



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

MARIA FERNANDA PORTO

**PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA CONCRETO LEVE  
AUTOADENSÁVEL (CLAA) A PARTIR DA RELAÇÃO  
MATRIZ CIMENTÍCIA/VAZIOS DO ESQUELETO GRANULAR**

---

Londrina  
2020

MARIA FERNANDA PORTO

**PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA CONCRETO LEVE  
AUTOADENSÁVEL (CLAA) A PARTIR DA RELAÇÃO  
MATRIZ CIMENTÍCIA/VAZIOS DO ESQUELETO GRANULAR**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Berenice Martins Toralles

Londrina  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

P853p Porto, Maria Fernanda.  
Procedimento de dosagem para concreto leve autoadensável (CLAA) a partir da relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular / Maria Fernanda Porto. - Londrina, 2020.  
183 f. : il.

Orientador: Berenice Martins Toralles.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.  
Inclui bibliografia.

1. Concreto leve autoadensável - Tese. 2. Procedimento de dosagem - Tese. 3. Adições minerais - Tese. 4. Argila expandida - Tese. I. Toralles, Berenice Martins. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

MARIA FERNANDA PORTO

**PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA CONCRETO LEVE  
AUTOADENSÁVEL (CLAA) A PARTIR DA RELAÇÃO MATRIZ  
CIMENTÍCIA/VAZIOS DO ESQUELETO GRANULAR**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Berenice Martins  
Toralles  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Nayara Soares Klein  
Universidade Federal do Paraná – UFPR

---

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Paulo César Correia Gomes  
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Londrina, 17 de julho de 2020

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me guiar e me apresentar com maravilhosas oportunidades e pessoas ao longo dessa caminhada.

A minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Berenice Martins Toralles, por toda orientação, dedicação, empenho, paciência ao longo de todos esses anos em que trabalhamos juntas. Levarei com muito orgulho todos os seus ensinamentos para minha vida.

Aos meus pais, Maria José e Tarcísio, por compartilharam comigo todas as minhas conquistas, por estarem presentes em todas as minhas lutas e por serem sempre o meu alicerce mais precioso. Meu amor por vocês é infinito.

Aos meus irmãos, Tarcísio, Ricardo, Melissa e Joice, e à minha cunhada Ana Carla que mesmo com toda a distância sempre estiveram ao meu lado. Não sei quem eu seria sem vocês.

Aos meus amigos da graduação, Marisa, Mateus, João Vitor e Roberta por todo apoio, pela paciência, pelo companheirismo e pela amizade maravilhosa que cultivamos todos esses anos. Sinto saudades da nossa convivência diária todos os dias.

Á Francieli, minha companheira nesse mestrado, que dividiu dia-a-dia comigo toda a roleta-russa de emoções e esteve comigo em todos os momentos e aos companheiros de laboratório Nicole, Geovana e Carlos por toda a ajuda compartilhada, todo o apoio psicológico, o auxílio nos artigos e nos experimentos e por essa amizade que levarei por toda a vida.

As minhas colegas de apartamento, Verena e Luana, por todo apoio e auxílio em todos esses anos.

A CAPES pela bolsa recebida durante o desenvolvimento do mestrado.

Aos alunos de iniciação científica, Larissa, Milena e Mateus pelo auxílio paciência na elaboração dos ensaios e por toda a disposição em me ajudar nessa pesquisa.

Aos técnicos dos Laboratórios de Materiais de Construção e Maquetaria, Anderson, André e Carlos, por toda ajuda no procedimento experimental. E ao técnico Osvaldo pelo auxílio com o microscópio eletrônico de varredura.

E a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

*“Ao menos que modifiquemos nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma que nos acostumamos a ver o mundo”*

*Albert Einstein*

PORTO, Maria Fernanda. **Procedimento de dosagem para concreto leve autoadensável (CLAA) a partir da relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular**. 2020. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

## RESUMO

O concreto leve autoadensável (CLAA) é um material com capacidade de reduzir o peso próprio de estruturas, diminuir a transferência de calor e a propagação de som, além de permitir facilidade de manuseio e aplicação a estruturas armadas e pré-moldadas. Porém estudos sobre o tema ainda são escassos e relatos sobre metodologias de dosagem são ainda mais raros. Com isso, o objetivo deste trabalho é propor um procedimento de dosagem para CLAA baseado no excesso de pasta ( $EX_{pasta}$ ) e argamassa ( $EX_{arg}$ ) sobre o volume de vazios do agregado miúdo e do agregado graúdo leve (AGL), respectivamente, avaliando suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Desse modo, o procedimento de dosagem está dividido em 3 etapas, sendo a Etapa 1 caracterizada pela obtenção do ponto de saturação do aditivo químico; a Etapa 2 determina o teor de adição mineral e o  $EX_{pasta}$  que promoveu as melhores características de autoadensabilidade e a Etapa 3 estuda o  $EX_{arg}$  para obter as melhores características no estado fresco do CLAA produzido. O procedimento de dosagem é validado com o estudo de combinações binárias (cimento Portland e pó de basalto (PB)) e ternária (cimento Portland, PB e sílica ativa) de materiais cimentícios e argila expandida como AGL. Com os resultados obtidos observou-se que o PB não teve influência sobre as propriedades no estado fresco dos materiais cimentícios e diminuiu significativamente a resistência à compressão e aumentou a absorção de água, sendo o teor de 20% o teor ótimo. Além disso, foi possível verificar que o aumento no  $EX_{pasta}$  aumentou o espalhamento das argamassas, porém não interferiu no tempo de escoamento das mesmas. Os  $EX_{pasta}$  estudados tiveram pouca influência nas propriedades no estado endurecido, obtendo-se o  $EX_{pasta}$  de 135% sobre o volume de vazios do agregado miúdo como aquele que gerou as melhores características de autoadensabilidade. Na Etapa 3, foi observado que o aumento contínuo do  $EX_{arg}$  gerou maior fluidez nos concretos produzidos até um limite. O CLAA com 70% de  $EX_{arg}$ , obteve as melhores características de autoadensabilidade. Por fim, ao avaliar a influência da água de absorção do AGL na produção do CLAA, observou-se que a mesma alterou de forma significativa as propriedades no estado fresco, tendo pouca interferência no estado endurecido. Por fim, verificou-se após a validação que o procedimento de dosagem o produziu um concreto leve autoadensável com características satisfatórias no estado fresco, resistência à compressão de 30 MPa, massa específica de 1.536 kg/m<sup>3</sup>, consumo de cimento Portland igual a 449 kg/m<sup>3</sup> e fator de eficiência de 20 MPa.dm<sup>3</sup>/kg.

**Palavras-chave:** Concreto leve autoadensável. Argamassa autoadensável. Pó de basalto. Sílica ativa. Argila expandida.

PORTO, Maria Fernanda. **Mix design for self-compacting lightweight concrete (CLAA) based on the cementitious matrix/voids of the granular skeleton ratio.** 2020. 183 p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

## ABSTRACT

Self-compacting lightweight concrete (SCLC) is a material capable of reducing the weight of structures, decreasing heat transfer and sound propagation, in addition to allowing easy handling and application to reinforced and precast structures. However, studies on the subject are still scarce and reports on mix design method are even rarer. Thereby, the objective of this work was to propose a mix design procedure for SCLC based on the excess of pastes ( $EX_{pasta}$ ) and mortar ( $EX_{arg}$ ) over the void volume of fine aggregate and light coarse aggregate (LCA), respectively, evaluating the SCLC properties in fresh and hardened state. Therefore, the mix design procedure was divided into 3 phases. Phase 1 was characterized by obtaining the saturation point of the chemical additive; Phase 2 aimed to determine the mineral addition content and the  $EX_{pasta}$  that promoted the best self-compacting characteristics and Phase 3 studied the  $EX_{arg}$  to obtain the best characteristics in the fresh state of the produced SCLC. The mix design procedure was validated studying binary combinations (Portland cement and basalt powder (BP)) and ternary (Portland cement, BP and silica fume) of cementitious materials and expanded clay such as LCA. It was observed that the BP had no influence on the properties in the fresh state of cementitious materials and significantly decreased the compressive strength and increased water absorption, with the content of 20% being the optimum percentage. In addition, it was possible to verify that the increase in  $EX_{pasta}$  enhanced the fluidity of mortars, but did not interfere with their flow time. The  $EX_{pasta}$  studied had little influence on the properties in the hardened state. The  $EX_{pasta}$  of 135% on the void volume of the fine aggregate was the one that generated the best self-compacting characteristics. The Step 3, it was observed that the continuous increase in  $EX_{arg}$  generated an increase in fluidity. The SCLC with 70%  $EX_{arg}$  obtained the best self-compacting characteristics. Then, when assessing the influence of LCA absorption water on SCLC production, it was determined that it directly altered properties in the fresh state, with little interference in the hardened state. In conclusion, the mix design procedure achieved the proposed objective by producing a self-compacting lightweight concrete with satisfactory characteristics in the fresh state, compressive strength of 30 MPa, density of 1,536 kg/m<sup>3</sup>, consumption of Portland cement equal to 449 kg/m<sup>3</sup> and strength/density ratio of 20 MPa.dm<sup>3</sup>/kg.

**Key words:** Self-compacting lightweight concrete. Self-compacting mortar. Basalt powder. Silica fume. Expanded clay.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Fluxograma do conteúdo da revisão bibliográfica .....	27
<b>Figura 2</b> - Dimensões do cone de Marsh.....	31
<b>Figura 3</b> - Curva para definição do ponto de saturação do aditivo superplastificante .....	32
<b>Figura 4</b> - Equipamentos para análise da autoadensabilidade de argamassas: a) Espalhamento; b) Funil V .....	33
<b>Figura 5</b> - Procedimento expedito proposto por Porto et al. (2019) .....	35
<b>Figura 6</b> - Produção de brita por estado brasileiro.....	37
<b>Figura 7</b> - Resultados do estudo em argamassa no estado fresco de Uncik e Kmecova (2013).....	38
<b>Figura 8</b> - Slump flow e T500 obtidos por Uysal e Sumer (2011) .....	39
<b>Figura 9</b> - Resultados de Funil V e Caixa L dos estudos de Uysal e Sumer (2011).....	39
<b>Figura 10</b> - Resultados de espalhamento para os estudos de Benaicha et al. (2015).....	42
<b>Figura 11</b> - Resultados de Funil V e Caixa L dos estudos de Benaicha et al. (2015).....	42
<b>Figura 12</b> - Frequência das publicações de CLAA por país .....	45
<b>Figura 13</b> - Frequência das publicações do CLAA por ano .....	45
<b>Figura 14</b> - Frequência de adições minerais e aditivos redutores de água utilizados para a produção de CLAA .....	46
<b>Figura 15</b> - Características dos agregados graúdos leves utilizados na produção de concretos leves autoadensáveis .....	46
<b>Figura 16</b> - Fluxograma do método de dosagem de Li, Chen e Wan (2017).....	54
<b>Figura 17</b> - Fluxograma do método de dosagem de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) .....	55
<b>Figura 18</b> - Gráfico para obtenção da relação a/c no método proposto por Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) .....	55
<b>Figura 19</b> - Frequência dos ensaios no estado fresco realizados na produção de concretos leves autoadensáveis .....	58
<b>Figura 20</b> - Resultados da revisão sistemática para o slump flow teste de concreto leve autoadensável.....	60

<b>Figura 21</b> - Resultados da revisão sistemática para o ensaio de T500 de concreto leve autoadensável.....	62
<b>Figura 22</b> - Resultados do ensaio T500 para CLAA com argila expandida da revisão sistemática.....	63
<b>Figura 23</b> - Resultados da revisão sistemática para o Anel J de concreto leve autoadensável.....	64
<b>Figura 24</b> - Resultados da revisão sistemática para o Funil V de concreto leve autoadensável.....	65
<b>Figura 25</b> - Resultados do ensaio de Funil V para CLAA com argila expandida da revisão sistemática.....	66
<b>Figura 26</b> - Equipamento para realização do ensaio da Caixa em L.....	67
<b>Figura 27</b> - Resultados da revisão sistemática para a Caixa em L de concreto leve autoadensável.....	68
<b>Figura 28</b> - Resultados do ensaio da Caixa em L para CLAA com argila expandida da revisão sistemática.....	69
<b>Figura 29</b> - Frequência dos ensaios mais realizados no estado endurecido na produção de concretos leves autoadensáveis.....	71
<b>Figura 30</b> - Resultados da revisão sistemática para a resistência à compressão de concreto leve autoadensável.....	72
<b>Figura 31</b> - Resultados do ensaio da resistência à compressão para CLAA com argila expandida da revisão sistemática.....	72
<b>Figura 32</b> - Resultados de resistência à compressão da pesquisa de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018).....	73
<b>Figura 33</b> - Resultados da resistência à tração para diversas misturas de concreto leve autoadensável.....	74
<b>Figura 34</b> - Resultados de resistência à tração da pesquisa produzida por Verzeghassi (2015).....	75
<b>Figura 35</b> - Resultados da revisão sistemática para o módulo de elasticidade do CLAA.....	76
<b>Figura 36</b> - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade para CLAA com argila expandida da revisão sistemática.....	77
<b>Figura 37</b> - Resultados de módulo de elasticidade da pesquisa produzida por Verzeghassi (2015).....	78

<b>Figura 38</b> - Resultados de módulo de elasticidade da pesquisa de Borja (2011).....	78
<b>Figura 39</b> - Resultados da revisão sistemática para a absorção de água de concreto leve autoadensável.....	79
<b>Figura 40</b> - Resultados do ensaio de absorção de água para CLAA com argila expandida da revisão sistemática.....	80
<b>Figura 41</b> - Resultados de absorção de água, porosidade e índice de vazios da pesquisa de Borja (2011) .....	81
<b>Figura 42</b> - Resultados de absorção de água da pesquisa de Verzeznassi (2015).....	81
<b>Figura 43</b> - Resultados da revisão sistemática para a massa específica de concreto leve autoadensável.....	82
<b>Figura 44</b> - Resultados de massa específica da pesquisa de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018).....	83
<b>Figura 45</b> - Resultados de massa específica da pesquisa de Verzeznassi (2015).....	84
<b>Figura 46</b> - Distribuição granulométrica do pó de basalto .....	86
<b>Figura 47</b> - MEV do pó de basalto com aumentos de a) 5000x; b) 30000x.....	87
<b>Figura 48</b> - MEV da sílica ativa com aumentos de a) 5000x; b) 30000x.....	88
<b>Figura 49</b> - Curva granulométrica do agregado miúdo .....	90
<b>Figura 50</b> - Agregado graúdo leve .....	90
<b>Figura 51</b> - Curva granulométrica do agregado graúdo leve .....	91
<b>Figura 52</b> - Absorção de água do agregado graúdo leve por tempo de imersão .....	92
<b>Figura 53</b> - Procedimento para verificação do mecanismo de absorção de água na situação de execução da mistura do concreto .....	92
<b>Figura 54</b> - Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa .....	93
<b>Figura 55</b> - Fluxograma do procedimento de dosagem proposto .....	94
<b>Figura 56</b> - Cone de Marsh.....	95
<b>Figura 57</b> - Fluxograma do procedimento de dosagem da argamassa .....	96
<b>Figura 58</b> - Equipamentos para ensaio de tempo de escoamento e espalhamento em argamassas: a) Funil V; b) Tronco de cone .....	98
<b>Figura 59</b> - Procedimento expedito.....	99
<b>Figura 60</b> - Procedimento de dosagem para a etapa em concreto.....	100

<b>Figura 61</b> - Fluxograma da aplicação da Etapa 1 do procedimento de dosagem .....	103
<b>Figura 62</b> - Viscosímetro de Brookfield.....	104
<b>Figura 63</b> - Fluxograma da aplicação da Etapa 2 do procedimento de dosagem .....	105
<b>Figura 64</b> - Fluxograma da aplicação da Etapa 3 do procedimento de dosagem .....	108
<b>Figura 65</b> - Procedimento de mistura dos concretos produzidos na Etapa 3 do procedimento experimental .....	109
<b>Figura 66</b> - Tempo de fluxo (s) das pastas com 100% de PB .....	113
<b>Figura 67</b> - Influência da porcentagem de substituição do pó de basalto no tempo de escoamento das pastas cimentícias.....	114
<b>Figura 68</b> - Viscosidade das pastas com diferentes teores de pó de basalto .....	115
<b>Figura 69</b> - Influência do teor de pó de basalto na viscosidade das pastas cimentícias .....	116
<b>Figura 70</b> - Comparação entre o tempo de fluidez e a viscosidade das pastas cimentícias: a) 0%, b) 10%, c) 20% e d) 30%. .....	117
<b>Figura 71</b> - Espalhamento das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	118
<b>Figura 72</b> - Tempo de escoamento das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios .....	119
<b>Figura 73</b> - Estabilidade visual das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	120
<b>Figura 74</b> - Trisco das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios .....	120
<b>Figura 75</b> - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	121
<b>Figura 76</b> - Módulo de elasticidade aos 28 dias das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	121
<b>Figura 77</b> - Absorção de água das argamassas produzidas com combinação binária de materiais cimentícios .....	122
<b>Figura 78</b> - Massa específica das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	123

<b>Figura 79</b> - Box-plot da resistência à compressão das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	124
<b>Figura 80</b> - Box-plot da módulo de elasticidade das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	125
<b>Figura 81</b> - Tempo de fluidez das pastas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	127
<b>Figura 82</b> - Viscosidade das pastas com combinação ternária de materiais cimentícios .....	128
<b>Figura 83</b> - Tempo de fluidez e a viscosidade das pastas cimentícias com combinação ternária de materiais cimentícios .....	129
<b>Figura 84</b> - Relação entre o tempo de fluidez e viscosidade das pastas cimentícias com diferentes combinação de materiais cimentícios. ....	129
<b>Figura 85</b> - Espalhamento das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	131
<b>Figura 86</b> - Tempo de escoamento das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	131
<b>Figura 87</b> - Estabilidade visual das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	132
<b>Figura 88</b> - Trisco das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios .....	133
<b>Figura 89</b> - Box-plot da resistência à compressão das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios .....	135
<b>Figura 90</b> - Box-plot da módulo de elasticidade das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios .....	136
<b>Figura 91</b> - Espalhamento (a) e Estabilidade visual (b) do CLAA100, CLAA70 e CLAA40.....	137
<b>Figura 92</b> - Segregação estática dos concretos CLAA70 e CLAA100 segundo metodologia de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) .....	139
<b>Figura 93</b> - Fluxograma completo do procedimento de dosagem proposto.....	142
<b>Figura 94</b> - Box-plot da resistência à compressão do CLAA70 e CLAA100 .....	145
<b>Figura 95</b> - Box-plot do módulo de elasticidade estático e dinâmico do CLAA70 e CLAA100 aos 28 dias .....	146

<b>Figura 96</b> - Espalhamento (a) e Estabilidade visual (b) dos concretos CLAA10min, CLAA0h e CLAA24h .....	147
<b>Figura 97</b> - Segregação estática dos concretos CLAA10min e CLAA24h segundo metodologia de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) .....	147
<b>Figura 98</b> - Presença de exsudação no ensaio da Caixa L para o concreto CLAA24h.....	149
<b>Figura 99</b> - MEV da zona de transição do CLAA10min e CLAA24h.....	150
<b>Figura 100</b> - MEV do agregado graúdo nos concretos CLAA10min e CLAA24h.....	151
<b>Figura 101</b> - Box-plot da resistência à compressão do CLAA10min e CLAA24h aos 7 e 28 dias.....	152
<b>Figura 102</b> - Box-plot do módulo de elasticidade estático e dinâmico do CLAA10min e CLAA24h aos 28 dias.....	153

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Limites da área relativa de espalhamento (Gm) em argamassas .....	34
<b>Tabela 2</b> - Limites do escoamento relativo (Rm) em argamassas.....	34
<b>Tabela 3</b> - Resumo da incorporação de sílica ativa em trabalhos de materiais cimentícios autoadensáveis .....	40
<b>Tabela 4</b> - Estudos em concreto leve autoadensável por ano e país .....	44
<b>Tabela 5</b> - Materiais utilizados para a produção do concreto leve autoadensáveis por diversos autores.....	48
<b>Tabela 6</b> - Consumo de materiais para a produção de 1 m <sup>3</sup> de concreto leve autoadensável pelos diversos autores .....	49
<b>Tabela 7</b> - Características das argilas expandidas produzidas no Brasil para utilização em concretos leves.....	51
<b>Tabela 8</b> - Limites de autoadensabilidade em argamassa de acordo com Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018).....	56
<b>Tabela 9</b> - Ensaio para avaliação das propriedades no estado fresco de concretos leves autoadensáveis por diversos autores .....	57
<b>Tabela 10</b> -Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio o slump flow em concretos autoadensáveis .....	59
<b>Tabela 11</b> -Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio de T500 em concretos autoadensáveis.....	61
<b>Tabela 12</b> -Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio de Anel J em concretos autoadensáveis.....	64
<b>Tabela 13</b> -Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio de Funil V em concretos autoadensáveis .....	65
<b>Tabela 14</b> -Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio de Caixa L em concretos autoadensáveis.....	68
<b>Tabela 15</b> -Ensaio para avaliação das propriedades no estado endurecido de concretos leves autoadensáveis por diversos autores .....	70
<b>Tabela 16</b> -Composição química do cimento Portland CPV-ARI.....	85
<b>Tabela 17</b> -Massa específica e superfície específica do pó de basalto.....	86
<b>Tabela 18</b> -Composição de óxidos do PB detectada por fluorescência de raios X.....	87
<b>Tabela 19</b> -Características física e químicas da sílica ativa .....	88

<b>Tabela 20</b> - Elementos químicos que compõe a sílica ativa.....	89
<b>Tabela 21</b> - Dados técnicos do aditivo superplastificante.....	89
<b>Tabela 22</b> - Propriedades físicas do agregado miúdo .....	89
<b>Tabela 23</b> - Características físicas do agregado graúdo leve.....	91
<b>Tabela 24</b> - Absorção da argila expandida simulando o procedimento de mistura do concreto .....	93
<b>Tabela 25</b> - Consumo de materiais para as pastas cimentícias com combinação binária .....	112
<b>Tabela 26</b> - Determinação do ponto de saturação das pastas cimentícias com combinação binária .....	115
<b>Tabela 27</b> - Consumo de materiais das argamassas produzidas com combinação binária de materiais cimentícios .....	118
<b>Tabela 28</b> - Gm e Rm das argamassas com pó de basalto.....	119
<b>Tabela 29</b> - Análise estatística da resistência à compressão das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios .....	124
<b>Tabela 30</b> - Análise estatística do módulo de elasticidade das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios .....	125
<b>Tabela 31</b> - Consumo de materiais utilizados na produção das pastas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	126
<b>Tabela 32</b> - Ponto de saturação das pastas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	127
<b>Tabela 33</b> - Gm e Rm das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios .....	132
<b>Tabela 34</b> - Consumo de materiais das argamassas produzidas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	134
<b>Tabela 35</b> - Resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e massa específica das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	134
<b>Tabela 36</b> - Análise estatística da resistência à compressão das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	135
<b>Tabela 37</b> - Análise estatística do módulo de elasticidade das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	136
<b>Tabela 38</b> - Propriedades no estado fresco dos concretos com diferentes excessos de argamassa.....	138

<b>Tabela 39</b> - Resumo das características de autoadensabilidade dos concretos produzidos com relação à ABNT NBR 15823/2017 .....	138
<b>Tabela 40</b> - Consumo de materiais em kg/m <sup>3</sup> e m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> dos concretos CLAA100, CLAA70, CLAA40.....	140
<b>Tabela 41</b> - Propriedades mecânicas do CLAA70 e CLAA100 .....	143
<b>Tabela 42</b> - Propriedades físicas e hidráulicas do CLAA70 e do CLAA100 .....	144
<b>Tabela 43</b> - Análise estatística da resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos CLAA70 e CLAA100.....	145
<b>Tabela 44</b> - Análise estatística do módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias dos CLAA70 e CLAA100.....	146
<b>Tabela 45</b> - Propriedades no estado fresco do CLAA10min, CLAA0h e CLAA24h.....	148
<b>Tabela 46</b> - Propriedades mecânicas CLAA10min e CLAA24h.....	149
<b>Tabela 47</b> - Propriedades físicas e hidráulicas do CLAA10min e CLAA24h.....	150
<b>Tabela 48</b> - Análise estatística da resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos CLAA10min e CLAA24h .....	152
<b>Tabela 49</b> - Análise estatística do módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias dos CLAA10min e CLAA24h.....	153
<b>Tabela 50</b> - Resistência à compressão, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	174
<b>Tabela 51</b> - Módulo de elasticidade, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	174
<b>Tabela 52</b> - Absorção de água, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	175
<b>Tabela 53</b> - Massa específica, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios .....	175
<b>Tabela 54</b> - Resistência à compressão, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	176

<b>Tabela 55</b> -Módulo de elasticidade, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	176
<b>Tabela 56</b> -Absorção de água, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.....	177
<b>Tabela 57</b> -Massa específica, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios .....	177
<b>Tabela 58</b> -Resistência à compressão, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAs produzidos na Etapa 3.....	180
<b>Tabela 59</b> -Módulo de elasticidade dinâmico, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAs produzidos na Etapa 3.....	180
<b>Tabela 60</b> -Módulo de elasticidade estático, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAs produzidos na Etapa 3.....	181
<b>Tabela 61</b> -Absorção de água, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAs produzidos na Etapa 3.....	181
<b>Tabela 62</b> -Índice de vazios, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAs produzidos na Etapa 3 .....	181
<b>Tabela 63</b> -Massa específica, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAs produzidos na Etapa 3 .....	181
<b>Tabela 64</b> -Resistência à compressão, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h .....	182
<b>Tabela 65</b> -Módulo de elasticidade dinâmico, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h .....	182
<b>Tabela 66</b> -Módulo de elasticidade estático, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h .....	183
<b>Tabela 67</b> -Absorção de água, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h .....	183
<b>Tabela 68</b> -Índice de vazios, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h.....	183
<b>Tabela 69</b> -Massa específica, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h.....	183

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Ensaio no estado fresco proposto no procedimento de dosagem na etapa de argamassa.....	98
<b>Quadro 2</b> - Ensaio no estado endurecido propostos para a etapa em argamassa .....	99
<b>Quadro 3</b> - Ensaio para verificação da autoadensabilidade dos concretos produzidos com o procedimento de dosagem.....	102
<b>Quadro 4</b> - Planejamento experimental para os ensaios no estado endurecido em argamassa.....	106
<b>Quadro 5</b> - Concretos leves autoadensáveis produzidos para análise da influência da absorção de água .....	110
<b>Quadro 6</b> - Planejamento experimental da etapa em concreto .....	110
<b>Quadro 7</b> - Desenvolvimento da dosagem das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.....	170
<b>Quadro 8</b> - Desenvolvimento da dosagem das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios e excesso de pastas de 100% .....	172
<b>Quadro 9</b> - Desenvolvimento da dosagem das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios e excesso de pastas de 135% .....	173
<b>Quadro 10</b> - Desenvolvimento da dosagem das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios e excesso de pastas de 140% .....	173
<b>Quadro 11</b> - Desenvolvimento da dosagem dos concretos leves autoadensáveis com excesso de argamassa de 40% .....	178
<b>Quadro 12</b> - Desenvolvimento da dosagem dos concretos leves autoadensáveis com excesso de argamassa de 70% .....	179
<b>Quadro 13</b> - Desenvolvimento da dosagem dos concretos leves autoadensáveis com excesso de argamassa de 100% .....	179

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/cim	Relação água/cimentícios
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AD	Porcentagem em decimais de adição mineral em relação à massa de cimento
am/arg	Relação volumétrica de agregado miúdo por argamassa
ARGPB0	Argamassa com combinação binária de materiais cimentícios e 0% de pó de basalto em substituição ao cimento Portland
ARGPB10	Argamassa com combinação binária de materiais cimentícios e 10% de pó de basalto em substituição ao cimento Portland
ARGPB20	Argamassa com combinação binária de materiais cimentícios e 20% de pó de basalto em substituição ao cimento Portland
ARGPB30	Argamassa com combinação binária de materiais cimentícios e 30% de pó de basalto em substituição ao cimento Portland
ARGPB-SA100	Argamassa com combinação terciária de materiais cimentícios e 100% de excesso de pasta sobre o volume de vazios do agregado miúdo
ARGPB-SA135	Argamassa com combinação terciária de materiais cimentícios e 135% de excesso de pasta sobre o volume de vazios do agregado miúdo
ARGPB-SA140	Argamassa com combinação terciária de materiais cimentícios e 140% de excesso de pasta sobre o volume de vazios do agregado miúdo
ASTM	American Society for Testing Materials
CLAA	Concreto leve autoadensável
CLAA <sub>0h</sub>	CLAA sem incorporação da água de absorção do agregado graúdo leve na mistura
CLAA <sub>10min</sub>	CLAA com incorporação da água de absorção relativa a 10 minutos de imersão do AGL
CLAA <sub>24h</sub>	CLAA com incorporação da água de absorção relativa a 24 horas de imersão do AGL
CLAA100	CLAA produzido com excesso de argamassa de 100%

CLAA40	CLAA produzido com excesso de argamassa de 40%
CLAA70	CLAA produzido com excesso de argamassa de 70%
$EX_{arg}$	Excesso de argamassa sobre volume de vazios do agregado graúdo
$EX_{pasta}$	Excesso de pasta sobre o volume de vazios do agregado miúdo
$G_m$	Área relativa de espalhamento em argamassas
$IV_{AGL}$	Índice de vazios do agregado graúdo leve
$I_{vam}$	Índice de vazios do agregado miúdo
$M_{AGL}$	Massa do agregado graúdo leve
$M_{am}$	Massa do agregado miúdo
$M_{cim}$	Massa de cimento Portland
$M_{AD}$	Massa de adição mineral
PB	Pó de basalto
$R_m$	Tempo relativo de espalhamento em argamassas
SA	Sílica ativa
SP	Porcentagem em decimais de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento
$T_{risco}$	Procedimento expedito proposto nesse trabalho para autoadensabilidade de argamassas
$V_{AGL}$	Volume de agregado graúdo leve
$V_{am}$	Volume de agregado miúdo
$V_{arg}$	Volume de argamassa
$V_{conc}$	Volume de concreto
$V_{pasta}$	Volume de pasta
$V_{VAGL}$	Volume de vazios do agregado graúdo leve
$V_{vam}$	Volume de vazios do agregado miúdo
$\gamma_{água}$	Massa específica da água
$\gamma_{AD}$	Massa específica das adições minerais
$\gamma_{cim}$	Massa específica do cimento Portland
$\rho_{AGL}$	Massa unitária solta do agregado graúdo leve
$\rho_{am}$	Massa unitária solta do agregado miúdo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	QUESTÃO DE PESQUISA	25
1.3	OBJETIVOS	25
1.3.1	Objetivo Geral	25
1.3.1	Objetivos Específicos	25
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	25
1.5	CONTRIBUIÇÃO ESPERADA	26
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1	AUTOADENSABILIDADE E REOLOGIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS	28
2.1.1	Autoadensabilidade em estudos com pastas cimentícias	30
2.1.2	Autoadensabilidade em estudos com argamassas	32
2.1.3	Influência das adições minerais na reologia e autoadensabilidade de materiais cimentícios	35
2.1.4.1	Pó de basalto	36
2.1.4.2	Sílica ativa	40
2.2	CONCRETO LEVE AUTOADENSÁVEL (CLAA)	43
2.2.1	Histórico e Aplicações	43
2.2.2	Materiais Utilizados no CLAA	47
2.2.3	Métodos de Dosagem	52
2.2.3.1	Li, Chen e Wan (2017)	53
2.2.3.2	Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)	54
2.2.4	Caracterização no Estado Fresco	57
2.2.4.1	Ensaio de espalhamento - Slump flow teste	59
2.2.4.2	Anel J	63
2.2.4.3	Funil V	64
2.2.4.5	Caixa em L	67
2.2.5	Propriedades no Estado Endurecido	69
2.2.5.1	Resistência à compressão e resistência à tração	71
2.2.5.3	Módulo de elasticidade estático	75

2.2.5.5	Absorção de água do concreto leve autoadensável .....	79
2.2.5.6	Massa específica .....	82
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>85</b>
3.1	MATERIAIS.....	85
3.1.1	Cimento Portland, Adições minerais e Aditivo superplastificante .....	85
3.1.3	Agregado miúdo .....	89
3.1.4	Agregado graúdo.....	90
3.2	MÉTODO .....	93
3.2.1	Procedimento de dosagem.....	94
3.2.1.1	Etapa 1 – Pastas cimentícias .....	95
3.2.1.2	Etapa 2 – Argamassas .....	95
3.2.1.3	Etapa 3 – Concretos.....	100
3.2.2	Validação do procedimento de dosagem .....	102
3.2.2.1	Etapa 1 – Pastas com combinação binária e ternária de materiais cimentícios.....	103
3.2.2.2	Etapa 2 – Argamassas com combinação binária e ternária de materiais cimentícios .....	105
3.2.2.3	Etapa 3 – Concreto.....	107
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>112</b>
4.1	ETAPAS 1 E 2 – PASTAS E ARGAMASSAS COM COMBINAÇÃO BINÁRIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS .....	112
4.1.1	Estudo em Pasta .....	112
4.1.2	Estudo em Argamassa .....	117
4.1.2.1	Estado fresco.....	118
4.2.2.3	Estado endurecido.....	121
4.1.3	Análise estatística.....	123
4.2	ETAPAS 1 E 2 – PASTAS E ARGAMASSAS COM COMBINAÇÃO TERNÁRIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS .....	126
4.2.1	Estudo em Pasta .....	126
4.2.1.1	Comparação das pastas com diferentes combinações de materiais cimentícios.....	129
4.2.2	Estudo em Argamassa .....	130

4.2.2.1	Estado fresco.....	131
4.2.2.2	Estado endurecido.....	134
4.1.3	Análise estatística.....	135
4.4	ETAPA 3 – CONCRETO.....	136
4.4.1	Estado fresco – Obtenção do <i>EXarg</i> do procedimento de dosagem .....	137
4.4.2	Considerações sobre o procedimento de dosagem proposto.....	139
4.4.3	Estado endurecido – Influência da alteração do <i>EXarg</i> .....	143
4.4.3.1	Análise estatística - Concretos com <i>EXarg</i> como variável.....	145
4.4.4	Estado fresco – Influência da água de absorção do agregado graúdo leve.....	146
4.4.5	Estado endurecido – Influência da água de absorção do agregado graúdo leve.....	149
4.4.5.1	Análise estatística - Influência da água de absorção do agregado graúdo leve.....	152
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>154</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	155
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>156</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>170</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido às demandas cada vez maiores do mercado pela industrialização da construção, buscando edificações mais eficientes tecnicamente, economicamente e ambientalmente, há um crescente empenho pelo estudo e produção de materiais que possam revolucionar o modelo de construção atual.

Considerando o cenário acima mencionado, temos o desenvolvimento do concreto leve autoadensável (CLAA), capaz de incrementar o potencial da pré-fabricação no Brasil, legítima representante da industrialização da construção civil (DONIAK e GUTSEIN, 2011; ASSUNÇÃO, 2016).

O termo CLAA descreve um concreto leve com alta fluidez, que escoar sem energia de compactação externa e que apresenta uma alta resistência à segregação em relação à fluabilidade do agregado leve (MAGHSOUDI, MOHAMADPOUR e MAGHSOUDI, 2011).

Além disso, o material deve simultaneamente satisfazer as características de autoadensabilidade e baixa massa específica, características que podem ser desafiadoras ao considerar que a redução do peso próprio resulta em uma menor energia dinâmica que irá comprometer o fluxo da mistura (KAFFETZAKIS; PAPANICOLAOU, 2016).

A baixa massa específica do agregado graúdo leve também pode gerar uma tendência à flutuação do mesmo e, dessa maneira, ocorrendo a segregação do material (MAGHSOUDI, MOHAMADPOUR e MAGHSOUDI, 2011). Segundo Maghsoudi, Mohamadpour e Maghsoudi (2011) a chave para uma produção eficiente de CLAA, que evita os problemas de segregação do material, é um cuidadoso ajuste das propriedades da matriz de argamassa e de pasta.

Dessa maneira, o procedimento de dosagem do concreto leve autoadensável deve satisfazer todas as complexidades do mesmo, gerando um material fluído, coeso e de baixa massa específica (KAFFETZAKIS e PAPANICOLAOU, 2016). Porém, com um procedimento de dosagem efetivo é possível obter um material que é capaz de reduzir o peso próprio da estrutura, eliminar os ruídos proveniente da etapa de adensamento, com capacidade de preenchimento e resistência à segregação, ao mesmo tempo que reduz o tempo de construção, melhora o isolamento térmico e acústico e possui resistência contra o fogo e ataques químicos, (KAFFETZAKIS e PAPANICOLAOU, 2016; TING et al., 2019).

Entretanto, o consumo de cimento Portland para produção de materiais autoadensáveis costuma ser alto, gerando um alto impacto ambiental, pois para cada tonelada de cimento produzida no Brasil, 600 kg de CO<sub>2</sub> são emitidos na atmosfera (FREIRE, 2016). Desse modo, a aplicação de materiais alternativos pode ser a solução para a produção de concretos mais sustentáveis, sendo a prática mais comum a substituição parcial do cimento por resíduos de outras indústrias como cinza volante, cinza da cana de açúcar, pó calcário e resíduos de pedreiras no geral.

Desse modo, além do desenvolvimento de um procedimento de dosagem para concretos leves autoadensáveis, este trabalho também se propôs a estudar a substituição do cimento Portland por pó de basalto, subproduto gerado no processo de britagem da rocha para a produção de agregados (ARAÚJO, 2017; UNCIK, KMECOVÁ, 2013) de maneira a viabilizar uma redução do consumo de aglomerante durante o desenvolvimento do procedimento de dosagem.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto leve autoadensável é um material de desenvolvimento recente que vem sendo estudado apenas nos últimos 20 anos (ASSUNÇÃO, 2016; BOGAS, GOMES e PEREIRA, 2012; BORJA, 2011; CHOI et al., 2006; DYMOND, 2007; ERDEM, 2014; GRABOIS, CORDEIRO e TOLEDO FILHO, 2016; KIM, CHOI, LACHEMI, 2010; LO, TANG, CUI, 2007; PAPANICOLAOU e KAFFETZAKIS, 2011; VAKSHOURI e NEJADI, 2016; VERZEGNASSI, 2015; ZARNACHI et al. 2018). Sendo que, os relatos de estudos de dosagem são ainda mais escassos (HWANG e HUN, 2005; KAFFETZAKIS e PAPANICOLAOU, 2012; LI, CHEN e WAN, 2017; NEPOMUCENO, PEREIRA DE OLIVEIRA e PEREIRA, 2018).

Os procedimentos de dosagem de concretos autoadensáveis, é comum a consideração do material em duas fases: o agregado graúdo em uma matriz de argamassa (DOMONE, 2006; GOMES, 2002; LI, CHEN e WAN, 2017; NEPOMUCENO, PEREIRA DE OLIVEIRA e LOPES, 2014; OKAMURA, OZAWA E OUCHI, 2000). Porém, a relação entre a pasta de cimento e os agregados também tem sua importância, já que a mesma irá preencher os vazios, diminuindo o atrito interno e melhorando a fluidez do concreto (VAKSHOURI e NEJADI, 2016).

Dessa maneira, o procedimento proposto neste trabalho estuda separadamente as características da pasta, da argamassa e do concreto tendo como embasamento teórico que a pasta de cimento deve preencher os vazios do agregado

miúdo de maneira que seja obtido uma argamassa com características satisfatórias de autoadensabilidade para, em seguida, esta última preencher os vazios do agregado graúdo leve, produzindo o concreto leve autoadensável.

## 1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

É viável dosar um concreto leve autoadensável a partir da relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Produzir concreto leve autoadensável a partir de um procedimento de dosagem baseado no excesso de pasta e argamassa sobre o volume de vazios do agregado miúdo natural e graúdo leve, avaliando suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

### 1.3.1 Objetivos Específicos

- Determinar a influência das adições minerais - pó de basalto e sílica ativa - nas propriedades no estado fresco e endurecido de pastas e argamassas.
- Apontar a influência nas propriedades do estado fresco e endurecido da incorporação da água de absorção do agregado graúdo leve na água de mistura do CLAA.

## 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa delimitou-se ao estudo de materiais cimentícios com relação água/cimentícios de 0,40, cimento Portland CP V ARI, aditivo superplastificante à base de policarboxilato, areia natural lavada de rio e argila expandida de dimensão máxima de 19 mm como agregado graúdo. Além disso, estudou-se a incorporação das adições minerais – pó de basalto <sup>1</sup> e sílica ativa.

---

<sup>1</sup>Material com granulometria menor que 0,075µm – passante na peneira #200.

### 1.5 CONTRIBUIÇÃO ESPERADA

Espera-se com este trabalho contribuir para o estado da arte do concreto leve autoadensável e também propor um procedimento de dosagem, considerando as características do agregado graúdo leve. Igualmente, também se espera contribuir para o melhor entendimento das características de autoadensabilidade de cada fase do concreto – pasta e argamassa.

### 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro dedicado à introdução, a justificativa, os objetivos, a questão de pesquisa e a contribuição esperada.

No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica, apresentando os conceitos de autoadensabilidade e os principais conhecimentos acerca do concreto leve autoadensável.

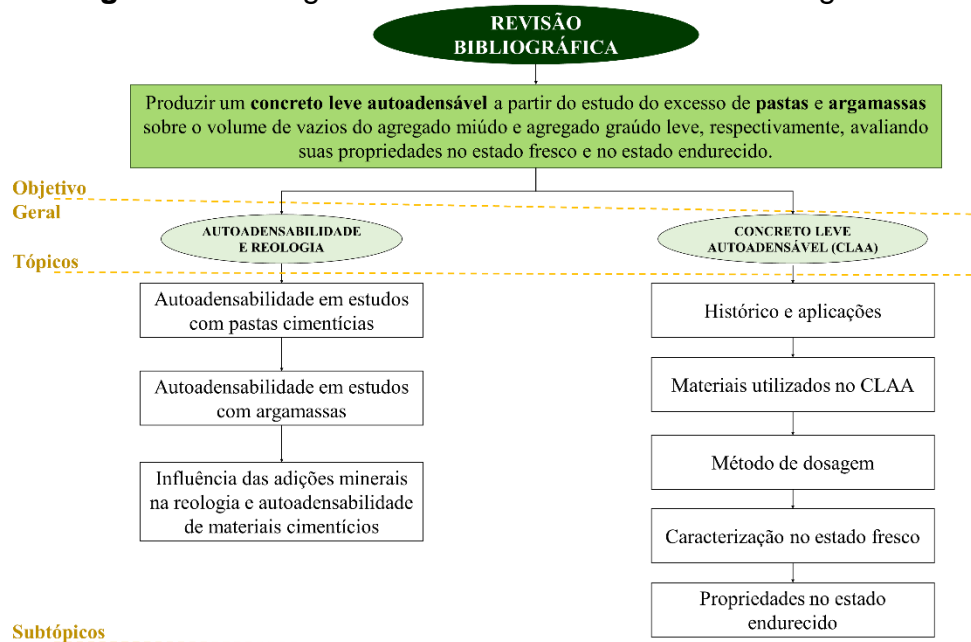
Os materiais empregados e o procedimento metodológico utilizados se encontram no terceiro capítulo. Os resultados e discussões dos materiais cimentícios estudados estão apresentados no quarto capítulo.

As conclusões estão contidas no capítulo cinco, assim como as sugestões para trabalhos futuros e no sexto capítulo encontram-se as referências bibliográficas apresentadas ao longo do documento. Por fim, no último capítulo estão contidos os apêndices com o detalhamento das informações descritas ao longo do documento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo está dividido em dois principais subtópicos: autoadensabilidade e concreto leve autoadensável. E, para facilitar o entendimento do conteúdo apresentado nesta, pode-se visualizar o fluxograma da Figura 1.

**Figura 1 - Fluxograma do conteúdo da revisão bibliográfica**



**Fonte:** A Autora

Considerando as principais palavras contidas no objetivo geral deste trabalho e negritadas na Figura 1, obteve-se a esquematização de tópicos descritas na mesma figura. Além disso, considerou-se que a leveza do material estaria condicionada à incorporação do agregado graúdo leve e seu estudo da arte está contido no tópico de CLAA.

Portanto, inicia-se essa revisão apresentando-se o conceito de autoadensabilidade e sua relação com a reologia dos materiais cimentícios, para em seguida, detalhar as características de autoadensabilidade em pastas e argamassas, objetos de estudo deste trabalho.

Após expor as características em pastas e argamassas, é exposto a influência das adições minerais nas características reológicas e autoadensabilidade dos materiais cimentícios, com foco na sílica ativa e no pó de basalto, adições aplicadas nesta pesquisa.

Ao finalizar as características gerais de autoadensabilidade, aprofunda-se o conhecimento sobre o concreto leve autoadensável (CLAA) com o seu histórico, seus materiais constituintes, propostas de dosagens de outros autores e suas características no estado fresco e propriedades no estado endurecido.

## 2.1 AUTOADENSABILIDADE E REOLOGIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A autoadensabilidade do concreto pode ser descrita como a capacidade do mesmo de preencher as formas e envolver as armaduras apenas pela ação do peso próprio, mantendo sua homogeneidade e, para isso, o material necessita ter características reológicas apropriadas (NUNES, 2001; SKARAND AHL e PETERSSON, 2001).

As principais propriedades de autoadensabilidade em um concreto autoadensável são: habilidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação (GOMES e BARROS, 2009; MANUEL, 2005; SKARAND AHL e PETERSSON, 2001). Ainda segundo Gomes e Barros (2009) tais propriedades fazem com que a mistura apresente alta fluidez e viscosidade suficiente para manter a coesão dos materiais, preenchendo toda a forma sem exibir segregação e sem haver bloqueio entre as armaduras ou obstáculos presentes durante o lançamento.

A habilidade de preenchimento dependerá da fluidez do material e da capacidade do material em preencher completamente todas as áreas e cantos da forma sob ação do seu peso próprio, sem adensamento externo (MANUEL, 2005; PEREIRA, 2010).

A habilidade passante é a capacidade do material de passar por entre os obstáculos sem separação dos seus constituintes e sem bloqueio (GOMES e BARROS, 2009; MANUEL, 2005).

E, por fim, a resistência à segregação é a propriedade do material em evitar a separação dos seus componentes, como a separação dos agregados da pasta cimentícia, sendo governada pela viscosidade da mistura (GOMES e BARROS, 2009).

Segundo Nunes (2001) para conseguir adequada resistência à segregação é necessário reduzir a tendência de separação dos sólidos e minimizar a exsudação. Para alcançar a primeira característica, segundo a autora, é necessário limitar a quantidade dos agregados, reduzir a dimensão máxima do agregado, baixar a relação água/finos e/ou introduzir um agente de viscosidade.

Entretanto para minimizar a exsudação, a autora sugere baixar o conteúdo de água, baixar a relação água/finos, utilizar materiais finos com maior superfície específica e/ou introduzir um agente de viscosidade.

O comportamento do concreto autoadensável no estado fresco pode ser influenciado pelas características reológicas do mesmo. A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria (HACKLEY e FERRARIS, 2001).

O comportamento reológico de pastas, argamassas e concretos pode ser avaliado adotando o modelo de Bingham através da determinação da tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) e da viscosidade ( $\mu$ ) (CAMÕES, 2005; SANTOS et al., 2017).

A interpretação física da tensão de escoamento é que a mesma corresponde à tensão necessária a ser aplicada para que o material flua, portanto, quando a tensão de cisalhamento é maior que a tensão de escoamento, a mistura escoar, em contrapartida a resistência a este escoamento irá depender da viscosidade plástica (GOŁASZEWSKI; SZWABOWSKI, 2004).

Em concretos e argamassas, a viscosidade está relacionada à pasta de cimento e, por consequência, à quantidade de água incorporada, à origem mineralógica, dimensão e forma dos agregados e ao efeito lubrificante das partículas finas (BLOMBLED, 1967 apud RAGO, 1999).

De Larrard e Sedran (2002) também afirmam que a viscosidade plástica é governada pela concentração relativa da mistura, definida como a razão entre a proporção de materiais sólidos (em volume) e sua densidade de empacotamento. Portanto, segundo os autores, a contribuição das diferentes frações de grãos na viscosidade plástica só terá influência até o momento em que elas favorecem a densidade de empacotamento da mistura seca correspondente.

A viscosidade representa a resistência ao fluxo presente no material e, portanto, quanto maior a viscosidade do material, maior será sua resistência ao escoamento (BRETAS e D'AVILLA, 2000). Além disso, também pode ser visto como um indicativo da coesão entre as moléculas que constituem o fluido (REIS, 2008).

Considerando as características de autoadensabilidade e reologia já apresentadas dos materiais cimentícios como um todo, os próximos tópicos discorrem a autoadensabilidade em pastas cimentícias e, em seguida, em argamassas.

### 2.1.1 Autoadensabilidade em estudos com pastas cimentícias

Para maximizar a fluidez da pasta sem aumentar a relação água/cimento e sem perder a coesão dos materiais, é importante estudar os parâmetros que influenciam a reologia e a fluidez da mesma (KWAN e WONG, 2008). Desse modo, a mesma têm sido objeto de estudo de diversas investigações (AGULLÓ et al., 1999; GUNNELIUS et al., 2017; KALETA e GRZESZCZYK, 2015; KWAN e WONG, 2008; MA e WANG, 2013; MATOS et al., 2018; SANTOS et al., 2017; SILVA, GOMES e MORAIS, 2019; ZHANG, ZHANG, 2014).

Agullo et al. (1999) consideram que a pasta de cimento é responsável pela fluidez e coesão do concreto, fazendo que as propriedades no estado fresco e as características reológicas do último sejam dependentes das propriedades da pasta.

Do ponto de vista prático, o concreto pode ser considerado como uma suspensão de agregados inertes em uma matriz de pasta de cimento, sendo que sua fluidez depende de parâmetros relacionados aos agregados como a relação volumétrica empregada, distribuição granulométrica e forma, porém, ao mesmo tempo, também está altamente relacionada à reologia da pasta de cimento que constitui a matriz (CHAPPUIS, 1991; DOMONE, 2006; YEN et al., 1999).

Dessa maneira, o conhecimento do comportamento reológico das pastas de cimento pode fornecer informações importantes sobre o comportamento do concreto, desde que medidos corretamente, podendo ser utilizadas para a escolha das adições minerais e químicas aplicadas no concreto (CASTRO, LIBORIO e PANDOLFELLI, 2011).

Deste modo, a compatibilidade de um determinado cimento Portland com um aditivo superplastificante pode ser feita por meio da determinação da fluidez da pasta de cimento com o ensaio do cone de Marsh, assim como a influência de diferentes adições minerais sobre o tempo de escoamento do material no mesmo equipamento (CASTRO, LIBORIO e PANDOLFELLI, 2011).

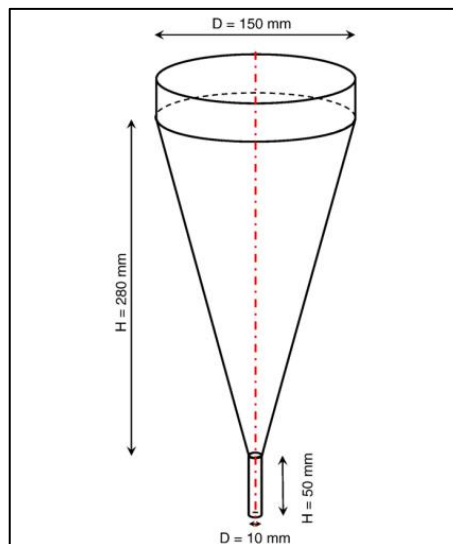
O cone de Marsh é um dos equipamentos mais utilizados para avaliação do comportamento de pastas cimentícias, o mesmo costuma ser utilizado para a determinação do teor de saturação do aditivo ou na avaliação da compatibilidade entre o cimento e aditivo (AGULLO et al., 1999; CALMON et al., 2013; GOMES, GETTU e AGULLO, 2003; KWAN e WONG, 2008; PIOVEZAM, MELEIRO e IZA, 2008; SANTOS

et al., 2017; SCHWARTZENTRUBER; ROY e CORDIN, 2006; SILVA, GOMES e MORAIS, 2019).

O equipamento tem como principal vantagem sua simplicidade e rapidez de ensaio quando comparado com métodos mais sofisticados, como o viscosímetro, e mede o tempo necessário para que um determinado volume de material flua através do cone por uma pequena abertura; sendo que quanto menor o tempo de escoamento, maior é a fluidez da pasta (AGULLO et al., 2009; MONTE e FIGUEIREDO, 2008).

O aparato de ensaio consiste em um funil de metal como o representado na Figura 2.

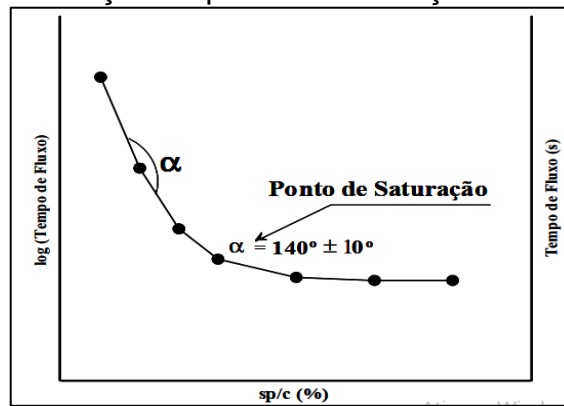
**Figura 2 - Dimensões do cone de Marsh**



Fonte: Bouvet, Ghorbet e Bennacer (2010)

Para definir o ponto de saturação do aditivo superplastificante, de Larrard (1990) afirma que o mesmo é o ponto no qual o aumento do teor de aditivo não gera incremento da fluidez do material. Gomes, Gettu e Agullo (2003) apresentam uma definição mais objetiva do mesmo ponto, em que o ponto de saturação é tomado como a dosagem a qual o ângulo interno da curva log do tempo de fluxo por teor de superplastificante (sp/c) é igual a  $140 \pm 10^\circ$ , como pode ser visualizado na Figura 3.

**Figura 3** - Curva para definição do ponto de saturação do aditivo superplastificante



Fonte: Gomes, Gettu e Agullo (2003)

Entretanto, o estudo da pasta cimentícia tem algumas limitações, principalmente considerando que a pasta pode ter uma reologia diferente da encontrada no concreto e, por isso, é necessária uma otimização final da composição através de testes em concretos (AGULLO et al., 1999).

O próximo item da revisão bibliográfica apresenta as características de autoadensabilidade avaliadas em estudos de argamassas e os limites esperados nos ensaios destes materiais cimentícios.

### 2.1.2 Autoadensabilidade em estudos com argamassas

Os componentes da argamassa desempenham um papel muito importante na produção de concretos autoadensáveis, pois a mesma possui a função de lubrificante do concreto conferindo fluidez e permitindo a compactação do material apenas pelo seu peso próprio, além disso, a argamassa define a coesão da mistura ao unir os agregados graúdos (KHOTBEHSARA et al., 2015).

A fase de argamassa serve como base para a autoadensabilidade do concreto (SAHMARAN; CRISTIANO e YAMAN, 2006). Além disso, diversos procedimentos de dosagem utilizam da fase em argamassa como um meio eficiente de determinar as quantidades apropriadas dos materiais como: água, aditivo, cimento Portland, adições e esqueleto granular (DOMONE, 2006).

Segundo Domone e Jin (1999), o estudo das propriedades das argamassas para produção de concretos autoadensáveis é justificado pelas seguintes razões:

- O concreto autoadensável tem menor volume de agregados graúdos na mistura (tipicamente 31% a 35%) e, portanto, as propriedades das argamassas são dominantes;

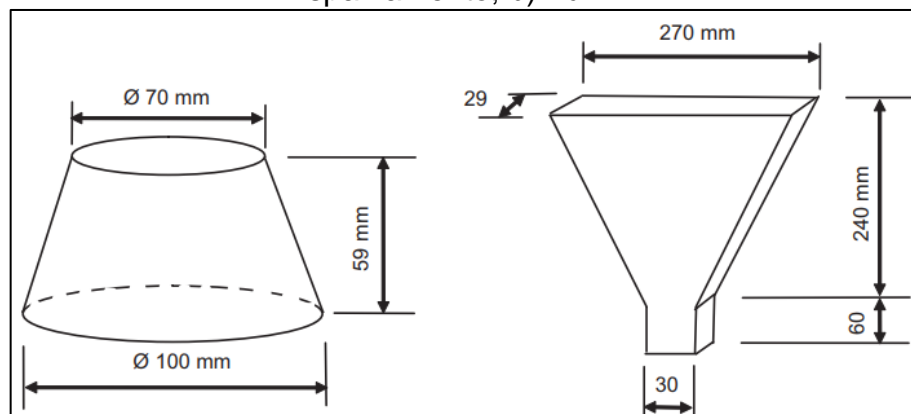
- Avaliar as propriedades das argamassas faz parte de diversas metodologias de dosagem, deste modo, o conhecimento das mesmas se faz muito importante;
- Os ensaios em argamassas são de mais fácil realização do que os ensaios em concreto.

A caracterização da autoadensabilidade das argamassas é feita, principalmente, através das análises dos índices de área relativa de espalhamento ( $G_m$ ) e tempo de escoamento relativo ( $R_m$ ) (DOMONE, 2006; EDAMATSU et al., 1999; NEPOMUCENO; OLIVEIRA, 2008; OKAMURA; OZAWA; OUCHI, 2000).

Os índices de autoadensabilidade em argamassa são propostos para indicar como a proporção de materiais finos, areia e superplastificante irão influenciar nas propriedades no estado fresco do concreto autoadensável (OKAMURA; OZAWA; OUCHI, 2000).

O índice  $G_m$  é obtido através do ensaio de espalhamento do material em tronco de cone e o índice  $R_m$  é obtido por meio do ensaio de Funil V para argamassas. Os equipamentos utilizados para realização de ambos os ensaios podem ser visualizados na Figura 4.

**Figura 4** - Equipamentos para análise da autoadensabilidade de argamassas: a) Espalhamento; b) Funil V



Fonte: Nepomuceno, Oliveira e Lopes (2012).

Os índices são obtidos através das Equações 1 e 2, apresentadas abaixo.

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1, \quad (1)$$

$$R_m = \frac{10}{t}, \quad (2)$$

nas quais  $D_m$  é a média do diâmetro de espalhamento da argamassa,  $D_0$  é o diâmetro da base do tronco de cone (Figura 4a) e  $t$  é o tempo de escoamento da argamassa no Funil V (Figura 4b) (MELO, 2005).

Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) observaram que é possível utilizar os limites dos índices  $G_m$  e  $R_m$  aplicados para concretos autoadensável de massa normal na produção de concretos leves autoadensáveis, desde que seja feita a correção da água de absorção do agregado leve na água de amassamento do concreto produzido.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os limites de área relativa de espalhamento ( $G_m$ ) e escoamento relativo ( $R_m$ ) utilizados por diversos autores.

**Tabela 1 - Limites da área relativa de espalhamento ( $G_m$ ) em argamassas**

<b>Limites da Literatura</b>			
Edamatsu et al. (1999)	Okamura e Ouchi (2003)	Melo (2005)	Nepomuceno, Oliveira e Lopes (2012)
$3 \leq G_m \leq 7$	= 5	$3 \leq G_m \leq 6,8$	$5,3 \leq G_m \leq 5,9$

Fonte: A Autora

**Tabela 2 - Limites do escoamento relativo ( $R_m$ ) em argamassas**

<b>Limites da Literatura</b>			
Edamatsu et al. (1999)	Okamura e Ouchi (2003)	Melo (2005)	Nepomuceno, Oliveira e Lopes (2012)
$1 \leq R_m \leq 2$	= 1	$1 \leq R_m \leq 2,86$	$1,14 \leq R_m \leq 1,30$

Fonte: A Autora

Okamura e Ouchi (2003) afirmam que altos valores de área relativa de espalhamento indicam maior deformabilidade e que altos valores de escoamento relativo indicam alta viscosidade. Portanto os autores definem valores fixos para os índices representando uma deformabilidade e viscosidade ideal.

Além dos ensaios consagrados acima apresentados, Porto et al. (2019) apresenta um procedimento expedito para analisar a presença de exsudação nas argamassas conforme o material retorna à posição inicial após ser riscado ao longo do seu diâmetro com uma espátula de 4 cm de largura, como apresentado na Figura 5.

**Figura 5** - Procedimento expedito proposto por Porto et al. (2019)



Fonte: Porto et al. (2019)

Segundo os autores, a argamassa não pode ser considerada autoadensável se o material não retornar à posição inicial ou se houver presença de exsudação ao longo do risco ou no material deslocado com a espátula. Além disso, o procedimento expedito ainda necessita de estudos mais aprofundados para correlacionar seus resultados com os ensaios já consagrados, porém ele é um procedimento rápido, de análise visual clara, de baixo custo, com potencial para ser realizado tanto em laboratório como em canteiro de obra.

Importante salientar que misturas com tendência à segregação devem ser descartadas, mesmo que tenham obtido índices de autoadensabilidade dentro do recomendado pela literatura (MELO, 2005).

O próximo tópico apresenta a influência das adições minerais utilizadas em materiais cimentícios e como as mesmas influenciam nas características de autoadensabilidade e nas propriedades reológicas.

### 2.1.3 Influência das adições minerais na reologia e autoadensabilidade de materiais cimentícios

O uso de adições minerais em argamassas e concretos autoadensáveis é imprescindível para alcançar as características necessárias de autoadensabilidade e reduzir o custo do material produzido (TURK, 2012).

Estas são normalmente incorporadas aos materiais cimentícios em substituição, parcial ou integral, do cimento com intuito de alterar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, além das propriedades no estado fresco como: demanda de água, trabalhabilidade, coesão, segregação, exsudação e calor de hidratação (PARK, NOH e PARK, 2005; MENDES, 2015).

Usualmente, as adições minerais incorporadas aos compósitos cimentícios são materiais com elevada finura e, por isso, passíveis de melhorar significativamente as propriedades reológicas como coesão e viscosidade e, também, reduzir a exsudação e a segregação (MENDES, 2015).

É esperado que, com a concentração de materiais sólidos constante e para uma fluidez específica, a substituição do cimento por um material fino – adição mineral, irá aumentar a demanda de água graças ao aumento da superfície específica (TURK, 2012).

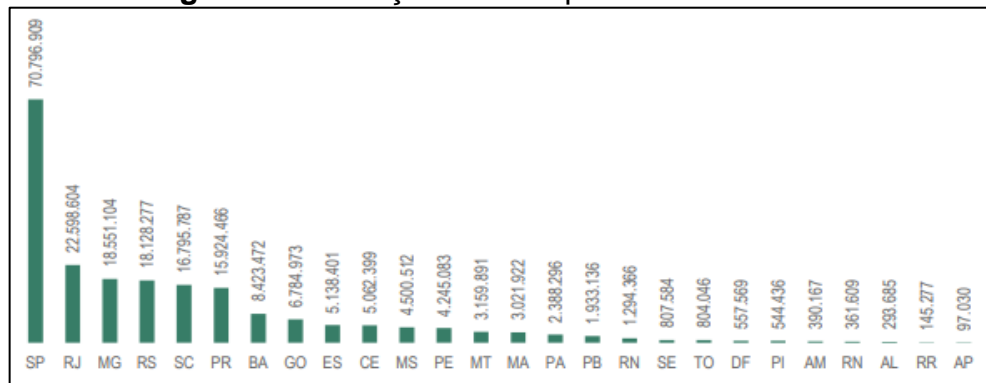
Além disso, também é importante notar que o efeito das adições minerais nas propriedades dos materiais cimentícios irá depender da sua distribuição granulométrica, bem como da forma e características da superfície das partículas (ELYAMANY; ELMOATY; MOHAMED, 2014).

A adição desses materiais mais finos que o cimento permite o preenchimento dos vazios, melhorando o arranjo das partículas, garantindo melhor distribuição da água, maior empacotamento das partículas e melhor fluidez, porém quanto maior for o empacotamento das partículas, mais viscoso será o material cimentício produzido graças ao aumento do atrito interno entre as partículas, podendo gerar decréscimos de fluidez (ELYAMANY; ELMOATY; MOHAMED, 2014; RAMAHCHANDRAN, 1995).

Considerando as adições minerais estudadas neste trabalho – pó de basalto e sílica ativa – os próximos subitens têm como objetivo a apresentação das características das mesmas e sua influência na autoadensabilidade dos materiais cimentícios.

#### *2.1.4.1 Pó de basalto*

A produção de agregado graúdo – brita – no Brasil no ano de 2015 atingiu a marca de 212,7 milhões de toneladas sendo que 76,52% desse total estão concentrados em apenas seis estados: São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná como pode ser visualizado na Figura 6.

**Figura 6 - Produção de brita por estado brasileiro**

Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral (2015)

Segundo Filla (2011) 5% da produção total de brita no Brasil é extraída de rochas basálticas, portanto, foram produzidos 10,6 milhões de toneladas desse agregado em 2015.

O pó de basalto, denominado também como fino de pedra, é um subproduto gerado no processo de britagem da rocha para a produção de agregados em quantidades que variam de acordo com a dureza da rocha e dos equipamentos utilizados na britagem (UNČÍK; KMECOVÁ, 2013; ARAÚJO, 2007).

Finos de pedra costumam ser estocados ao ar livre, causando alterações da paisagem, gerando impacto ambiental, obstrução de canais de drenagem e seu aproveitamento gera maior lucratividade às empresas e benefícios ao meio ambiente (CAMPOS, 2015).

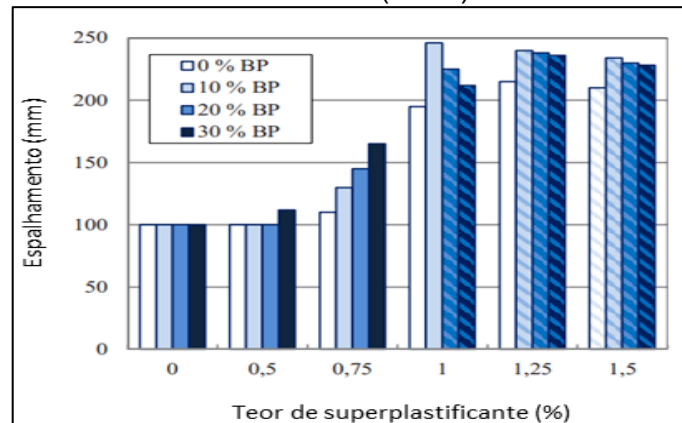
Como exemplo de aproveitamento desse resíduo, tem-se a substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra para a produção de concretos, tal estratégia traz grandes benefícios ambientais já que as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de cimento Portland representam cerca de 5% das emissões antropogênicas em todo mundo (FREIRE, 2016). No Brasil, para cada tonelada de cimento produzida são emitidos 600 kg de CO<sub>2</sub> (FREIRE, 2016).

O pó de basalto ainda não foi estudado como adição mineral em concretos leves autoadensáveis e, apesar de escassa bibliografia, é possível encontrar estudos do mesmo em outros materiais cimentícios.

Uncik e Kmecova (2013), por exemplo, estudaram a influência da substituição parcial do cimento Portland por pó de basalto em argamassas com dosagens de aditivo variando de 0 a 1,5% da massa de cimento, teores de pó de basalto (BP) de

0, 10%, 20% e 30% e relação água/cimento de 0,45, os resultados encontrados podem ser visualizados na Figura 7.

**Figura 7 - Resultados do estudo em argamassa no estado fresco de Uncik e Kmecova (2013)**

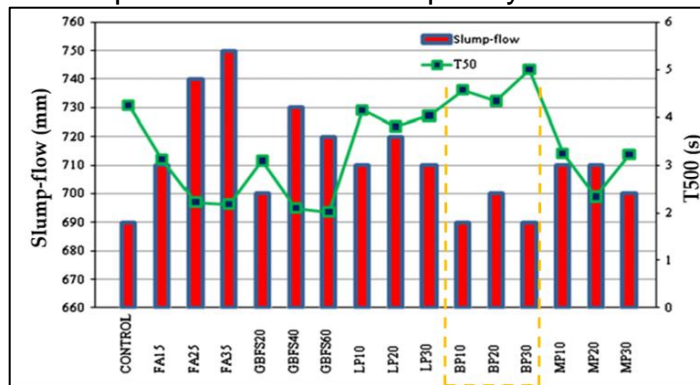


Fonte: Adaptado de Uncik e Kmecova (2013)

Nota-se, na Figura 7, que as argamassas com os menores teores de aditivo superplastificante não tiveram influência significativa na fluidez com a adição do pó de basalto, sendo que sua utilização só gerou aumento da fluidez com o teor de 0,75% de aditivo superplastificantes. Para valores superiores de aditivo redutor de água, houve sinais de segregação e exsudação as quais o pó de basalto não foi capaz de conter.

Uysal e Sumer (2011) estudaram o efeito de diferentes adições nas características de concretos autoadensáveis, sendo elas: escória granulada de alto forno (GBFS), cinza volante (FA), pó de mármore (MP), pó calcário (LP) e pó de basalto (BP). Os teores de adição utilizados não foram constantes, porém o pó de basalto foi empregado em 10%, 20% e 30% em substituição ao volume de cimento e a relação água/cimentícios dos concretos era de 0,33. Os resultados das propriedades no estado fresco podem ser visualizados na Figura 8.

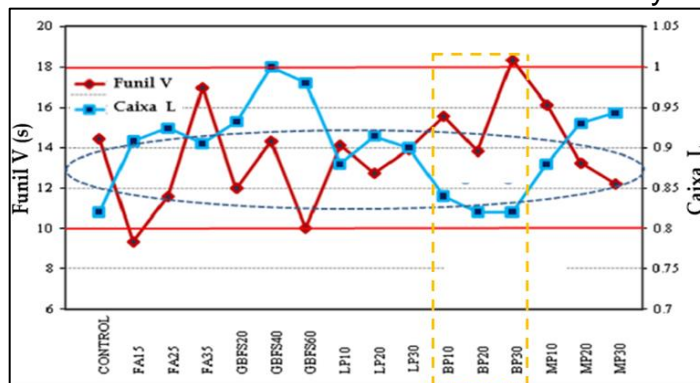
**Figura 8 - Slump flow e T500 obtidos por Uysal e Sumer (2011)**



Fonte: Adaptado de Uysal e Sumer (2011)

Verifica-se, na Figura 8, na área destacada em amarelo que a utilização do pó de basalto nos estudos de Uysal e Sumer (2011) tem pouca interferência nos resultados de espalhamento e  $T_{500}$ . Os autores também realizaram os ensaios de Funil V e Caixa L, podendo ser visualizados na Figura 9.

**Figura 9 - Resultados de Funil V e Caixa L dos estudos de Uysal e Sumer (2011)**



Fonte: Adaptado de Uysal e Sumer (2011)

Observa-se, na Figura 9, na área destacada em amarelo que a utilização do pó de basalto como adição mineral gerou, no maior teor, o maior tempo de escoamento e a menor relação de alturas da caixa em L.

Por se tratar de um material de aplicação recente, ainda são necessárias maiores investigações dos efeitos do mesmo nas propriedades no estado fresco dos materiais cimentícios, além da análise conjunta com a caracterização física e mineralógica da adição.

### 2.1.4.2 Sílica ativa

A sílica ativa (SA) é um subproduto do processo de obtenção do ferro-silício – insumo destinado à produção de aços comuns – e silício metálico – insumo utilizado pelas indústrias de alumínio, química e eletrônica (DAL MOLIN, 2011)

No estado fresco, a adição de SA pode aumentar significativamente a coesão da pasta de cimento e, por consequência, do concreto graças ao grande aumento da superfície específica que diminui a quantidade de vazios e aumenta a viscosidade do material, reduzindo o risco de segregação (BENAICHA et al., 2015; CHEN, FUNG e KWAN, 2012).

A Tabela 3 apresenta um resumo da incorporação de sílica ativa em trabalhos recentes com materiais cimentícios autoadensáveis, podendo verificar a forma de incorporação, o diâmetro médio da partícula, sua superfície específica, os teores incorporados, a relação água/cimento (a/c) dos materiais produzidos e se foram incorporadas outras adições durante os estudos. Importante mencionar que nos trabalhos aqui mencionados, nenhum são em concretos leves autoadensáveis.

**Tabela 3** - Resumo da incorporação de sílica ativa em trabalhos de materiais cimentícios autoadensáveis

<b>Autores</b>	<b>Incorporação</b>	<b>Diâmetro médio (µm)</b>	<b>Superfície específica (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Teores (%)</b>	<b>Outras adições</b>	<b>a/c</b>
Gesoglu Güneyisi, e Özbay (2009)	Substituição	-	21.000	5; 10; 15;	-	0,44
Güneyisi, Gesoglu e Özbay (2010)	Substituição	-	21.000	5; 10; 15;	-	0,32 e 0,44
Mohamed (2011)	Substituição	-	-	10; 15; 20	-	0,42
Turk (2012)	Substituição	< 45	-	5; 10; 15; 20;	-	0,44 a 0,50
Bingöl e Tohumcu (2013)	Substituição	-	-	5; 10; 15	-	0,35 a 0,41
Rahma, Baluch e Malik (2014)	Substituição	-	15.000	2,5; 5; 7,5	-	0,3 a 0,34
Elyamany et al. (2014)	Adição	-	-	7,5; 10; 15	-	0,45 a 0,48
Benaicha et al. (2015)	Substituição	-	2.220	5; 10; 15; 20; 25; 30	Fíler calcário	0,37
Jalal et al. (2015)	Substituição	-	21.000	10	-	0,38
Lu, Yang e Mei (2015)	Substituição	-	-	2; 4; 6; 8; 12; 16	-	0,35

\**Continua*

**Tabela 3** – Resumo da incorporação de sílica ativa em trabalhos de materiais cimentícios autoadensáveis

\*Continuação

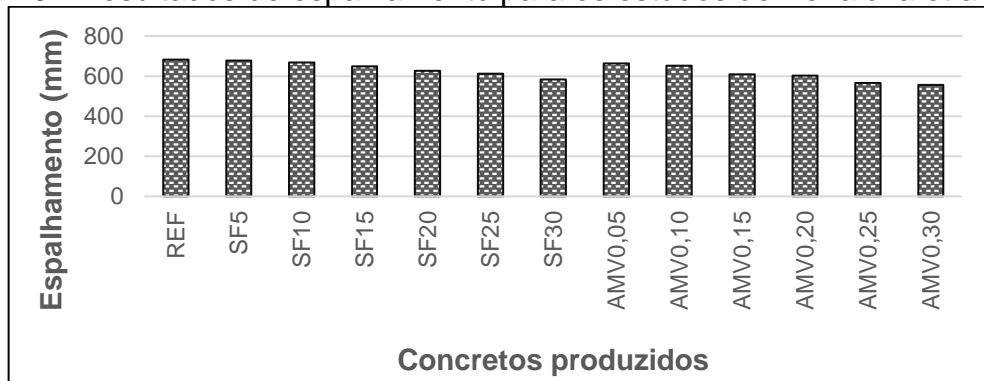
<b>Autores</b>	<b>Incorporação</b>	<b>Diâmetro médio (µm)</b>	<b>Superfície específica (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Teores (%)</b>	<b>Outras adições</b>	<b>a/c</b>
Leung et al. (2016)	Substituição	0,1	-	5; 10; 15;	Cinza Volante	0,38
Mohan e Mini (2018)	Substituição	-	-	5; 10; 15;	-	0,34
Akcay e Tasdemir (2018)	Substituição	0,8	13.200	10	-	0,28 e 0,35
Correa-Yepes, Rojas-Reyes e Tobón (2018)	Substituição	-	-	5; 10; 15	-	0,5
Bernal et al. (2018)	Adição	0,15	15.000 – 30.000	2,5; 5; 7,5	Nanosílica	0,36

Fonte: A Autora

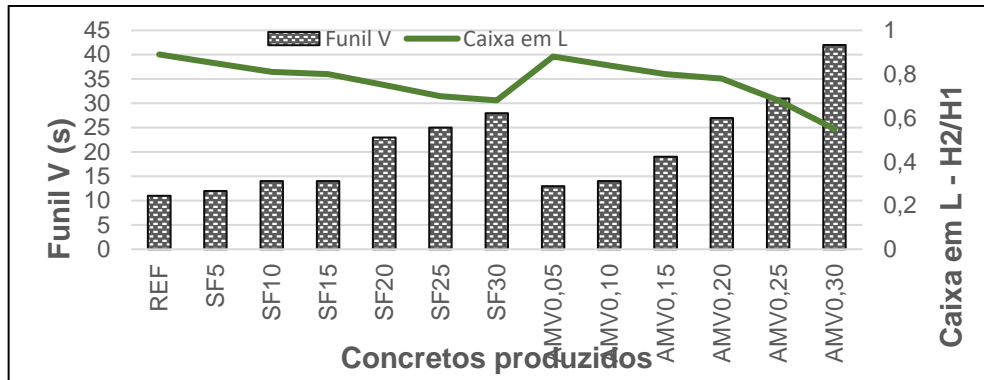
Verifica-se, na Tabela 3, que os estudos com sílica ativa foram realizados com a incorporação da mesma em substituição à massa de cimento. Além disso, para que as reações de hidratação não sejam prejudicadas, é comum a utilização de relações água/cimento acima de 0,30.

Por fim, com relação aos teores incorporados, nota-se que as faixas de 5% a 15% são mais comumente aplicadas, sendo que Lu, Yang e Mei (2015) afirmam que utilização de teores menores a 8% da massa de cimento pouco influencia no espalhamento de concretos autoadensáveis, e o comportamento inverso ocorre com a utilização de teores maiores ou iguais a 12%.

Benaicha et al. (2015) estudaram a incorporação da sílica ativa em concretos autoadensáveis comparando-a com concretos produzidos com aditivo modificador de viscosidade. Os teores de sílica utilizados pelos autores estão apresentados na Tabela 3 e o aditivo modificador de viscosidade foi estudado nas porcentagens de 0,05%; 0,10%; 0,15%; 0,20%; 0,25% e 0,30% em relação a massa de cimento, além disso, também foi empregado um aditivo superplastificante a base de policarboxilato em todas as misturas produzidas. Os resultados no estado fresco estão presentes nas Figuras 10 e 11.

**Figura 10 - Resultados de espalhamento para os estudos de Benaicha et al. (2015)**

Fonte: Adaptado de Benaicha et al. (2015)

**Figura 11 - Resultados de Funil V e Caixa L dos estudos de Benaicha et al. (2015)**

Fonte: Adaptado de Benaicha et al. (2015)

Com relação as propriedades no estado fresco do estudo de Benaicha et al. (2015), a utilização da sílica ativa só produz misturas autoadensáveis até o teor de 15%, acima disso, as misturas não apresentaram resultados satisfatórios. Além disso, nota-se que os aumentos dos teores de sílica produzem misturas com menor fluidez.

Além disso, para as propriedades no estado endurecido, conforme há o aumento no teor de sílica ativa, melhores são os resultados das propriedades mecânicas do concreto, sendo que a utilização de 10% dessa adição mineral gera um aumento de 18% na resistência à compressão aos 28 dias. Portanto, os autores afirmam que a sílica ativa pode ser utilizada como um agente modificador de viscosidade, controlando a exsudação e a segregação do material, sem perdas significativas nas propriedades mecânicas.

Desse modo, de maneira geral, o aumento do teor de incorporação de adição de sílica ativa em materiais cimentícios aumenta a viscosidade da mistura, sua coesão e a exsudação é consideravelmente reduzida à medida que parte da água livre é

adsorvida pelas partículas da própria adição mineral (RAMAHCHANDRAN, 1996; PARK, NOH e PARK, 2005; BENAICHA et al., 2015).

O próximo item da revisão bibliográfica inicia o estudo da arte acerca do concreto leve autoadensável (CLAA), apresentando as características gerais e suas propriedades no estado fresco e endurecido.

## 2.2 CONCRETO LEVE AUTOADENSÁVEL (CLAA)

O concreto leve autoadensável (CLAA) é um material de alto desempenho que irá combinar as vantagens de um concreto leve – redução das cargas estruturais, elevada capacidade de isolamento, resistência contra o fogo e ataques químicos – com as vantagens do concreto autoadensável – maior durabilidade, capacidade de preenchimento e resistência à segregação (KAFFETZAKIS; PAPANICOLAOU, 2016).

O CLAA deve simultaneamente satisfazer as características de autoadensabilidade e baixa massa específica, características que podem ser desafiadoras ao considerar que a redução do peso próprio resulta em uma menor energia dinâmica que irá comprometer o fluxo da mistura (KAFFETZAKIS; PAPANICOLAOU, 2016).

Com relação à produção do material, Cui, Lo e Xing (2013) afirmam que o mesmo pode ser produzido com base nos mesmos princípios do concreto autoadensável de massa específica comum.

Entretanto Vakhshouri e Nejadi (2017) afirmam que o concreto leve autoadensável é mais sensível às mudanças nas proporções de materiais, ou seja, alterações na dosagem que visam alcançar uma melhor autoadensabilidade pode afetar o desempenho do concreto endurecido.

### 2.2.1 Histórico e Aplicações

Através de uma pesquisa sistemática nas bases de dados Scielo, ResearchGate, BASE (Bielefeld Academic Search Engine) e DOAJ (Directory of open access journals) foi possível categorizar os trabalhos sobre concretos leves autoadensáveis.

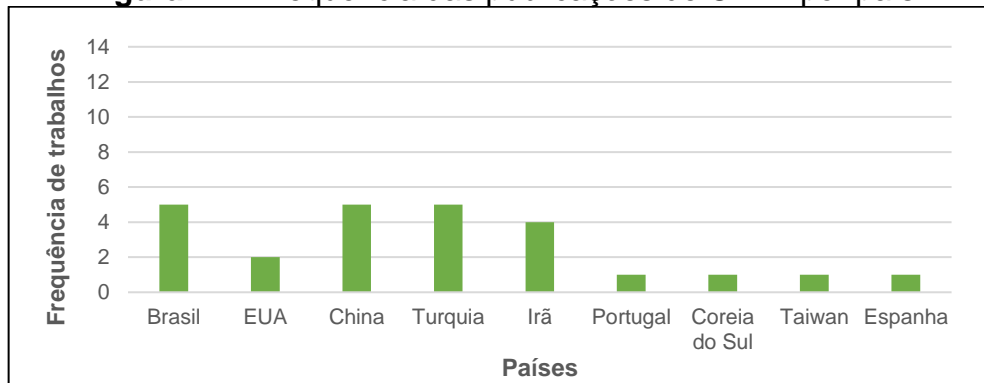
Dessa maneira 68 artigos, dissertações e teses sobre concretos leves autoadensável que datam de 2005 até o presente foram encontrados. Para um melhor aproveitamento da revisão sistemática de concreto leve autoadensável, selecionou-

se aqueles que produziram CLAA com agregado graúdo leve e agregado miúdo de massa normal (Tabela 4), já que esta dissertação tem como objetivo produzir um CLAA com essa constituição.

**Tabela 4 - Estudos em concreto leve autoadensável por ano e país**

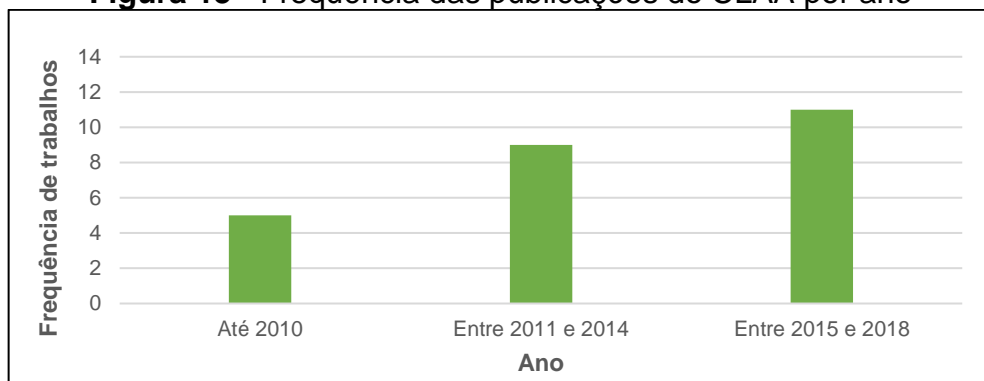
<b>Item</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>País</b>
1	Hwang e Hung	2005	Taiwan
2	Adiç-Çakir et al.	2009	Turquia
3	Kim, Choi e Lachemi	2010	Coreia do Sul
4	Topçu e Uygunoglu	2010	Turquia
5	Cui, Lo e Xing	2013	China
6	Borja	2011	Brasil
7	Maghsoudi, Mohamadpour e Maghsoudi	2011	Irã
8	Klein et al.	2011	Espanha
9	Bogas, Gomes e Pereira	2012	Portugal
10	Andiç-Çakir e Hizal	2012	Turquia
11	Guneyisi, Gesoglu e Booya	2012	Turquia
12	Wu et al.	2013	China
13	Erdem	2014	Turquia
14	Zhang, Wu e Wu	2014	China
15	Floyd, Hale, Bymaster	2015	Estados Unidos
16	Verzeghassi	2015	Brasil
17	Yang et al.	2015	China
18	Karamloo, Mazloom, Payganeh	2016	Irã
19	Grabois, Cordeiro e Toledo Filho	2016	Brasil
20	Assunção	2016	Brasil
21	Li, Chen e Wan	2017	China
22	Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira	2018	Portugal
23	Mazloom e Salehi	2018	Irã
24	Porto	2018	Brasil
25	Afzali-Naniz e Mazloom	2019	Irã

A Figura 12 apresenta a distribuição, por país das pesquisas contidas na Tabela 4.

**Figura 12 - Frequência das publicações de CLAA por país**

Fonte: A Autora

É possível notar, através da Figura 12, que os estudos de CLAA estão presentes em maior quantidade na região asiática. Enquanto que na Figura 13 é possível visualizar a distribuição ao longo do tempo das publicações.

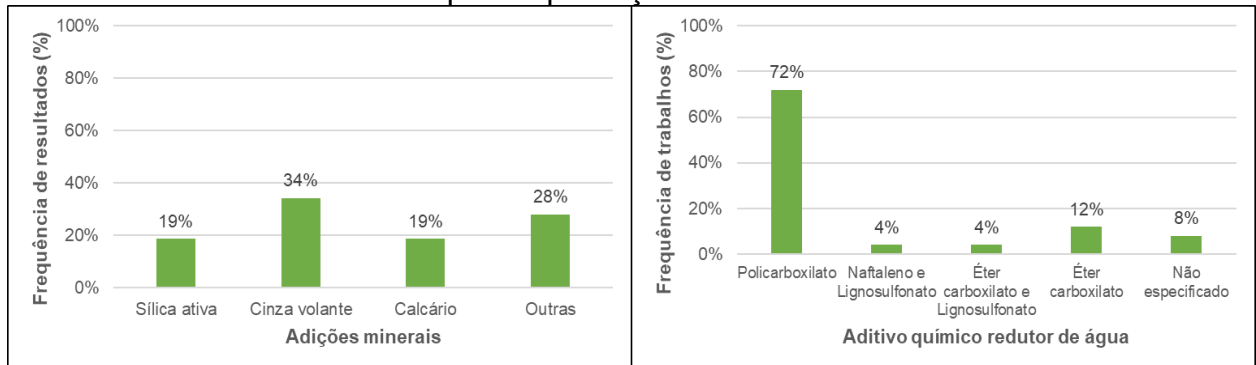
**Figura 13 - Frequência das publicações do CLAA por ano**

Fonte: A Autora

O desenvolvimento tecnológico e científico do concreto leve autoadensável vem crescendo desde o início dos seus estudos já que, como pode ser visualizado na Figura 13, o mesmo é objeto de estudo de uma maior quantidade de autores na última década.

Com relação aos materiais utilizados pelos diversos autores, na Figura 14 é possível observar a frequência de adições minerais utilizadas, assim como a frequência dos tipos de aditivos redutores de água.

**Figura 14 - Frequência de adições minerais e aditivos redutores de água utilizados para a produção de CLAA**



Fonte: A Autora

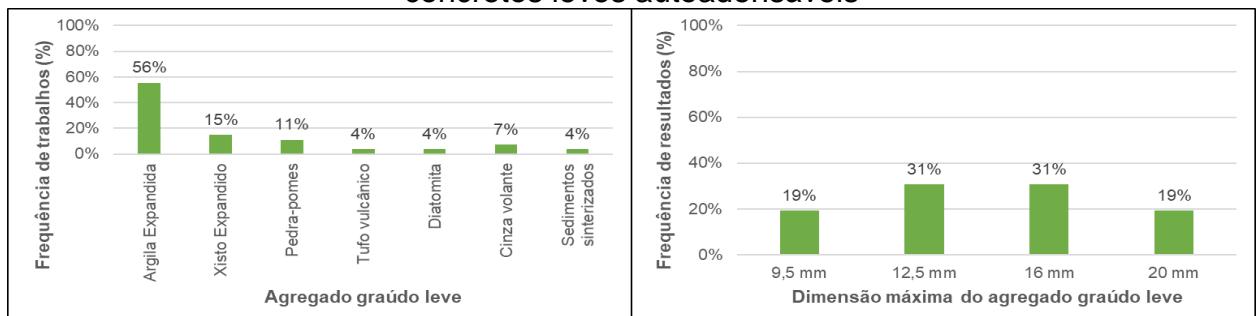
Observa-se, na Figura 14, que a adição mineral mais utilizada para a produção do CLAA é a cinza volante, seguida pelo pó calcário e a sílica ativa, também é importante mencionar que dos autores citados na Tabela 4, apenas Kim, Choi e Lachemi (2010) não fizeram uso de adições minerais.

Outra consideração importante sobre as adições minerais é que, em aproximadamente 40% dos trabalhos, as mesmas foram utilizadas de maneira combinada, ou seja, em combinações terciárias ou quartenárias, tendo como exemplo os trabalhos de Güneýisi, Gesoglu e Booya (2012) e Afzali-Naniz e Mazloom (2018).

Com relação aos aditivos redutores de água, o mais utilizado é o aditivo superplastificante a base de policarboxilato. Além disso, dentre todos os trabalhos apresentados na Tabela 4, apenas 5 usam outros aditivos químicos para alcançar as características necessárias de autoadensabilidade.

Ainda com relação aos materiais, a Figura 15 apresenta a frequência dos tipos de agregados graúdos leves (AGL) utilizados, assim como as dimensões máximas dos mesmos.

**Figura 15 - Características dos agregados graúdos leves utilizados na produção de concretos leves autoadensáveis**



Fonte: A Autora

Os agregados graúdos têm sua utilização ditada pela disponibilidade de material da região, porém ainda assim o agregado graúdo leve mais utilizado é a argila expandida. Com relação à sua dimensão máxima, a utilização de AGL de 12,5 mm é mais frequente, considerando que dimensões maiores podem dificultar a aplicação em estruturas densamente armadas.

Por fim, com relação aos agregados miúdos (AM) utilizados, 82% dos trabalhos utilizam areia natural. As areias naturais são mais indicadas para alcançar características satisfatórias de autoadensabilidade por possuir forma mais arredondada e uniforme (PETRY, 2015).

Com relação as aplicações do concreto leve autoadensável, estas estão geralmente relacionadas à indústria de pré-moldados e, mesmo assim, ainda são raras (PAPANICOLAOU e KAFFETZAKIS, 2011).

Entre as poucas aplicações do material, destacam-se: Dymond (2007) que projetou e construiu uma viga usando concreto leve autoadensável, Ranjbar et al. (2011) que estudaram a possibilidade de aplicação em paredes de concreto e Klein et al. (2011) que utilizou o concreto leve autoadensável reforçado com fibras como material de enchimento em vigas de Barcelona para recuperação de rigidez e solução de problemas de deslocamento de ladrilhos nas mesmas.

### 2.2.2 Materiais Utilizados no CLAA

Os materiais, com exceção do agregado graúdo, utilizados na produção do concreto leve autoadensável são, em sua maioria, os mesmos utilizados na produção do concreto autoadensável, (VERZEGNASSI, 2015).

Na Tabela 5 é possível observar os tipos de cimento, aditivos redutores de água (RA) e aditivos de outras finalidades – incorporadores de ar (IA) e modificadores de viscosidade (MV), adições, agregados graúdos leves (AGL) e agregados miúdos (AM) para a produção de concretos leves autoadensáveis segundo os autores apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** - Materiais utilizados para a produção do concreto leve autoadensáveis por diversos autores.

Ref.	Cimento	Aditivos		Adições	AGL	AM
		RA	Outros			
1	ASTM C150	NF e LS	-	CV e Escória	Artificial	NAT.
2	Portland Comum	PC	-	CV	XE	NAT.
3	CEM I 42,5R	PC	IA	CV	PP	NAT.
4	Blaine: 3.539 cm <sup>2</sup> /g	PC	IA	-	Pó fino de Riolito	NAT.
5	CEM I 42,5R	PC	-	Pó calcário e CV	PP, TV e Diatomita	NAT.
6	Blaine: 3950 cm <sup>2</sup> /g	N/E	MV	Cinza de combustível	AE	NAT.
7	CPII Z32 RS	PC e LS	-	CCA e MET	AE	NAT.
8	CEM II/A-L	PC	MV	Pó calcário e fibra de aço	AE	NAT.
9	Tipo II - ASTM C150	PC	-	SA e filer calcário	AE	NAT.
10	CEM I 42,5R	PC	-	CV	AE	Silicosa
11	CEM I 42,5 R	PC	IA	Resíduo de olivina	PP	Calcário
12	CEM I 42,5 R	PC		CV e SA	CV	Calcário e NAT.
13	CEM I 52,5 N	PC	-	CV	CV	NAT.
14	Portland Comum	N/E	-	CV	XE	NAT.
15	Chinês - GB 175	PC		CV	AE	NAT. e Partículas de plástico
16	Tipo I e Tipo III - ASTM C150	PC	-	CV e SA	AE e XE	NAT.
17	CPV - ARI	PC	-	Filito em pó	AE	NAT.
18	CEM I 42,5 N	PC	-	Pó calcário	AE	NAT.
19	CPV - ARI	PC	-	Fibra de aço e CV	AE	NAT.
20	CPV - ARI	EP	-	SA	AE	NAT.
21	CEM I 42,5 N	PC	-	CV e SA	XE	NAT.
22	CEM i 42,5 R	PC	-	Pó calcário	AE	NAT.
23	CEM I 42,5	PC		Pó calcário	AE	NAT.
24	CPIIZ-32	PC	-	SA	AE	NAT.
25	CEM I 42,5 N	PC	-	NS, MS e calcário	AE	NAT.

RA= Redutor de água; AGL= Agregado graúdo leve; AM = Agregado miúdo; NE = Não especificado; NF = Naftaleno; LS = Lignosulfonato; PC = Policarboxilato; EP = Éter policarboxilíco; IA = Incorporador de ar; MV = Modificador de viscosidade; CV = Cinza volante; CCA = Cinza da cana de açúcar; MET = Metacaulim; SA = Sílica ativa; NS = Nanosílica; MS = Micro-sílica; XE = Xisto expandido; PP = Pedrapomes; TV = Tufo vulcânico; AE = Argila expandida; NAT = Natural

**Fonte:** A Autora

Considerando a seleção de materiais de cada um dos autores apresentada na Tabela 5, é possível observar na Tabela 6 o consumo de materiais para realização das diversas misturas produzidas.

**Tabela 6** - Consumo de materiais para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto leve autoadensável pelos diversos autores

Ref.	Nº de Mist.	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Adição (kg/m <sup>3</sup> )	AGL (kg/m <sup>3</sup> )	AM (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	Aditivos	
								RA (kg/m <sup>3</sup> )	Outro (kg/m <sup>3</sup> )
1	8	224-451	143-153	434-510	672-791	114-183	0,3-0,4	7-26	-
2	2	397-425	170-182	408-416	780-787	176-187	0,4-0,5	6,2-10,9	-
3	5	369-400	140-170	177-197	509-746	184-200	0,5	4,9-8,2	2,9-6,1
4	2	460	-	469-617	861	175	0,5	3,2-6,0	0,023
5	15	396-415	132-138	351-488	571-664	162-216	0,4-0,5	7,9-14,3	2,6-2,8
6	5	445-556	0-55,6	562	493,78	230	0,4-0,5	6,666	-
7	2	360-450	100-190	175	1134	240-256	0,5-0,7	4,7-5,0	-
8	9	360-450	0-130	170-228	580-980	183-203	0,4-0,5	11,43	0,85-1
9	14	321-399	161-201	0,28-0,4	607-839	151-196	0,4-0,5	2, -3,3	-
10	4	367-395	220-230	147-587	449-554	202-257	0,6-0,7	2,4-13,4	1,4-3,9
11	9	330-550	0-220	657-688	657-688	1923	0,4-0,6	5,3-6,4	-
12	5	300-360	200-240	334-429	592-739	200-240	0,7	4,5-5,5	0,5-0,83
13	1	323	177	446	832	155	0,5	5	-
14	2	397-425	170-182	408-416	780-787	176-187	0,4-0,5	6,2-10,9	-
15	1	369	154	300	703	133,3	0,4	5,3	-
16	32	440-564	0-87	377-444	733-880	177-208	0,3-0,4	0,9-4,9	-
17	3	320-440	69-175	363	945	195	0,4-0,6	4,5-6,2	-
18	6	400-450	225	250	850	158-160	0,3-0,40	6-8	-
19	2	357	153-192	366-371	702	171	0,5	12,9	-
20	5	452-473	45-47	280-294	762-800	200-294	0,38-0,40	5-5,2	-
21	5	326-436	140-187	566-671	613-727	163-218	0,5	0,9-2,3	-
22	10	273-664	0-371	300-334	688-808	156-188	0,3-0,60	3,7-7,0	-
23	3	335-395	210	230	780	146-157	0,4-0,5	3,7-6,7	-
24	1	475	38	270	550	204,25	0,43	2,4	-
25	16	340-450	230-271	270	800	158-180	0,4-0,5	3,6-16,2	-

RA= Redutor de água; AGL= Agregado graúdo leve; AM = Agregado miúdo; a/c = relação água/cimento

Fonte: A Autora

Com relação aos consumos apresentados na Tabela 6, é possível observar que foram produzidos concretos com reduzidos consumos de cimento (224 kg/m<sup>3</sup>) e concretos com consumos mais elevados (664 kg/m<sup>3</sup>). No que diz respeito ao consumo

de agregado graúdo utilizado pelos autores, o mesmo variou desde 147 kg/m<sup>3</sup> até 688 kg/m<sup>3</sup>.

Com relação ao tipo de cimento Portland empregado no CLAA, cimentos mais finos – Blaine > 3000 cm<sup>2</sup>/g – são mais indicados para este tipo de concreto, pois possuem maior quantidade de partículas em contato com a água o que irá gerar um aumento de viscosidade e melhor coesão da mistura (ASSUNÇÃO, 2016; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

Por ter essa demanda elevada de finos na sua composição para aumentar a coesão da mistura, cuidados com calor de hidratação e a retração do concreto são necessários (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Deste modo, cresce a necessidade da aplicação do cimento em conjunto com adições minerais, as quais geralmente possuem maior superfície específica, melhorando a distribuição granulométrica da mistura, diminuindo à tendência de segregação ou exsudação do material (BENAICHA et al., 2015; MORAES, 2010).

A utilização desses materiais na produção do concreto autoadensável pode diminuir os custos da produção – por diminuir o consumo de cimento –, melhorar o empacotamento das partículas, diminuir a permeabilidade e, por fim, aumentar a durabilidade do concreto (UYSAL; YILMAZ, 2012).

Além das adições minerais, a produção de concretos autoadensáveis tem a necessidade de incorporar aditivos redutores de água de elevada efetividade. A ação dos superplastificantes pode ser afetada pelos seguintes fatores: tipo de aditivo, dosagem e momento da colocação na mistura, temperatura, umidade, procedimento de mistura, tipo de cimento e presença de outros aditivos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Por fim, a incorporação do agregado graúdo leve irá garantir a leveza ao CLAA. Agregado graúdos que possuem massa específica menor do que 2000 kg/m<sup>3</sup>, segundo a NBR 9935 (ABNT, 2011), são considerados leves e encontram aplicação na produção de vários tipos de concretos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Ao se utilizar um agregado graúdo leve e poroso, a adesão deste material com a pasta de cimento irá depender principalmente da porosidade superficial do agregado (LO, TANG, CUI, 2007).

O agregado leve possui menor resistência à compressão e uma elevada absorção e, por isso, necessita de uma maior quantidade de pasta de cimento para

atingir uma consistência e uma resistência à compressão adequada (HWANG; HUNG, 2005).

Tais agregados possuem algumas propriedades desfavoráveis que necessitam ser levadas em consideração durante a dosagem do concreto, como por exemplo: alta porosidade e, conseqüentemente, elevada absorção de água, baixa resistência ao esmagamento e tendência a flutuar (KAFFETZAKIS; PAPANICOLAOU, 2016).

Em seus estudos, Vakhshouri e Nejadi (2016) notaram que não há um padrão para a utilização dos agregados graúdos leves, pois são utilizados diversos tipos, com dimensões variadas e diferentes combinações. Porém, o agregado leve mais utilizado foi a argila expandida.

A argila expandida é o único agregado graúdo leve produzido no Brasil, sua produção ocorre em fornos rotativos e pode ser dividida nas seguintes etapas: homogeneização, desintegração, mistura, nova homogeneização, laminação, pelotização, secagem e queima, resfriamento, classificação e estocagem (VERZEGNASSI, 2015). Seu processo de produção é responsável pelas características de formato, porosidade e coloração do agregado (RASHAD, 2018).

Entre as granulometrias produzidas, os trabalhos brasileiros utilizam dois tipos cujas características podem ser observadas na Tabela 7 (ASSUNÇÃO, 2016; BORJA, 2011; PORTO, 2018; VERZEGNASSI, 2012).

**Tabela 7** - Características das argilas expandidas produzidas no Brasil para utilização em concretos leves.

Nome Comercial	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência Mecânica (MPa)	Dimensão (mm)
0500	850	2,27	0 – 5
1506	600	2,27	6 – 15

Fonte: Fabricante

A argila expandida é um tipo de agregado leve com uma elevada porosidade, formato arredondado ou quase esférico e menor resistência ao esmagamento do que os agregados de massa normal (NEPOMUCENO; PEREIRA-DE-OLIVEIRA; PEREIRA, 2018).

Com relação à absorção do agregado graúdo leve, os estudos presentes na Tabela 4 ficam divididos, em sua maioria, por ou pré-saturar os agregados leves utilizados (ANDIÇ-ÇAKIR e HIZAL, 2012; BORJA, 2011; CUI, LO e XING, 2013; ;

FLOYD, HALE BYMASTER, 2015; LI, CHEN e WAN, 2017; MAGHSOUDI, MOHAMADPOUR e MAGHOUSI, 2011; MAZLOON e SALEHI, 2018; TOPÇU e UYGUNOGLU, 2010; VERZEGNASSI, 2015; YANG et al., 2015; WU et al., 2013) ou não considerar a água de absorção do agregado na produção (ANDIÇ-ÇAKIR et al., 2009; BOGAS, GOMES E PEREIRA, 2012; GUNEYISI, GESOGLU e BOOYA, 2012; HWANG e HUNG, 2005; KARAMLOO, MAZLOOM e PAYGANEH, 2016; KIM, CHOI e LACHEMI, 2010; KLEIN et al., 2011; PORTO, 2018). Entretanto, alguns dos autores apresentados incorporam a água de absorção do agregado leve à água da mistura do CLAA (ASSUNÇÃO, 2016; AFZALI-NANIZ e MAZLOOM, 2019; GRABOIS, CORDEIRO e TOLEDO FILHO, 2016).

Porém apenas Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) estudam a influência da água de absorção do agregado graúdo leve durante a produção do CLAA. Para atingir tal objetivo, os autores produzem dois concretos leves autoadensáveis sendo um incorporando a água de absorção do agregado leve à água de mistura (LWSCC1.2) e outro sem esta incorporação (LWSCC1.1). Através dessa análise, os autores concluíram que para que seja possível alcançar as características de autoadensabilidade no CLAA é necessário incluir à água da mistura um excesso relativo a absorção de água do agregado graúdo leve, pois apenas o LWSCC1.2 obteve resultados satisfatórios.

Considerando os desafios que a incorporação do agregado leve traz para a produção de um material autoadensável, o próximo item da revisão bibliográfica traz os métodos de dosagem para CLAA já propostos por outros autores.

### 2.2.3 Métodos de Dosagem

A dosagem de concreto leve autoadensável possui um alto grau de complexidade visto que o mesmo deve satisfazer as características de autoadensabilidade e possuir baixa densidade (KAFFETZAKIS; PAPANICOLAOU, 2016).

O procedimento de dosagem proposto neste trabalho teve sua fundamentação teórica adaptada do apresentado por Toralles-Carbonari (1996) e Gomes (2002).

Toralles-Carbonari (1996) desenvolveu a metodologia de dosagem para produção de concretos de alta resistência que consistiu em realizar a otimização separada da composição de pasta e do esqueleto granular. O método proposto pela autora possui as seguintes hipóteses: a fluidez da pasta governa as propriedades

reológicas do concreto; o teor ótimo de superplastificante é definido pelo ponto de saturação utilizando-se do ensaio do cone de Marsh; o esqueleto granular deve apresentar o menor volume de vazios e o conteúdo da pasta depende dos requisitos de desempenho do concreto.

Gomes (2002) utilizou-se de embasamento teórico semelhante ao utilizado por Toralles-Carbonari (1996) para desenvolvimento de metodologia de dosagem para concretos autoadensáveis. Segundo o autor, a composição da pasta não interfere na determinação da proporção entre os agregados, o que permite independência entre as fases. Dessa maneira, a metodologia de dosagem é subdividida em três etapas: obtenção da composição da pasta, determinação da proporção de mistura dos agregados considerando um menor volume de vazios e limite de tamanho máximo e determinação do volume de pasta que proporcionará os requisitos de autoadensabilidade.

Considerando a bibliografia existente em concreto leve autoadensável, poucos estudos possuem foco no desenvolvimento de um método de dosagem para o mesmo, sendo possível citar os trabalhos de: Andiç-Çakir et al., (2009); Hwang e Hung (2005); Kaffetzakis e Papanicolaou (2016); Li, Chen e Wan (2017); Lofty, Hossain e Lachemi (2014); e Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018).

Portanto, este item abordará, de maneira resumida, os métodos desenvolvidos que apresentam embasamento teórico semelhante ao proposto neste trabalho, sendo estes: Li, Chen e Wan (2017) e Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018).

#### 2.2.3.1 Li, Chen e Wan (2017)

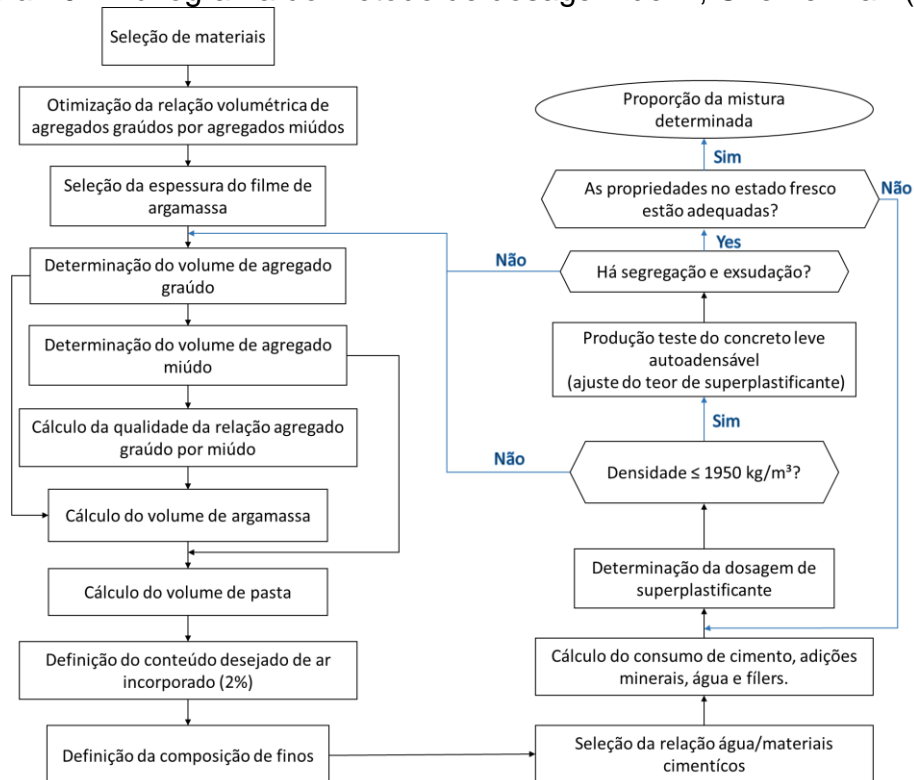
O método de dosagem desenvolvido pelos autores está baseado nas teorias do empacotamento das partículas e na teoria da espessura de filme de argamassa (*mortar film thickness* – MFT).

As premissas básicas do método são: a composição do concreto tem propriedades aditivas de volume; os vazios dos agregados graúdos leves são preenchidos com argamassas; os vazios dos agregados miúdos são preenchidos com pasta e a pasta é composta por água, cimento, adição mineral, aditivos químicos e ar.

E para facilitar o cálculo foi suposto que as partículas do agregado graúdo são consideradas esféricas e seu tamanho pode ser obtido através da análise dos grãos; agregados graúdos com diferentes tamanhos de partículas possuem apenas um valor de MFT; a porosidade dos agregados graúdos permanece constante.

Na Figura 16 é possível visualizar o fluxograma completo do método de dosagem proposto pelos autores.

**Figura 16 - Fluxograma do método de dosagem de Li, Chen e Wan (2017)**



**Fonte:** Adaptado de Li, Chen e Wan (2017)

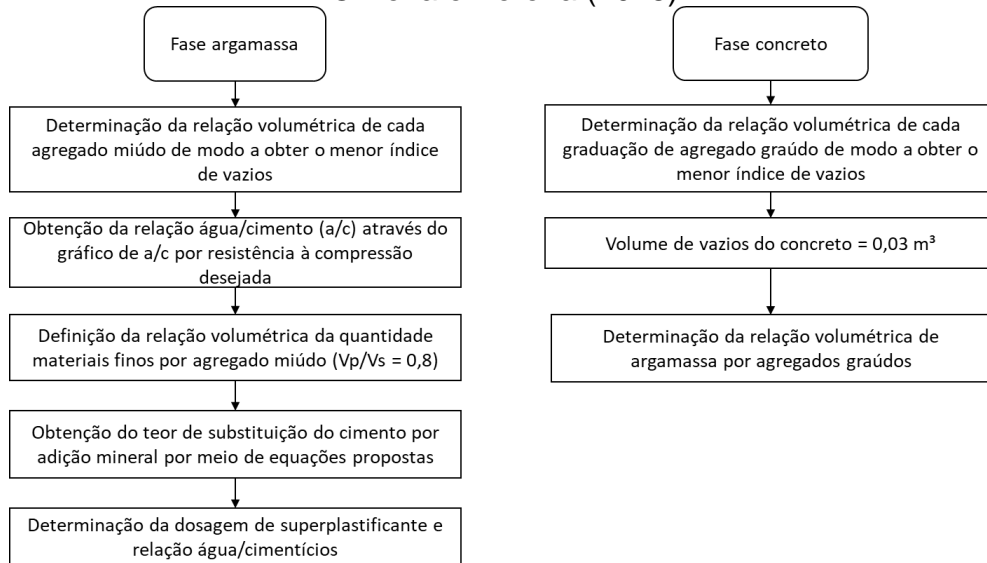
Para a análise do estado fresco dos concretos produzidos, os autores indicam a realização do ensaio de *slump flow* e, caso o mesmo possua um resultado satisfatório, realize-se as análises de capacidade passante e resistência à segregação.

A metodologia foi validada com a produção de concretos leves autoadensáveis sem a presença de exsudação ou segregação, com massa específica de aproximadamente  $1.900 \text{ kg/m}^3$ , resistência à compressão aos 28 dias por volta de 50 MPa e consumo de cimento máximo de  $435,4 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.2.3.2 Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

Os autores dividem o método em duas fases: argamassa e concreto sendo utilizado agregado graúdo leve para obtenção da leveza do material, como descrito na Figura 17.

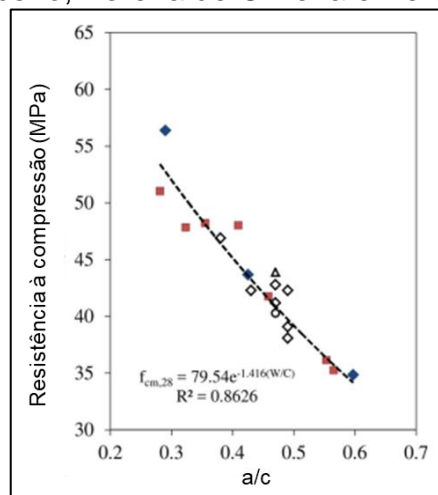
**Figura 17 - Fluxograma do método de dosagem de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)**



**Fonte:** Adaptado de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

A obtenção da relação água/cimento, ainda na fase de argamassa é realizada através do gráfico, apresentado na Figura 18, apresentado pelos autores, o qual relaciona a resistência à compressão requerida no concreto leve autoadensável com a relação água/cimento.

**Figura 18 - Gráfico para obtenção da relação a/c no método proposto por Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)**



**Fonte:** Adaptado de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

Além disso, a determinação da relação volumétrica de materiais finos pelo agregado miúdo ( $V_p/V_s$ ) igual a 0,8 é para maximizar o volume de agregado graúdos leves e, conseqüentemente, diminuir o peso do concreto.

Com relação ao teor de adição mineral, os autores definem equações para misturas binárias de cimento e fíler calcário ou cimento e cinza volante. Por fim, o último item da fase de argamassa é a determinação do teor de aditivo superplastificante e da relação água/materiais cimentícios. A definição dessas variáveis é feita de modo a alcançar as características de autoadensabilidade através dos ensaios de espalhamento pelo mini tronco de cone e tempo de escoamento para argamassas no Funil V.

Com a realização dos ensaios é possível obter os parâmetros de autoadensabilidade: área relativa de espalhamento ( $G_m$ ) e escoamento relativo ( $R_m$ ). Os autores afirmam que, empiricamente, deve-se variar o teor de aditivo superplastificante e a relação água/materiais cimentícios de modo a alcançar valores de  $G_m$  e  $R_m$  dentro do intervalo apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8** - Limites de autoadensabilidade em argamassa de acordo com Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

Área relativa de espalhamento	Escoamento relativo
$5,3 \leq G_m \leq 5,9$	$1,14 \leq R_m \leq 1,30$

Fonte: Adaptado de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

Os autores afirmam que os limites de autoadensabilidade propostos em argamassas para a produção de concretos leves autoadensáveis são os mesmos que utilizados para concretos autoadensáveis de peso normal, porém para que o concreto leve produzido atinja as características necessárias é preciso contabilizar a água de absorção do AGL na água de amassamento do concreto.

Ao passar para a fase de concreto, o primeiro passo do método é determinar a composição de agregado gráudo leve que terá o menor índice de vazios para, em seguida utilizar a Equação 3 para determinação do volume de argamassa com relação ao volume de agregado gráudo ( $V_m/V_g$ ), considerando um volume de vazios do concreto de  $0,03 \text{ m}^3$ .

$$\frac{V_m}{V_g} = \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2} \times \frac{1,2214 - 1,3605\left(\frac{H_2}{H_1}\right) + 1,3099\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 - 0,001758(D_m)}{1 - 1,0184\left(\frac{H_2}{H_1}\right) + 1,0855\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 - 0,001524(D_m)}, \quad (3)$$

na qual  $\frac{V_p}{V_s}$  é a relação de materiais cimentícios por agregado miúdo,  $\frac{H_2}{H_1}$  é o valor estimado para o ensaio da Caixa em L e  $D_m$  é o valor do diâmetro do espalhamento da argamassa aplicada.

Determinando o volume de agregado graúdo ( $V_m/V_g$ ), o concreto deve ser produzido e suas propriedades no estado fresco avaliadas para verificação se o mesmo atende as características de autoadensabilidade mínimas.

O método foi validado com a produção de concretos leves autoadensáveis com massas específicas entre 1698 e 1834 kg/m<sup>3</sup>, resistência à compressão aos 28 dias entre 34,9 e 56,4 MPa.

Dessa maneira, após a apresentação dos métodos de dosagem, o próximo item da revisão bibliográfica discorre acerca das propriedades no estado fresco para o concreto leve autoadensável.

#### 2.2.4 Caracterização no Estado Fresco

Como a produção do concreto leve autoadensável não possui referências normativas para os resultados em estado fresco, acredita-se que, para garantir as características de autoadensabilidade, o CLAA deve pelo menos alcançar o proposto pela norma ABNT NBR 15823/2017.

A Tabela 9 contém os ensaios no estado fresco realizados em concreto leve autoadensável apresentadas nos trabalhos contidos na Tabela 4 e a Figura 19 apresenta a frequência com que cada ensaio foi realizado.

**Tabela 9** - Ensaios para avaliação das propriedades no estado fresco de concretos leves autoadensáveis por diversos autores

Ref.	Ensaios em fresco
1	<i>Slump flow</i>
2	<i>Slump flow</i> , funil V, caixa em L, caixa em U, teste de segregação, teste de assentamento e coluna de segregação
3	<i>Slump flow</i> , T500, estabilidade visual, funil V, funil V após 5 minutos e massa específica
4	<i>Slump flow</i> , T500, funil V e caixa em U
5	<i>Slump flow</i>
6	<i>Slump flow</i> e caixa em L
7	<i>Slump flow</i> , funil V, caixa em L, teor de ar incorporado e massa específica
8	<i>Slump flow</i> , anel J, ar incorporado e massa específica
9	<i>Slump flow</i> , anel J, caixa em L e funil V
10	<i>Slump flow</i> , funil V, caixa em L, caixa em U e coluna de segregação

\**Continua*

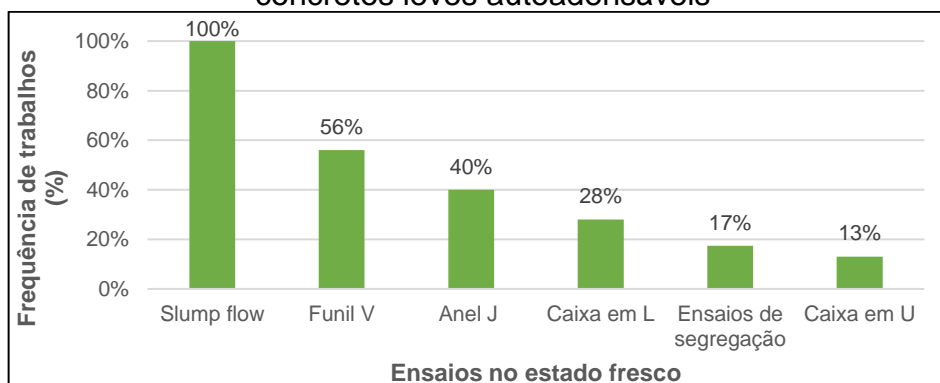
**Tabela 9** – Ensaio para avaliação das propriedades no estado fresco de concretos leves autoadensáveis por diversos autores

\*Continuação

Ref.	Ensaio em fresco
11	<i>Slump flow</i> , T500, funil V, funil V após 5 minutos, massa específica e teor de ar incorporado
12	<i>Slump flow</i> , T500, funil V e caixa em L
13	<i>Slump flow</i> , funil V e anel J
14	<i>Slump flow</i> , T500, funil V, caixa em L, peneira de segregação e coluna de segregação
15	<i>Slump flow</i> , anel J e coluna de segregação
16	<i>Slump flow</i> , anel J, T500, massa específica e estabilidade visual
17	<i>Slump flow</i> , anel J, caixa em L e funil V
18	<i>Slump flow</i> , anel J e caixa em U
19	<i>Slump flow</i> , <i>slump flow</i> invertido, funil V, absorção de água e massa específica
20	<i>Slump flow</i> , anel J, caixa L, funil V, coluna de segregação, T500, teor de ar incorporado e massa específica
21	<i>Slump flow</i> , T500, anel J e funil V
22	<i>Slump Flow</i> , Funil V e caixa em L
23	<i>Slump flow</i> e anel J
24	<i>Slump flow</i> , T500, anel J, funil V e caixa em U
25	<i>Slump flow</i> , anel J, funil V e caixa em L

Fonte: A Autora

**Figura 19** - Frequência dos ensaios no estado fresco realizados na produção de concretos leves autoadensáveis



Fonte: A Autora

Constata-se que o *slump flow* teste é realizado em todos os trabalhos e que, o segundo ensaio com maior frequência é o Funil V, sendo este último analisado em aproximadamente metade das pesquisas.

Bogas, Gomes e Pereira (2012) ao produzirem concretos leve autoadensáveis com argila expandida concluíram que os testes para avaliar a habilidade passante não são determinantes para a caracterização do material, pois os agregados utilizados são de tamanho reduzido.

A seguir, são apresentados o estudo da arte acerca dos ensaios de espalhamento (*slump flow*), Anel J, Funil V e Caixa em L para concretos autoadensáveis produzidos com agregado graúdo leve.

#### 2.2.4.1 Ensaio de espalhamento - *Slump flow* teste

O *slump-flow* teste é utilizado para medir o espalhamento do concreto autoadensável, indicando sua fluidez – capacidade do mesmo de fluir livremente sem segregar – e sua habilidade de preenchimento em fluxo livre (VERZEGNASSI, 2015).

Para realização segundo a ABNT NBR 15823-2/2017 utiliza-se o cone de Abrams sobre uma placa metálica de 900x900 mm com marcações de referência com diâmetros de 200 mm e 500 mm.

Segundo a ABNT NBR 15823/2017 o concreto autoadensável de peso normal pode possuir três classificações de acordo com seu espalhamento no estado fresco, tais classificações indicam para quais tipos de estruturas o material estará mais adequado. A classificação do mesmo segundo o seu espalhamento pode ser visualizada na Tabela 10.

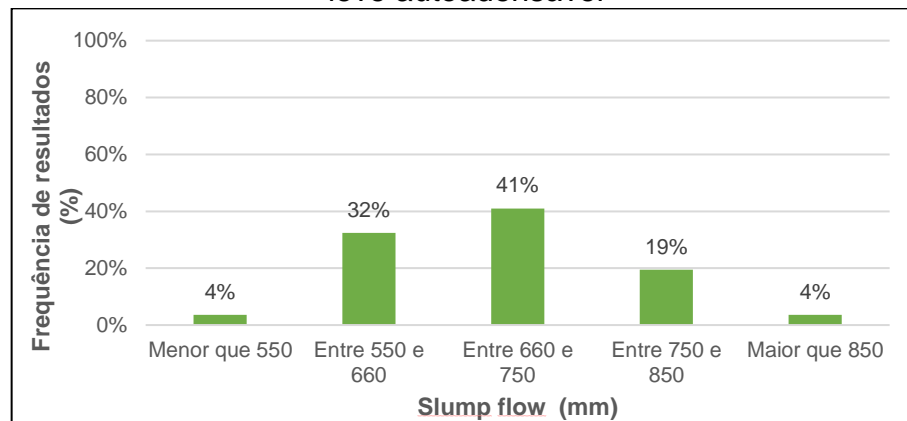
**Tabela 10** - Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio o slump flow em concretos autoadensáveis

Classes de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura, cuja concretagem é realizada do ponto mais alto, com deslocamento livre. Estruturas com curta distância de espalhamento horizontal	Lajes Estacas Certas fundações profundas
SF2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes Vigas Pilares
SF3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com uso de agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-parede Paredes-diafragma Pilares

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15823-1/2017

A Figura 20 apresenta os resultados de *slump flow* teste de 139 misturas produzidas pelas pesquisas contidas nos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 20** - Resultados da revisão sistemática para o *slump flow* teste de concreto leve autoadensável



**Fonte:** A Autora

Verifica-se a partir da Figura 20 que a maioria das misturas alcançam a classe de espalhamento SF2 da ABNT NBR 15823-1/2017 sendo considerado adequada para a maioria das aplicações. Além disso, apenas 4% das misturas obtiveram valores inferiores ou superiores do recomendado pela referida norma.

Borja (2011) ao estudar dois tipos de adição – cinza volante e metacaulim – em concretos leves autoadensáveis com argila expandida como agregado graúdo obteve espalhamentos a partir de 550 mm. Enquanto que Verzgnassi (2015) ao produzir CLAA's com filito em pó como adição mineral e argila expandida como agregado graúdo leve obteve espalhamentos superiores à 620 mm.

Afzali-Naniz e Mazloon (2018) estudaram a adição secundária e terciária de nanosílica coloidal (NS) e microsílica (MS) em relação ao volume de cimento em concretos leves autoadensáveis com argila expandida obtendo espalhamentos na faixa de 560 a 785 mm. Além disso, os autores afirmam que quando a relação água/cimento foi mantida constante, a substituição do cimento por MS e NS levou a um aumento na dosagem de superplastificante e esse aumento depende da quantidade de adição aplicada. A adição combinada de MS e NS, misturas ternárias, precisa de maior quantidade de superplastificante para obter a trabalhabilidade desejada.

Topçu e Uygunoğlu (2010) ao estudarem a influência do tipo de agregado graúdo leve na produção de CLAA afirmam que o espalhamento do concreto aumenta conforme há um acréscimo da relação água/cimento, independentemente do tipo de agregado leve utilizado, pois o incremento da relação a/c leva à melhora da lubrificação entre as partículas, o que facilita o escoamento.

Bogas, Gomes e Pereira (2012) afirmam que a pré-saturação do agregado graúdo leve faz com que o mesmo não tenha tanta influência na perda de fluidez já que, deste modo, o mesmo não absorve a água presente na mistura.

Graças a essa característica do AGL de absorver a água presente na mistura, podendo diminuir a fluidez do material também recomenda-se a utilização de agregados esféricos com menor absorção de água para resultar em melhores características de autoadensabilidade (KIM, CHOI e LACHEMI, 2010; YANG et. al, 2015).

Além da indicação da fluidez, o ensaio de *slump flow* determina o tempo que o material leva para alcançar a marca de 500mm ( $T_{500}$ ). O ensaio de  $T_{500}$  pode ser considerado como um indicativo da viscosidade do concreto.

Como a viscosidade é uma propriedade de difícil medição em obra, a ABNT NBR 15823/2017 apresenta os ensaios de medição de tempo de fluxo ( $T_{500}$  e Funil V) para a avaliação da mesma classificando-os em classes de viscosidade plástica aparente.

Para o ensaio  $T_{500}$ , as classes de viscosidade plástica aparente indicadas pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017) estão apresentadas na Tabela 11.

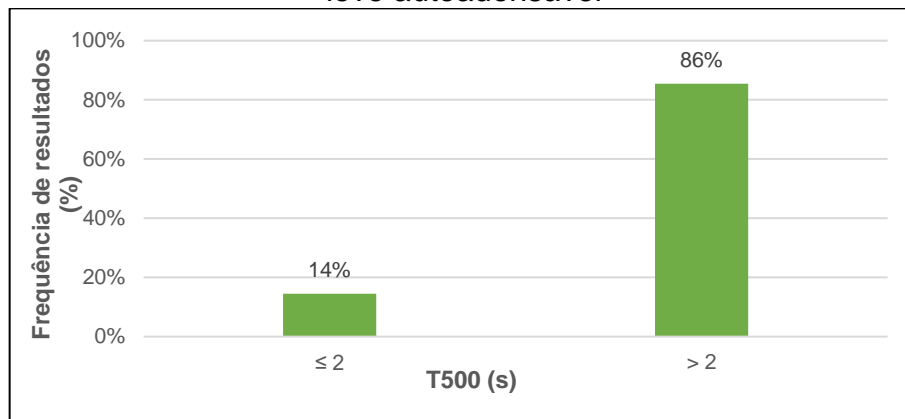
**Tabela 11** - Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio de  $T_{500}$  em concretos autoadensáveis

Classes de viscosidade plástica aparente	Tempo (s)	Aplicação	Exemplo
VS1	$\leq 2$	Elementos estruturais com alta densidade de armadura, requerendo controle de exsudação e segregação. Concretagens realizadas do ponto mais alto com deslocamento livre	Pilares-parede Paredes-diafragma Indústria de pré-moldado Concreto aparente
VS2	$> 2$	Adequado para a maioria das aplicações correntes.	Vigas Lajes

**Fonte:** Adaptado ABNT NBR 15823-1/2017

Com relação ao ensaio  $T_{500}$ , a Figura 21 apresenta a frequência de resultados obtidos com 69 misturas de CLAA produzidas pelos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 21** - Resultados da revisão sistemática para o ensaio de  $T_{500}$  de concreto leve autoadensável



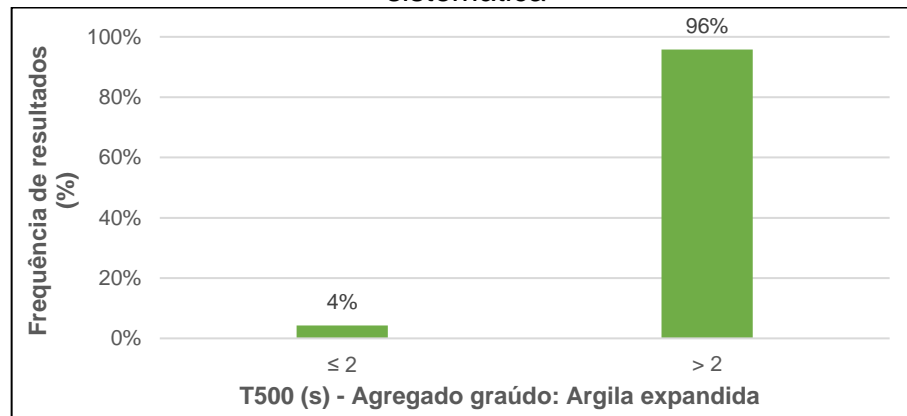
**Fonte:** A Autora

Pode-se notar, na Figura 21, que a maioria das misturas possuem valores de escoamento acima de 2 segundos, tais resultados classificam as misturas como adequadas para a maioria das aplicações de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

O guia europeu para concretos autoadensáveis – EFNARC (2005) –, assim como a norma brasileira, indicam que não há valor máximo para essa característica. Além disso, também afirma que o aumento do tempo de fluxo irá apresentar efeitos tixotrópicos que podem melhorar a resistência à segregação, porém o mesmo efeito irá prejudicar o acabamento superficial.

Das 69 misturas contidas na Figura 21, 47 foram produzidas utilizando argila expandida como agregado graúdo leve e seus resultados para o ensaio  $T_{500}$  podem ser visualizados na Figura 22.

**Figura 22** - Resultados do ensaio T500 para CLAA com argila expandida da revisão sistemática



**Fonte:** A Autora

Observa-se, na Figura 22, que o concreto leve autoadensável produzido com argila expandida possui a mesma tendência de resultados da Figura 21, ou seja, em sua grande maioria (96% das misturas) o CLAA com argila expandida alcança resultados satisfatórios para o ensaio T500 podendo ser considerado como aplicável para a maioria das estruturas correntes segundo a ABNT NBR 15823/2017.

De modo geral, pode-se afirmar que a utilização da argila expandida como agregado graúdo não prejudicou a resistência à segregação do material, porém é importante afirmar que aproximadamente metade dos autores realizam a pré-saturação do agregado.

#### 2.2.4.2 Anel J

O ensaio do anel J permite avaliar a habilidade passante do concreto autoadensável. Habilidade passante, segundo a ABNT NBR 15823-1/2017, é a capacidade do concreto de fluir sem perder sua uniformidade ou causar bloqueio através das formas e armaduras.

De maneira semelhante aos ensaios apresentados anteriormente, a NBR 15823 (ABNT, 2017) também apresenta classificações para a diferença ( $d_{jf}$ ) entre o diâmetro médio do *slump-flow* e o diâmetro médio obtido no ensaio de anel J. Tal classificação pode ser visualizada na Tabela 12.

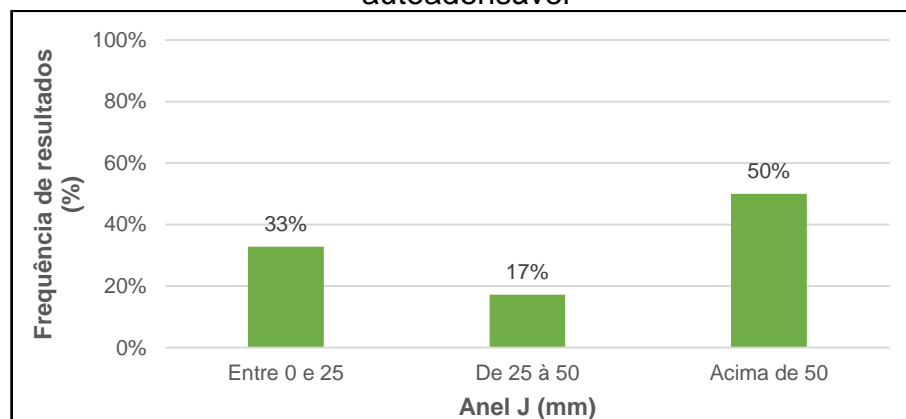
**Tabela 12** - Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio de Anel J em concretos autoadensáveis

Classes de habilidade passante	Anel J (mm)	Aplicação	Exemplo
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamento de armadura de 60 mm a 80 mm	Vigas Pilares Tirantes Pré-fabricados
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço	Adequado para a maioria das aplicações correntes.	Lajes Painéis Elementos de fundação

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15823-1/2017

A Figura 23 apresenta os resultados do  $d_{fr}$  para o ensaio do anel J para 64 misturas de concreto leve autoadensável apresentados pelos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 23** - Resultados da revisão sistemática para o Anel J de concreto leve autoadensável



Fonte: A Autora

Verifica-se, através da Figura 23, que a maioria das misturas possuem  $d_{fr}$  superiores a 50 mm, resultado acima do indicado pela ABNT NBR 15823-1/2017. Tal resultado não é discutido pelos autores, pois a EFNARC (2005) – guia internacional para concretos autoadensáveis – não apresenta um limite máximo como a norma brasileira.

#### 2.2.4.3 Funil V

O ensaio do Funil V, segundo a ABNT NBR 15823-2/2017, é utilizado para avaliar a viscosidade plástica aparente do concreto autoadensável, assim como o

ensaio T<sub>500</sub>, e é importante quando for requerido um bom acabamento superficial da estrutura ou quando há uma alta taxa de armadura.

Além disso, o ensaio consegue avaliar, qualitativamente, a resistência à segregação do concreto no funil; sendo que tempos de escoamentos muito elevados podem indicar segregação da mistura no bocal de saída do equipamento (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

As classificações da norma brasileira de concretos autoadensáveis, NBR 15823-1 (ABNT, 2017), para o ensaio Funil V estão apresentadas na Tabela 13.

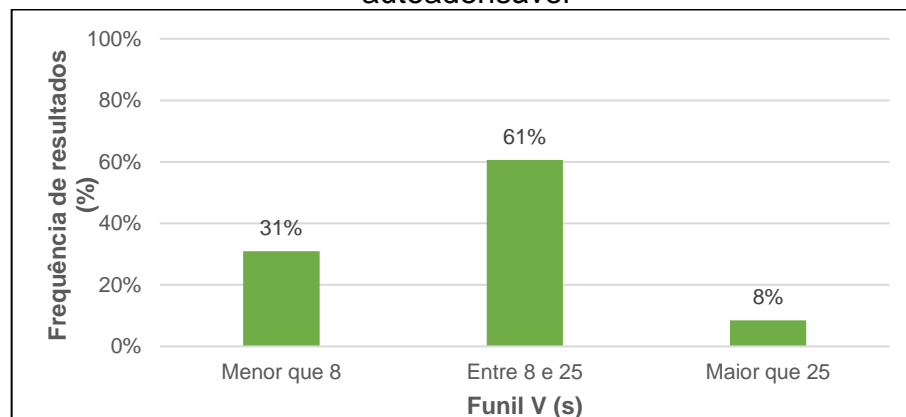
**Tabela 13** - Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio de Funil V em concretos autoadensáveis

Classes de viscosidade aparente	Funil V (s)	Aplicação	Exemplo
VF1	≤ 8	Elementos estruturais com alta densidade de armadura, requerendo controle de exsudação e segregação. Concretagens realizadas do ponto mais alto com deslocamento livre	Pilares-parede Paredes-diafragma Indústria de pré-moldado Concreto aparente
VF2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes.	Vigas Lajes

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15823-1/2017

A Figura 24 apresenta os resultados do tempo de escoamento no Funil V de 71 misturas produzidas pelos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 24** - Resultados da revisão sistemática para o Funil V de concreto leve autoadensável



Fonte: A Autora

Distingue-se, na Figura 24, que a maioria das misturas de concreto leve autoadensável possuem resultados satisfatórios de viscosidade plástica, já que as mesmas são classificadas como adequada para a maioria das aplicações segundo a ABNT NBR 15823-1/2017.

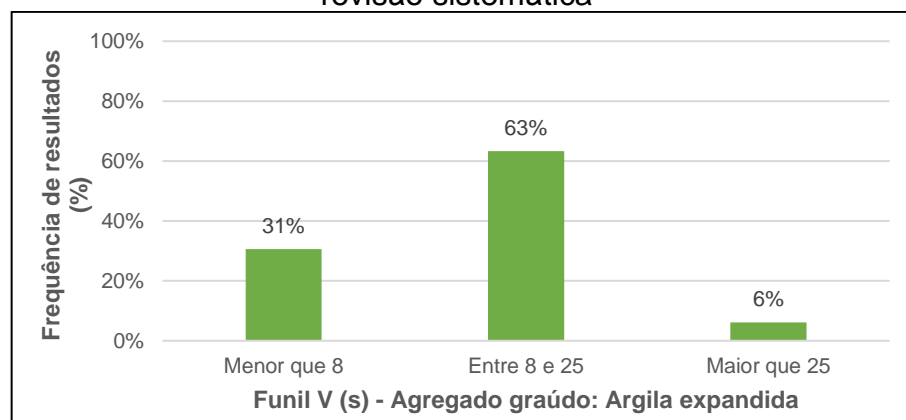
Na Figura 23 também é possível observar que 8% das misturas relatadas nas pesquisas obtiveram valores acima dos 25 segundos, tal resultado pode ser comumente encontrado em concretos com agregado graúdo leve (AGL), pois o peso reduzido da mistura devido a presença do AGL pode diminuir a velocidade de escoamento do material (ERDEM, 2014).

Utilizando-se da argila expandida como agregado graúdo, Borja (2011) atinge a classificação VF1 em todas as suas misturas de concreto leve autoadensável, ou seja, o material produzido pelos autores é adequado para concretagens em elementos altos com deslocamento livre, necessitando cuidados com exsudação e segregação.

Valores semelhantes ao encontrado por Borja (2011) pode ser visto nas misturas produzidas por Maghsoudi; Mohamadpour; Maghsoudi (2011), nas quais os autores produziram dois concretos leves autoadensáveis com argila expandida e adições de sílica ativa e pó de calcário, obtendo valores de tempo de escoamento de 5 e 5,5 segundos.

Porém, o resultado mais comumente encontrado para o tempo de escoamento de concretos leves autoadensáveis com argila expandida como agregado graúdo é entre 8 e 25 segundos, como pode ser visualizado na Figura 25.

**Figura 25 -** Resultados do ensaio de Funil V para CLAA com argila expandida da revisão sistemática



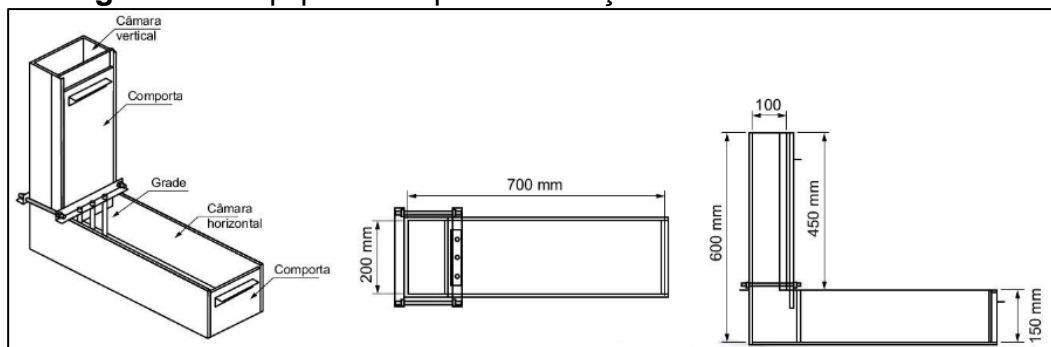
Fonte: A Autora

Constata-se, na Figura 25, que o gráfico possui a mesma tendência da Figura 24, ou seja, a utilização da argila expandida em detrimento dos outros tipos de agregados leves não aparenta influenciar de forma significativa no tempo de escoamento do material.

#### 2.2.4.5 Caixa em L

A caixa em L avalia a habilidade passante em fluxo confinado e, para tanto, o equipamento utilizado é composto de uma caixa com dois compartimentos, um horizontal e outro vertical, separados por uma comporta e duas ou três barras metálicas lisas de diâmetro  $12,5 \pm 0,2$  mm uniformemente distribuídas. O equipamento pode ser visualizado na Figura 26.

**Figura 26** - Equipamento para realização do ensaio da Caixa em L



Fonte: ABNT NBR 15823-4/2017.

Neste ensaio obtém-se a habilidade passante (HP), isto é, a razão entre as alturas do concreto no compartimento vertical ( $H_1$ ) e no compartimento horizontal ( $H_2$ ) de acordo com a Equação 4.

$$HP = \frac{H_2}{H_1} \quad (4)$$

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017) apresenta as classificações para os resultados obtidos no ensaio da caixa em L, como apresentado na Tabela 14.

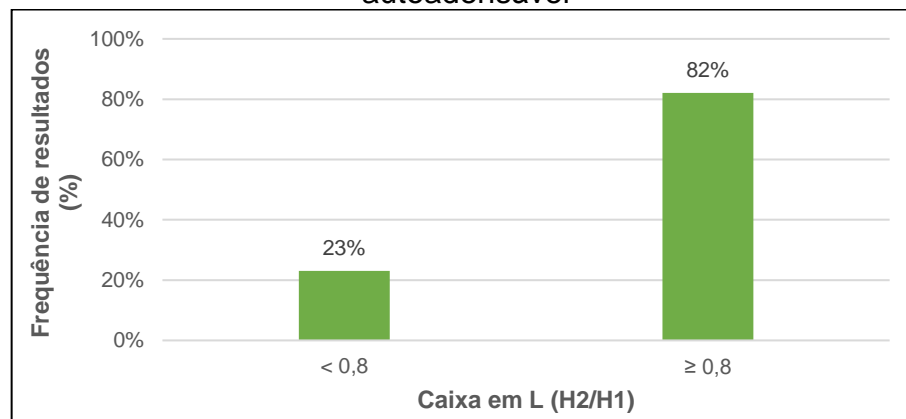
**Tabela 14** - Classificação da ABNT NBR 15823-1/2017 para ensaio de Caixa L em concretos autoadensáveis

Classes de habilidade passante	Caixa em L (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	Aplicação	Exemplo
PL1	≥ 0,8 com duas barras de aço	Adequada elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 mm a 100 mm	Lajes Painéis Elementos de fundação
PL2	≥ 0,8 com três barras de aço	Adequado para a maioria das aplicações correntes.	Vigas Pilares Tirantes Pré-fabricados

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15823-1/2017

A Figura 27 contém o comportamento de 41 misturas de concreto leve autoadensável produzidas pelos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 27** - Resultados da revisão sistemática para a Caixa em L de concreto leve autoadensável



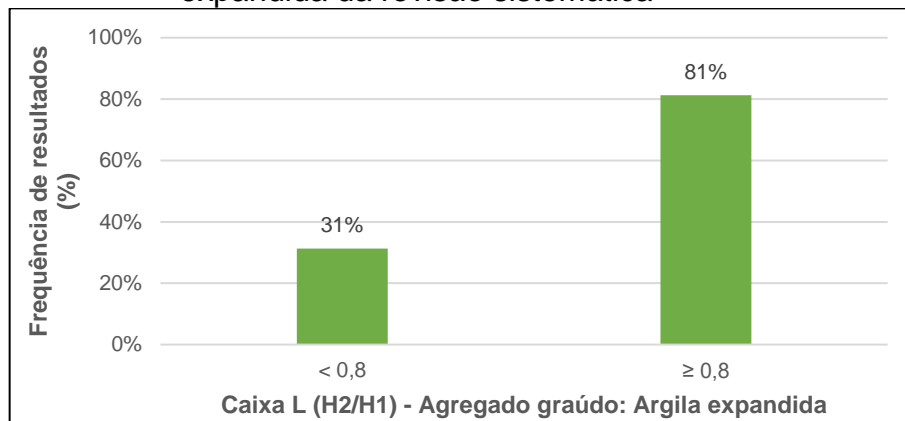
Fonte: A Autora

É importante mencionar que maiores valores da relação H<sub>1</sub>/H<sub>2</sub> indicam melhores habilidades passantes da mistura (CUI; LO; XING, 2010). Consta-se, na Figura 27, que a maioria das misturas de concreto leve autoadensável produzida pelos diversos autores possuem a relação H<sub>1</sub>/H<sub>2</sub> maiores que 0,8 e dentro do indicado pela ABNT NBR 15823-1/2017.

Além disso, Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018), ao desenvolverem sua metodologia de dosagem para CLAA, observaram que todas as misturas de concreto leve autoadensáveis produzidas tiveram resultados satisfatórios na caixa em L desde que a absorção de água do agregado leve fosse contabilizada na quantidade de água da mistura.

A Figura 28 apresenta os resultados da Caixa em L para os concretos leves autoadensáveis dos trabalhos referenciados na Tabela 4 que utilizaram argila expandida na produção.

**Figura 28** - Resultados do ensaio da Caixa em L para CLAA com argila expandida da revisão sistemática



Fonte: A Autora

Verifica-se, na Figura 28, que o gráfico possui a mesma tendência da Figura 27, ou seja, a utilização da argila expandida em detrimento dos outros tipos de agregados leves não aparenta influenciar de forma significativa no escoamento do material em fluxo confinado.

#### 2.2.5 Propriedades no Estado Endurecido

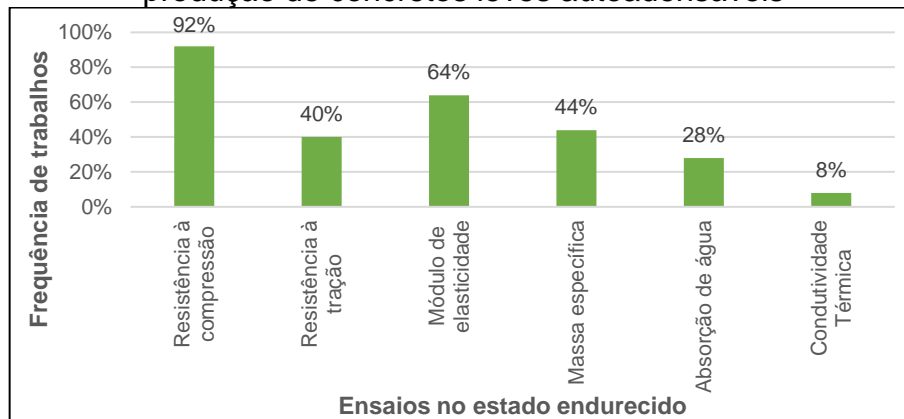
A utilização de agregados leves para a produção do CLAA irá influenciar diretamente nas propriedades no estado endurecido (AZARIJAFARI et al. 2018). A baixa resistência dos agregados leves dificulta a produção de concretos de alta resistência à compressão, mas é possível alcançar valores para utilização em concretos estruturais (FLOYD; HALE; BYMASTER, 2015). Na Tabela 15, estão apresentadas as propriedades estudadas para concretos leves autoadensáveis pelos autores citados na Tabela 4 e na Figura 29 a frequência dos mesmos.

**Tabela 15 - Ensaio para avaliação das propriedades no estado endurecido de concretos leves autoadensáveis por diversos autores**

Ref.	Ensaio no estado endurecido
1	Resistência à compressão, resistência elétrica, permeabilidade à íons cloreto
2	-
3	Resistência à compressão
4	Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático
5	Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático, abrasão, porosidade, absorção de água
6	Resistência à compressão, massa específica, módulo de elasticidade estático
7	Resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios, porosidade, massa específica e módulo de elasticidade dinâmico
8	Resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, massa específica
9	Resistência à compressão, massa específica, módulo de elasticidade estático
10	Resistência à compressão, massa específica, módulo de elasticidade estático
11	Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático, massa específica, absorção de água, volume de vazios, resistência em elevadas temperaturas
12	Resistência à compressão, adsorção
13	Resistência à compressão, resistência à corrosão, índice de vazios, análise de fratura, análise de segregação
14	Resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, retração, fluência
15	Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à flexão, módulo de elasticidade estático
16	Resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, retração
17	Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático, absorção de água, massa específica
18	Resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade estático
19	Resistência à compressão, massa específica, módulo de elasticidade estático, comportamento tensão-deformação, calor específico, condutividade térmica, difusividade térmica, retração
20	Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático, massa específica, absorção de água, carbonatação e condutividade térmica
21	Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral
22	Resistência à compressão, massa específica
23	Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático, análise de fratura em vigas
24	Resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, absorção de água
25	Resistência à compressão, massa específica e absorção de água

Fonte: A Autora

**Figura 29 -** Frequência dos ensaios mais realizados no estado endurecido na produção de concretos leves autoadensáveis



Fonte: A Autora

Observa-se, na Figura 29, que a resistência à compressão é a propriedade mais avaliada pelos autores no estado endurecido, a mesma só não teve seus valores determinados em um único trabalho, o qual estava focado em determinar as propriedades no estado fresco das misturas produzidas.

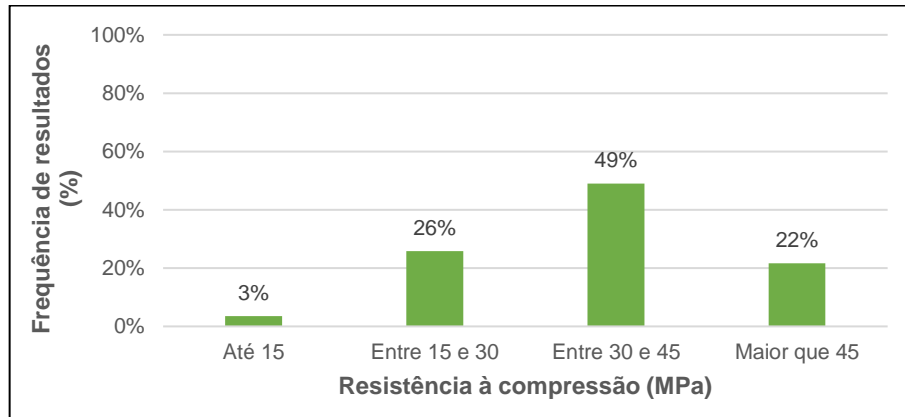
Além disso, é importante mencionar que por se tratar de um concreto leve, a massa específica foi determinada por todos os autores, porém alguns fazem a sua determinação ainda em fresco, explicando a baixa frequência dessa propriedade na Figura 29.

Também é importante mencionar que há uma grande variedade de características no estado endurecido avaliadas pelos diversos autores, como pode-se observar na Tabela 15. Portanto, esta seção apresentará as características de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade estático, massa específica e absorção de água, pois estas são as principais propriedades avaliadas neste trabalho.

#### 2.2.5.1 Resistência à compressão e resistência à tração

Considerando os trabalhos em concreto leve autoadensável apresentados na Tabela 4, os valores de resistência à compressão variam entre 12 e 54 MPa. Na Figura 30 é possível observar a distribuição das resistências à compressão de 143 misturas produzidas pelos dos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 30** - Resultados da revisão sistemática para a resistência à compressão de concreto leve autoadensável



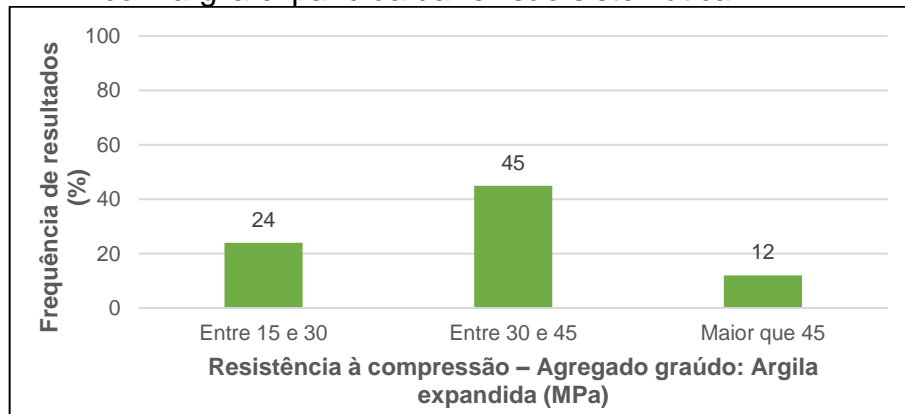
Fonte: A Autora

Topçu e Uygunoglu (2010) afirmam que o agregado leve influencia em todas as propriedades mecânicas do concreto leve autoadensável e que a redução da resistência mecânica quando comparado com concretos autoadensáveis de peso normal está relacionada a baixa resistência do agregado.

Apesar da afirmação dos autores acima, identifica-se na Figura 30 que apesar da utilização do agregado leve, a maioria das misturas possuem resistência entre 30 e 45 MPa, podendo ainda ser encontrado misturas que superam os 45 MPa.

A argila expandida é o agregado leve mais utilizados pelos autores apresentados na Tabela 4 e, por isso, 81 das 143 misturas foram produzidas com esse agregado leve. Na Figura 31 é possível visualizar a frequência de resultados encontrados pelos autores referenciados na Tabela 4 que produziram concretos leves autoadensáveis com argila expandida como agregado graúdo leve.

**Figura 31** - Resultados do ensaio da resistência à compressão para CLAA com argila expandida da revisão sistemática



Fonte: A Autora

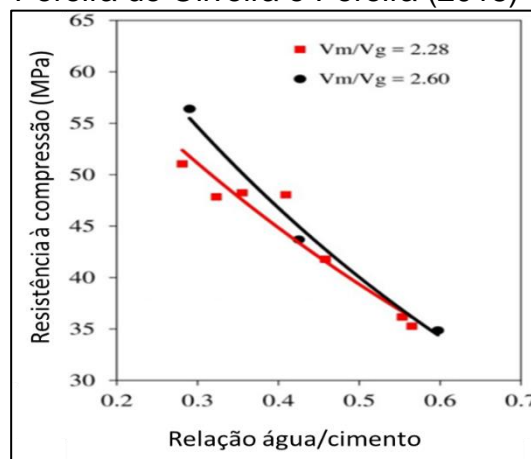
Os trabalhos com argila expandida como agregado graúdo reportam resistências variando entre 20,8 e 51,7 MPa e, como pode ser visualizado na Figura 31, com a maioria dos valores contidos entre 30 e 45 MPa.

Verzegnassi (2015) em seus estudos observou que a utilização da argila expandida como agregado leve na produção de concretos autoadensáveis resultou em resistências 11% a 52% menores do que quando utilizado o agregado convencional.

Assunção (2016) ao estudar diferentes porcentagens de substituições do agregado de massa específica normal pelo agregado leve – argila expandida – observou que a diminuição da resistência ocorre de forma independente da quantidade de argila substituída, não identificando um padrão para os resultados de resistência à compressão.

Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) estudaram concretos leves autoadensáveis com argila expandida como AGL produzindo diferentes misturas com diferentes relações volumétricas de agregado graúdo com relação à argamassa e com diferentes relações água/cimento. Os resultados desses autores podem ser visualizados na Figura 32.

**Figura 32** - Resultados de resistência à compressão da pesquisa de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)



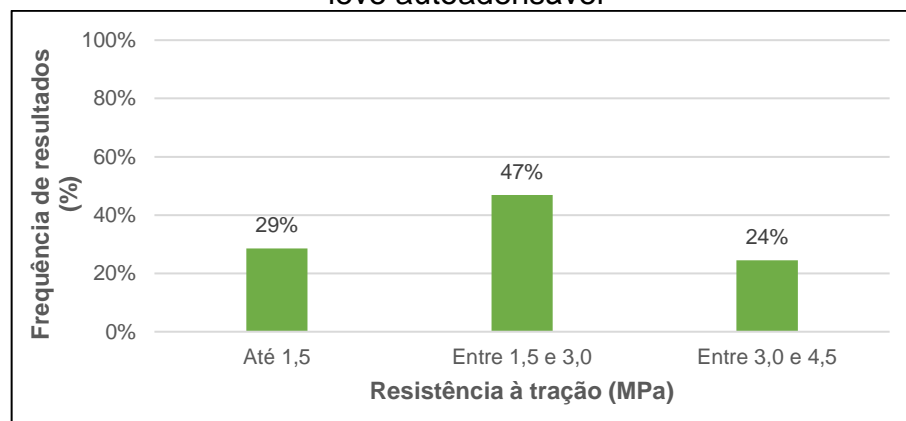
Fonte: Adaptado de Nepomuceno, Pereira de Oliver e Pereira (2018).

Os autores então observaram que a relação volumétrica entre o agregado graúdo ( $V_g$ ) e argamassa ( $V_m$ ) gera maior influência na resistência à compressão quando a relação água/cimento é menor, uma vez que a menor resistência ao

esmagamento do agregado graúdo leve tem maior impacto na medida que a resistência aumenta.

Com relação à resistência à tração, a Figura 33, apresenta a resistência à tração dos concretos leves autoadensáveis observadas em 49 misturas dos trabalhos referenciados na Tabela 15.

**Figura 33** - Resultados da resistência à tração para diversas misturas de concreto leve autoadensável



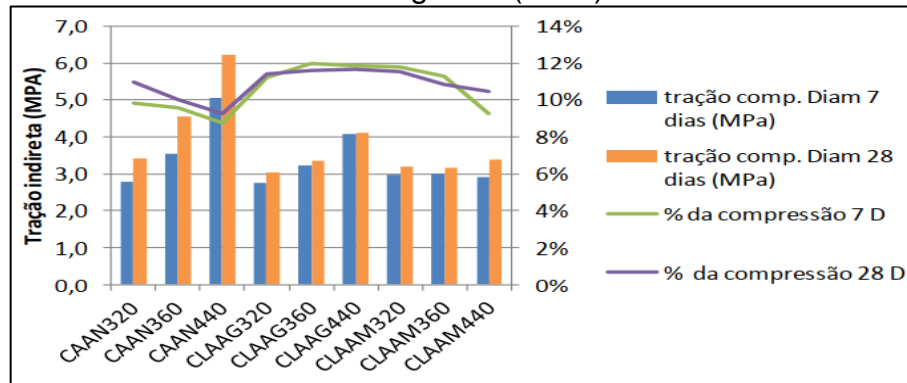
Fonte: A Autora

Nota-se, na Figura 33, que as resistências à tração encontradas não apresentam a mesma tendência de frequência da resistência à compressão apresentada na Figura 30. Isto é justificado pelo fato de que nem todos os trabalhos contidos na Figura 30 obtiveram as resistências à tração de suas misturas, portanto, o número de misturas de concreto leve autoadensável das duas propriedades não é o mesmo.

Dos autores apresentados na revisão sistemática que realizaram estudos com argila expandida como agregado graúdo leve, apenas Yang et al. (2015), Verzeznassi (2015), Karamloo, Mazloom e Payganeh (2016) e Mazloon e Salehi (2018) determinam as resistências à tração dos concretos leves autoadensáveis produzidos.

Entre esses, importante destacar o trabalho de Verzeznassi (2015) que estuda o concreto leve autoadensável com argila expandida apenas como agregado graúdo, ou como agregado graúdo e substituição parcial do agregado miúdo, além disso, o autor também realizou a produção de concretos autoadensáveis de peso normal para comparação das propriedades. Na Figura 34 é possível visualizar os resultados do autor para a resistência à tração das diversas misturas estudadas.

**Figura 34 - Resultados de resistência à tração da pesquisa produzida por Verzeznassi (2015)**



Fonte: Verzeznassi (2015)

Na Figura 34 o autor utiliza da nomenclatura CAAN para concretos autoadensável de peso normal e CLAA para concretos leves autoadensáveis, em seguida o mesmo distingue as amostras de acordo com o consumo de cimento de cada concreto.

O autor então afirma que ao observar relação entre as resistências à tração com a resistência à compressão para o mesmo traço, o desempenho dos concretos autoadensáveis com agregado graúdo leve é proporcionalmente maior que os traços com agregado graúdo convencional. Além disso, também foi observado que houve pouca variação entre os resultados de 7 e 28 dias para todos os traços de CLAA.

### 2.2.5.3 Módulo de elasticidade estático

Mehta e Monteiro (2014) definem o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) como a razão entre tensão e a deformação reversível. O  $E_c$  do concreto está associado às deformações estruturais que em excesso podem causar fissuras, gerando manifestações patológicas, podendo influenciar na vida útil do material (SANTOS et al., 2017).

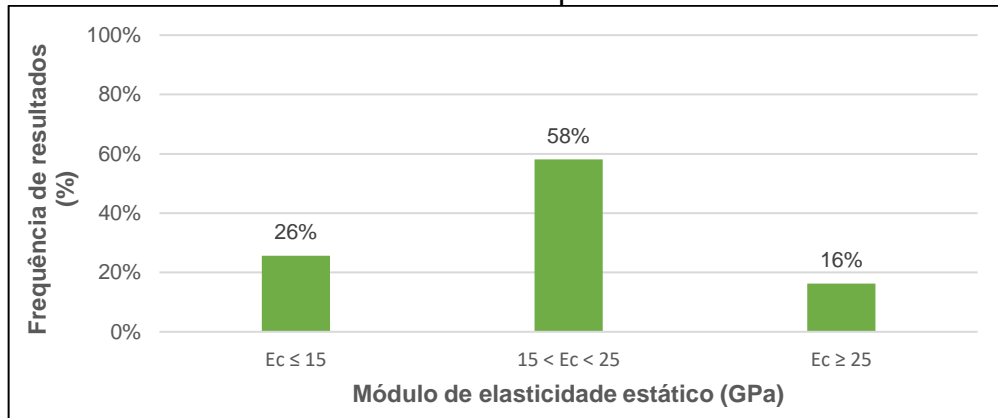
O módulo de elasticidade do concreto depende do módulo de elasticidade da matriz de cimento hidratado, do tipo de agregado, da relação água/aglomerante e do volume de cimento (TOPÇU; UYGUNOĞLU, 2010).

Os agregados graúdos constituem considerável parte do volume do concreto, portanto o módulo de elasticidade destes tem grande influência no módulo de elasticidade do concreto (VERZEGNASSI, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2014; ANDIÇ-

ÇAKIR e HIZAL, 2012). Além disso, agregados mais densos tendem a ter módulo de elasticidade mais elevados (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Na Figura 35 é possível observar a distribuição do módulo de elasticidade estático das 74 misturas produzidas pelos dos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 35 - Resultados da revisão sistemática para o módulo de elasticidade do CLAA**



Fonte: A Autora

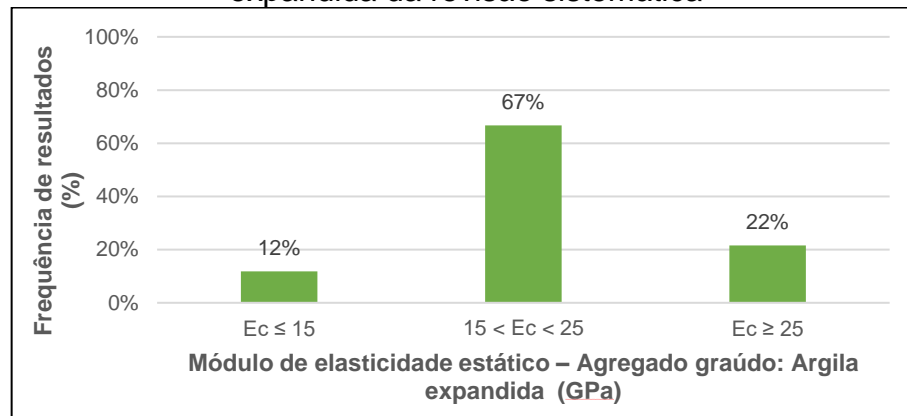
Constata-se, na Figura 35, que a maioria das misturas de concreto leve autoadensável possuem módulo de elasticidade entre 15 e 25 MPa, sendo pouco relatado misturas que superaram 25 MPa.

Lo et al. (2007) afirmam que o módulo de elasticidade do concreto leve autoadensável é 80% do encontrado no concreto autoadensável de massa normal, porém o CLAA possui maior módulo do que o concreto leve comum.

Além disso, Topçu e Uygunoglu (2010) afirmaram que o aumento da relação água/cimento gera um decréscimo substancial do módulo de elasticidade estático dos concretos leves autoadensáveis estudados.

Das 74 misturas da revisão sistemática que estudaram módulo de elasticidade estático, 51 eram constituídas de misturas em argila expandida e a distribuição dos resultados de  $E_c$  podem ser visualizadas na Figura 36.

**Figura 36 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade para CLAA com argila expandida da revisão sistemática**

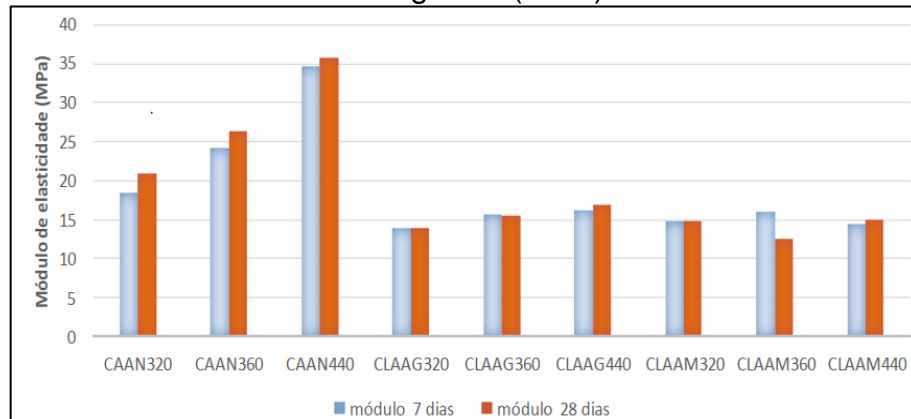


**Fonte:** A Autora

Visualiza-se, na Figura 36, que a tendência de resultados é a mesma presente na Figura 35 já que a argila expandida está presente na maioria das misturas, porém é possível notar que houve uma diminuição na proporção de resultados do módulo de elasticidade inferior a 15 MPa e um aumento na proporção de resultados maioria que 25 MPa. Isto pode ser um indicativo de que a utilização da argila expandida como agregado graúdo gera menor redução nesta propriedade do que os outros agregados graúdos leves.

Verzegnassi (2015) ao comparar o concreto autoadensável de peso normal com o concreto leve autoadensável com argila obteve os resultados de módulo de elasticidade apresentados na Figura 37. O autor utiliza da nomenclatura CAAN para concretos autoadensável de peso normal e CLAA para concretos leves autoadensáveis, em seguida o mesmo distingue as amostras de acordo com o consumo de cimento de cada concreto.

**Figura 37** - Resultados de módulo de elasticidade da pesquisa produzida por Verzeznassi (2015)

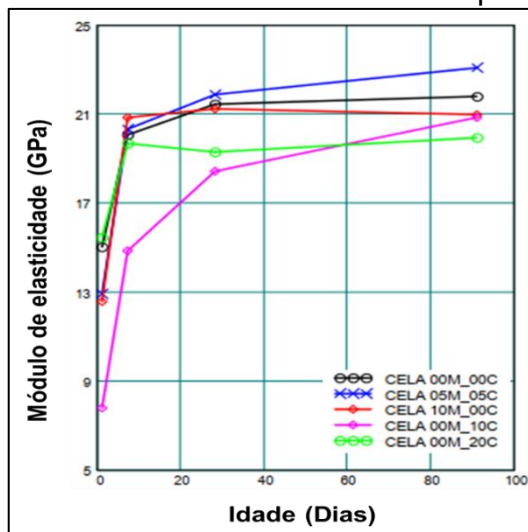


Fonte: Adaptado de Verzeznassi (2015)

Verzeznassi (2015) afirma, sobre a Figura 37, que a incorporação da argila expandida como agregado gera reduções significativas de módulo de elasticidade estático, como esperado. Sendo que as reduções foram mais acentuadas nos concretos os quais a argila expandida foi utilizada como agregado miúdo e graúdo e quando o consumo de cimento era maior.

Borja (2011) ao estudar concretos leves autoadensáveis com argila expandida, cujo o autor nomeia de CELA seguido dos teores incorporados de metacaulim e cinza da cana de açúcar (CELA 00M\_05C, por exemplo) obteve os resultados de módulo de elasticidade dinâmicos apresentados na Figura 38.

**Figura 38** - Resultados de módulo de elasticidade da pesquisa de Borja (2011)



Fonte: Adaptado Borja (2011)

Segundo o autor, o módulo de elasticidade aos 28 dias variou entre 18 MPa e 21 MPa e os resultados indicam que, para as dosagens estudadas, a adição de metacaulim e cinza da biomassa contribuíram para a manutenção da rigidez dos concretos, associando o efeito fíler, através do preenchimento dos poros intersticiais e da comprovada atividade pozolânica do metacaulim.

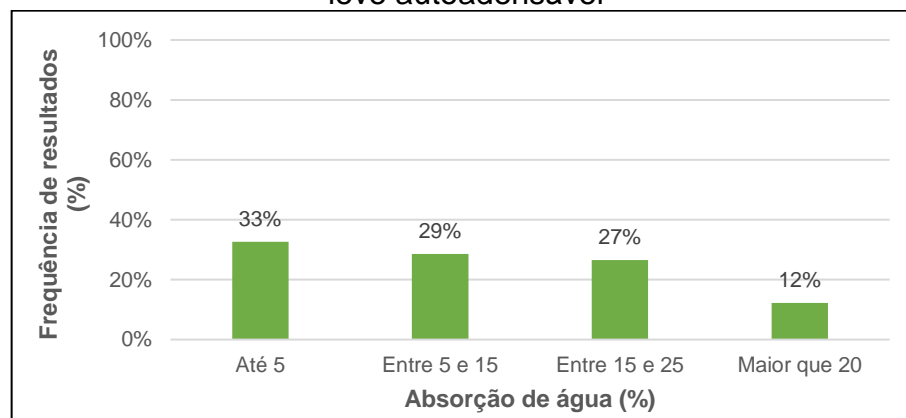
Por fim, Assunção (2016), ao correlacionar o módulo de elasticidade estático de concretos autoadensáveis com diferentes substituições do agregado graúdo normal por argila expandida, afirmou que a diminuição da massa específica afeta diretamente os resultados de módulo e, dessa maneira, apresenta duas correlações entre esta propriedade e a resistência à compressão de acordo com o teor de substituição do agregado graúdo.

#### 2.2.5.5 Absorção de água do concreto leve autoadensável

Os agregados leves (AL) – argila expandida – possuem uma absorção de água mais elevada quando comparados com os agregados convencionais, tal característica irá influenciar diretamente na absorção de água dos concretos produzidos com esse agregado (NEVILLE e BROOKS, 2013; TOPÇU e UYGUNOGLU, 2010).

É possível observar, na Figura 39, a distribuição da absorção de água de 45 misturas produzidas pelos dos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 39** - Resultados da revisão sistemática para a absorção de água de concreto leve autoadensável



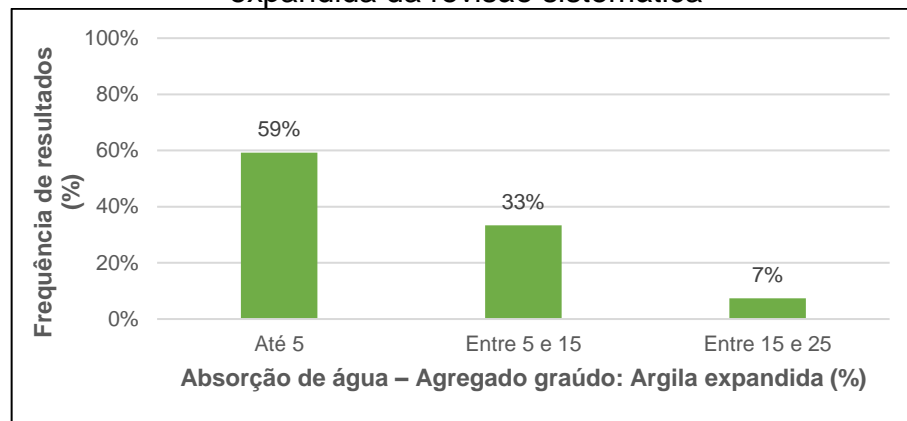
Fonte: A Autora

Ao analisar a Figura 39, é possível perceber que a maioria das misturas não possuem absorção de água tão elevada, porém é importante mencionar que essa absorção reduzida foi obtida por Afzali-Naniz e Mazloom (2018) ao produzir 16

diferentes misturas de CLAA com a adição de microsílca e nanosílca em diferentes proporções e argila expandida como agregado graúdo.

Das 45 misturas de concreto leve autoadensável que estudaram a absorção de água, 27 foram produzidas com argila expandida como agregado graúdo leve e a distribuição da propriedade pode ser observada na Figura 40.

**Figura 40** - Resultados do ensaio de absorção de água para CLAA com argila expandida da revisão sistemática

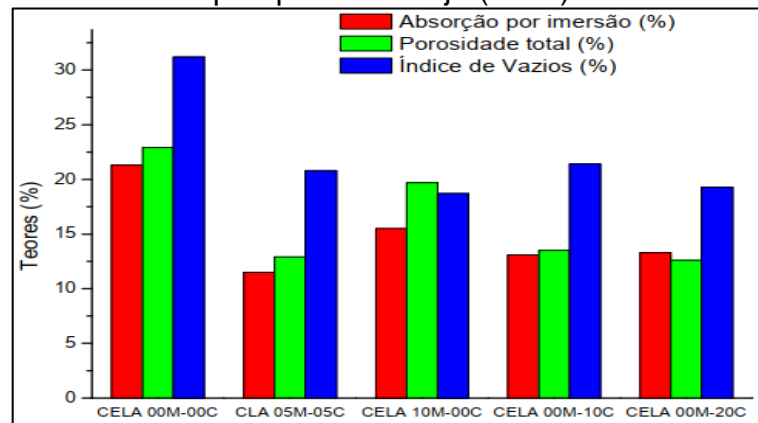


Fonte: A Autora

Assim como o que ocorre na Figura 39, na Figura 40 os resultados de absorção dos concretos leves autoadensáveis menores que 5% são todas misturas pertencentes ao trabalho de Afzali-Naniz e Mazloom (2018) que ao utilizar adições de microsílca e nanosílca obteve uma matriz mais densa que auxiliou na redução da absorção total do concreto.

Borja (2011), ao estudar a produção de concretos leves autoadensáveis com a utilização de metacaulim e cinza de biomassa de cana-de-açúcar obteve absorção de água entre 11,5% e 15,5%, como pode ser visualizado na Figura 41.

**Figura 41 - Resultados de absorção de água, porosidade e índice de vazios da pesquisa de Borja (2011)**

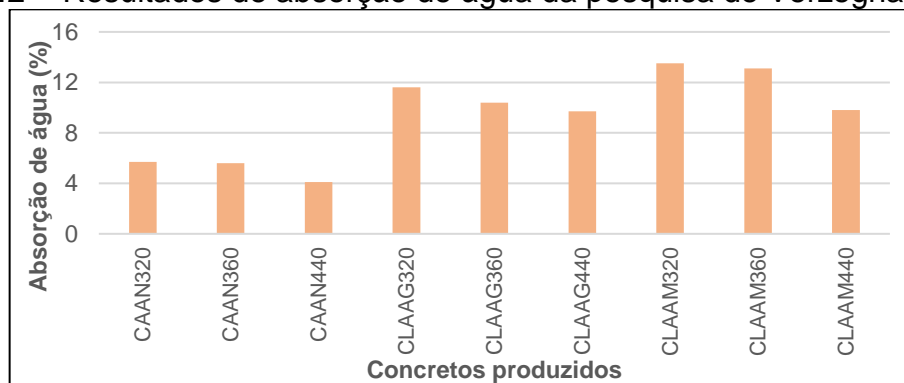


Fonte: Borja (2011)

Para diferenciar os concretos produzidos, o autor utiliza a nomenclatura CELA (Concreto Estrutural Leve Autoadensável) seguida da porcentagem de metacaulim e de cinza volante utilizada. O autor então afirma que a menor redução absorção de água ocorreu com o CELA05M-05C, produzido com a combinação das duas adições, tendo uma redução de 46% quando comparado à referência sem adição.

Verzegnassi (2015) ao estudar diferentes consumos de cimento e argila expandida ora como substituição do agregado graúdo, ora como substituição parcial do agregado miúdo obteve os resultados de absorção apresentados na Figura 42.

**Figura 42 - Resultados de absorção de água da pesquisa de Verzegnassi (2015)**



Fonte: Adaptado de Verzegnassi (2015)

Na Figura 42, a nomenclatura CAAN é utilizada para designar os concretos autoadensáveis de peso normal e CLAA para concretos leves autoadensável, em seguida os concretos são diferenciados de acordo com o consumo de cimento de cada um.

O autor observou que, como esperado, a troca do agregado graúdo de peso normal pela argila expandida gera absorções de água mais elevadas, assim como a substituição parcial do agregado miúdo de peso normal pelo agregado leve. Os concretos produzidos apenas com argila expandida como agregado graúdo obtiveram absorção de água entre 9,7% a 11,6%.

Por fim, Rossignolo (2009) ao utilizar argila expandida para a produção de concreto leve vibrado afirma que a alta porosidade do agregado leve não afeta a durabilidade do concreto devido à falta de comunicação entre os vazios da argila expandida.

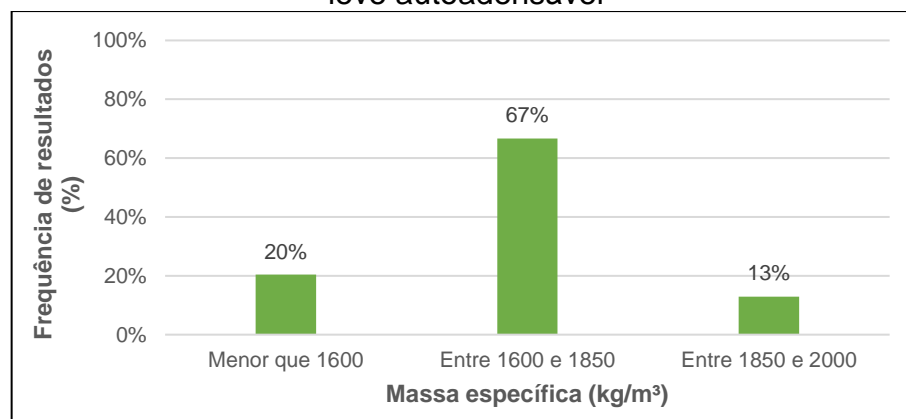
#### 2.2.5.6 Massa específica

A massa específica de um concreto leve (CL) pode variar de 300 até 1850 kg/m<sup>3</sup>, dependendo do agregado utilizado para sua fabricação (NEVILLE e BROOKS, 2013). Porém a NBR 8953 (ABNT, 2015) afirma que concretos com massa específica inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup> são classificados como concretos leves.

É importante mencionar que a massa específica do CLAA irá influenciar diretamente na característica de fluidez do material no estado fresco, já que um menor peso próprio irá gerar uma menor energia para o deslocamento (BOGAS; GOMES e PEREIRA, 2012).

Na Figura 43 é possível observar a distribuição da massa específica de 54 misturas produzidas pelos dos trabalhos referenciados na Tabela 4.

**Figura 43** - Resultados da revisão sistemática para a massa específica de concreto leve autoadensável



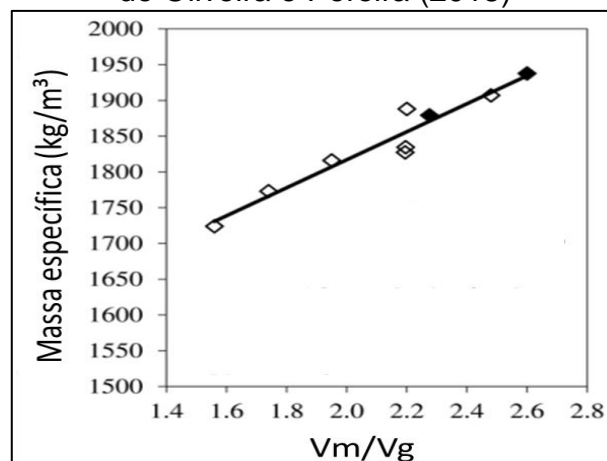
Fonte: A Autora

Verifica-se, na Figura 43, que os concretos leves autoadensáveis costumam ter massa específica entre 1600 a 1850 kg/m<sup>3</sup>.

Das 54 misturas cujos resultados de massa específica estão contidos na Figura 42, 50 foram produzidas com argila expandida como agregado graúdo, portanto, pode-se afirmar que a tendência de resultados dessa propriedade será a mesma durante a utilização desse agregado leve.

Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) ao produzir concretos leves autoadensáveis com diferentes relações volumétrica de argamassa por agregado graúdo leve ( $V_m/V_g$ ) e englobando estudos de outros autores obtiveram o gráfico apresentado na Figura 44.

**Figura 44** - Resultados de massa específica da pesquisa de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

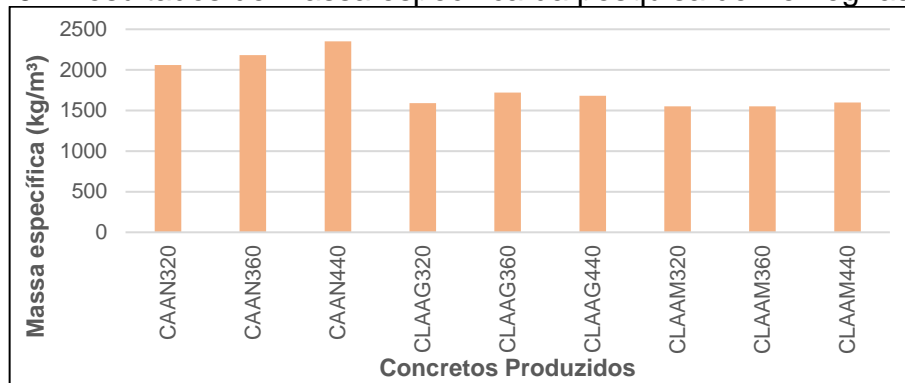


Fonte: Adaptado de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

Os autores afirmam que há uma tendência linear entre a massa específica e  $V_m/V_g$ , demonstrando que a densidade do concreto leve autoadensável depende do volume de agregado graúdo leve na mistura e que a medida que há um acréscimo na relação  $V_m/V_g$ , há um aumento da densidade, uma vez que o volume de agregado leve diminui.

Com relação ao trabalho de Verzegnassi (2015), a Figura 45 apresenta os resultados de massa específica para os diferentes concretos produzidos.

**Figura 45 - Resultados de massa específica da pesquisa de Verzeznassi (2015)**



**Fonte:** Adaptado de Verzeznassi (2015)

Como mencionado anteriormente, Verzeznassi (2015) utiliza da nomenclatura CAAN para designar os concretos autoadensáveis de peso normal e CLAA para concretos leves autoadensável, em seguida apresenta-se os consumos de cimento de cada mistura.

Com relação à Figura 45 o autor afirma que os concretos leves autoadensáveis tiveram uma redução da massa específica de 21% a 32%, sendo que as maiores reduções ocorrem a partir da incorporação do agregado miúdo leve na mistura. O menor valor de massa específica –  $1550 \text{ kg/m}^3$  - ocorre na mistura com substituição de 13% do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo leve. Além disso, entre as misturas produzidas apenas com o agregado leve como agregado graúdo o menor valor de massa específica seca foi de  $1590 \text{ kg/m}^3$  na mistura produzida com o menor consumo de cimento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo estão apresentados os materiais utilizados durante o procedimento metodológico, assim como a descrição do procedimento de dosagem e as etapas para sua validação.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção dos materiais cimentícios – pastas cimentícias, argamassas e concretos – estão listados a seguir:

- Cimento Portland CPV ARI;
- Adições minerais – Pó de basalto (PB) e Sílica ativa (SA);
- Agregado miúdo natural (AMN);
- Agregado graúdo leve (AGL) – argila expandida;
- Aditivo superplastificante à base de policarboxilato;
- Água.

##### 3.1.1 Cimento Portland, Adições minerais e Aditivo superplastificante

A escolha do tipo de cimento ocorreu devido à finura, à sua ausência de adições minerais e por ser o mais utilizado na indústria de pré-moldados. A massa específica, segundo o fabricante, é de 2.990 kg/m<sup>3</sup>.

A Tabela 16 apresenta a composição do cimento Portland CPV ARI utilizado no procedimento experimental, segundo o fabricante.

**Tabela 16** - Composição química do cimento Portland CPV-ARI

<b>Substância</b>	<b>Concentração (% em massa)</b>
Silicato tricálcico	20 – 70
Silicato dicálcico	10 – 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 – 15
Sulfato de cálcio	2 – 8
Aluminato tricálcico	1 – 15
Carbonato de cálcio	0 – 25
Óxido de magnésio (livre)	0 – 6
Óxido de cálcio (livre)	0 – 2

Fonte: O Fabricante

Com relação às adições minerais, foram utilizados pó de basalto (PB) e sílica ativa (SA) para produção dos materiais cimentícios estudados neste trabalho.

O pó de basalto (PB) é um rejeito da produção de agregados de basalto, gerado durante a britagem da rocha. Neste trabalho foi utilizado o material passante na peneira 0,075  $\mu\text{m}$  como substituição à massa de cimento Portland.

A sílica ativa (SA) é um pó fino pulverizado proveniente do processo de fabricação do silício metálico ou do ferro silício.

Com relação as características físicas do PB, na Tabela 17 é possível visualizar os resultados de massa específica obtida pela ABNT NBR 16605/2017 e superfície específica por BET no qual utilizou-se o equipamento *Surface area and pore size analyzers* da marca Quantachrome, do Laboratório de Química da Universidade Estadual de Londrina.

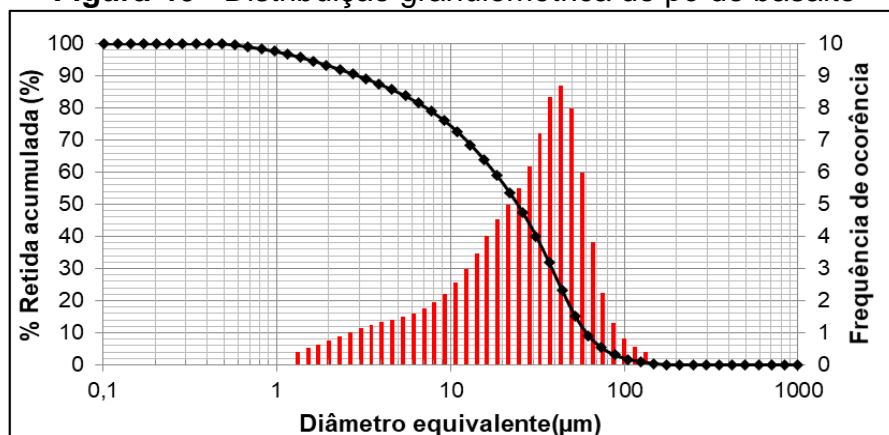
**Tabela 17** - Massa específica e superfície específica do pó de basalto

Propriedade	Pó de basalto
Massa específica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2.880
Superfície específica (BET) ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	7.757

Fonte: A Autora

Ainda com relação às características físicas do PB, na Figura 45 é possível visualizar a distribuição granulométrica do mesmo, obtida através do ensaio de granulometria à laser realizado pelo Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal de Curitiba utilizando um granulômetro MICROTRAC S3500.

**Figura 46** - Distribuição granulométrica do pó de basalto



Fonte: A Autora

Pode-se observar na Figura 45 que a maior parte das partículas de PB encontra-se no intervalo granulométrico de 1 a 80  $\mu\text{m}$ . Na Tabela 18 está contida a

caracterização química do mesmo, detectada por fluorescência de raios-X realizada no Laboratório de Análises de Raios X (LARX) da Universidade Estadual de Londrina, utilizando-se do equipamento Shimadzu, modelo EDX-720.

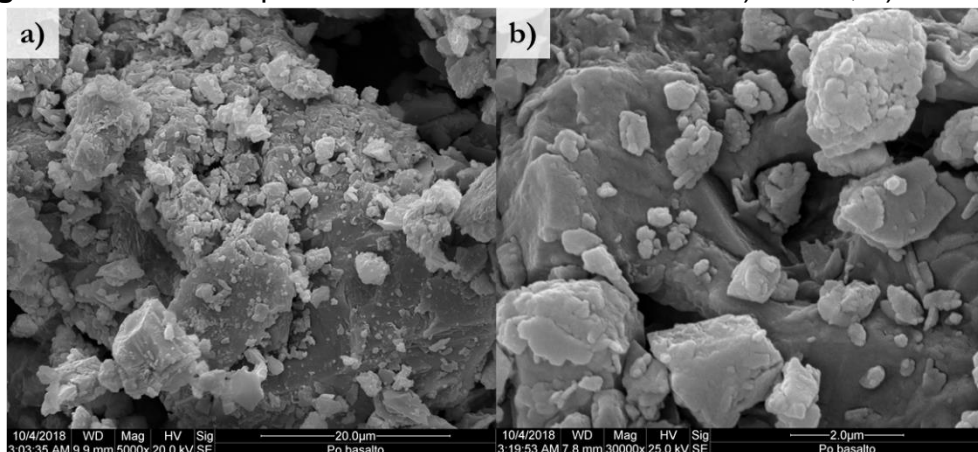
**Tabela 18** - Composição de óxidos do PB detectada por fluorescência de raios X.

Óxidos	%
Si	53,41
Al <sub>2</sub>	27,86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,67
CaO	7,89
TiO <sub>2</sub>	1,02
K <sub>2</sub> O	0,70
SO <sub>3</sub>	0,19
MnO	0,13
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	89,94

Fonte: A Autora

Por fim, a morfologia das partículas de PB foi obtida no Microscópio Eletrônico de Varredura (FEI Quanta 200) do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise (LMEM) da Universidade Estadual de Londrina, podendo ser visualizada na Figura 47.

**Figura 47** - MEV do pó de basalto com aumentos de a) 5000x; b) 30000x.



Fonte: A Autora

Observa-se, na Figura 47, que o PB possui formato irregular e aspecto angular, com arestas bem definidas, superfície pouco porosa e alta variabilidade de tamanhos de partícula.

Com relação à SA, na Tabela 19 pode-se observar as características da mesma.

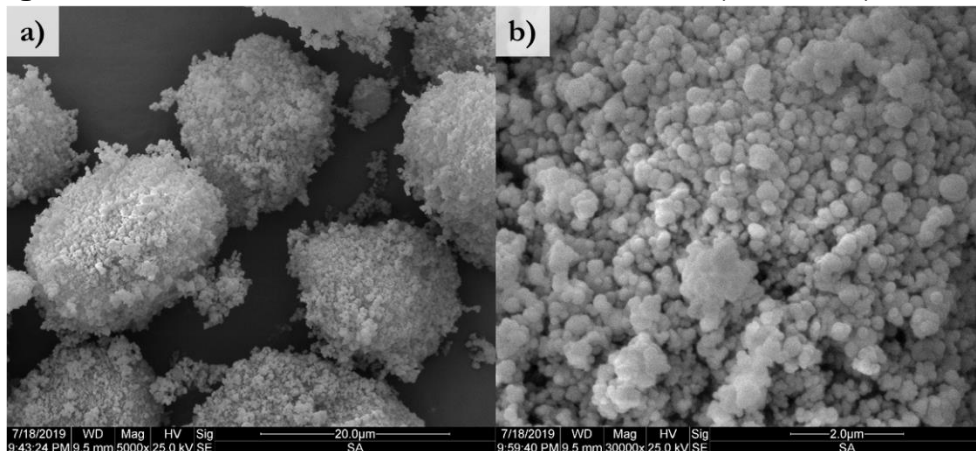
**Tabela 19** - Características física e químicas da sílica ativa

Características	Valores
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2.170
Teor de SiO <sub>2</sub> (%)	> 90
Superfície específica – B.E.T (m <sup>2</sup> /kg)	15.510
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio (µm)	0,20

Fonte: A Autora

A massa específica foi obtida através do ensaio normativo apresentado na ABNT NBR 16605/2017 e a superfície específica da mesma foi determinada por BET utilizando-se do equipamento *Surface area and pore size analyzers* da marca Quantachrome, do Laboratório de Química da Universidade Estadual de Londrina.

Com relação à morfologia da partícula de SA, na Figura 48 é possível visualizar seu formato através do microscópio eletrônico de varredura (FEI Quanta 200) do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise (LMEM) da Universidade Estadual de Londrina.

**Figura 48** - MEV da sílica ativa com aumentos de a) 5000x; b) 30000x.

Fonte: A Autora

Nota-se, na Figura 48, que as partículas de sílica ativa possuem formato circular e uma tendência a aglutinar, formando grumos. Na Tabela 20 é possível visualizar a composição química da mesma, detectada por fluorescência de raios-X, sendo este ensaio realizado no Laboratório de Análises de Raios X (LARX) da Universidade Estadual de Londrina, utilizando-se do equipamento Shimadzu, modelo EDX-720

**Tabela 20** - Elementos químicos que compõe a sílica ativa

Elementos químicos	%
Si	88,73
Ca	4,53
K	3,55
Fe	2,20
S	0,50
Mn	0,18
Ti	0,13
Cu	0,07
Zn	0,04
Sr	0,03
Br	0,02
Rb	0,01
Si + Ca	93,3

Fonte: A Autora

Por fim, o aditivo superplastificante utilizado é uma solução a base de policarboxilato e os dados técnicos fornecidos pelo fabricante estão apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21** - Dados técnicos do aditivo superplastificante

Dosagem recomendada (% massa de cimento)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Cor
0,2 – 5,0	1.090	Marrom

Fonte: Do Fabricante

### 3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado é proveniente do Rio Paraná, da cidade de Nova Londrina/PR. Na Tabela 22 estão apresentadas suas propriedades.

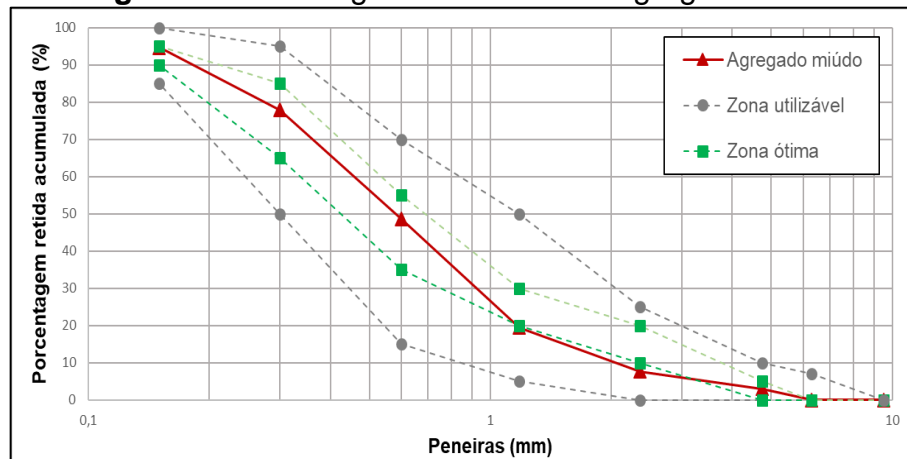
**Tabela 22** - Propriedades físicas do agregado miúdo

Ensaio	Resultados	Normas
Índice de vazios (%)	36,90	ABNT NBR NM 45/2006
Massa unitária solta (kg/m <sup>3</sup> )	1.660	DNER-ME 194/1998
Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> )	2.640	ABNT NBR NM 52/2009
Teor de pulverulento (%)	2,0	ABNT NBR NM 46/2003
Absorção de água (%)	0,56	ABNT NBR NM 30/2001

Fonte: A Autora

A distribuição granulométrica do agregado miúdo foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e pode ser visualizada na Figura 49.

**Figura 49 - Curva granulométrica do agregado miúdo**



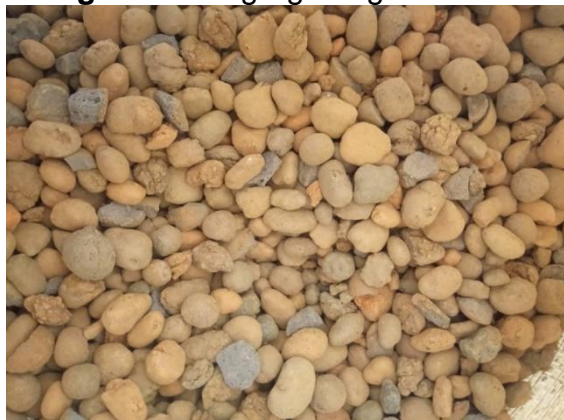
Fonte: A Autora

Conforme é possível observar na Figura 49, o agregado miúdo possui curva granulométrica dentro da zona ótima, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019) e comportamento em S, característico de agregados com granulometria contínua. Além disso, possui módulo de finura igual a 2,51 e dimensão máxima de 4,8 mm.

#### 3.1.4 Agregado graúdo

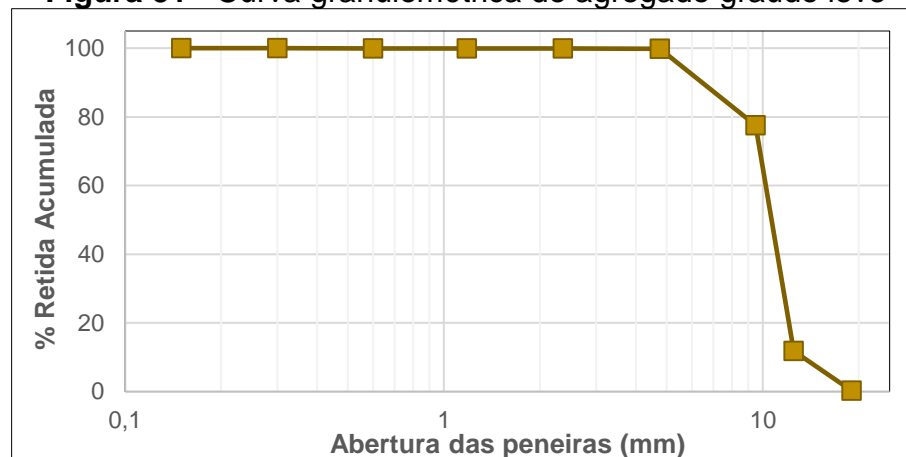
Com relação ao agregado graúdo leve, o mesmo é proveniente de Várzea Paulista/SP e pode ser observado na Figura 50.

**Figura 50 - Agregado graúdo leve**



Fonte: A Autora

Com relação a sua distribuição granulométrica, a mesma pode ser visualizada na Figura 51 e foi realizada de acordo com o proposto pela norma ABNT NBR 248/2003.

**Figura 51** - Curva granulométrica do agregado graúdo leve

Fonte: A Autora

Verifica-se, na Figura 51, que a granulometria da argila expandida empregada é praticamente uniforme com os grãos concentrados na peneira de 9,5 mm. Entretanto, sua dimensão máxima é de 19 mm e seu módulo de finura é de 6,8.

Além disso, suas demais propriedades podem ser visualizadas na Tabela 23.

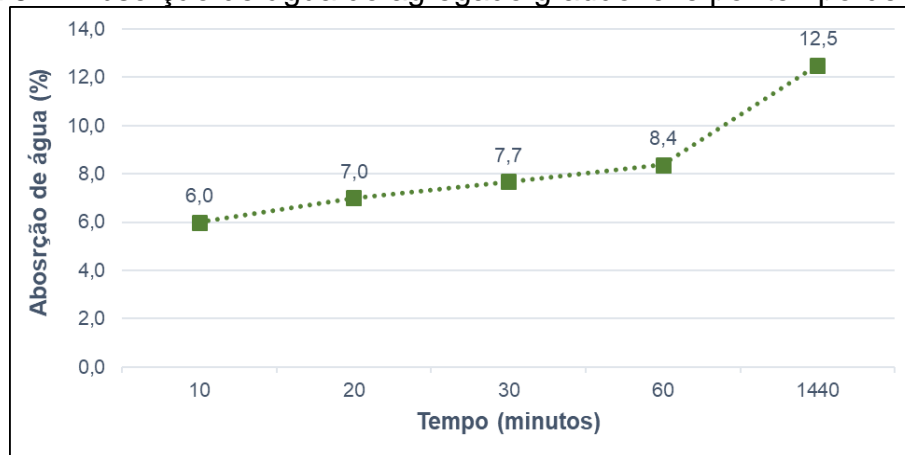
**Tabela 23** - Características físicas do agregado graúdo leve

Propriedade	Resultado	Normas
Índice de vazios (%)	58,5	ABNT NBR NM 45:2006
Massa unitária sem compactar (kg/m <sup>3</sup> )	497,1	ABNT NBR NM 45:2006
Absorção de água (%)	12,5	ABNT NBR NM 53:2009
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	1.109	ABNT NBR NM 53:2009
Teor de pulverulento (%)	0,5	ABNT NBR NM 46/2003

Fonte: A Autora

A Tabela 23 apresenta a absorção de água do agregado graúdo leve imerso por 24 horas, como recomendado pela ABNT NBR 53:2009. Também foi observado o comportamento desta propriedade em diferentes tempos de imersão, com os resultados apresentados na Figura 52.

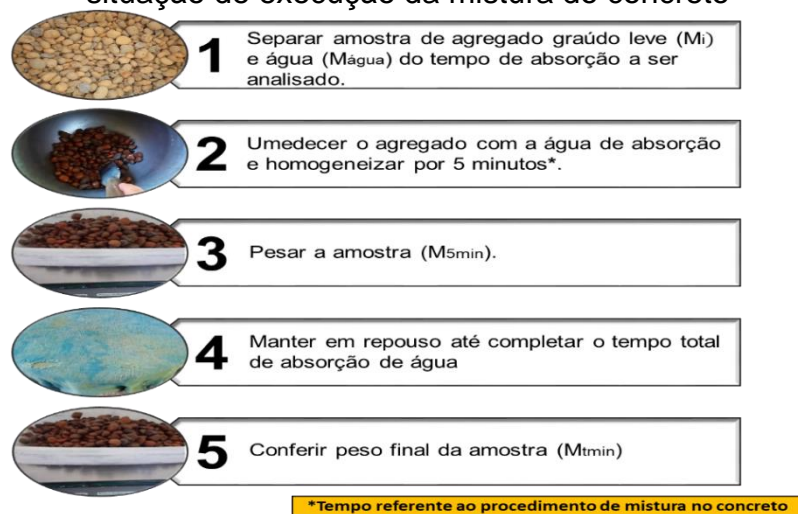
**Figura 52 - Absorção de água do agregado graúdo leve por tempo de imersão**



Fonte: A Autora

Para verificar como o agregado graúdo absorve a água na situação de execução da mistura do mesmo durante a produção do concreto, realizou-se o procedimento apresentado na Figura 53.

**Figura 53 - Procedimento para verificação do mecanismo de absorção de água na situação de execução da mistura do concreto**



Fonte: A Autora

O objetivo do procedimento descrito na Figura 53 é avaliar se a água de absorção de determinado tempo de imersão é absorvida totalmente durante a execução do concreto ou se ficará presente como água livre na mistura. Dessa maneira, a Tabela 24 apresenta os resultados para os tempos de absorção de 10 minutos e 20 minutos.

**Tabela 24** - Absorção da argila expandida simulando o procedimento de mistura do concreto

Tempo de absorção	$M_i$ (g)	$M_{\text{água}}$ (g)	$M_{5\text{min}}$ (g)	$M_{t\text{min}}$ (g)
10 minutos	400	24	424	424
20 minutos	400	28	426	426

Fonte: A Autora

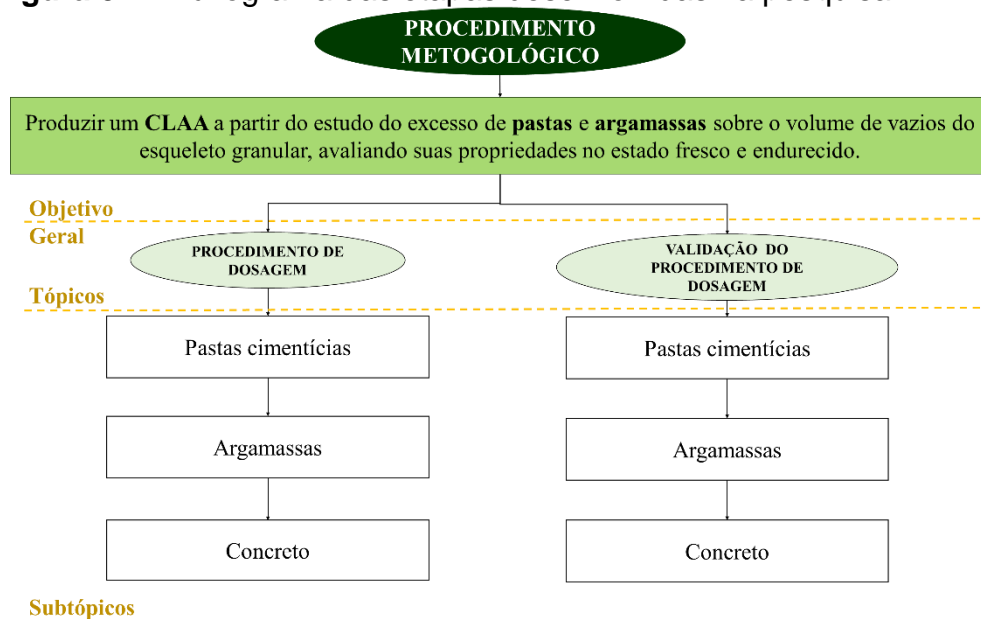
É possível verificar na Tabela 24 que com a água de absorção de 20 minutos, a argila expandida absorve toda a água incorporada. E após deixar o mesmo em repouso por 10 minutos, não há alteração de massa.

Com isso, analisando o comportamento do próximo tempo de absorção de água (20 minutos) foi possível observar que não há absorção total, indicando que poderia haver um pequeno aumento da água livre na mistura. Desta forma, optou-se pela incorporação da água de absorção de 10 minutos no procedimento de mistura do CLAA com intuito de prevenir o excesso de água ou redução da mesma durante a produção.

### 3.2 MÉTODO

Para atingir o objetivo proposto nesta pesquisa, o método está subdividido como apresentado no fluxograma da Figura 54.

**Figura 54** - Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa



Subtópicos

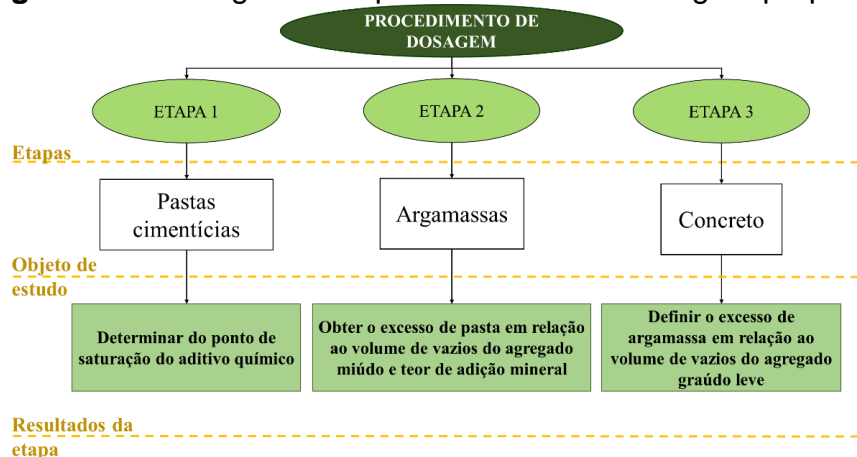
Fonte: Da Autora

### 3.2.1 Procedimento de dosagem

O procedimento de dosagem proposto neste trabalho é uma adaptação dos métodos de dosagem propostos por Toralles-Carbonari (1996) e Gomes (2002).

Dessa maneira, o procedimento estuda as diferentes fases que compõem um concreto como apresentado na Figura 55.

**Figura 55** - Fluxograma do procedimento de dosagem proposto



**Fonte:** Da Autora

O estudo em pasta objetiva obter o ponto de saturação dos aditivos químicos. Em situações que as dosagens dos mesmos já estiverem definidas, a realização desta etapa é dispensável.

Na sequência, a Etapa 2 propõe obter quais seria o excesso de pasta ( $EX_{pasta}$ ), de acordo com o esqueleto granular do agregado miúdo (AM), que resultaria uma argamassa autoadensável segundo os limites propostos na literatura. Tal consumo de pasta é obtido a partir do pressuposto que a mesma deve preencher os vazios do AM e exceder o seu volume de maneira que consiga promover a fluidez da argamassa mantendo-a coesa.

Ainda na fase de argamassa objetiva-se escolher qual combinação e teores de adição mineral obtêm as melhores características em fresco e endurecido.

Ao alcançar as características de autoadensabilidade nas argamassas, utiliza-se desse material cimentício para preencher os vazios do AGL e exceder o seu volume de maneira que o concreto apresente características satisfatórias de autoadensabilidade.

A relação água/cimentícios (a/cim) é considerada como dado de entrada do procedimento de dosagem e, portanto, é fixa durante todas as etapas desenvolvidas. Recomenda-se sua escolha de acordo com a necessidade do usuário para as propriedades mecânicas do CLAA.

#### 3.2.1.1 Etapa 1 – Pastas cimentícias

Nesta etapa, o procedimento de dosagem propõe que seja obtido o ponto de saturação do aditivo químico para os diferentes teores de adição mineral estudados.

Dessa maneira, utiliza-se do ensaio de tempo de escoamento com o cone de Marsh – Figura 56 – que consiste em um cone de metal no qual 800 ml de pasta cimentícia é colocado no interior do mesmo para, em seguida, determinar o tempo necessário para que 200 ml flua através do orifício, conforme proposto por Monteiro, Pitangueira e Wolenski (2012).

**Figura 56 - Cone de Marsh**



**Fonte:** Da Autora

E seguindo a metodologia proposta por Gomes, Gettu e Agulló (2003), o ponto de saturação será aquele que possuir ângulo interno de  $140 \pm 10^\circ$  na curva de log do tempo de fluxo por teor de aditivo químico.

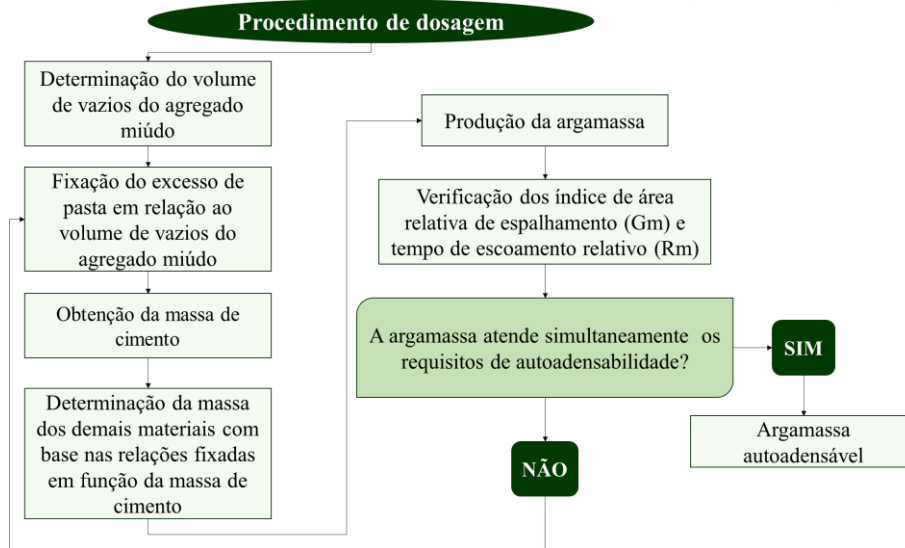
#### 3.2.1.2 Etapa 2 – Argamassas

A Etapa 2 busca a determinação de duas variáveis: teor ideal de adição mineral e porcentagem de excesso de pasta ( $EX_{pasta}$ ).

Para definição do teor ideal de adição mineral, avalia-se como os diferentes teores de adição mineral influenciam nas propriedades no estado fresco e endurecido.

Com relação ao  $EX_{pasta}$  ideal, o mesmo deve preencher os vazios do agregado miúdo e excedê-los de maneira que a argamassa produzida atinja características satisfatórias de autoadensabilidade. Deste modo, o procedimento de dosagem, nesta fase, segue os passos apresentados no fluxograma da Figura 57.

**Figura 57 - Fluxograma do procedimento de dosagem da argamassa**



Fonte: A Autora

Para determinação do volume de vazios do agregado miúdo, a premissa básica é: o volume de argamassa a ser produzido é igual ao volume de agregado miúdo, conforme a Equação 5.

$$V_{arg} = V_{am}$$

$$V_{vam} = V_{arg} * I_{vam} \quad (5)$$

na qual  $V_{arg}$  é o volume de argamassa a ser produzido em  $m^3$ ;  $V_{am}$  é o volume de agregado miúdo considerado inicial em  $m^3$ ;  $V_{vam}$  é o volume de vazios do agregado miúdo em  $m^3$  e  $I_{vam}$  é o índice de vazios do agregado miúdos em porcentagem (%), obtido na caracterização do mesmo.

A determinação do consumo de agregado miúdo, em gramas, é realizada através da Equação 6.

$$M_{am} = V_{arg} * \rho_{am} \quad (6)$$

na qual  $\rho_{am}$  é a massa unitária compactada do agregado miúdo, em  $kg/m^3$ , obtida na caracterização do mesmo.

Em seguida, para determinar o consumo de cimento para a produção das argamassas parte-se dos pressupostos apresentados na Equação 7.

$$V_{pasta} = V_{cim} + V_{AD} + V_{\acute{a}gua} + V_{SP} \quad (7)$$

Porém, segundo a teoria proposta neste procedimento de dosagem, o volume de pasta também é igual ao apresentado na Equação 8.

$$\begin{aligned} V_{pasta} &= V_{vam} + EX_{pasta} * (V_{vam}), \\ V_{pasta} &= V_{vam} * (1 + EX_{pasta}), \end{aligned} \quad (8)$$

Colocando todos os volumes da Equação 7 em função da massa cimento, tem-se:

$$V_{pasta} = \frac{M_{cim}}{\gamma_{cim}} \pm \frac{M_{cim} * AD}{\gamma_{AD}} + \frac{M_{cim} * (a/cim)}{\gamma_{\acute{a}gua}} + \frac{SP * M_{cim}}{\gamma_{SP}} \quad (9)$$

E isolando o fator  $M_{cim}$  na Equação 9, obteve-se a Equação 10.

$$V_{pasta} = M_{cim} \left( \frac{1}{\gamma_{cim}} \pm \frac{AD}{\gamma_{AD}} + \frac{(a/cim)}{\gamma_{\acute{a}gua}} + \frac{SP}{\gamma_{SP}} \right) \quad (10)$$

Por fim, considerando os pressupostos das Equação 7 a 10, obtém-se a Equação 11 para a massa de cimento da argamassa.

$$M_{cim} = \left( \frac{V_{vam} * (1 + EX_{pasta})}{\left( \frac{1}{\gamma_{cim}} \pm \frac{AD}{\gamma_{AD}} + \frac{(a/cim)}{\gamma_{\acute{a}gua}} + \frac{SP}{\gamma_{SP}} \right)} \right) \quad (11)$$

Na qual:

- $EX_{pasta}$  é o excesso de pasta em relação ao volume de vazios do agregado miúdo (AMN);
- $V_{vam}$  é o volume de vazios do agregado miúdo em  $m^3$ ;
- $M_{cim}$  é a massa de cimento em gramas;
- $AD$  é a porcentagem, em decimais, de adição mineral em relação à massa de cimento, a qual será somada ou subtraída dependendo se a mesma é incorporada em adição ou substituição;
- $SP$  é a porcentagem, em decimais, de aditivo químico em relação à massa de cimento;
- $a/cim$  é o fator água/cimentício;
- $\gamma_{cim}$  é a massa específica do cimento em  $kg/m^3$ ;
- $\gamma_{AD}$  é a massa específica da adição em  $kg/m^3$ ;
- $\gamma_{\acute{a}gua}$  é a massa específica da água, sendo adotada como  $1.000 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{SP}$  é a massa específica do aditivo químico em  $kg/m^3$ .

Após encontrar o consumo de cimento, é possível obter o consumo dos demais materiais a partir das relações fixadas. Dessa maneira, caracteriza-se a argamassa produzidas com os ensaios no estado fresco apresentados no Quadro 1.

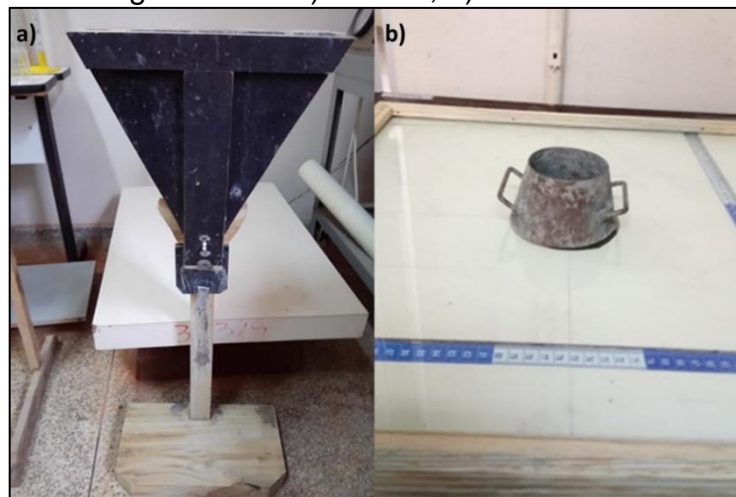
**Quadro 1** - Ensaios no estado fresco proposto no procedimento de dosagem na etapa de argamassa

Ensaios	Unidade	Equação	Método
Espalhamento ( $G_m$ )	mm	$G_m = (D_m/D_0)^2 - 1$	Okamura, Ozawa e Ouchi (2000)
Tempo de escoamento ( $R_m$ )	s <sup>-1</sup>	$R_m = 10/t$	Okamura, Ozawa e Ouchi (2000)
Procedimento Expedito ( $T_{risco}$ )	s	-	Porto et al. (2019)
Limites da Literatura utilizados ( $G_m$ e $R_m$ )			
Melo (2005)			
$3 \leq G_m \leq 6,8$		$1 \leq R_m \leq 2,86$	

Fonte: A Autora

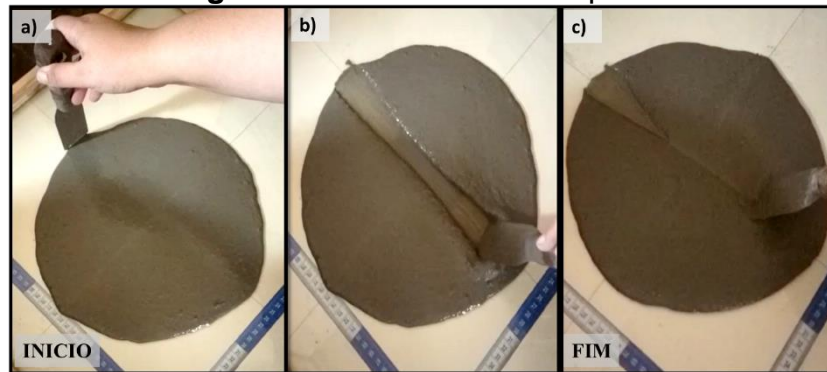
Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de tempo de escoamento e espalhamento podem ser visualizados na Figura 58.

**Figura 58** - Equipamentos para ensaio de tempo de escoamento e espalhamento em argamassas: a) Funil V; b) Tronco de cone



Fonte: A Autora

Em relação ao procedimento expedito proposto, o mesmo segue o prescrito por Porto et al. (2019) e consiste em avaliar a estabilidade visual do material ao retornar à posição inicial, após ser riscado, com uma espátula de 4 cm de largura, ao longo do diâmetro da circunferência formada pelo ensaio do tronco de cone. Na Figura 59 é possível observar as etapas do procedimento experimental proposto.

**Figura 59** - Procedimento expedito

Fonte: A Autora

No procedimento expedito ( $T_{risco}$ ), o material só pode ser considerado autoadensável se o mesmo fechar o centro do risco realizado pela espátula, como representado na Figura 59. Além disso, não pode haver exsudação ao longo do risco ou no material deslocado pela espátula.

Dessa maneira, com a realização dos ensaios propostos, é possível avaliar a autoadensabilidade das argamassas produzidas com os diferentes excessos de pasta e diferentes teores de adição mineral e determinar qual argamassa apresenta as características satisfatórias para aplicação no concreto.

Caso a variação da adição mineral não resulte em resultados conclusivos com relação aos parâmetros de autoadensabilidade, ou seja, as argamassas sejam autoadensáveis, mas não possuam variações significativas das propriedades no estado fresco com a alteração do teor de adição, o procedimento propõe o estudo das propriedades no estado endurecido para avaliar o impacto das mesmas nas propriedades mecânicas, como apresentado no Quadro 2.

**Quadro 2** - Ensaio no estado endurecido propostos para a etapa em argamassa

Ensaio	Normas
Massa específica	ABNT NBR 9778:2009
Absorção de água	ABNT NBR 9778:2009
Resistência à compressão	ABNT NBR 7215:2019
Módulo de elasticidade dinâmico (por ultrassom)	ABNT NBR 15630:2009

Fonte: A Autora

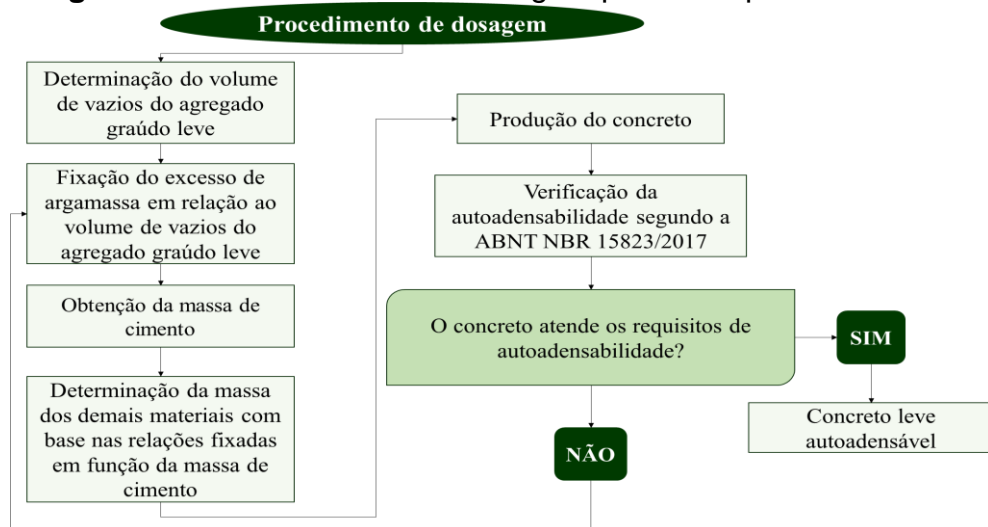
Deste modo, com a determinação do teor de adição mineral e fixação do  $EX_{pasta}$ , o próximo passo do procedimento de dosagem é a produção do concreto.

### 3.2.1.3 Etapa 3 – Concretos

A produção dos concretos ocorre de maneira semelhante à produção das argamassas, ou seja, é determinado o excesso de argamassa ( $EX_{arg}$ ), de acordo com o esqueleto granular do agregado graúdo leve, que apresenta características satisfatórias de autoadensabilidade.

Portanto o consumo de argamassa é determinado como sendo o volume necessário para preencher os vazios do agregado graúdo e excede-los de maneira a atingir características satisfatórias de autoadensabilidade, como esquematizado na Figura 60.

**Figura 60** - Procedimento de dosagem para a etapa em concreto



Fonte: A Autora

De acordo com a Figura 60, o primeiro passo é determinar o volume de vazios do agregado graúdo leve (AGL). Para tanto, a premissa básica é: o volume de concreto ( $V_{conc}$ ) produzido é igual ao volume de agregado graúdo leve ( $V_{AGL}$ ) e, com isso, obtém-se o volume de vazios ( $V_{vagl}$ ) do mesmo segundo a Equação 12.

$$\boxed{V_{conc} = V_{AGL}}$$

$$V_{VAGL} = V_{conc} * I_{VAGL} \quad (12)$$

na qual  $I_{VAGL}$  é o índice de vazios do AGL, obtido na caracterização do mesmo, em porcentagem.

Em seguida, a massa de agregado leve a ser incorporado na produção é determinado utilizando a Equação 12.

$$M_{AGL} = V_{conc} * \rho_{AGL} \quad (12)$$

na qual  $M_{AGL}$  é a massa de agregado graúdo leve em quilogramas;  $\rho_{AGL}$  é a massa unitária solta do agregado graúdo leve em kg/m<sup>3</sup>.

A partir do volume de vazios do AGL, obtém-se o volume de argamassa utilizando-se da Equação 13.

$$V_{arg} = V_{VAGL} + EX_{arg} * V_{VAGL} = V_{VAGL} * (1 + EX_{arg}) \quad (13)$$

na qual  $EX_{arg}$  é a porcentagem, em decimais, do excesso de argamassa em relação ao volume de vazios do AGL e  $V_{VAGL}$  é o volume de vazios do agregado graúdo leve, em m<sup>3</sup>, determinado na Equação 12.

Posteriormente ao cálculo do volume de argamassa, foram consideradas as premissas das Equações 14 a 16 para a obtenção da massa de cimento:

$$V_{arg} = V_{pasta} + V_{am} \quad (14)$$

Onde:

- O volume de pastas é igual ao apresentado na Equação 10;
- E o volume de agregado miúdo da Equação 14 é obtido pela Equação 16.

$$V_{am} = (V_{AM}/V_{arg}) * V_{arg} \quad (15)$$

Assim, ao substituir as Equações 10 e 15 na Equação 14, obteve-se a massa de cimento para os diferentes tipos de argamassa como pode ser visualizado na Equação 16.

$$M_{cim} = \frac{V_{arg} - (V_{AM}/V_{arg}) * V_{arg}}{\left( \frac{1}{\gamma_{cim}} + \frac{AD}{\gamma_{AD}} + \frac{(a/cim)}{\gamma_{\acute{a}gua}} + \frac{SP}{\gamma_{SP}} \right)} \quad (16)$$

Onde:

- $M_{cim}$  é a massa de cimento em kg;
- $V_{arg}$  é o volume de argamassa calculado pela Equação 13 em m<sup>3</sup>;
- $V_{AM}/V_{arg}$  é a relação entre o volume de agregado miúdo por volume de argamassa encontrado na dosagem das argamassas autoadensáveis.
- $AD$  é a porcentagem, em decimais, de adição mineral em relação à massa de cimento, a qual será somada ou subtraída dependendo se a mesma é incorporada em adição ou substituição;
- $SP$  é a porcentagem, em decimais, de aditivo químico em relação à massa de cimento;
- $a/cim$  é o fator água/cimentício;

- $\gamma_{cim}$  é a massa específica do cimento em  $\text{kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{AD}$  é a massa específica da adição em  $\text{kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{\text{água}}$  é a massa específica da água, sendo igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{SP}$  é a massa específica do aditivo químico  $\text{kg/m}^3$ .

Após a obtenção da massa de cimento, como apresentado na Figura 60, determina-se as quantidades dos demais materiais com base nas relações fixadas. Para verificação se o  $EX_{arg}$  empregado alcançou as características satisfatórias de autoadensabilidade, utiliza-se dos ensaios apresentados no Quadro 3.

**Quadro 3** - Ensaios para verificação da autoadensabilidade dos concretos produzidos com o procedimento de dosagem

Ensaios	Método
Slump flow teste	ABNT NBR 15823/2:2017
$T_{500}$	ABNT NBR 15823/2:2017
Índice de estabilidade visual	ABNT NBR 15823/2:2017
Anel J	ABNT NBR 15823/3:2017
Funil V	ABNT NBR 15823/5:2017
Caixa em L	ABNT NBR 15823/4:2017
Análise da segregação estática	Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

Fonte: A Autora

Para realizar a análise da segregação estática, proposta por Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018), os corpos de prova foram moldados de maneira convencional sem vibração externa, desmoldados com 24 horas e, então, rompidos a tração por compressão diametral para que possa ser feito a análise visual da distribuição dos agregados leves no corpo de prova.

Portanto, caso o concreto produzido alcance características satisfatórias nos ensaios realizados, o procedimento de dosagem está concluído e as propriedades mecânicas desse concreto podem ser avaliadas.

### 3.2.2 Validação do procedimento de dosagem

Para a validação do procedimento de dosagem, estudou-se, inicialmente, a combinação binária de materiais cimentícios – pó de basalto (PB) em substituição ao cimento Portland.

Entretanto, durante a aplicação do procedimento, decidiu-se pela utilização de uma segunda adição, em combinação ternária, capaz de resultar em melhor coesão

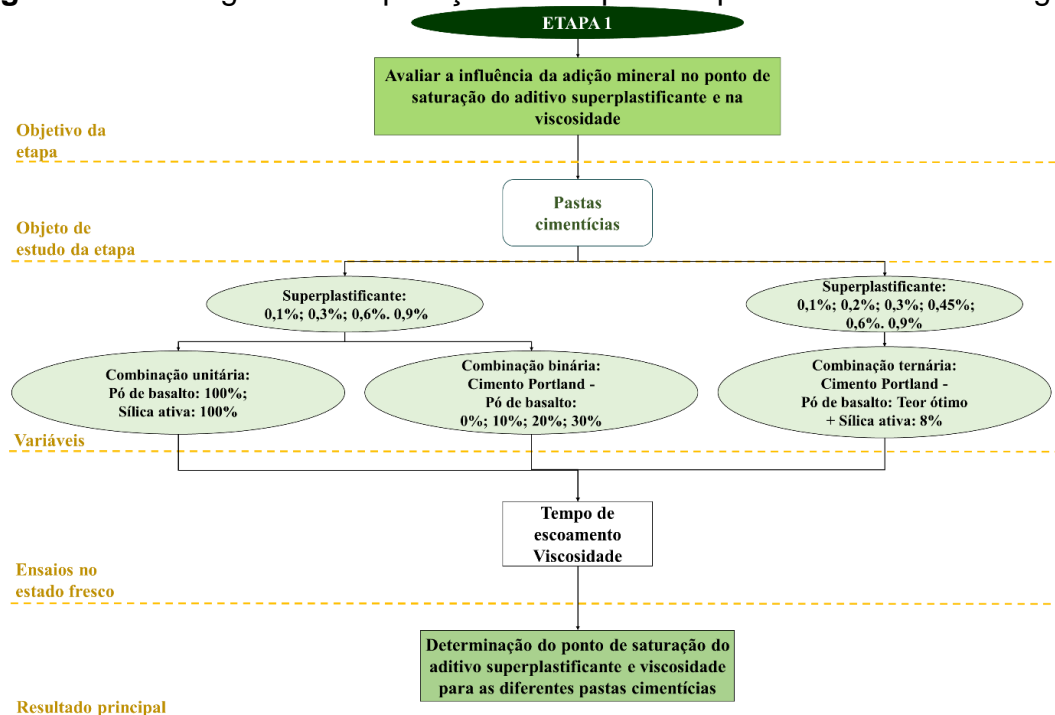
dos materiais cimentícios estudados, podendo evitar a tendência dos agregados leves – na produção de concreto – de segregar.

Desse modo, incorporou-se a sílica ativa no teor de 8% em adição à massa de cimento. Nos subitens abaixo apresenta-se a validação do procedimento de dosagem com os materiais selecionados durante a pesquisa.

### 3.2.2.1 Etapa 1 – Pastas com combinação binária e ternária de materiais cimentícios

Nesta etapa avaliou-se a influência das diferentes combinações de adições no ponto de saturação do aditivo superplastificante, como proposto no procedimento de dosagem. Além disso, também foi obtido a viscosidade das mesmas, como descrito na Figura 61.

**Figura 61** - Fluxograma da aplicação da Etapa 1 do procedimento de dosagem



**Fonte:** A Autora.

As pastas cimentícias com 100% de adição mineral foram produzidas com o objetivo de avaliar a influência do aditivo superplastificante sobre a partícula da mesma.

Para a produção das pastas cimentícias com combinação binária, o PB foi empregado em substituição ao cimento Portland em diferentes porcentagens (0%,

10%, 20%, 30%) e a dosagem de aditivo superplastificante variou em 0,1%; 0,3%; 0,6% e 0,9% sobre a massa de cimento.

Enquanto que as pastas cimentícias com combinação ternária são compostas pela combinação do teor ótimo de pó de basalto, definido na Etapa 2, em substituição ao cimento Portland, 8% de sílica ativa em adição à massa de cimento restante e a dosagem de aditivo superplastificante variou em 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,45% 0,6% e 0,9% sobre a massa de cimento.

Todas as pastas cimentícias foram produzidas com relação água/cimentícios de 0,40 para que o aditivo superplastificante ainda tivesse influência sobre o material (AGULLÓ et al., 1999).

A diferenciação das pastas foi realizada mediante a nomenclatura: primeiro a sigla indicando as adições (PB ou PB-SA) e, por último, o teor de aditivo superplastificante. Portanto, PB10\_0,3 é uma pasta cimentícia produzida com 10% de substituição de cimento Portland por PB e 0,3% de aditivo superplastificante e PPB-SA\_0,3 é uma pasta produzida com combinação ternária de materiais cimentícios e 0,3% de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento.

As pastas foram produzidas em misturador planetário, seguindo sempre o mesmo procedimento de mistura proposto por Porto et al. (2018). Para analisar as propriedades foi aplicado as orientações do procedimento de dosagem – item 3.2.1.1 – e a viscosidade foi obtida com o viscosímetro de Brookfield (Figura 62).

**Figura 62** - Viscosímetro de Brookfield



Fonte: A Autora

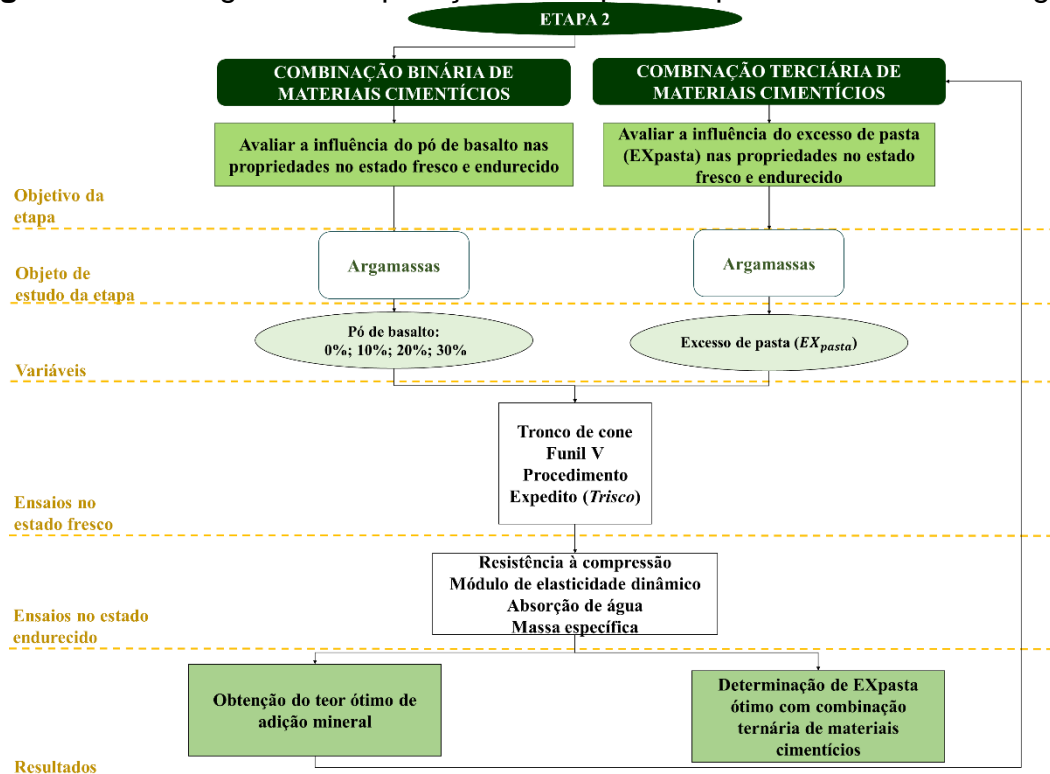
A determinação da viscosidade ocorreu posteriormente ao ensaio do cone de Marsh para cada pasta cimentícia produzida. O equipamento consiste em hastes (Spindles) que são rotacionadas dentro de um fluido em velocidades que, neste experimento, variaram de 100 a 200 rpm. Foram colocados 300 ml de pasta em um recipiente e, então, utilizando-se do Spindle 4 selecionou-se a velocidade que proporcionou a estabilização da leitura.

Finalizada a Etapa 1 e obtido o teor de aditivo superplastificante, iniciou-se a produção das argamassas – Etapa 2 – como apresentado no item abaixo.

### 3.2.2.2 Etapa 2 – Argamassas com combinação binária e ternária de materiais cimentícios

A etapa 2 possuiu dois objetivos: escolher o teor ideal de PB em substituição ao cimento Portland e definição do  $EX_{pasta}$  que resulta nas melhores características de autoadensabilidade das argamassas estudadas, como apresentado no fluxograma da Figura 63.

**Figura 63** - Fluxograma da aplicação da Etapa 2 do procedimento de dosagem



Fonte: A Autora

Portanto, primeiro produziu-se argamassas com combinação binária de materiais cimentícios e  $EX_{pasta}$  fixo, para avaliação da incorporação do pó de basalto.

Tais argamassas foram produzidas com o  $EX_{pasta}$  fixado em 82% com relação ao volume de vazios do agregado miúdo, que representa uma relação volumétrica de agregado miúdo por argamassa ( $\frac{V_{AM}}{V_{arg}}$ ) de 0,46; valor dentro do proposto por Domone (2006).

Como o cimento Portland e o PB apresentaram características físicas parecidas, o consumo de cimento foi obtido substituindo a quantidade deste pelo teor de PB a ser estudado. As propriedades no estado fresco e endurecido foram avaliadas seguindo o recomendado pelo procedimento de dosagem.

Com o teor ideal de PB determinado, produziu-se as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios, com o objetivo de obter o  $EX_{pasta}$  ideal.

O primeiro teor de  $EX_{pasta}$  empregado representa a mesma relação  $\frac{V_{AM}}{V_{arg}}$  das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios e, conforme os resultados encontrados, alterou-se  $EX_{pasta}$  de maneira a obter características satisfatórias de autoadensabilidade.

Todas as argamassas foram homogeneizadas em misturador planetário, seguindo o procedimento de mistura proposto por Porto et al. (2018). Após o procedimento de mistura, o material foi submetido aos ensaios no estado fresco e endurecido apresentados nos Quadros 1 e 2 do item 3.2.1.2.

Importante mencionar que só foram moldados corpos de prova das argamassas com características autoadensáveis e, portanto, não se utilizou de nenhum procedimento externo de adensamento na moldagem dos mesmos. No Quadro 4 contém o planejamento experimental para os ensaios em argamassas.

**Quadro 4** - Planejamento experimental para os ensaios no estado endurecido em argamassa

Ensaio	Nº de cp's para combinação binária	Nº de cp's para combinação ternária	Idade
Resistência à compressão	3	5	28
Módulo de elasticidade	3	5	28
Absorção de água	2	2	28

Fonte: A Autora

Foram utilizados os mesmos corpos de prova para os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom e resistência à compressão e nos corpos de prova para a absorção de água não foram utilizados nenhum tipo de desmoldante para que não houvesse influência nos resultados. Além disso, todas as amostras foram curadas em cura submersa e ensaiadas aos 28 dias.

As diferentes argamassas produzidas foram denominadas segundo a nomenclatura:

- Para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios:
  - Sigla ARGPB seguida da porcentagem de pó de basalto incorporado.
- Para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios:
  - Sigla ARGPB-SA seguida do teor de  $EX_{pasta}$  avaliado.

Portanto, a ARGPB10 é uma argamassa com combinação binária de materiais cimentícios e 10% de pó de basalto em substituição ao cimento Portland e a ARGPB-SA100 é uma argamassa com combinação ternária de materiais cimentícios cuja variável é o  $EX_{pasta}$  de 100%.

Por fim, com relação a análise estatística das amostras, para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios utilizou-se o método de análise de variância (Anova) e para as argamassas com combinação ternária foi necessário utilizar o teste t não pareado, ambas com o auxílio do software RStudio.

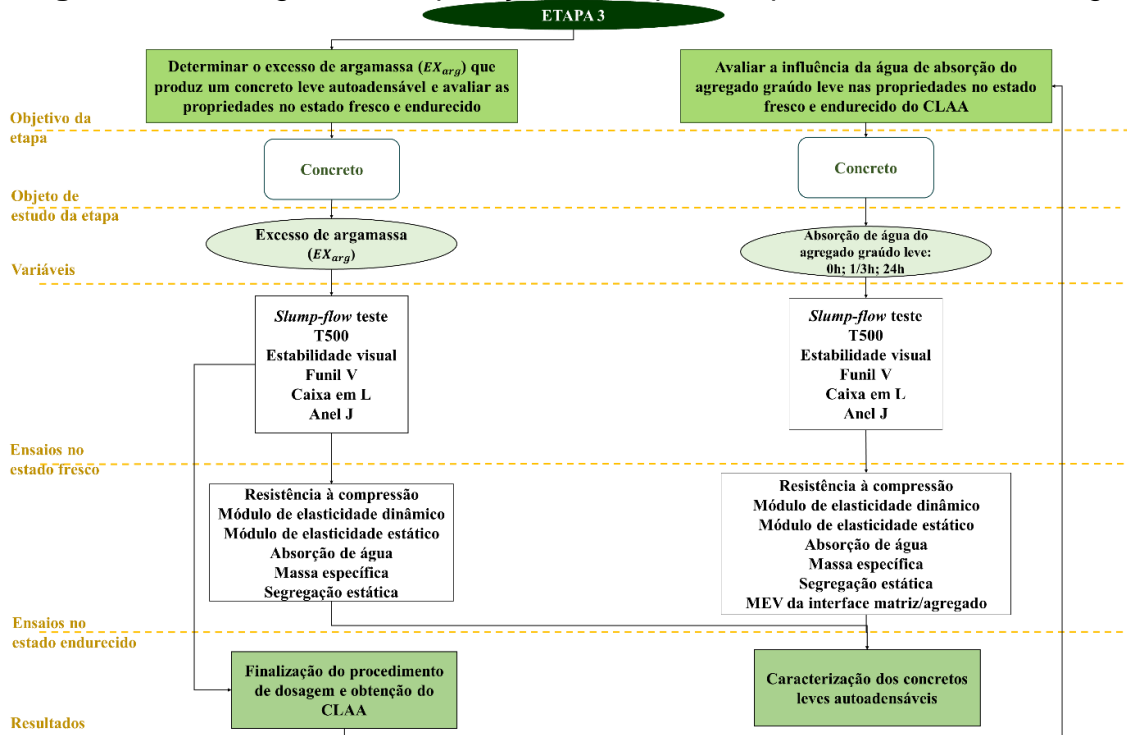
Foi considerado que as unidades experimentais são homogêneas e também foram garantidos os princípios de causalização (homogeneização) e repetição para validação de ambas as análises. O nível de significância considerado ( $p_{valor}$ ) foi de 95% para todas as análises.

Na sequência, está descrito a validação da Etapa 3 do procedimento de dosagem proposto e a caracterização dos concretos produzidos.

### 3.2.2.3 Etapa 3 – Concreto

Com os resultados obtidos nos estudos anteriores, iniciou-se a Etapa 3 do procedimento de dosagem. Esta etapa teve como principal objetivo determinar o excesso de argamassa ( $EX_{arg}$ ) para a produção do concreto leve autoadensável e avaliar suas propriedades no estado fresco e endurecido, como pode ser visualizado no fluxograma da Figura 64.

**Figura 64 - Fluxograma da aplicação da Etapa 3 do procedimento de dosagem**



Fonte: A Autora

A produção dos concretos ocorreu como apresentado no procedimento de dosagem descrito no item 3.2.1.3. A argamassa utilizada para preencher os vazios do agregado graúdo foi obtida após a realização das Etapas 1 e 2, descritas anteriormente, sendo que se optou pela utilização da combinação ternária de materiais cimentícios – pó de basalto e sílica ativa – com objetivo de reduzir o consumo de cimento e evitar a segregação dos materiais.

Após a obtenção da massa de cimento determinou-se as quantidades dos demais materiais com base nas relações fixadas. Os teores das adições, relação água/cimento e teor de aditivo superplastificante são os mesmos utilizados nos itens 3.2.2.1 e 3.2.2.2, com a incorporação da combinação ternária de materiais cimentícios.

Com relação ao consumo de argamassa, iniciou-se o estudo com  $EX_{arg} = 100\%$  em relação ao volume de vazios do agregado graúdo, pois este representa uma relação volumétrica de agregado graúdo por concreto ( $\frac{V_{AGL}}{V_{conc}}$ ) igual à 28%. Tal relação está dentro do intervalo apresentado na literatura por Domone (2006), representando

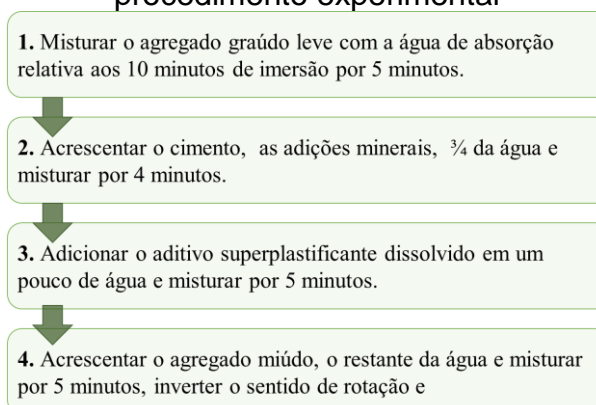
a recomendação máxima de volume de argamassa a ser incorporado, segundo o autor.

De acordo com os resultados obtidos no estado fresco determinou-se quais outros teores de  $EX_{arg}$  seriam avaliados para que se alcançasse características satisfatórias de autoadensabilidade. Dessa maneira, os concretos produzidos durante o procedimento de dosagem foram denominados com a sigla CLAA seguida da porcentagem de  $EX_{arg}$  incorporada. Portanto, o CLAA100 é o concreto leve autoadensável produzido com  $EX_{arg} = 100\%$ .

Sendo que caso o concreto não atingisse os valores necessários de espalhamento no *slump* flow teste, segundo a ABNT NBR 15823-2/2017, os demais ensaios não seriam realizados.

Todos os concretos estudados seguiram o procedimento de mistura apresentado na Figura 65.

**Figura 65** - Procedimento de mistura dos concretos produzidos na Etapa 3 do procedimento experimental



**Fonte:** A Autora

Finalizando o procedimento de dosagem, foi selecionado o concreto que apresentou as melhores características de autoadensabilidade para, em seguida, averiguar como a água de absorção do agregado graúdo leve influencia nas propriedades no estado fresco e endurecido do CLAA.

Desse modo, produziu-se este CLAA variando-se o teor de água de absorção do agregado graúdo leve a ser adicionado ao procedimento de mistura, gerando os três concretos apresentados no Quadro 5.

**Quadro 5 - Concretos leves autoadensáveis produzidos para análise da influência da absorção de água**

Nomenclatura	Descrição das argamassas
CLAA <sub>10min</sub>	Concreto leve autoadensável com incorporação de água de absorção do agregado graúdo leve após 10 minutos (1/6h) de submersão, representando 48% da água total de absorção.
CLAA <sub>0h</sub>	Concreto leve autoadensável sem a incorporação da água de absorção do agregado graúdo leve, representando 0% da água total de absorção.
CLAA <sub>24h</sub>	Concreto leve autoadensável com incorporação de água de absorção do agregado graúdo leve após 24 horas de submersão, representando 100% da água total de absorção.

Fonte: A Autora

Após a realização dos ensaios no estado fresco, como determinado no Quadro 3 do item 3.2.2.3, os concretos que alcançaram resultados satisfatórios no estado fresco foram moldados, curados, no molde, por 24 horas para então serem desmoldados e colocados em cura úmida até o período de ensaio. O planejamento experimental está apresentado no Quadro 6.

**Quadro 6 - Planejamento experimental da etapa em concreto**

Ensaio	Dimensão dos cp's (mm)	Nº de cp's por idade	Idades analisadas (dias)	Normas
Resistência à compressão	100x200	3	7	ABNT NBR 5739:2018
Resistência à compressão	100x200	4	28	ABNT NBR 5739:2018
Módulo de elasticidade dinâmica por ultrassom	100x200	3	28	ASTM C597:2016
Módulo de elasticidade estático	100x200	3	28	ABNT NBR 8522:2017
Absorção de água/Massa específica	100x200	2	28	ABNT NBR 9778:2009
Interface matriz/agregado*	-	-	33	-

\*Ensaio realizado apenas para os concretos cuja variável foi a quantidade de água de absorção do agregado leve incorporado à mistura.

Fonte: A Autora

Foram utilizados os mesmos corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade pelo método do ultrassom e resistência à compressão. A análise visual da interface da matriz cimentícia/agregado leve foi realizada através do microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 200 do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise (LMEM) da Universidade Estadual de Londrina.

As amostras foram obtidas após o rompimento dos corpos de prova à tração por compressão diametral 24 horas após a moldagem. Após o rompimento, fragmentos foram separados e colocados em cura submersa em recipiente lacrado até 7 dias antes do ensaio para preparação das mesmas. Após cura submersa, as amostras foram secas em estufa em  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas e, posteriormente, foi realizada a preparação dos *stubs* com fita dupla face de carbono, recebendo uma camada de ouro em torno de  $20 \mu\text{m}$  e feixe de  $15 \text{ nm}$  através do equipamento Sputter Coster SCD 050.

Por fim, a análise estatística dos resultados obtidos foi realizada utilizando-se do teste t não pareado com o auxílio do software RStudio. Foi considerado que as unidades experimentais são homogêneas e garantem os princípios de homogeneização e repetição para validação da análise. Foi utilizado o teste “Shapiro-Wilk” para verificar a normalidade e o teste de variância para determinar a homogeneidade das amostras. O nível de significância considerado ( $p_{valor}$ ) foi de 95% para todas as análises.

Dessa maneira, os resultados e discussões do procedimento metodológico podem ser visualizados no capítulo abaixo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados e discussões da validação do procedimento de dosagem. Primeiramente, são dispostos os resultados das Etapas 1 e 2 com a aplicação de combinação binária de materiais cimentícios: Pó de basalto (PB) em substituição ao cimento Portland. Em seguida, com a determinação do teor ideal de PB, é exposto os resultados das Etapas 1 e 2 com a inserção da sílica ativa e, portanto, combinação ternária de materiais cimentícios para determinação do teor ideal de  $EX_{pasta}$ .

Por fim, na Etapa 3, apresenta-se a produção do concreto com a obtenção do  $EX_{arg}$ , finalizando com a apresentação do estudo da influência da absorção de água do agregado graúdo leve nas propriedades no estado fresco e endurecido do CLAA.

### 4.1 ETAPAS 1 E 2 – PASTAS E ARGAMASSAS COM COMBINAÇÃO BINÁRIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

#### 4.1.1 Estudo em Pasta

Verificou-se a atuação do aditivo superplastificante sobre a partícula de PB ao produzir diferente pastas com 100% de PB e diferentes teores de aditivo superplastificante. Dessa forma, o consumo de materiais para a produção das pastas cimentícias pode ser visualizado na Tabela 25, o volume final foi de 1,8 L.

**Tabela 25** - Consumo de materiais para as pastas cimentícias com combinação binária

Amostra	CP (g)	PB (g)	SA (g)	Água (ml)	SP (ml)
PB100_0,1	0	1.900	-	760	1,7
PB100_0,3	0	1.900	-	760	5,2
PB100_0,6	0	1.900	-	760	10,5
PB100_0,9	0	1.900	-	760	15,7
PB0_0,1	1.900	0	-	760	1,7
PB0_0,3	1.900	0	-	760	5,2
PB0_0,6	1.900	0	-	760	10,5
PB0_0,9	1.900	0	-	760	15,7
PB10_0,1	1.710	190	-	760	1,6
PB10_0,3	1.710	190	-	760	4,7
PB10_0,6	1.710	190	-	760	9,4
PB10_0,9	1.710	190	-	760	14,1

\*Continua

**Tabela 25** – Consumo de materiais para as pastas cimentícias com combinação binária

*\*Continuação*

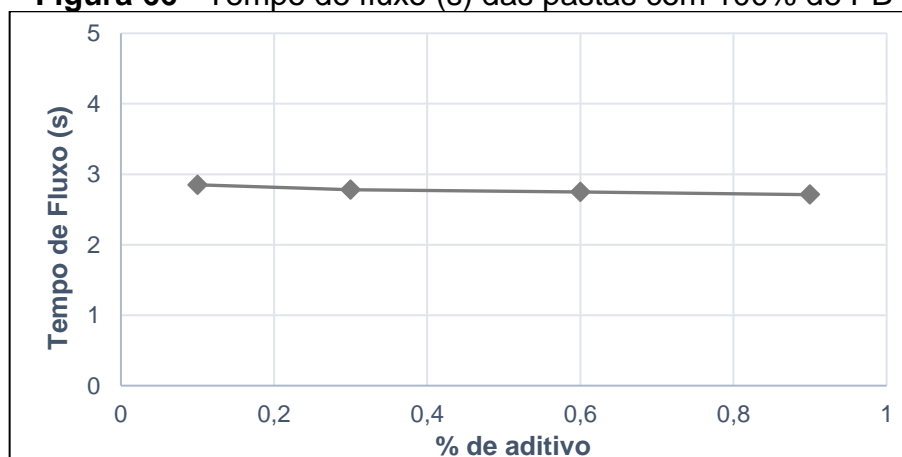
Amostra	CP (g)	PB (g)	SA (g)	Água (ml)	SP (ml)
PB20_0,1	1.520	380	-	760	1,4
PB20_0,3	1.520	380	-	760	4,2
PB20_0,6	1.520	380	-	760	8,4
PB20_0,9	1.520	380	-	760	12,6
PB30_0,1	1.330	570	-	760	1,2
PB30_0,3	1.330	570	-	760	3,7
PB30_0,6	1.330	570	-	760	7,3
PB30_0,9	1.330	570	-	760	11,0

CP = Cimento Portland; PB = Pó de Basalto; SA = Sílica ativa; SP = Aditivo superplastificante

Fonte: A Autora

Com relação à influência do aditivo superplastificante sobre a partícula de adição mineral, os resultados podem ser visualizados na Figura 66.

**Figura 66** - Tempo de fluxo (s) das pastas com 100% de PB



Fonte: A Autora

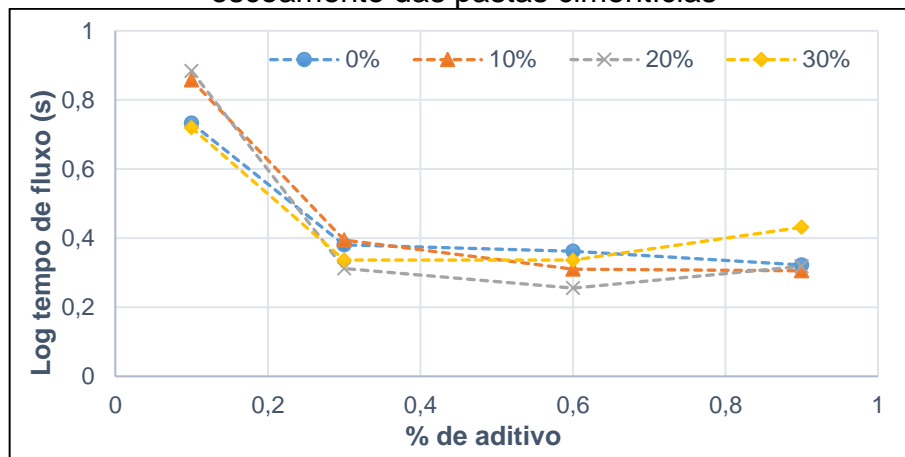
Foi possível observar, na Figura 66, que o aditivo superplastificante não agiu sobre a partícula de PB, pois o acréscimo do primeiro não gerou alterações no tempo de escoamento do material.

O superplastificante poderia agir sobre as partículas de duas maneiras principais: por efeito de repulsão eletrostática ou efeito estereoquímico e, em ambos os casos, há a adsorção do aditivo pelas partículas de aglomerante (TAKADA, 2004). Portanto, como não há alteração na fluidez do material, o PB não adsorveu o aditivo superplastificante nesta relação água/cimentícios estudada, dessa maneira,

justificando a dosagem do último sobre a massa de cimento Portland e não sobre a massa total de materiais cimentícios.

Com relação ao tempo de escoamento, na Figura 67 é possível visualizar o gráfico do log do tempo de escoamento X teor de aditivo superplastificante incorporado para as pastas com diferentes teores de adição mineral.

**Figura 67** - Influência da porcentagem de substituição do pó de basalto no tempo de escoamento das pastas cimentícias



Fone: A Autora

Constatou-se, na Figura 67, que todas as pastas tiveram a mesma tendência de comportamento, com uma redução do tempo de escoamento até atingir um teor ótimo, comportamento verificado por diversos autores ao estudar o ponto de saturação em diferentes adições (AGULLÓ et al., 1999; CALMON et al., 2013; CAMÕES, 2005; GOMES, GETU E AGULLÓ, 2003; MONTEIRO, PITANGUEIRA E WOLENSKI, 2012; PIOVEZAM, MELEIRO e IZA, 2008; SILVA, GOMES e MORAIS, 2019).

Com relação a determinação do ponto de saturação das pastas produzidas, na Tabela 26 é possível visualizar os ângulos internos das curvas da Figura 67 segundo o método de Gomes, Gettu e Agulló (2003).

**Tabela 26** - Determinação do ponto de saturação das pastas cimentícias com combinação binária

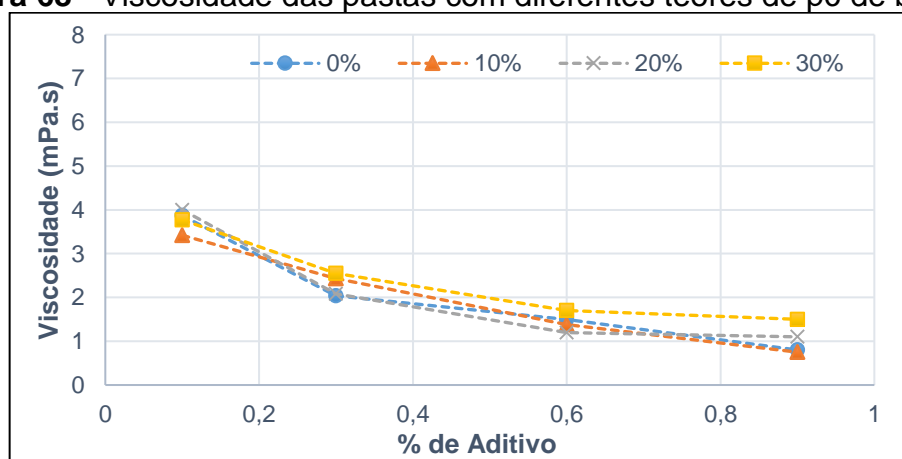
Pastas	Ângulo (°)
PB0_0,3	123,6
PB0_0,6	183,8
PB10_0,3	128,4
PB10_0,6	165,9
PB20_0,3	119,7
PB20_0,6	150,2
PB30_0,3	117,8
PB30_0,6	173,3

Fonte: A Autora

Notou-se que a utilização de 0,3% de aditivo sobre a massa de cimento está abaixo do limite proposto por Gomes, Gettu, Agulló (2003) enquanto que a utilização de 0,6% ultrapassa o limite superior dos autores. Portanto, foi concluído que o ponto de saturação está entre 0,3% e 0,6% para todas as pastas estudadas, sendo adotado o teor de 0,45% para a produção das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.

Para complementar o estudo da influência do PB nas pastas cimentícias, as viscosidades aparentes das mesmas encontram-se na Figura 68.

**Figura 68** - Viscosidade das pastas com diferentes teores de pó de basalto



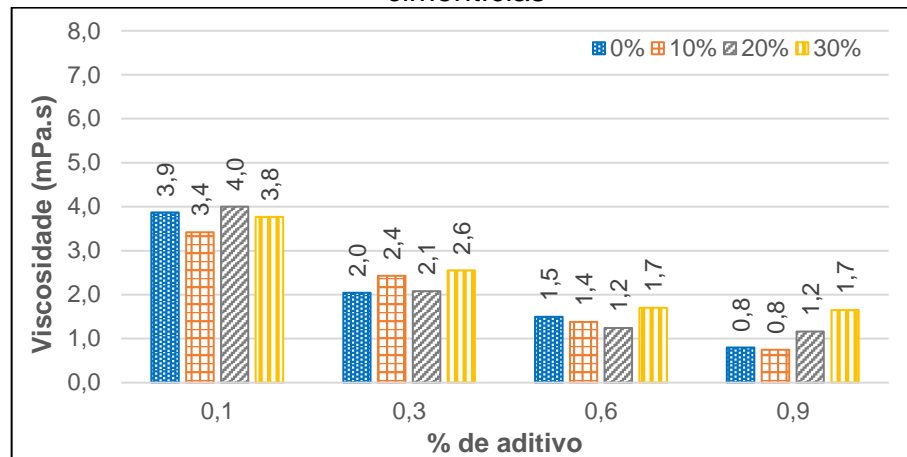
Fonte: A Autora

Com relação ao aumento do teor de aditivo superplastificante, observou-se na Figura 68 que houve uma diminuição contínua da viscosidade em todas as pastas produzidas, resultado similar ao encontrado por outros autores ao estudar a variação

do superplastificante em pastas cimentícias (LIU et al., 2017; PAPO e PIANI, 2004; SCHWARTZENTRUBER, ROY e CORDIN, 2006)

Para analisar a influência apenas da alteração da adição mineral, plotou-se o gráfico apresentado na Figura 69.

**Figura 69** - Influência do teor de pó de basalto na viscosidade das pastas cimentícias

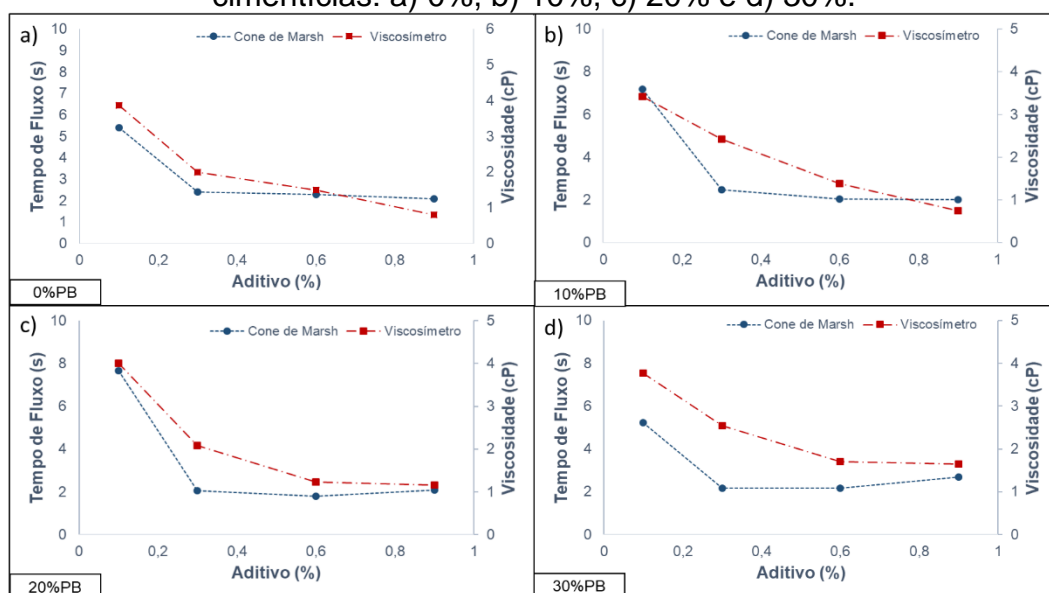


Fonte: A Autora

Observou-se que o aumento do teor de pó de basalto não gerou interferência significativa na viscosidade das pastas, considerando o mesmo teor de aditivo químico. As características físicas semelhantes entre o cimento Portland e a adição mineral pode ter feito com que sua substituição, mesmo em diferentes teores, não alterasse a viscosidade da pasta, de maneira semelhante ao ocorrido no tempo de escoamento das mesmas.

Na Figura 70, apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos no Cone de Marsh e no viscosímetro de Brookfield.

**Figura 70** - Comparação entre o tempo de fluidez e a viscosidade das pastas cimentícias: a) 0%, b) 10%, c) 20% e d) 30%.



Fonte: A Autora

Foi possível observar que os resultados de tempo de escoamento e viscosidade apresentaram tendências semelhantes, indicando que, assim como ocorre nos ensaios em concretos autoadensáveis no Funil V, a medida do tempo de escoamento em fluxo confinado está diretamente relacionada a viscosidade do material.

Na próxima seção, apresenta-se o estudo em argamassa com combinação binária de materiais cimentícios produzidas com o teor de aditivo superplastificante obtido nesta etapa.

#### 4.1.2 Estudo em Argamassa

Utilizando-se da sequência de dosagem apresentada no item 3.2.1.2, realizou-se a produção das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios. Os desenvolvimentos dos cálculos encontram-se no Apêndice A.

Na Tabela 27 é possível visualizar o consumo de materiais por m<sup>3</sup> de todas as argamassas produzidas.

**Tabela 27** - Consumo de materiais das argamassas produzidas com combinação binária de materiais cimentícios

Amostra	% de substituição	$EX_{pasta}$ (%)	$V_{AM}/V_{arg}$	CP (Kg)	PB (Kg)	AM (Kg)	Água (L)	SP (L)
ARGPB0	0	82	46%	698	0	1274	279	2,9
ARGPB10	10	82	46%	628	70	1274	279	2,6
ARGPB20	20	82	46%	558	140	1274	279	2,3
ARGPB30	30	82	46%	489	209	1274	279	2,0

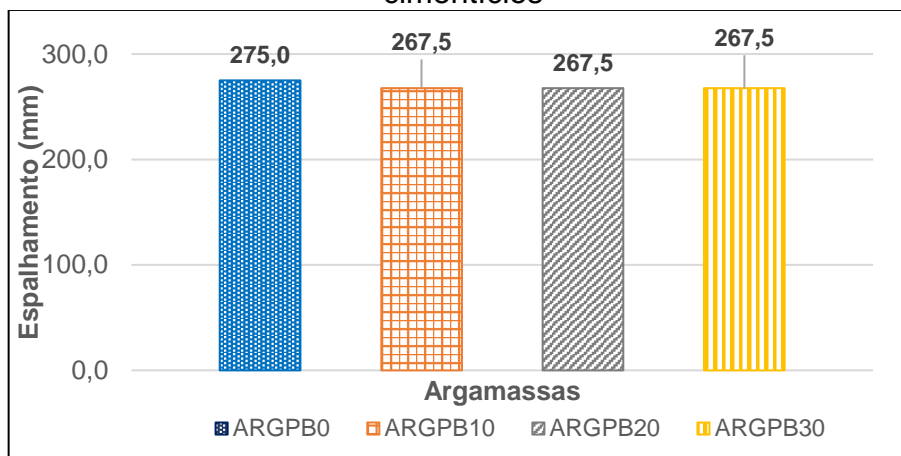
Fonte: A Autora

As argamassas foram produzidas com relação água/cimentícios de 0,40, teor de aditivo superplastificante de 0,45% sobre a massa de cimento.

#### 4.1.2.1 Estado fresco

As argamassas foram inicialmente avaliadas de acordo com o seu espalhamento pelo tronco de cone e seus resultados estão apresentados na Figura 71.

**Figura 71** - Espalhamento das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

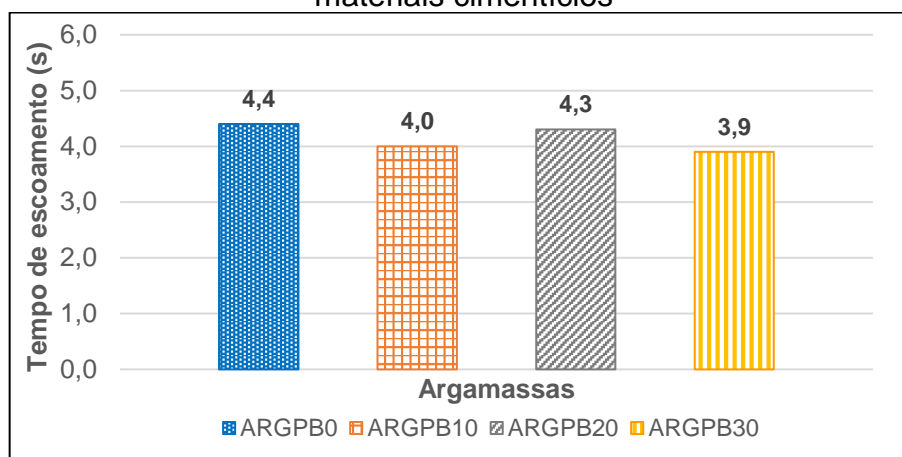


Fonte: A Autora

Observou-se que o PB não influenciou na fluidez das argamassas nos teores de substituição avaliados, corroborando com os resultados encontrados em pastas cimentícias e similar ao encontrado por Uncik em Kmecova (2013) em argamassas produzidas pelos autores utilizando aditivo superplastificante até 0,5%.

Com relação ao tempo de escoamento no ensaio de Funil V, seus resultados podem ser visualizados na Figura 72.

**Figura 72 - Tempo de escoamento das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios**



Fonte: A Autora

Constatou-se, na Figura 72, que a substituição do cimento Portland por PB não interferiu sobre o tempo de escoamento das argamassas. Sabe-se que o ensaio de Funil V é governado pela viscosidade aparente do material (OKAMURA, OSAWA E OUCHI, 2000). Dessa maneira, como constatado no estudo em pasta, a variação do teor de PB não gerou alteração na viscosidade da mesma.

Utilizando as equações 1 e 2, foi possível obter os índices  $G_m$  e  $R_m$  das argamassas produzidas e, os resultados podem ser visualizados na Tabela 28.

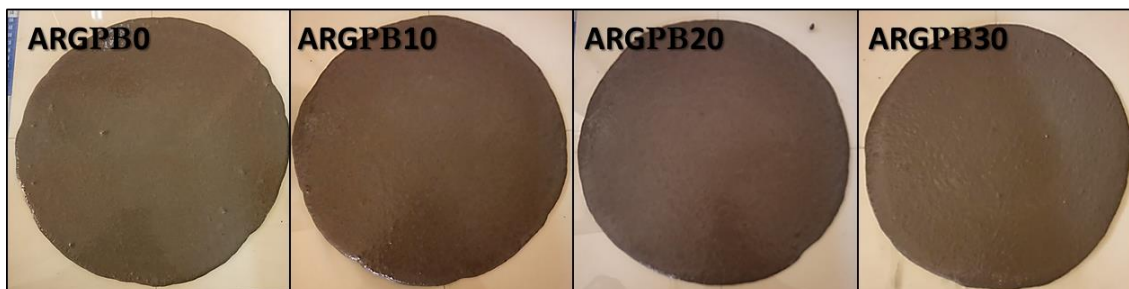
**Tabela 28 -  $G_m$  e  $R_m$  das argamassas com pó de basalto**

Argamassas	$V_{AM}/V_{arg}$	$G_m$	$R_m (s^{-1})$
ARGPB0	46%	6,6	2,3
ARGPB10	46%	6,2	2,5
ARGPB20	46%	6,2	2,3
ARGPB30	46%	6,2	2,7

Fonte: A Autora

Na Tabela 28 foi possível observar que todas as argamassas produzidas atendem os limites propostos na metodologia, podendo ser consideradas como autoadensáveis. Deste modo, a Figura 73 apresenta a estabilidade visual das mesmas.

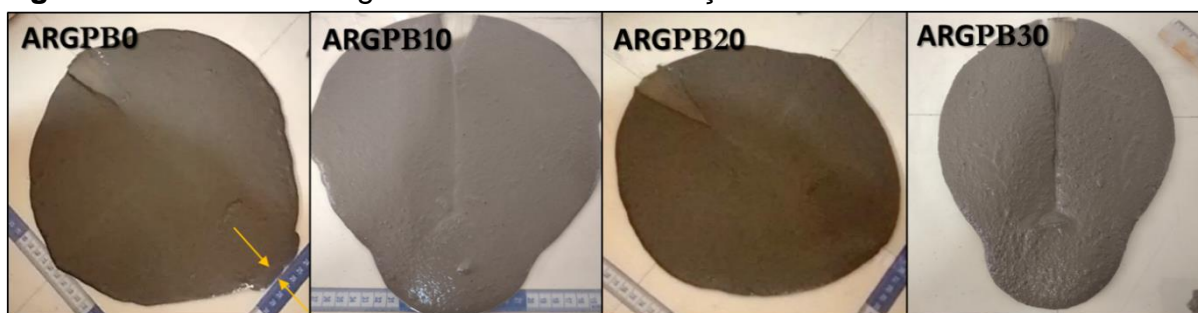
**Figura 73** - Estabilidade visual das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

Verificou-se, na Figura 73, que não houve exsudação ou segregação. Porém para promover uma análise visual mais completa nas argamassas foi proposto o procedimento expedito ( $T_{risco}$ ), apresentado na Figura 74 abaixo.

**Figura 74** - Trisco das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

Observou-se, na Figura 74, que apesar da alteração no teor de PB, todas as argamassas retornaram à posição inicial após serem riscadas, indicando capacidade de preenchimento. Com relação à presença de exsudação, a argamassa de referência (ARGPB0) apresentou separação da pasta cimentícia como destacado na Figura 73.

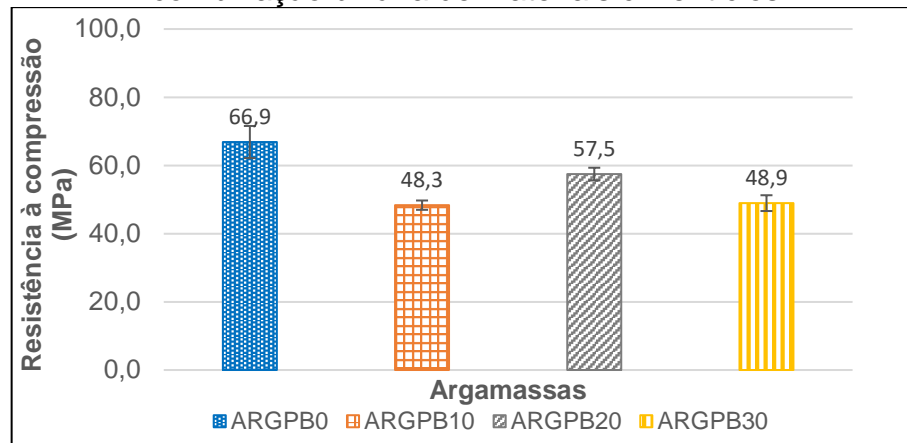
Dessa maneira, a incorporação do PB foi capaz melhorar sutilmente a coesão dos materiais, sendo esta característica não detectada nos ensaios convencionais de autoadensabilidade.

Em conclusão, a incorporação dos diferentes teores de PB pouco influenciou nas características de autoadensabilidade das argamassas, não sendo possível determinar qual o teor ideal do mesmo. Dessa maneira, o procedimento de dosagem propôs a avaliação das propriedades no estado endurecido, como apresentado no item abaixo.

#### 4.2.2.3 Estado endurecido

Os resultados resistência à compressão podem ser visualizados na Figura 75.

**Figura 75** - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

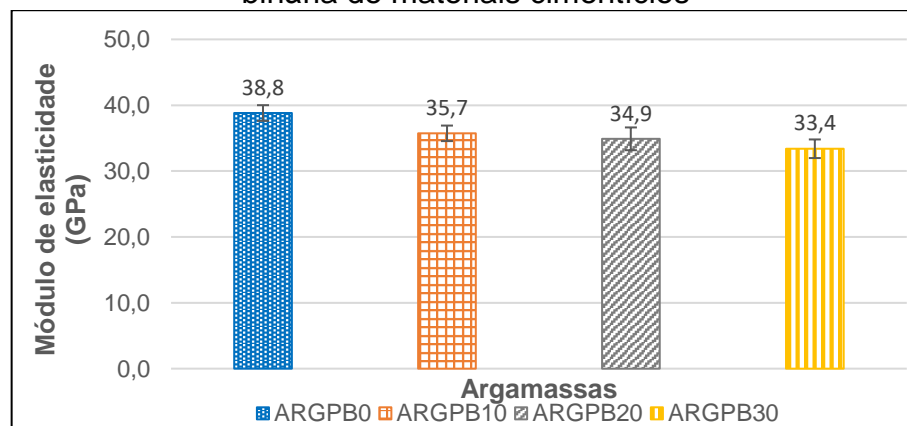


Fonte: A Autora

A incorporação do PB diminuiu a resistência à compressão em todas as argamassas com relação à referência, resultado similar ao encontrado por Saraya (2014), Uncik e Kmecoka (2013), Uysal, Ylmaz e Ipek (2012). Entretanto, observou-se que a incorporação de 20% gerou a menor redução de resistência à compressão entre as argamassas analisadas, resultado similar ao encontrado por El-Didadomy et al. (2015).

Com relação aos resultados de módulo de elasticidade para as argamassas produzidas, os mesmos podem ser visualizados no Figura 76.

**Figura 76** - Módulo de elasticidade aos 28 dias das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

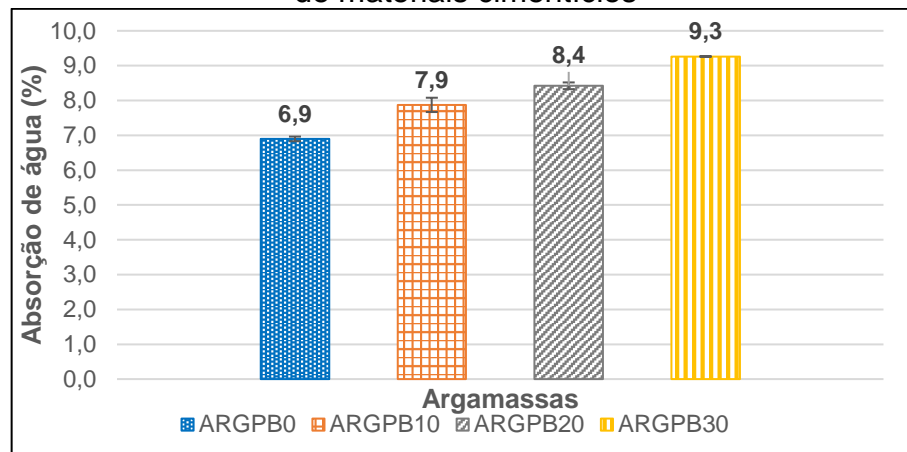


Fonte: A Autora

A substituição do cimento Portland pelo PB pouco influenciou no módulo de elasticidade das argamassas produzidas, pois considerando o desvio padrão, não aparentou haver diferença significativa entre os resultados obtidos nesta propriedade.

Com relação às propriedades hidráulicas, foi determinado a absorção de água das argamassas produzidas e seus resultados estão apresentados na Figura 77.

**Figura 77** - Absorção de água das argamassas produzidas com combinação binária de materiais cimentícios

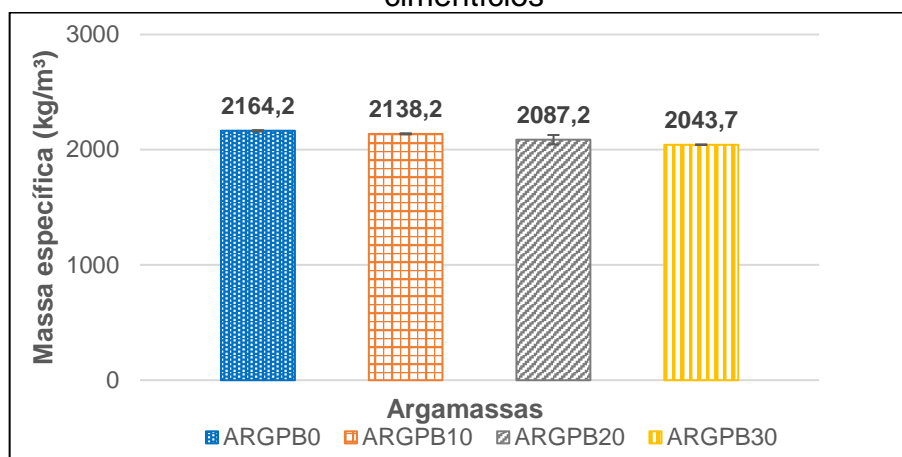


Fonte: A Autora

Notou-se, na Figura 77 que a substituição do cimento Portland pelo PB gerou um aumento de absorção de água nas argamassas produzidas. O aumento da absorção com o aumento do teor de PB ocorreu pois, ao contrário do encontrado com outras adições minerais incorporadas em substituição (FONSECA, 2016; JAMIL et al., 2016; KANELLOPOULOS, PETROU E IOANNOU, 2012), o PB não é uma adição reativa, nem tem potencial pozolânico para fazer o refinamento da estrutura. (COUTO et al., 2019).

Por fim, com relação à massa específica, os resultados das argamassas produzidas podem ser visualizados na Figura 78.

**Figura 78** - Massa específica das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

Foi possível avaliar, na Figura 78, que o PB pouco influenciou na massa específica das argamassas produzidas, este resultado se justifica pela semelhança entre a massa específica do cimento Portland e do PB ( $\approx 3.000 \text{ kg/m}^3$ ).

Os resultados de cada amostra analisada para as propriedades apresentadas nessa etapa, suas médias, desvios padrão e variâncias estão apresentados no Apêndice C.

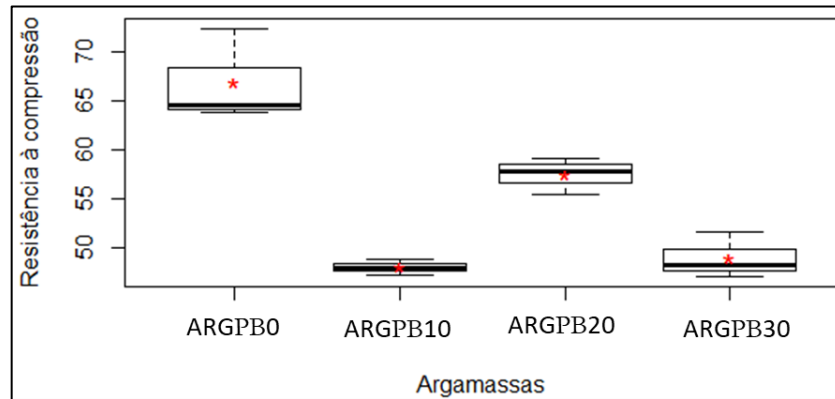
Em resumo foi possível concluir que a incorporação do PB influenciou diretamente na resistência à compressão e na absorção de água. Em contrapartida, tal efeito não é observado no módulo de elasticidade e na massa específica das argamassas produzidas.

Dessa maneira, determinou-se o teor de 20% de PB como teor ótimo para incorporação, considerando que o mesmo apresentou boas propriedades no estado endurecido, reduzindo consideravelmente o consumo de aglomerante e atendendo a todas as propriedades de autoadensabilidade.

#### 4.1.3 Análise estatística

A análise estatística foi realizada para a resistência à compressão e módulo de elasticidade das argamassas, sendo que é possível visualizar o comportamento dos resultados para a primeira propriedade no box-plot apresentado na Figura 79 e na Tabela 29.

**Figura 79** - Box-plot da resistência à compressão das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

**Tabela 29** - Análise estatística da resistência à compressão das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

Amostras	$f_{c_{28}}$ Médio (MPa)	Variância (MPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	ANOVA (p-valor)	Teste Tukey
ARGB0	66,86	22,15	0,4246	0,4016	0,001051	a
ARGB10	48,01	0,68				b
ARGB20	57,46	3,47				c
ARGB30	48,94	5,35				b

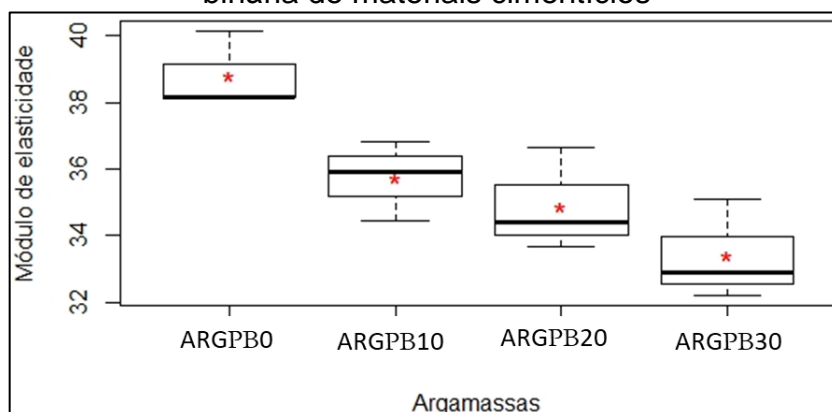
Fonte: A Autora

Observou-se, na Figura 79, que a ARGPB0 apresentou o resultado com maior discrepância com relação às outras médias obtidas. O teste de normalidade e homogeneidade indicaram que as amostras provieram de população normal e possuíram homogeneidade de variância. Dessa maneira, concluiu-se que as amostras possuem resistência à compressão significativamente diferentes.

Por fim, utilizando-se do Teste Tukey, confirmou-se a interpretação prévia do box-plot em que a argamassa de referência possuiu resistência à compressão diferente das demais, porém a substituição de 10% e 30% de cimento Portland por PB resultou em argamassas com resistência à compressão estatisticamente iguais.

Para o módulo de elasticidade das argamassas produzidas, o box-plot dos resultados está apresentado na Figura 80 e os resultados obtidos com a Anova na Tabela 30.

**Figura 80** - Box-plot da módulo de elasticidade das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

**Tabela 30** - Análise estatística do módulo de elasticidade das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

Amostras	$Ed_{28}$ Médio	Variância (GPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	ANOVA (p-valor)	Teste Tukey
ARGB0	38,82	1,31	0,05185	0,9728	0,076	a
ARGB10	35,74	1,44				ab
ARGB20	34,90	2,38				b
ARGB30	33,39	2,25				b

Fonte: A Autora

Constatou-se que as amostras são de população normal e possuíam homogeneidade de variância, sendo que apenas a ARGPB0 apresentou o resultado ligeiramente diferente com relação às outras médias obtidas.

Também foi possível afirmar que as amostras tiveram módulo de elasticidade com diferença significativa. E, através do teste Tukey, confirmou-se a interpretação do box-plot em que as ARGPB20 e ARGPB30 diferem significativamente dos outros teores utilizados.

Nos itens abaixo, apresenta-se a validação do procedimento de dosagem proposto para pastas e argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios.

## 4.2 ETAPAS 1 E 2 – PASTAS E ARGAMASSAS COM COMBINAÇÃO TERNÁRIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

### 4.2.1 Estudo em Pasta

Foram produzidas pastas apenas com sílica ativa (SA) para determinar se o aditivo superplastificante agiria sobre a partícula da mesma. As pastas de sílica ativa possuíram relação água/SA de 0,40 e apresentaram consistência seca decorrente de sua elevada superfície específica.

Além disso, a incorporação de diferentes teores de aditivo não resultou em alterações da sua consistência e, portanto, se concluiu que, de forma semelhante ao ocorrido com o PB, o aditivo superplastificante não foi adsorvido pela partícula de sílica nesta relação água/cimento empregada. Dessa maneira, justificando a incorporação do mesmo apenas sobre a massa de cimento Portland.

Na Tabela 31 é possível visualizar o consumo de material para as pastas cimentícias produzidas com combinação ternária de materiais cimentícios. Todas as pastas foram produzidas considerando o volume final de 1,8 L.

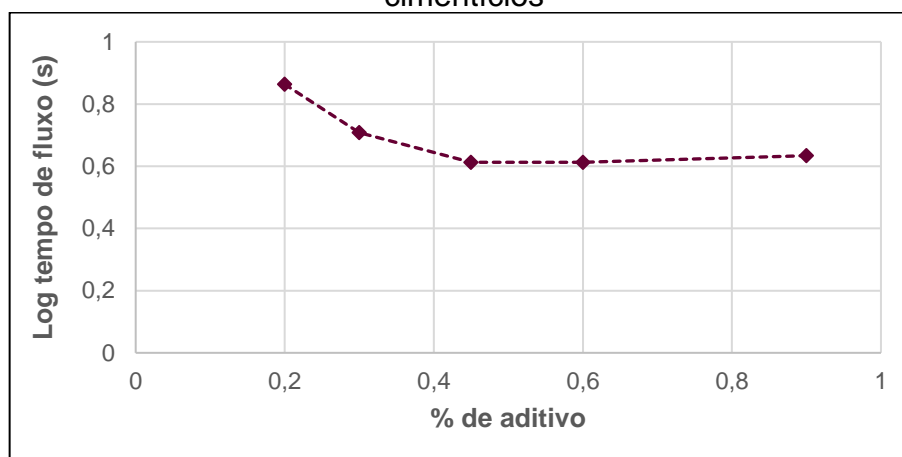
**Tabela 31** - Consumo de materiais utilizados na produção das pastas com combinação ternária de materiais cimentícios

<b>Amostra</b>	<b>CP (g)</b>	<b>PB (g)</b>	<b>SA (g)</b>	<b>Água (ml)</b>	<b>SP (ml)</b>
PPB-SA_0,1	1.520	380	122	809	1,4
PPB-SA_0,2	1.520	380	122	809	2,8
PPB-SA_0,3	1.520	380	122	809	4,2
PPB-SA_0,45	1520	280	122	809	6,3
PPB-SA_0,6	1.520	380	122	809	8,4
PPB-SA_0,9	1.520	380	122	809	12,6

Fonte: A Autora.

Com os consumos apresentados na Tabela 31, realizou-se o ensaio de tempo de escoamento cujos resultados encontram-se na Figura 81.

**Figura 81** - Tempo de fluidez das pastas com combinação ternária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

Identificou-se, na Figura 81, que o tempo de escoamento das pastas cimentícias diminuíram conforme houve o aumento do teor de aditivo até atingir a saturação, comportamento encontrado por diversos autores ao estudar aditivos superplastificantes (AGULLÓ et al., 1999; CALMON et al., 2013; CAMÕES, 2005; GOMES, GETU E AGULLÓ, 2003; MONTEIRO, PITANGUEIRA E WOLENSKI, 2012; PIOVEZAM, MELEIRO e IZA, 2008; SILVA, GOMES e MORAIS, 2019). Além disso, é importante mencionar que a pasta PPB-SA\_0,1 não possuiu resultado no gráfico da Figura 82, pois não apresentou escoamento no cone de Marsh.

Utilizando-se da metodologia proposta por Gomes, Gettu e Agullo (2003), calculou-se os ângulos internos da curva acima e seus resultados estão apresentados na Tabela 32.

**Tabela 32** - Ponto de saturação das pastas com combinação ternária de materiais cimentícios

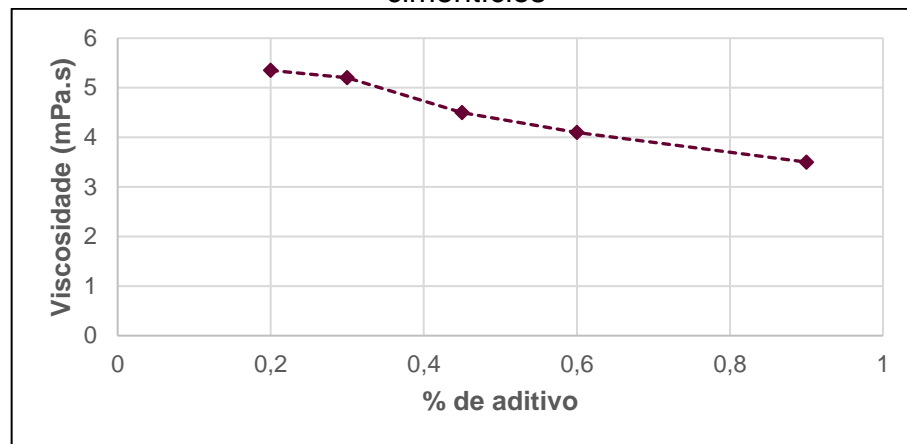
Pastas	Ângulo (°)
PCT_0,1	-
PCT_0,2	-
PCT_0,3	155,14
PCT_0,45	147,7
PCT_0,6	176,0
PCT_0,9	-

Fonte: A Autora

É possível visualizar na Tabela 32 que o ponto de saturação é 0,45%, sendo este o teor empregado nas argamassas produzidas na próxima etapa, finalizando a Etapa 1 do procedimento de dosagem.

Para complementar os estudos em pasta, os resultados da viscosidade aparente podem ser visualizados na Figura 82.

**Figura 82** - Viscosidade das pastas com combinação ternária de materiais cimentícios

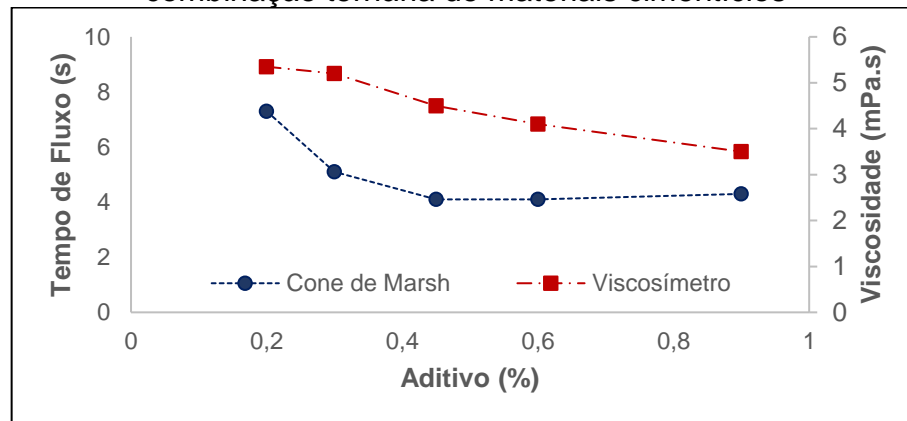


Fonte: A Autora

Observou-se que houve uma contínua redução da viscosidade aparente conforme houve o aumento do teor de aditivo superplastificante, resultado similar ao encontrado nas pastas de PB e por outros autores ao estudar o comportamento da viscosidade com o aumento do teor de aditivo superplastificante (LIU et al., 2017; PAPO e PIANI, 2004; SCHWARTZENTRUBER, ROY e CORDIN, 2006).

Para averiguar se houve uma tendência semelhante de comportamento entre os ensaios, plotou-se o gráfico da Figura 83.

**Figura 83 - Tempo de fluidez e a viscosidade das pastas cimentícias com combinação ternária de materiais cimentícios**



Fonte: A Autora

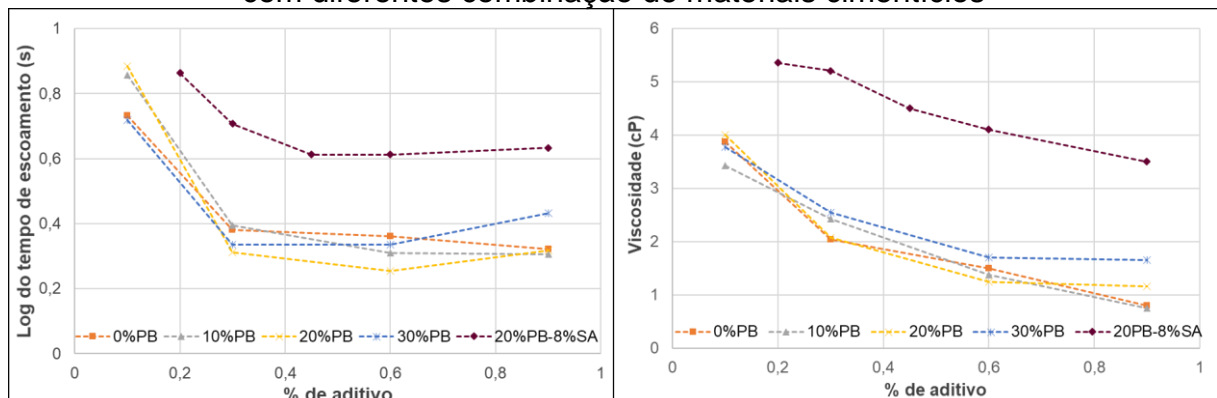
Foi possível observar na Figura 83 que os resultados de tempo de fluxo e viscosidade aparente apresentaram tendências semelhantes, indicando que a medida do tempo de escoamento está diretamente relacionada a viscosidade do material, como ocorrido no estudo anterior.

No subitem abaixo, apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos com o cone de Marsh e viscosímetro de Brookfield para as pastas produzidas com as diferentes combinações de materiais cimentícios.

#### 4.2.1.1 Comparação das pastas com diferentes combinações de materiais cimentícios

Este tópico tem o objetivo a comparação dos resultados em pasta com combinação binária e ternária. Os resultados podem ser visualizados nos gráficos da Figura 84.

**Figura 84 - Relação entre o tempo de fluidez e viscosidade das pastas cimentícias com diferentes combinação de materiais cimentícios**



Fonte: A Autora

Constatou-se, na Figura 84, que a incorporação da SA aumentou o tempo de escoamento e a viscosidade aparente do material. Tal resultado foi justificado, pois a mesma possuía superfície específica de 15.510 m<sup>2</sup>/ kg enquanto que a do PB era de 7.757 kg/m<sup>2</sup>. Ao incorporar uma adição mineral com o dobro da superfície específica houve um aumento na demanda de água e, dessa maneira, aumento da viscosidade encontrada (IVANOV e ROSHAVELOV, 1991 apud CASTRO, 2007; MENDES, 2015; TURK 2012).

Na Figura 84 também se constatou a validade do ensaio de cone de Marsh, pois o mesmo foi capaz de detectar a variação da viscosidade das pastas de maneira similar à encontrada no viscosímetro de Brookfield. Portanto foi possível concluir que o ensaio de cone de Marsh pode ser uma alternativa viável para estudo dessa propriedade reológica em pastas cimentícias, sendo seus resultados passíveis de correlação e de grande auxílio, principalmente quando o objetivo é avaliar o efeito de uma variável sobre a viscosidade do material cimentício.

No item abaixo, apresenta-se o estudo em argamassa com combinação ternária de materiais cimentícios produzida com o teor de aditivo superplastificante obtido.

#### 4.2.2 Estudo em Argamassa

Através da sequência de dosagem apresentada no item 3.2.1.2, foi feito o estudo do excesso de pasta ( $EX_{pasta}$ ), sobre o volume de vazios do agregado miúdo, com a combinação ternária de adições minerais – SA e PB.

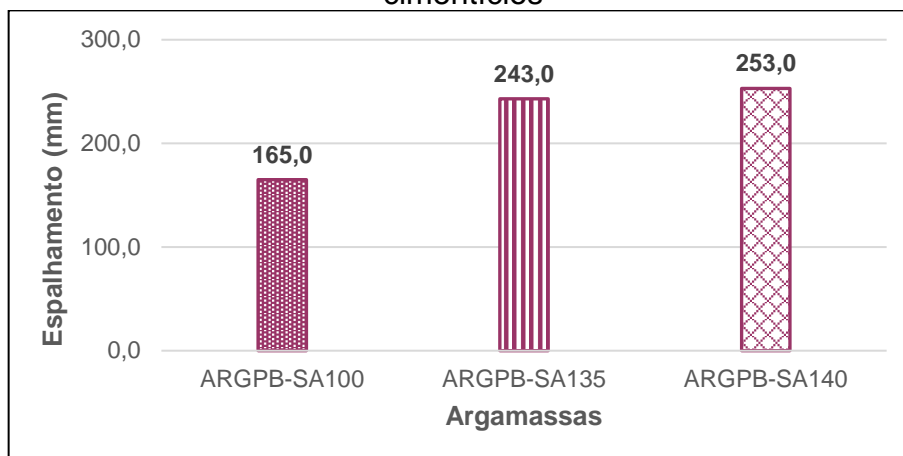
O desenvolvimento do procedimento de dosagem apresentado até aqui determinou que o teor de superplastificante seria de 0,45% sobre a massa de cimento, 20% de PB em substituição a massa de CP. Além disso, como variáveis previamente fixadas: 8% de SA em adição a massa de CP restante e água/cimentícios igual 0,40.

Foram produzidas argamassas com três teores de  $EX_{pasta}$ . A escolha de tais teores ocorreu de acordo com os resultados no estado fresco obtidos, sendo que o  $EX_{pasta} = 100\%$  foi escolhido como partida inicial para a aplicação do procedimento de dosagem. Esse  $EX_{pasta}$  representa a mesma relação  $\frac{V_{AM}}{V_{arg}}$  das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.

#### 4.2.2.1 Estado fresco

O resultado do espalhamento com o tronco de cone pode ser visualizado na Figura 85.

**Figura 85** - Espalhamento das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

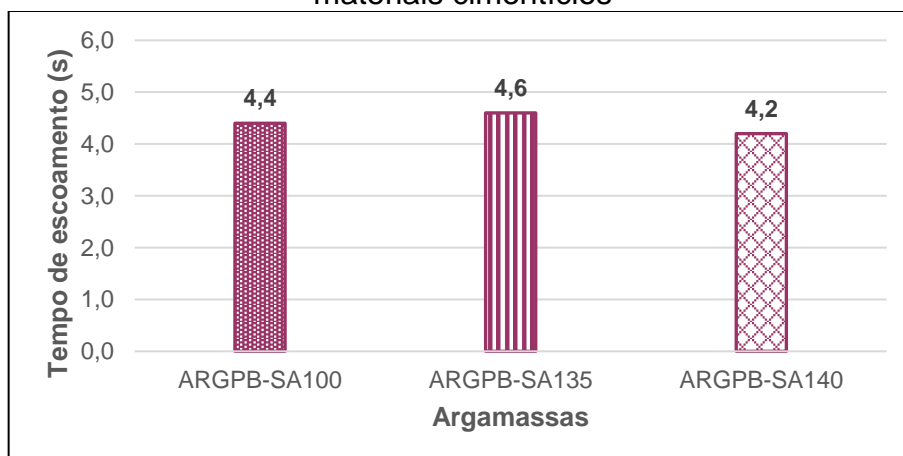


Fonte: A Autora

Verificou-se, na Figura 85, que com o acréscimo da quantidade de pasta, as argamassas apresentaram maior fluidez. Mendes (2016) afirmou que a pasta de cimento age como um lubrificante entre as partículas de agregado miúdo e ao aumentar o seu consumo, há um acréscimo de fluidez do material cimentício.

Com relação ao tempo de escoamento das argamassas estudadas, os resultados podem ser visualizados na Figura 86.

**Figura 86** - Tempo de escoamento das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

Foi possível observar que a alteração no excesso de pasta não alterou o tempo de escoamento das argamassas. O Funil V é um ensaio que correlaciona os seus resultados com a viscosidade aparente do material (OKAMURA, OSAWA E OUCHI, 2000; NEPOMUCENO, PEREIRA e LOPES, 2012). Portanto, como a viscosidade das argamassas é governada pela pasta cimentícia (AGULLÓ et al., 1999) e, apesar da variação de quantidade, todas as argamassas são constituídas de pastas de mesma viscosidade e, portanto, o tempo de escoamento foi pouco influenciado pela alteração do  $EX_{pasta}$ .

Utilizando-se das Equações 1 e 2 foi possível obter os índices de autoadensabilidade –  $G_m$  e  $R_m$  – e seus resultados com os limites da literatura estão apresentados na Tabela 33.

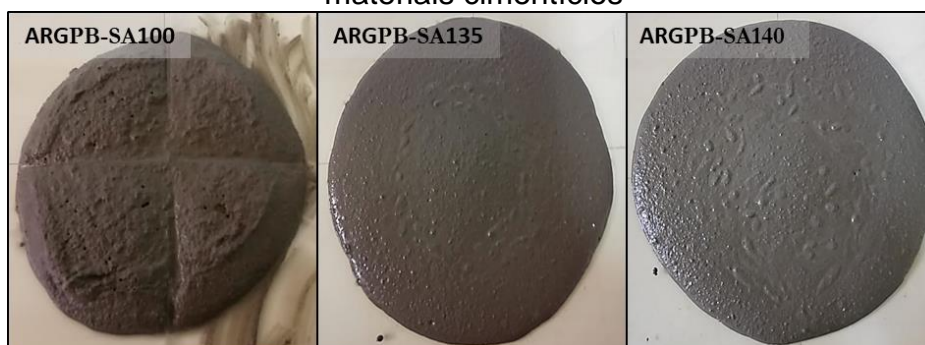
**Tabela 33** -  $G_m$  e  $R_m$  das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

Argamassas	$V_{AM}/V_{arg}$	$G_m$	$R_m (s^{-1})$
ARGPB-SA100	46%	1,7	2,3
ARGPB-SA135	42%	4,9	2,2
ARGPB-SA140	41%	5,4	2,5

Fonte: A Autora

Notou-se que, para o índice  $G_m$ , apenas a ARGPB-SA100 não o limite apresentado na metodologia. Com relação ao  $R_m$ , as argamassas estudadas estavam dentro do intervalo considerado. A estabilidade visual das argamassas estão apresentas na Figura 87.

**Figura 87** - Estabilidade visual das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

Observou-se, na Figura 87, que as argamassas produzidas não apresentaram nenhum sinal de segregação ou exsudação. Na Figura 88, é possível observar o comportamento das argamassas no procedimento expedito  $T_{risco}$ .

**Figura 88** - Trisco das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

Notou-se, na Figura 88, que a ARGPB-SA100 não obteve fluidez necessária, indicando que não obteve características de autoadensabilidade, como já determinado segundo os índices  $G_m$  e  $R_m$ . As demais argamassas produzidas foram capazes de retornar à posição, sem apresentar segregação e exsudação e, além disso, o material deslocado com a espátula também se manteve coeso com o deslocamento.

Entretanto, a ARGPB-SA140 apesar de apresentar fluidez para escoar, o pequeno acréscimo de viscosidade, detectado no índice  $R_m$ , fez com que não houvesse preenchimento completo do centro do risco produzido.

Portanto, o procedimento expedito proposto pode ser de extremo auxílio na avaliação das características de autoadensabilidade em argamassas, pois foi capaz de caracterizar as mesmas de maneira mais completa, apresentando sua capacidade de preenchimento, fluidez, coesão e presença de exsudação dinâmica.

Como conclusão da Etapa 2 do procedimento de dosagem, o  $EX_{pasta}=135\%$ , que representa  $\frac{V_{AM}}{V_{arg}} = 42\%$ , foi definido como teor ideal de excesso de pasta para produção do CLAA, pois obteve resultados satisfatórios de autoadensabilidade segundo Melo (2005) e no  $T_{risco}$ .

Por fim, na Tabela 34, é possível visualizar o consumo dos materiais por  $m^3$  das argamassas estudadas. Importante mencionar que a massa de cimento apresentada já está descontada da quantidade de PB incorporado em substituição.

**Tabela 34** - Consumo de materiais das argamassas produzidas com combinação ternária de materiais cimentícios

Amostra	$EX_{pasta}$ (%)	$V_{AM}/V_{arg}$	CP (kg)	PB (kg)	SA (kg)	AMN (kg)	Água (L)	SP (L)
ARGPB-SA100	100	46%	567	142	45	1213	301	2,25
ARGPB-SA135	135	42%	608	152	49	1108	324	2,43
ARGPB-SA140	140	41%	614	153	49	1095	327	2,52

Fonte: A Autora

O desenvolvimento do cálculo para obtenção do consumo de materiais da Tabela 34 encontra-se no Apêndice B. A Etapa 2 do procedimento de dosagem foi finalizada neste item com a definição do  $EX_{pasta}$ , porém na seção abaixo estão contidos os resultados no estado endurecido da ARGPB-SA135 e ARGPB-SA140.

#### 4.2.2.2 Estado endurecido

Os resultados das propriedades no estado endurecido, aos 28 dias, podem ser visualizados na Tabela 35.

**Tabela 35** - Resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e massa específica das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Absorção de água (%)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
ARGPB-SA135	56,8	35,5	8,4	2310,0
Desvio padrão	3,70	1,66	0,09	1,40
ARGPB-SA140	52,8	36,3	8,0	2315,5
Desvio padrão	4,23	1,67	0,45	4,07

Fonte: A Autora

Como a alteração de  $EX_{pasta}$  é pequena entre as argamassas analisadas – 135% para 140% - representando variação da relação  $\frac{V_{AM}}{V_{arg}}$  de 0,41 para 0,42 – as propriedades no estado endurecido obtiveram resultados similares, quando considerado o desvio padrão das amostras.

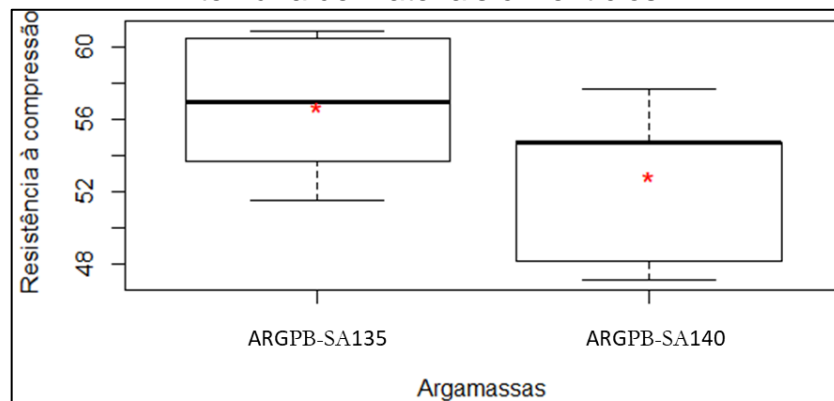
Os resultados de cada amostra analisada para as propriedades da Tabela 35, suas médias, desvio padrão e variâncias estão apresentados no Apêndice D.

#### 4.1.3 Análise estatística

Aplicou-se o teste t não-pareado para a análise estatística das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios, pois nesta etapa do procedimento metodológico compara-se apenas duas amostras: a ARGPB-SA135 e a ARGPB-SA140.

Dessa maneira, com relação à resistência à compressão aos 28 dias, pode-se visualizar o comportamento dos resultados no box-plot apresentado na Figura 89 e na Tabela 36.

**Figura 89** - Box-plot da resistência à compressão das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

**Tabela 36** - Análise estatística da resistência à compressão das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

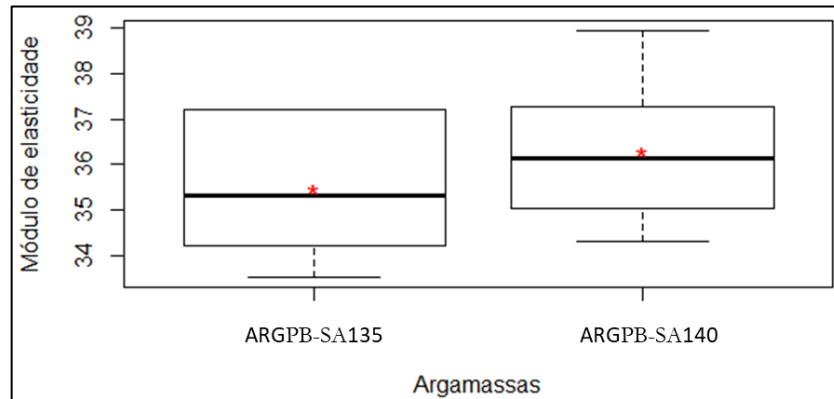
Argamassas	$f_{c28}$ Médio (MPa)	Variância (MPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p-valor)
ARGPB-SA135	56,75	13,69	0,6435	0,7768	0,1186
ARGPB-SA140	52,83	17,88	0,1312		

Fonte: A Autora

Observou-se que não houve diferença significativa entre as resistências à compressão da ARGPB-SA135 e ARGPB-SA140. O teste de normalidade e homogeneidade validaram que as amostras provêm de população normal e possuíam homogeneidade de variância.

Com relação ao módulo de elasticidade, o box-plot dos resultados está apresentado na Figura 90 e os resultados obtidos com o teste t não pareado na Tabela 37.

**Figura 90** - Box-plot da módulo de elasticidade das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios



Fonte: A Autora

**Tabela 37** - Análise estatística do módulo de elasticidade das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

Argamassas	$Ed_{28}$ Médio	Variância (MPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p-valor)
ARGPB-SA135	35,47	2,75	0,133	0,9916	0,4038
ARGPB-SA140	36,31	2,78	0,933		

Fonte: A Autora

Constatou-se que de maneira semelhante ao ocorrido na resistência à compressão, não houve diferença entre os resultados de módulo de elasticidade das argamassas. O teste de normalidade e homogeneidade confirmaram que as amostras foram de população normal e possuíam homogeneidade de variância.

Dessa maneira, considerando todas os resultados obtidos nas argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios, definiu-se que o  $EX_{pasta}$  ideal foi igual a 135%.

#### 4.4 ETAPA 3 – CONCRETO

Nesta etapa, avaliou-se o excesso de argamassa ( $EX_{arg}$ ) sobre o volume de vazios do agregado graúdo para que fosse possível alcançar características satisfatórias de autoadensabilidade e determinar suas propriedades no estado endurecido.

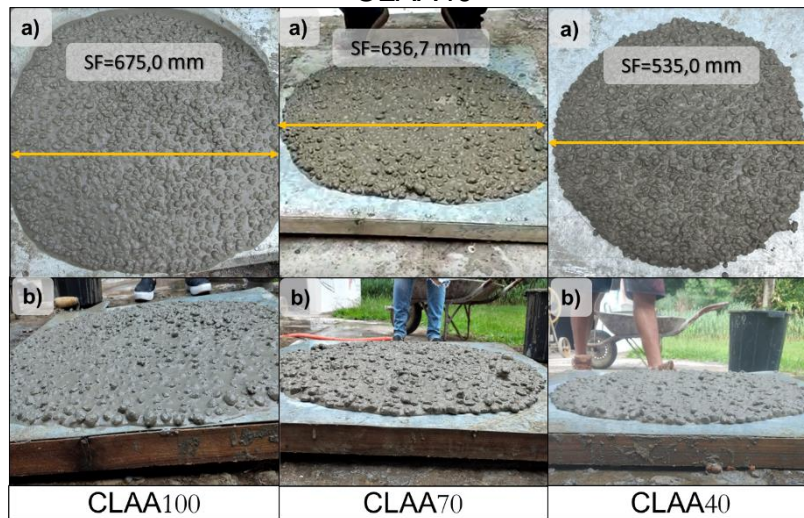
Iniciou-se o estudo com  $EX_{arg}$  igual a 100%, pois estava próximo do limite inferior da relação volumétrica de agregado graúdo por concreto ( $\frac{V_{AGL}}{V_{conc}} = 28\%$ )

proposto por Domone (2006). Os outros teores foram determinados de acordo com os resultados de autoadensabilidade obtidos.

#### 4.4.1 Estado fresco – Obtenção do $EX_{arg}$ do procedimento de dosagem

Na Figura 91 é possível observar os resultados no ensaio de *slump-flow* e sua estabilidade visual.

**Figura 91** - Espalhamento (a) e Estabilidade visual (b) do CLAA100, CLAA70 e CLAA40



SF=Diâmetro médio de espalhamento.

Fonte: A Autora

Observou-se, na Figura 91, que o  $EX_{arg}$  inicial de 100% foi reduzido para 70% e, em seguida, para 40%. O CLAA100 apresentou segregação da argamassa ao redor da amostra. Dessa maneira, a redução do  $EX_{arg}$  de 100% para 70% resultou em um espalhamento dentro dos limites propostos pela norma, sem apresentar segregação e/ou exsudação visual do material. Porém, ao alterar o  $EX_{arg}$  de 70% para 40%, o concreto não alcançou o mínimo de 550 mm previsto pela ABNT NBR 15823-1/2017.

Portanto ao diminuir o  $EX_{arg}$  incorporado, houve menor fluidez no ensaio *slump-flow*, pois o decréscimo do teor de argamassa promoveu a redução do espaçamento entre as partículas dos agregados (BOGAS, GOMES e PEREIRA, 2012; LI, CHEN, WAN, 2017).

Os resultados corroboraram com o encontrado por Assunção (2016), Afzali-Naniz e Mazloon (2018), Cui, Lo e Xing (2013), Grabois e Cordeiro (2016), Li, Chen e Wan (2017) e Mazloon e Salehi (2018), Verzegnassi (2015).

Na Tabela 38 é possível visualizar os resultados das demais propriedades no estado fresco.

**Tabela 38** - Propriedades no estado fresco dos concretos com diferentes excessos de argamassa

Concretos	T <sub>500</sub> (s)	Anel J (mm)	Caixa L (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	Funil V (s)
CLAA100	2,2	10,0	1,0	3,8
CLAA70	2,4	46,7	0,8	4,5
CLAA40	-	-	-	-

Fonte: A Autora

Observou-se que a alteração do  $EX_{arg}$  não interferiu significativamente na viscosidade plástica aparente (T<sub>500</sub> e Funil V) dos concretos produzidos. De acordo com Bogas, Gomes e Pereira (2012) e Uygunoglu e Topçu (2011), o tempo de escoamento é governado principalmente pela densidade do concreto, forma e granulometria dos agregados e viscosidade da pasta.

Portanto, como as três últimas variáveis são iguais em todos os concretos produzidos, a diferença de densidade não foi expressiva o suficiente para alterar os resultados desta propriedade.

Com relação à habilidade passante (Anel J e Caixa L), notou-se também na Tabela 38, que a redução do  $EX_{arg}$  afetou esta propriedade, havendo menor lubrificação entre as partículas dos agregados e, por consequência, maior atrito entre as mesmas gerando, dessa maneira, menor fluidez do material (ASSUNÇÃO, 2016; BOGAS, GOMES e PEREIRA, 2012; LI, CHEN, WAN, 2017).

Na Tabela 39 é possível visualizar se os concretos produzidos obtiveram resultados dentro do recomendado pela ABNT NBR 15823/2017.

**Tabela 39** - Resumo das características de autoadensabilidade dos concretos produzidos com relação à ABNT NBR 15823/2017

Concretos	Slump-flow	T <sub>500</sub>	Anel J	Caixa L	Funil V
CLAA100	SIM*	SIM	SIM	SIM	SIM
CLAA70	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
CLAA40	NÃO	NÃO	-**	-**	-**

\*Apresentou exsudação na análise visual.

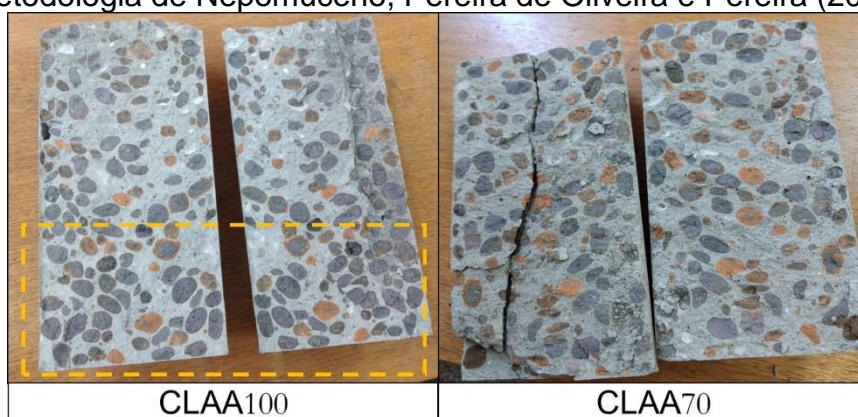
\*\*Ensaio não realizado.

Fonte: A Autora

Portanto, de acordo com a Tabela 39, apenas o CLAA70 obteve propriedades satisfatórias de autoadensabilidade em todos os ensaios no estado fresco, de acordo com o recomendado pela ABNT NBR 15823/2017, incluindo o não aparecimento de exsudação e segregação.

Por fim, os resultados da segregação estática dos concretos leves autoadensáveis podem ser visualizados na Figura 92.

**Figura 92** - Segregação estática dos concretos CLAA70 e CLAA100 segundo metodologia de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)



**Fonte:** A Autora

Verificou-se no destaque da Figura 92 que houve a presença de uma leve segregação estática no CLAA100, assim como o mesmo apresentou segregação dinâmica no ensaio de espalhamento no estado fresco. Bogas, Gomes e Pereira (2012) afirmam a diminuição da distância entre as partículas do agregado graúdo leve, como ocorrido no CLAA70, pode alterar a viscosidade do concreto, aumentando sua resistência à segregação.

#### 4.4.2 Considerações sobre o procedimento de dosagem proposto

Considerando que o procedimento de dosagem proposto é finalizado com a obtenção das propriedades no estado fresco, esta seção apresenta as conclusões sobre a validação do mesmo.

O consumo de materiais por m<sup>3</sup> dos CLAAs produzidos estão contidos na Tabela 40, sendo que os mesmos foram obtidos a partir do equacionamento proposto no procedimento de dosagem no item 3.2.1.3, cujo desenvolvimento encontra-se no Apêndice E.

**Tabela 40** - Consumo de materiais em kg/m<sup>3</sup> e m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> dos concretos CLAA100, CLAA70, CLAA40

Concretos	CP (/m <sup>3</sup> )		PB (/m <sup>3</sup> )		SA (/m <sup>3</sup> )		AMN (/m <sup>3</sup> )		AGL (/m <sup>3</sup> )		Água (/m <sup>3</sup> )	SP (/m <sup>3</sup> )
	kg	m <sup>3</sup>	kg	m <sup>3</sup>	kg	m <sup>3</sup>	kg <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kg	m <sup>3</sup>	L	L
CLAA100	470	0,16	118	0,04	38	0,02	513	0,31	315	0,28	220	2,0
CLAA70	449	0,15	112	0,04	36	0,02	490	0,30	354	0,32	230	1,9
CLAA40	422	0,14	106	0,04	34	0,02	461	0,28	403	0,36	240	1,7

Fonte: A Autora

O consumo de agregado graúdo obtido com o procedimento de dosagem proposto estava de acordo com o apresentado na Tabela 6 da revisão sistemática. Também é importante destacar que a incorporação do pó de basalto resultou em uma economia de, em média, 112 kg de aglomerante por m<sup>3</sup> de concreto produzido.

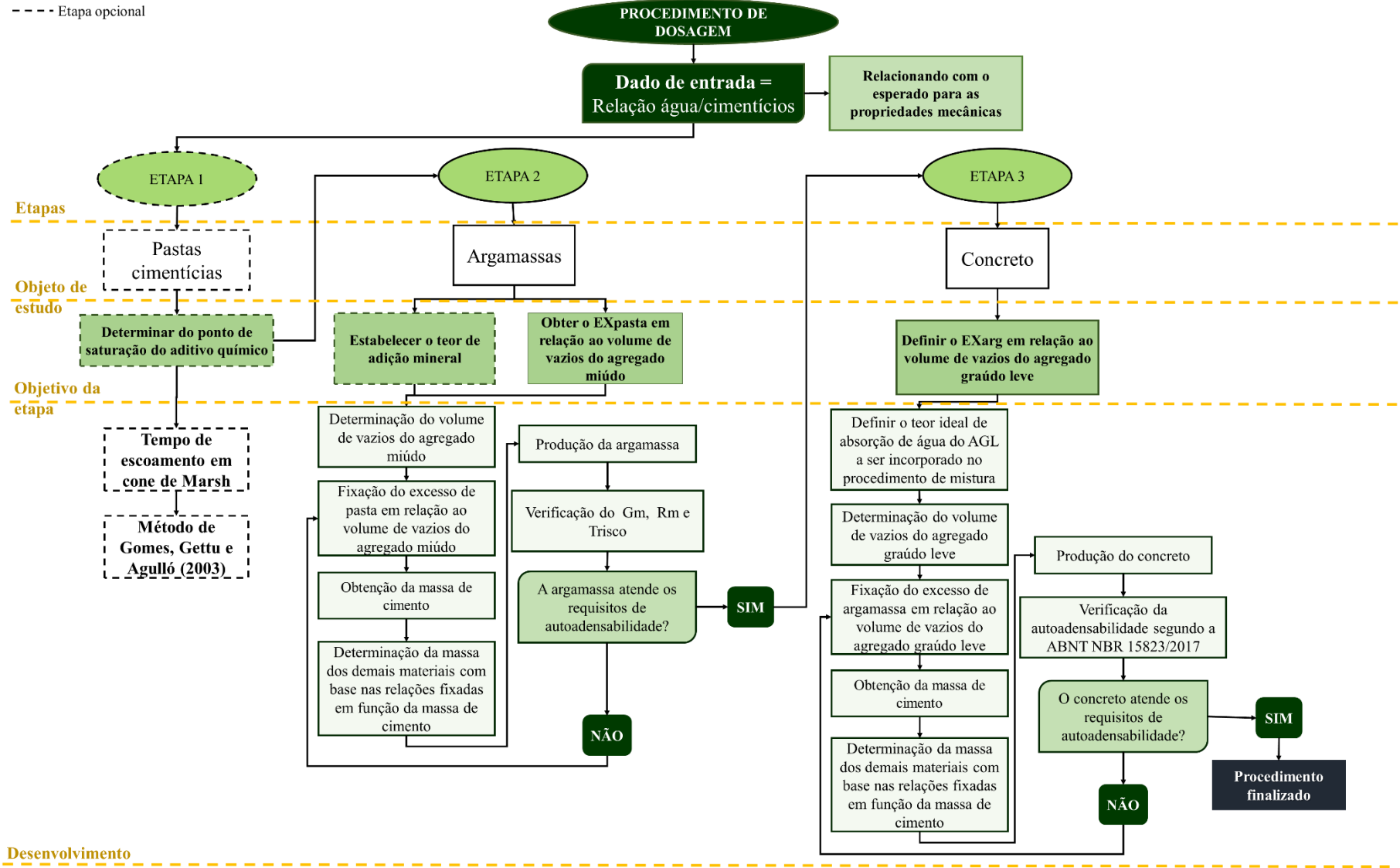
Portanto, considerando os resultados no estado fresco, o procedimento proposto foi validado ao obter um concreto (CLAA70) com características satisfatórias de autoadensabilidade e consumo de cimento Portland de 449 kg/m<sup>3</sup>.

Ainda com relação ao CLAA70 destaca-se: a relação volumétrica  $\frac{V_{AGL}}{V_{conc}} = 32\%$  está dentro dos limites apresentados por Domone (2006), Melo (2005), Li, Chen e Wan (2017); a relação  $\frac{V_{AM}}{V_{arg}} = 42\%$  conforme Domone (2006), Okamura e Ouchi (2003) e Assunção (2016).

Dessa maneira, nota-se que as proporções de materiais apresentadas em concretos autoadensáveis de peso normal podem ser aplicadas para a produção do CLAA, desde que sejam consideradas as características de absorção de água do agregado graúdo leve. Importante mencionar que apesar da validação obtida para o procedimento de dosagem proposto, o mesmo necessita de refinamento.

Dessa maneira, resume-se o procedimento de dosagem proposto no fluxograma apresentado na Figura 93.

**Figura 93 - Fluxograma completo do procedimento de dosagem proposto**



Fonte: A Autora

Com o procedimento de dosagem concluído, as demais seções apresentam a complementação da caracterização dos concretos produzidos.

#### 4.4.3 Estado endurecido – Influência da alteração do $EX_{arg}$

Os resultados das propriedades mecânicas dos concretos produzidos podem ser visualizados na Tabela 41.

**Tabela 41 - Propriedades mecânicas do CLAA70 e CLAA100**

Concretos	$F_{ck} - 7$ dias (MPa)	$F_{ck} - 28$ dias (MPa)	$E_d - 28$ dias (GPa)	$E_e - 28$ dias (GPa)
CLAA100	30,4	34,6	25,31	23,18
Desvio padrão	1,26*	0,67*	0,48	6,59
CLAA70	29,6	30,6	22,30	17,8
Desvio padrão	1,36*	0,46*	0,38	0,73

\*Desvio padrão calculado conforme apresentado na norma NBR 5739 (ABNT, 2018).

Fonte: A Autora

Notou-se, na Tabela 41, que as resistências à compressão aos 7 dias tiveram resultados semelhantes considerando o desvio padrão das amostras. Também foi possível observar que aos 7 dias, os concretos atingiram 89% e 96% da resistência encontrada aos 28 dias para o CLAA100 e CLAA70, respectivamente. Resultado esperado considerando o tipo de cimento utilizado – CPV ARI (ABNT NBR 16697:2018; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A mesma propriedade aos 28 dias apresentou resultados com diferença mais acentuada entre o CLAA100 e o CLAA70, sendo o primeiro 11,5% maior, pois conforme o processo de hidratação ocorreu com o avanço da idade, o volume do agregado leve se tornou parte importante do sistema (VERZEGNASSI, 2015).

Os resultados de resistência à compressão corroboram com o encontrado por Verzegnassi (2015), Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) e Bogas, Gomes e Pereira (2012).

Em sequência, com relação aos módulos de elasticidade estáticos aos 28 dias, observou-se que os concretos apresentaram diferença pouco significativa, quantitativamente, segundo Borja (2011). É importante mencionar que a tendência à segregação do CLAA100 aparentou ter impactado os resultados, gerando um desvio padrão superior aos dos demais ensaios.

Constatou-se também que o módulo de elasticidade dinâmico foi 8,4% e 20,2% maior para os concretos CLAA100 e CLAA70, respectivamente, do que o módulo de elasticidade estático. A análise comparativa para o CLAA100 ficou prejudicada pelo seu alto desvio padrão e presença de segregação durante a produção. Entretanto, para o CLAA70 a relação entre o módulo estático e dinâmico esteve dentro da porcentagem apresentada por Mehta e Monteiro (2014).

Os resultados das propriedades físicas e hidráulicas podem ser visualizados na Tabela 42.

**Tabela 42 - Propriedades físicas e hidráulicas do CLAA70 e do CLAA100**

Concretos	Massa específica seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
CLAA100	1.784,9	9,99	16,48
Desvio padrão	46,24	0,68	0,89
CLAA70	1.536	9,23	15,33
Desvio padrão	71,8	0,26	0,33

Fonte: A Autora

Como pôde ser visualizado na Tabela 42, todos os concretos produzidos são classificados como leve, segundo a ABNT NBR 8953/2015. A diminuição do  $EX_{ARG}$  gerou concretos com menores massa específicas, graças ao aumento do volume de agregado graúdo leve incorporado (ASSUNÇÃO, 2016; NEPOMUCENO, PEREIRA DE OLIVEIRA E PEREIRA, 2018; VERZEGNASSI, 2015).

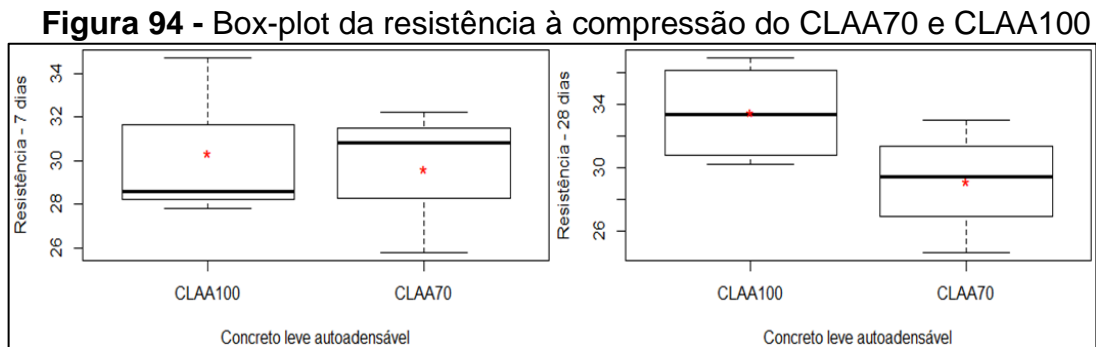
Com relação à absorção de água e o índice de vazios, notou-se que a variação do volume de agregado graúdo leve pouco interferiu nos resultados obtidos, quando consideramos o desvio padrão do ensaio. Os resultados obtidos em ambas as propriedades corroboram com o encontrado por Verzegnassi (2012).

Concluindo, o CLAA70 produzido com o procedimento de dosagem proposto apresentou propriedades satisfatórias, pois apresentou características de autoadensabilidade, propriedades mecânicas, hidráulicas e físicas adequadas. Além disso, o mesmo apresentou fator de eficiência (resistência compressão/massa específica do concreto) igual à 20 MPa.dm<sup>3</sup>/kg.

Na seção abaixo, apresenta-se os resultados da análise estatística dos ensaios de resistência à compressão e módulos de elasticidade realizados.

#### 4.4.2.1 Análise estatística - Concretos com $EX_{arg}$ como variável

O comportamento dos resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos concretos leves autoadensáveis produzidos estão presentes na Figura 94 e na Tabela 43.



**Tabela 43 - Análise estatística da resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos CLAA70 e CLAA100**

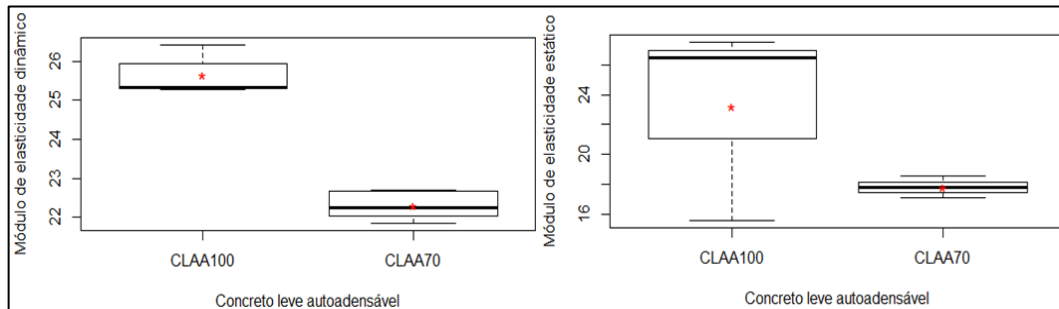
Concretos	$f_{c_7}$ Médio (MPa)	Variância (MPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p-valor)
CLAA100	30,4	11,32	0,4003	0,8856	0,8058
CLAA70	29,6	14,24	0,2028		
Concretos	$f_{c_{28}}$ Médio (MPa)	Variância (MPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p-valor)
CLAA100	33,47	10,22	0,4954	0,9129	0,1116
CLAA70	29,11	11,73	0,7673		

Fonte: A Autora

Foi possível observar na Figura 94 e na Tabela 43 que, em ambas as idades, a incorporação de um excesso de argamassa inferior não gerou diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão.

Com relação ao módulo de elasticidade estático e dinâmico, a análise estatística com o box-plot pode ser visualizada na Figura 95 e na Tabela 44.

**Figura 95** - Box-plot do módulo de elasticidade estático e dinâmico do CLAA70 e CLAA100 aos 28 dias



Fonte: A Autora

**Tabela 44** - Análise estatística do módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias dos CLAA70 e CLAA100

Concretos	$E_d$ Médio (GPa)	Variância (GPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p- valor)
CLAA100	25,65	0,255	0,3509	0,5841	$2,303 \times 10^{-6}$
CLAA70	24,38	0,170	0,09631		
Concretos	$E_e$ Médio (GPa)	Variância (GPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p- valor)
CLAA100	23,18	43,44	0,1508	0,2374	0,2297
CLAA70	17,80	0,522	0,8472		

Fonte: A Autora

Notou-se que a redução do  $EX_{ARG}$  alterou significativamente o módulo de elasticidade dinâmico, porém o mesmo comportamento não é obtido no módulo de elasticidade estático. Entretanto é importante mencionar que o último apresentou uma alta variabilidade, principalmente por ser um ensaio em que as características da amostra avaliada interferem de maneira significativa.

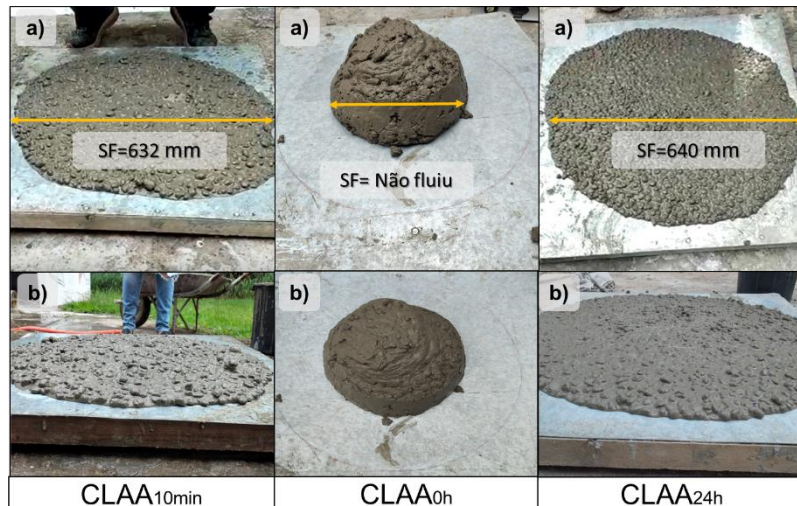
Dessa maneira, o próximo tópico abrange o estudo da influência da incorporação de diferentes quantidades de água de absorção do agregado graúdo leve no procedimento de mistura do CLAA.

#### 4.4.4 Estado fresco – Influência da água de absorção do agregado graúdo leve

Para o estudo deste tópico, utilizou-se como referência o CLAA70, pois o mesmo apresentou as melhores características de autoadensabilidade. O CLAA70 foi denominado então como CLAA<sub>10min</sub>, pois teve incorporado a água de absorção do agregado graúdo leve após 10 minutos de imersão na água de amassamento, representando 48% da água total de absorção.

Os resultados do ensaio de espalhamento e estabilidade visual para os concretos produzidos podem ser observados na Figura 96.

**Figura 96** - Espalhamento (a) e Estabilidade visual (b) dos concretos CLAA10min, CLAA0h e CLAA24h

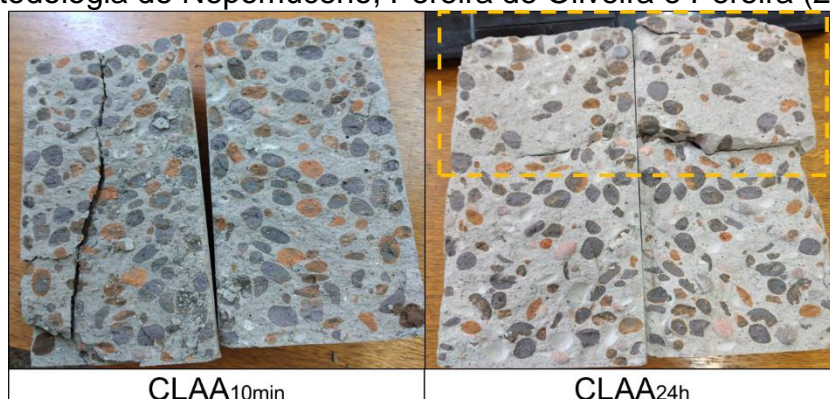


Fonte: A Autora

Visualizou-se, na Figura 96, que ao não considerar a água de absorção do agregado graúdo, o concreto produzido perdeu suas características de autoadensabilidade. Entretanto, a alteração de água entre o CLAA<sub>10min</sub> e o CLAA<sub>24h</sub> não foi suficiente para alterar de maneira expressiva o espalhamento obtido.

Observou-se também que não houve segregação do material, porém, como a argila expandida possui uma tendência à segregação estática, utilizou-se da metodologia de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018) para determinação da mesma. O resultado encontra-se na Figura 97.

**Figura 97** - Segregação estática dos concretos CLAA10min e CLAA24h segundo metodologia de Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)



Fonte: A Autora

Constatou-se que a segregação estática se vê presente na área destacada da Figura 98 no concreto CLAA<sub>24h</sub>. Deste modo, foi possível inferir que a incorporação da água de 24 horas de absorção do agregado graúdo não foi totalmente absorvida pelo mesmo durante o procedimento de mistura. Ocorreu que o excesso de água incorporado resultou em diminuição da coesão das partículas e, portanto, maior tendência à segregação (ASSUNÇÃO, 2016; BOGAS, GOMES e PEREIRA, 2012; TING, 2019).

Na Tabela 45, é possível visualizar os resultados das demais propriedades no estado fresco.

**Tabela 45** - Propriedades no estado fresco do CLAA<sub>10min</sub>, CLAA<sub>0h</sub> e CLAA<sub>24h</sub>

Concretos	T <sub>500</sub> (s)	Anel J (mm)	Caixa L	Funil V (s)
CLAA <sub>10min</sub>	2,4	46,7	0,80	4,5
CLAA <sub>0h</sub>	Não fluiu	-*	-*	-*
CLAA <sub>24h</sub>	1,5	5	0,84	2,8

\*Ensaio não realizou porque o concreto não apresentou fluidez suficiente.

**Fonte:** A Autora

Com relação às demais propriedades apresentadas na Tabela 45, foi possível observar influência nas propriedades de habilidade passante pelo Anel J e viscosidade plástica aparente, pois o aumento da quantidade de água incorporada levou à uma redução do atrito interno entre as partículas e, por consequência, diminuição da viscosidade e aumento da fluidez (LOFTY, HOSSAIN e LACHEMI, 2015).

Por fim, notou-se que os resultados da Caixa em L sofreram alterações muito sutis com a presença de maior quantidade de água livre na mistura, resultados que corroboram com o encontrado por Bogas, Gomes e Pereira (2012). Entretanto os autores também afirmam que neste ensaio a tendência à exsudação e segregação fica mais visível, resultado também encontrado nesta pesquisa para o CLAA<sub>24h</sub> como apresentado na Figura 98.

**Figura 98** - Presença de exsudação no ensaio da Caixa L para o concreto CLAA24h



Fonte: A Autora

Concluindo, este estudo reafirma a importância da avaliação da absorção de água do agregado graúdo leve ao longo do tempo, já que a produção do CLAA com a incorporação da água de absorção normativa levou à segregação do material através da metodologia de dosagem empregada.

Deste modo, o próximo tópico apresenta as propriedades no estado endurecido dos concretos CLAA<sub>10min</sub> e CLAA<sub>24h</sub>.

#### 4.4.5 Estado endurecido – Influência da água de absorção do agregado graúdo leve

Os resultados para as propriedades mecânicas do CLAA<sub>10min</sub> e CLAA<sub>24h</sub> encontram-se na Tabela 46.

**Tabela 46** - Propriedades mecânicas CLAA<sub>10min</sub> e CLAA<sub>24h</sub>

Concretos	$F_{ck} - 7$ dias (MPa)	$F_{ck} - 28$ dias (MPa)	$E_d - 28$ dias (GPa)	$E_e - 28$ dias (GPa)
CLAA <sub>10min</sub>	29,6	30,6	22,30	17,8
Desvio padrão	1,36*	0,46*	0,47	0,73
CLAA <sub>24h</sub>	27,6	31,8	21,5	18,39
Desvio padrão	1,61*	1,10*	0,64	2,42

\*Desvio padrão calculado conforme apresentado na norma NBR 5739 (ABNT, 2018).

Fonte: A Autora

Foi possível observar, na Tabela 46, que a variação da quantidade de água incorporada à mistura não gerou alterações relevantes nas propriedades mecânicas dos concretos avaliados, considerando os desvios padrão dos ensaios. Resultados

similares de resistência à compressão foram obtidos por Topçu e Uygunoglu (2010) e Floyd, Hale e Bimaster (2015). Importante mencionar que para o CLAA<sub>10min</sub> a relação água/cimentícios, considerando a água de absorção, é de 0,44 e para o CLAA<sub>24h</sub> é de 0,47.

Com relação as propriedades físicas e hidráulicas, pode-se visualizar os resultados das mesmas na Tabela 47.

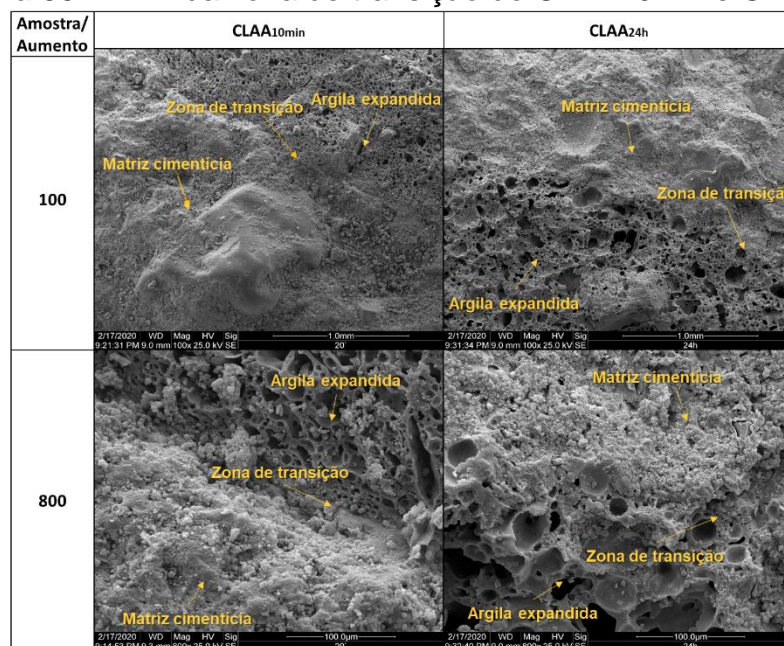
**Tabela 47 - Propriedades físicas e hidráulicas do CLAA<sub>10min</sub> e CLAA<sub>24h</sub>**

Concretos	Massa específica seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
CLAA <sub>10min</sub>	1.536	9,2	15,3
Desvio padrão	71,8	0,68	0,33
CLAA <sub>24h</sub>	1.533	10,2	15,7
Desvio padrão	87,4	0,44	1,56

Fonte: A Autora

Observou-se, na Tabela 47, que como ocorrido com as propriedades mecânicas, a alteração na quantidade de água incorporada nos concretos CLAA<sub>10min</sub> e CLAA<sub>24h</sub> foi ínfima, não influenciando nas propriedades físicas e hidráulicas. Por fim, na Figura 99 é possível visualizar a zona de transição dos concretos através de imagens obtidas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

**Figura 99 - MEV da zona de transição do CLAA<sub>10min</sub> e CLAA<sub>24h</sub>**



Fonte: A Autora

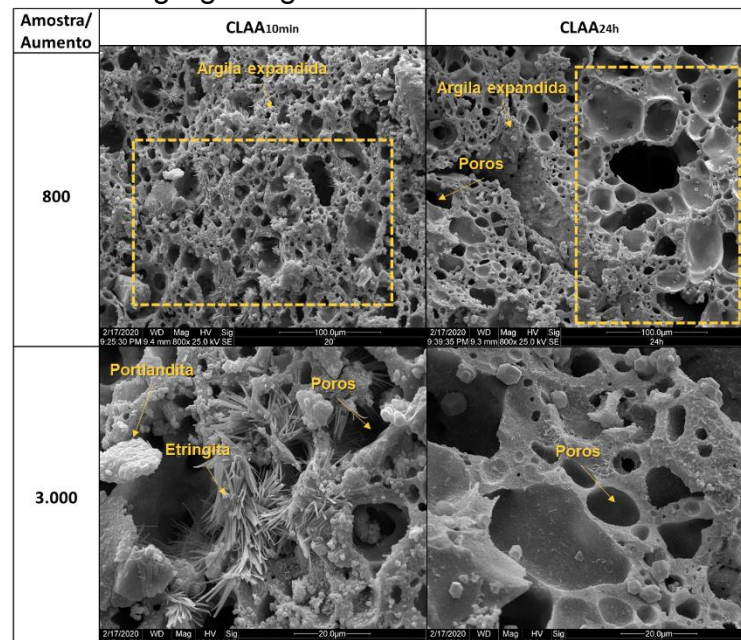
A textura superficial rugosa, a maior porosidade e a alta absorção dos agregados graúdos leves fazem com que a interface matriz/agregado leve seja mais compacta, dificultando sua delimitação com maior clareza e caracterizando-a pela interconectividade mecânica em combinação com a interação química pela reação pozolânica (ELSHARIEF; COHEN e OLEK, 2005; TOPÇU e UYGUNOGLU, 2010).

Dessa maneira, foi possível visualizar na Figura 99 que a zona de transição do CLAA<sub>24h</sub> era mais claramente delimitada do que a do CLAA<sub>10min</sub>, pois o agregado graúdo leve do primeiro apresentou maior saturação e dificultou o processo de absorção da matriz cimentícia e formação do intertravamento.

Além disso, também era visível como a própria matriz cimentícia do CLAA<sub>24h</sub> era mais porosa do que a presente no CLAA<sub>10min</sub>, pois esta propriedade está diretamente relacionada com a relação água/cimento, ou seja, quanto maior a última, mais porosa será a matriz cimentícia (BORJA, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013; TOPÇU e UYGUNOGLU, 2010).

Por fim, essa porosidade reduzida também foi detectada na própria argila expandida presente no CLAA<sub>10min</sub>, como pode ser observado na Figura 100.

**Figura 100** - MEV do agregado graúdo nos concretos CLAA<sub>10min</sub> e CLAA<sub>24h</sub>



Fonte: A Autora

Notou-se, na Figura 100, que a porosidade interna da argila expandida era menor no CLAA<sub>10min</sub>, além disso, também foi possível observar que o agregado graúdo

nesse concreto absorveu a pasta cimentícia, como confirmado pelo aparecimento de Etringita e Portlandita na amostra.

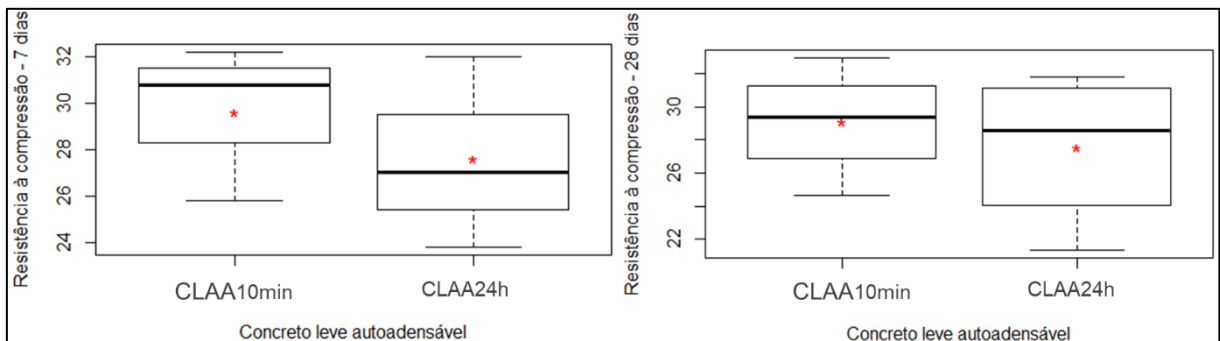
Como a argila expandida utilizada no CLAA<sub>10min</sub> possuía menor saturação, houve a absorção da água de mistura e um processo de filtração da pasta de cimento que teve capacidade de realizar hidratações adicionais no interior do agregado graúdo (MORAVIA, 2004; MORAVIA, 2007).

Porém é importante mencionar que a aparente maior fragilidade da zona de transição do CLAA<sub>24h</sub>, não interferiu de maneira significativa nas propriedades mecânicas analisadas neste trabalho, pois diferentemente do ocorrido em concretos de peso normal, a fragilidade do agregado graúdo em si é maior do que a ocorrida na zona de transição (ROSSIGNOLO, 2009; MORAVIA, 2007).

#### 4.4.4.1 Análise estatística - Influência da água de absorção do agregado graúdo leve

Na Figura 101 e na Tabela 48 têm-se o comportamento dos resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

**Figura 101** - Box-plot da resistência à compressão do CLAA10min e CLAA24h aos 7 e 28 dias



Fonte: A Autora

**Tabela 48** - Análise estatística da resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos CLAA10min e CLAA24h

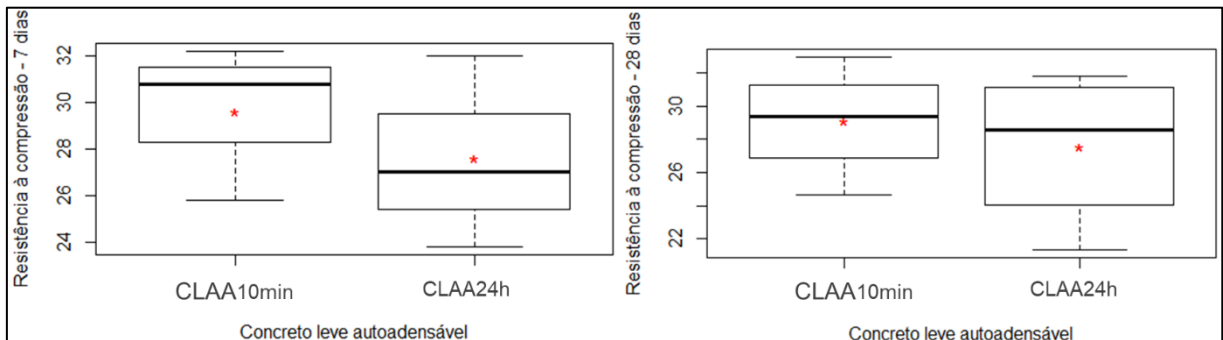
Concretos	$f_{c7}$ Médio (MPa)	Variância (MPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p-valor)
CLAA <sub>10min</sub>	29,6	11,32	0,4003	0,7972	0,5511
CLAA <sub>24h</sub>	27,6	17,08	0,7592		
Concretos	$f_{c28}$ Médio (MPa)	Variância (MPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p-valor)
CLAA <sub>10min</sub>	29,11	11,73	0,7673	0,6228	0,6157
CLAA <sub>24h</sub>	27,58	21,82	0,5868		

Fonte: A Autora

Foi possível observar, na Figura 102, que a incorporação de diferentes quantidades de água de absorção do agregado graúdo na mistura do concreto leve autoadensável não influenciou nesta propriedade do estado endurecido em ambas as idades estudadas, tendência essa confirmada com a estatística presente na Tabela 48.

Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico e estático, o comportamento dos resultados e sua análise estatística podem ser visualizados na Figura 102 e Tabela 49, respectivamente.

**Figura 102** - Box-plot do módulo de elasticidade estático e dinâmico do CLAA10min e CLAA24h aos 28 dias



Fonte: A Autora

**Tabela 49** - Análise estatística do módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias dos CLAA10min e CLAA24h

Concretos	$E_d$ Médio (GPa)	Variância (GPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p- valor)
CLAA <sub>10min</sub>	22,98	0,142	0,3509	0,1165	0,1276
CLAA <sub>24h</sub>	21,55	0,826	0,9575		
Concretos	$E_e$ Médio (GPa)	Variância (GPa)	Teste de normalidade (p-valor)	Teste de homogeneidade (p-valor)	Teste t (p- valor)
CLAA <sub>10min</sub>	17,77	0,522	0,8472	0,164	0,6907
CLAA <sub>24h</sub>	18,90	5,84	0,0514		

Fonte: A Autora

Os resultados de ambos os módulos de elasticidade não possuem diferença significativa. Portanto, a análise estatística confirmou a discussão dos resultados em que se concluiu que a alteração da quantidade de água de absorção do agregado graúdo leve não teve interferência significativa nas propriedades mecânicas.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou desenvolver um procedimento de dosagem para concretos leves autoadensáveis, o qual tem como fundamento a relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular.

Com relação ao estudo em pasta, foi possível notar que a alteração dos teores de adição incorporados não alterou o ponto de saturação do aditivo superplastificante, porém as pastas cimentícias com combinação ternária – pó de basalto (PB) e sílica ativa (SA) – possuem viscosidade superior às pastas cimentícias com combinação binária.

No estudo em argamassa, a incorporação de diferentes teores pó de basalto (PB) não alterou as características de autoadensabilidade, entretanto, afetou diretamente a resistência à compressão e a absorção de água, sendo que a ARGPB20 apresentou os melhores resultados.

Ainda com relação as argamassas, o aumento do excesso de pasta ( $Ex_{pasta}$ ) com relação ao volume de vazios aumentou a fluidez das argamassas e, no estado endurecido, a alteração no  $Ex_{pasta}$  não foi suficiente para influenciar nas propriedades avaliadas. Dessa maneira, concluiu-se que o  $Ex_{pasta}=135\%$  ( $\frac{V_{AM}}{V_{arg}}=42\%$ ) gerou a argamassa com as melhores características de autoadensabilidade para ser incorporada na produção do CLAA.

Com relação ao estudo em concreto (Etapa 3), foi possível observar que o excesso de argamassa ( $EX_{ARG}$ ) ótimo, com relação as propriedades no estado fresco, foi obtido com  $EX_{ARG}$  de 70%.

Dessa maneira, o procedimento de dosagem foi validado ao obter o CLAA70 com características satisfatórias no estado fresco e endurecido, sem apresentar exsudação e segregação. O CLAA70 apresenta relação volumétrica  $\frac{V_{AM}}{V_{arg}}=42\%$  e  $\frac{V_{AGL}}{V_{conc}}=32\%$ , como indicado pela bibliografia. Ademais, o procedimento de dosagem possui princípios de fácil execução e ampla aplicabilidade.

Com relação ao estudo da influência da absorção de água do agregado graúdo na produção do CLAA, observou-se que a mesma altera significativamente as propriedades no estado fresco e tem pouca influência no estado endurecido.

Por fim, verificou-se que é viável dosar um concreto leve autoadensável a partir de relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular, salientando a importância

de se levada em consideração as características de absorção de água dos agregados leves na produção desse tipo concreto.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O concreto leve autoadensável ainda possui lacunas do conhecimento a serem preenchidas. Dentre elas destacam-se:

- Validação do procedimento de dosagem proposto com diferentes agregados leves;
- Identificação de valores ideais de  $EX_{pasta}$  e  $EX_{arg}$ , correlacionando-os com  $\frac{V_{AM}}{V_{arg}}$  e  $\frac{V_{AGL}}{V_{conc}}$ , respectivamente, para obtenção de características de autoadensabilidade;
- Ainda em relação ao procedimento de dosagem proposto, verificar a incorporação de diferentes tipos de aditivos como os modificadores de viscosidade;
- Estudo mais aprofundado da zona de transição do agregado graúdo leve em CLAA;
- Avaliar os procedimentos de misturas para otimizar o processo de homogeneização do CLAA;
- Verificar o comportamento do concreto leve autoadensável frente à alta pressão do bombeamento.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AFZALI-NANIZ, O.; MAZLOOM, M. Assessment of the influence of micro-and nano-silica on the behavior of self-compacting lightweight concrete using full factorial design. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 1, p. 57-70, 2019.

AGULLÓ, L.; TORALLES-CARBONARI, B.; GETTU, R.; AGUADO, A. Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer: A study based on the Marsh cone test. **Materials and Structures**, v. 32, p.479-485, set. 1999.

AKCAY, B.; TASDEMIR, M. Performance evaluation of silica fume and metakaolin with identical finenesses in self-compacting and fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 436-444, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597**: Standard test method for pulse velocity through concrete, 2016.

ANDIÇ-ÇAKIR, ö. et al. Self-compacting lightweight aggregate concrete: design and experimental study. **Magazine of Concrete Research**, v. 61, n. 7, p.519-527, set. 2009.

ANDIÇ-ÇAKIR, Ö.; HIZAL, S. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self-consolidating lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 575-583, 2012.

ANDIÇ-ÇAKIR, Ö.; 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.

ARAUJO, J. G. **Influência das adições minerais pozolânicas e de finos de pedra nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto autoadensável**. 2007. 86f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, UFG, Goiás, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935:** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 15630:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1:** Concreto Autoadensável – Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-2:** Concreto Autoadensável – Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-3:** Concreto Autoadensável – Determinação da habilidade passante – Método do Anel J. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-4:** Concreto Autoadensável – Determinação da habilidade passante – Método da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-5:** Concreto Autoadensável – Determinação da viscosidade – Método do Funil V. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSUNÇÃO, J. W. **Concreto Leve Autoadensável: Influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto.** 2016. 226 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

AZARIJAFARI, H.; TAJADINI, A.; RAHIMI, M.; BERENJIAN, J. Reducing variations in the test results of self-consolidating lightweight concrete by incorporating pozzolanic materials. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 889-897, 2018.

BENAICHA, M.; ROGUIEZ, X.; JALBAUD, O.; BURTSCHHELL, Y; ALAOUI, A. H. Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 84, p.103-110, jun. 2015.

BERNAL, J.; REYES, E.; MASSANA, J.; LEÓN, N.; SÁNCHEZ, E. Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 160, p.196-210, jan. 2018.

BINGÖL, A. F.; TOHUMCU, İ. Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. **Materials & Design**, v. 51, p. 12-18, 2013.

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, 20 jun. 2012.

BOMBLED, P.J. Comportement rhéologique de pâtes, morters et bétons, influence de certains paramètres. **Revue des Matériaux de Construction "Ciments et Bétons"**, v. 617, fev. 1967.

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

BOUVET, A.; GHORBEL, E.; BENNACER, R. The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 40, n. 10, p.1517-1523, out. 2010.

BRETAS, R. E. S.; D'AVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos.** São Carlos. Editora da UFSCAR, 196 p., 2000.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; GIACOMETTI, M.; MENEGUELLI, M.; MORATTI, M.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Effects of BOF steel slag and other cementitious materials on the rheological properties of self-compacting cement pastes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 40, p.1046-1053, mar. 2013.

CAMÕES, A. Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do betão fresco. **Engenharia Civil**, v. 5, p.29-43, 2005.

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do Cimento Portland: Estudo experimental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2015.

CASTRO, A. L. de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia de concretos de alto desempenho**. 2007. 334 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, v. 57, n. 341, p. 10-21, 2011.

CHAPPUIS, J. Rheological measurements with cement pastes in viscosimeters: a comprehensive approach. In: **Rheology of fresh cement and concrete**, Londres, E & FN Spon, p. 3-12, 1991.

CHEN, J. J.; FUNG, W. W. S.; KWAN, A. K. H. Effects of CSF on strength, rheology and cohesiveness of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 979-987, 2012.

CHOI, Y. W.; KIM, Y. J.; SHIN, H. C.; MOON, H. Y. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p.1595-1602, set. 2006.

CORREA-YEPES, J. A.; ROJAS-REYES, N.; TOBÓN, J. I. Effect of fly ash and silica fume on rheology, compressive strength and self-compacting in cement mixtures. **Dyna**, v. 85, n. 206, p. 59-68, 2018.

COUTO, A. F. do; SBARDELOTTO, E. K.; PORTO, M. F; TORALLES, B. M. Pó de basalto como adição mineral em compósitos cimentícios: caracterização físico-química e avaliação da pozolanidade. In: **61º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2019.

CUI, H. Z.; LO, T. Y.; XING, F. Properties of self-compacting lightweight concrete. **Materials Research Innovations**, v. 14, n.5, p. 392-396, nov. 2010.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1, p. 261-309, IBRACON, 2011.

De LARRARD, F. de. A method for proportioning high-strength concrete mixtures. **Cement, concrete and aggregates**, v. 12, n. 1, p. 47-52, 1990.

De LARRARD, F. de; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p.1699-1704, nov. 2002

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 194**: Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **DNPM - Cadastro Nacional de Produtores de Brita**. Brasília: 2015. 90 p.

DOMONE, P. L.; JIN, JZ. Properties of mortar for self-compacting concrete. In: **Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete**. 1999. p. 109-120.

DOMONE, P.I. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p.197-208, fev. 2006.

DONIAK, I. L. O.; GUSTEIN, D. Concreto pré-fabricado. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed., v.2, IBRACON, 2011.

DYMOND, B. Z. **Shear strength of a PCBT-53 girder fabricated with lightweight, self-consolidating concrete**. Tese de Doutorado. Virginia Tech. 2007.

EDAMATSU, Y.; NISHIDA, N.; OSAKA, S.; OUCHI, M. A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles. In: **Proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete, Stockholm. Sweden**. 1999. p. 309-320.

EFNARC – EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICAL AND CONCRETE SYSTEMS. Specification and guidelines for self-compacting concrete. Londres. 2005.

EL-DIDAMONY, H.; HELMY, I. M.; OSMAN, R. M.; HABBOUD, A. M. Basalt as Pozzolana and Filler in Ordinary Portland Cement. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 8, n. 2, p. 263–274, 2015.

ELSHARIEF, A.; COHEN, M.D.; OLEK, J. Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar. **Cement and Concrete research**, v. 35, n. 7, p. 1368-1376, 2005.

ELYAMANY, H. E.; ELMOATY, A. E. M. A.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self-compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**, [s.l.], v. 53, n. 2, p.295-307, jun. 2014.

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

FERRARIS, C. F. Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. **Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology**, [s.l.], v. 104, n. 5, p.461-478, out. 1999.

FERRARIS, C. F.; OBLA, K. H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and concrete research**, v. 31, n. 2, p. 245-255, 2001.

FILLA, J. C. **Estudo da utilização de pó ultrafino de basalto como adição na preparação de um cimento mitigador da reação álcali-silica**. 2011. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2011.

FLOYD, R. W.; HALE, W. M.; BYMASTER, J. C. Effect of aggregate and cementitious material on properties of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 91-99, 2015.

FONSECA, T. V. **Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, fíler calcário e adição de cal hidratada**. Dissertação de Mestrado. Brasil. 2016.

FREIRE, D. **Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO<sub>2</sub>**. 2016. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/especialistas-discutem-papel-da-industria-do-cimento-nas-emissoes-de-co2/23449/>>. Acesso em: 23 set. 2019.

GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E.; ÖZBAY, E. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p.1847-1854, 2009.

GOŁASZEWSKI, J.; SZWABOWSKI, J. Influence of superplasticizers on rheological behavior of fresh cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p.235-248, fev. 2004.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. de. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 160 p, 2009.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos minerais. **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, p. 1-14, 2003.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**, Tese de Doutorado, UPC, Catalunya, Barcelona, 2002.

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, 2016.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; BOOYA, E. Fresh properties of self-compacting cold bonded fly ash lightweight aggregate concrete with different mineral admixtures. **Materials and Structures**, v. 45, n. 12, p. 1849-1859, 2012.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; ÖZBAY, E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 10, p.1878-1887, 2010.

- GUNNELIUS, K.R.; LUNDIN, T. C.; ROSENHOLM, J.B.; PELTONEN, J. Rheological characterization of cement pastes with functional filler particles. **Cement and Concrete Research**, v. 65, p.1-7, nov. 2014.
- HACKLEY, V. A.; FERRARIS, C. F. **The use of nomenclature in dispersion science and technology**. Washington: NIST, 72 p, 2001.
- HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L. da; KLEIN, N. S. Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.48-65, fev. 2016.
- HWANG, C. I.; HUNG, M. F. Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 8, p.619-626, out. 2005.
- IVANOV, Y. P.; ROSHAVELOV, T. T. The effect of condensed silica fume on the rheological behavior of cement pastes. In: Rheology of fresh cement and concrete, 1990, London. **Proceedings...** Londrin: E & FN Spon, 1991.
- JALAL, M.; POULADKHAN, A.; HARANDI, O. F.; JAFARI, D. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 90-104, 2015.
- JAMIL, M.; KHAN, M. N. N.; KARIM, M. R.; KAISH, A. B. M. A.; ZAIN, M. F. M. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 185–198, 2016.
- KAFFETZAKIS, M.; PAPANICOLAOU C. C. Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete (LWASCC) semi-automated mix design methodology. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 254-260, out. 2016.
- KALETA, A.; GRZESZCZYK, S. The Influence of Chosen Factors on the Rheological Properties of Cement Paste. **Procedia Engineering**, v. 108, p.568-574, 2015.
- KANELLOPOULOS, A.; PETROU, M. F.; IOANNOU, I. Durability performance of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 320–325, 2012.
- KARAMLOO, M.; MAZLOOM, M.; PAYGANEH, G. Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 123, p.508-515, out. 2016.
- KHOTBEHSARA, M. M.; EHSAN, M. YAZDI, M. A.; SARKER, P.; RANJBAR, M. M. Effect of nano-CuO and fly ash on the properties of self-compacting mortar. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 758-766, 2015.
- KIM, Y. J.; CHOI, Y. W.; LACHEMI, M. Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, p.11-16, jan. 2010

KLEIN, N. S.; DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A.; MASÓ, D. Lightweight self-compacting concrete reinforced with fibres for slab rehabilitation. **Materiales de construcción**, v. 61, n. 302, p. 239-256, 2011.

KWAN, A. K. H.; WONG, H. H. C. Effects of packing density, excess water and solid surface area on flowability of cement paste. **Advances in Cement Research**, v. 20, n. 1, p.1-11, jan. 2008.

LI, J.; CHEN, Y.; WAN, C. A mix-design method for lightweight aggregate self-compacting concrete based on packing and mortar film thickness theories. **Construction and Building Materials**, v. 157, p.621-634, dez. 2017.

LIU, J.; WANG, K; ZHANG, Q.; HAN, F.; SHA, J.; LIU J. Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio. **Construction and Building Materials**, v. 149, p.359-366, set. 2017.

LO, T. Y.; TANG, P. W. C.; CUI, H. Z.; NADEEM, A. Comparison of workability and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete and normal self-compacting concrete. **Materials Research Innovations**, v. 11, n. 1, p. 45-50, 2007.

LO, T. Y.; TANG, W. C.; CUI, H. Z. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p.3025-3029, ago. 2007.

LOFTY, A.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M. Durability properties of lightweight self-consolidating concrete developed with three types of aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 106, p.43-54, mar. 2016.

LONG, W.; GU, Y.; LIAO, J.; XING, F. Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p.317-325, nov. 2017.

LU, C.; YANG, H.; MEI, G. Relationship between slump flow and rheological properties of self-compacting concrete with silica fume and its permeability. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 157-162, 2015.

MA, B.; WANG, H. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures. **Journal of Wuhan University of Technology-mater. Sci. Ed.**, v. 28, n. 2, p.291-297, abr. 2013.

MAGHSOUDI, A. A.; MOHAMADPOUR, S. H.; MAGHSOUDI, M. Mix design and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete. **International Journal of Civil Engineering**, v. 9, n. 3, p. 230-236, 2011.

MANRICH, S.; PESSAN, L. A. **Reologia: Conceitos básicos**. São Carlos: Gráfica USFCAR, 1987.

MANUEL, P. J. M. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis**. 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

MATOS, P. R. de; OLIVEIRA, A. L.; PELISSER, F. PRUDÊNCIA JR.; L. R. Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 175, p.508-518, jun. 2018.

MAZLOOM, M.; SALEHI, H. The relationship between fracture toughness and compressive strength of self-compacting lightweight concrete. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 062007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MENDES, C. J. **Concreto autoadensável utilizando cinza da casca de arroz: Estudo das propriedades mecânicas**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unesp, Ilha Solteira, 2015.

MENDES, M. V. A. da S. **Estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis**. 2016. 259 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MENDES, T. M.; GUERRA, L.; MORALES, G. Basalt waste added to Portland cement. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 4, p. 431-436, 2016.

MOHAMED, H. A. Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 2, n. 2, p. 79-86, 2011.

MOHAN, A.; MINI, K. M. Strength and durability studies of SCC incorporating silica fume and ultra-fine GGBS. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 919-928, 2018.

MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. de. **Avaliação de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes**. São Paulo: Escola Politécnica Usp, 14p., 2008.

MONTEIRO, A. B.; PITANGUEIRA, R.; WOLENSKI, A. R. V. Determinação do teor ótimo de aditivos superplastificantes em pastas de cimento através do ensaio de cone de Marsh. In: **CBC - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**, 54., 2012, Maceió. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012. Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, p. 1 – 15, 2012

MORAES, K. A. M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável**. 2010. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MORAVIA, W. G. **Comportamento térmico e avaliação microestrutural de concretos leves produzidos com argila expandida.** 2004.

MORAVIA, W. G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade de concretos leves produzidos com argila expandida.** 2007.

NEPOMUCENO, M. C. S.; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; 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

NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L. Parameters for self-compacting concrete mortar phase. **Special Publication**, v. 253, p. 323-340, 2008.

NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 317-326, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto.** Bookman Editora, 2013.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades.** 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal, 2001.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p.5-15, 2003.

OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Structural Concrete**, v. 1, n. 1, p.3-17, mar. 2000.

PAPANICOLAOU, C. G. & KAFFETZAKIS, M. I. Lightweight Aggregate Self-compacting Concrete: State-of-the-Art & Pumice **Application Journal of Advanced Concrete Tecnology**, v. 9, n. 1, p.15-29, 15 jan. 2011.

PAPO, A. Rheological models for cement pastes. **Materials and Structures**, v. 21, n. 1, p. 41, 1988.

PAPO, A.; PIANI, L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes, **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 2097–2101, 2004.

PARK, C. K.; NOH, M. H.; PARK, T. H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p.842-849, maio 2005.

PEREIRA, T. A. da C. **Concreto autoadensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida.** 2010. 283 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PETRY, F. **Análise e otimização do método de dosagem Repette-Mello para concreto autoadensável através do modelo de empacotamento compressível de partículas (MEC)**. 2015. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

PIOVEZAM, I. A. R.; MELEIRO, L. P.; ISA, M. M. Influência da adição no comportamento reológico da pasta autoadensável de alto desempenho. **Acta Scientiarum. Technology**, v.30, n.2, p.155-159, 2008.

PORTO, M. F. **Estudo exploratório de concreto leve autoadensável com argila expandida**. 2018. 115 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

PORTO, M. F.; COFANI, F. S.; SILVA, L. F.; MORELLI, F. D.; TORALLES, B. M. Procedimento expedito para verificação da autoadensabilidade em argamassas. In: **CBC - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**, 2019, Fortaleza. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2019. Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, 2019.

PORTO, M. F.; COFANI, F. S.; FILLA, G. T. P.; TORALLES, B. M. Argamassas autoadensáveis: Influência do tipo de adição mineral. In: **XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. 2018.

RAGO, F. **Características reológicas de pastas de cales hidratadas normalizadas e de cimento**. Tese de Doutorado. 1999.

RAHMAN, M. K.; BALUCH, M. H.; MALIK, M. A. Thixotropic behavior of self-compacting concrete with different mineral admixtures. **Construction and building materials**, v. 50, p. 710-717, 2014.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. William Andrew, 1996.

RANJBAR, M. M.; BEYGI, M. H.; NIKBIN, I. M.; REZVANI, M.; BARARI, A. Evaluation of the strength variation of normal and lightweight self-compacting concrete in full scale walls. **Materiali in Tehnologije**, [s.l.], v. 6, n. 45, p.571-577, 2011.

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

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. P.; HASPARYK, N. P. Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 56–68, 2015.

REIS, J. F. A. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso**. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Unesp, Ilha Solteira, 2008.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto Leve Estrutural**. São Paulo: Pini, 2009. 144 p

SAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN, İ. Ö. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement and concrete composites**, v. 28, n. 5, p. 432-440, 2006.

SANTOS, F. N.; SOUSA, S. R. G.; BOMBARD, A. J. F.; VIEIRA, S. L. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 143, p.92-103, jul. 2017.

SARAYA, M. E. I. Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 72, p.104-112, dez. 2014.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. Artliber Ed., 2006.

SCHWARTZENTRUBER, L.D. A.; ROY, R. L.; CORDIN, J. Rheological Behavior of Fresh Cement Pastes: Interaction between Superplasticizer and Viscosity-Enhancing Admixture. **Special Publication**, v. 239, p. 409-422, 2006.

SILVA, O. F. da; GOMES, P. C. C.; MORAIS, K. A. M. Analytical method for determining the saturation point of superplasticizers in cement pastes using the Marsh cone. **Cerâmica**, [s.l.], v. 65, n. 374, p. 252-260, jun. 2019.

SKARENDAHL, Å.; PETERSSON, O. "Self-Compacting Concrete", State-of-Art report of RILEM Committee 174-SCC, Report 23, **RILEM Publications**, 2001.

SONEBI, M.; CEVIK, A.; GRÜNEWALD, S.; WALRAVEN, J. Modelling the fresh properties of self-compacting concrete using support vector machine approach. **Construction and Building Materials**, v. 106, p.55-64, mar. 2016.

SONEBI, M.; GRÜNEWALD, S.; WALRAVEN, J. Filling ability and passing ability of self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 2, p. 162, 2007.

TAKADA, K. **Influence of admixtures and mixing efficiency on the properties of self-compacting concrete: The birth of self-compacting concrete in the Netherlands**. 2004.

TING, T. Z. H.; RAHMAN, M.E.; LAU, H. H.; TING, M. Z. Y. Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 763-777, 2019.

TOPÇU, İ. B.; UYGUNOĞLU, T. Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1286-1295, 2010.

- TORALLES-CARBONARI, B. M. **Estúdio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación de hormigón de altas prestaciones.** Tese de doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya. 1996.
- TURK, K. Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 37, p.326-334, dez. 2012.
- TUTIKIAN, B. F. e DAL MOLIN, D.C. **Concreto Autoadensável.** 2. ed. São Paulo: 144 p. Pini, 2015.
- UNCÍK, S.; KMECOVÁ, V. The effect of basalt powder on the properties of cement composites. **Procedia Engineering**, v.65, p.51-56, 2013.
- UYSAL, M.; SUMER, M. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. **Construction and Building materials**, v. 25, n. 11, p. 4112-4120, 2011.
- UYSAL, M.; YILMAZ, K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 7, p.771-776, ago. 2011.
- UYSAL, M.; YILMAZ, K.; IPEK, M. The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 27, n. 1, p.263-270, fev. 2012.
- VAKHSHOURI, B.; NEJADI, S. Compressive strength and mixture proportions of self-compacting lightweight concrete. **Computers and Concrete**, v. 19, n. 5, p.555-566, 25 maio 2017.
- VAKHSHOURI, B.; NEJADI, S. Mix design of light-weight self-compacting concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v.4, p.1-14, jun.2016.
- VERZEGNASSI, E. **Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável.** 2015. 145 f. Dissertação (Mestrado), Unicamp, 2015
- WU, X.; WU, Z.; ZHENG, J.; UEDA, T.; TI, S. An experimental study on the performance of self-compacting lightweight concrete exposed to elevated temperature. **Magazine of Concrete Research**, v. 65, n. 13, p.780-786, jul. 2013.
- YANG, S.; YUE, X.; LIU, X.; TONG, Y. Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 444-453, 2015.
- YEN, T.; C. TANG; C. SHANG; K. CHEN. Flow behaviour of high strength high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, p.413-424, 1999.
- ZARNAGHI, V. N.; FOUROGHI-ASL, A.; NOURANI, V.; MA, H. On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 193, p. 557-564, dez. 2018.

ZHANG, L. C.; ZHANG, A. L. Effect of Mineral Admixtures on Rheological Properties of Cement Paste. **Advanced Materials Research**, v. 936, p.1409-1413, jun. 2014.

ZHANG, Y. G.; WU, Z. M.; WU, X. Experimental Investigation on the Shrinkage and Creep Performance of Self-Compacting Lightweight Concrete. **Advanced Materials Research**, v. 860-863, p.1346-1353, dez. 2013.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA ARGAMASSAS COM COMBINAÇÃO BINÁRIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Para obtenção do consumo de materiais para a produção da argamassa de referência, ou seja, sem substituição do cimento por pó de basalto, utilizou-se das Equações 5 a 11, as quais foram substituídas pelos seguintes valores:

- $V_{arg} = V_{am} = 1 \text{ m}^3$ ;
- $I_{vam} = 36,9 \%$ ;
- $\rho_{am} = 1.660 \text{ kg/m}^3$ ;
- $EX_{pasta} = 82\%$ ;
- $\gamma_{cim} = 2.990 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{\acute{a}gua} = 1.000 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{SP} = 1.090 \text{ kg/m}^3$ ;
  - $AD = 0\%$ ;
  - $SP = 0,0045$ ;
  - $a/cim = 0,4$ .

Ao substituir os valores acima nas Equações 5 a 11, temos o desenvolvimento de cálculo como apresentado no Quadro 7 abaixo.

**Quadro 7** - Desenvolvimento da dosagem das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

<b>ARGPB0</b>	
<b>Equações</b>	<b>Desenvolvimento</b>
(5)	$V_{vam} = 1 * 0,369$ $V_{vam} = 0,369 \text{ m}^3$
(6)	$M_{am} = (1) * 1.660$ $M_{am} = 1.660 \text{ kg}$
(11)	$M_{cim} = \left( \frac{(1 + 0,82) * 0,369}{\left( \frac{1}{2,99} + \frac{(0,4)}{1} + \frac{0,0045}{1,09} \right)} \right)$ $M_{cim} = 909,3 \text{ kg}$
	$V_{SP} = \frac{0,0045 * 909,3}{1,09} = 3,8 \text{ L}$ $V_{\acute{a}gua} = 0,4 * (909,3) = 364 \text{ L}$

Fonte: A Autora

É importante mencionar que, segundo o procedimento proposto, o volume final de argamassa produzida é igual ao volume de agregado miúdo ( $1 \text{ m}^3$ ), desconsiderando os vazios ( $0,369 \text{ m}^3$ ), somado ao volume de pasta ( $0,672 \text{ m}^3$ ). Dessa maneira, o volume de argamassa produzido no desenvolvimento de cálculo do Quadro 8 é de  $1,30 \text{ m}^3$ .

Para determinar o consumo das demais argamassas com combinação binária de materiais cimentícios, substituiu-se a quantidade de cimento obtida na argamassa

de referência pelo teor de basalto a ser empregado, pois o cimento Portland e o pó de basalto apresentaram características físicas semelhantes e sua substituição influenciaria pouco no volume final produzido.

Os consumos por metro cúbico de todas as argamassas produzidas, portanto, foram apresentados no item 4.1.2, na Tabela 27.

## APÊNDICE B – DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA ARGAMASSAS COM COMBINAÇÃO TERCIÁRIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Para obtenção do consumo de materiais para a produção das argamassas com combinação terciária de materiais cimentícios – 20% de pó de basalto em substituição ao cimento Portland e 8% de sílica ativa em adição ao cimento restante - utilizou-se das Equações 5 a 11, as quais foram substituídas pelos seguintes valores:

- $V_{arg} = V_{am} = 1 \text{ m}^3$ ;
- $I_{Vam} = 36,9 \%$ ;
- $\rho_{am} = 1.660 \text{ kg/m}^3$ ;
- $EX_{pasta} = 100\%, 135\% \text{ e } 140\%$ ;
- $\gamma_{cim} = 2.990 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{PB} = 2.880 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{SA} = 2.220 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{\acute{a}gua} = 1.000 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{SP} = 1.090 \text{ kg/m}^3$ ;
- $AD = 0,2$  para o pó de basalto em substituição;
- $AD = 0,08$  para a sílica ativa em adição;
  - $SP = 0,0045$ ;
  - $a/cim = 0,4$ .

Ao substituir os valores acima nas Equações 5 a 11, temos o desenvolvimento de cálculo como apresentado nos Quadros 8 a 10 para argamassas com excesso de pasta de 100%, 135%, 140%, respectivamente.

**Quadro 8 - Desenvolvimento da dosagem das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios e excesso de pastas de 100%**

<b>ARGPB-SA100</b>	
Eq.	Desenvolvimento
(5)	$V_{Vam} = 1 * 0,369$ $V_{Vam} = 0,369 \text{ m}^3$
(6)	$M_{am} = 1 * 1.660$ $M_{am} = 1.660 \text{ kg}$
(11)	$M_{cim} = \left( \frac{(1 + 1) * 0,369}{\left( \frac{1}{2.990} - \frac{(0,2)}{2.880} + \frac{(1 - 0,2) * 0,08}{2.220} + \frac{(1 + (1 - 0,2)) * 0,4}{1.000} + \frac{(1 - 0,2) * 0,0045}{1.090} \right)} \right)$ $M_{cim} = 970 \text{ kg}$
	$M_{PB} = 970 * 0,2 = 194 \text{ kg}$ $M_{SA} = (970 - 194) * 0,08 = 62,1 \text{ kg}$ $V_{SP} = \frac{0,0045 * (970 - 194)}{1.090} = 3,2 \text{ L}$ $V_{\acute{a}gua} = 0,4 * (970 + 62,1) = 413 \text{ L}$

Fonte: A Autora

**Quadro 9 - Desenvolvimento da dosagem das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios e excesso de pastas de 135%**

ARGPB-SA135	
Eq.	Desenvolvimento
(5)	$V_{Vam} = 1 * 0,369$ $V_{Vam} = 0,369 \text{ m}^3$
(6)	$M_{am} = 1 * 1.660$ $M_{am} = 1.660 \text{ kg}$
(11)	$M_{cim} = \left( \frac{(1 + 1,35) * 0,369}{\left( \frac{1}{2.990} - \frac{(0,2)}{2.880} + \frac{(1 - 0,2) * 0,08}{2.220} + \frac{(1 + (1 - 0,2)) * 0,4}{1.000} + \frac{(1 - 0,2) * 0,0045}{1.090} \right)} \right)$ $M_{cim} = 1.140 \text{ kg}$
	$M_{PB} = 1.140 * 0,2 = 228 \text{ kg}$ $M_{SA} = (1.140 - 228) * 0,08 = 73 \text{ kg}$ $V_{SP} = \frac{0,0045 * (1.140 - 228)}{1.090} = 3,8 \text{ L}$ $V_{\acute{a}gua} = 0,4 * (1.140 + 73) = 485 \text{ L}$

Fonte: A Autora

**Quadro 10 - Desenvolvimento da dosagem das argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios e excesso de pastas de 140%**

ARGPB-SA140	
Eq.	Desenvolvimento
(5)	$V_{Vam} = 1 * 0,369$ $V_{Vam} = 0,369 \text{ m}^3$
(6)	$M_{am} = 1 * 1.660$ $M_{am} = 1.660 \text{ kg}$
(11)	$M_{cim} = \left( \frac{(1 + 1,4) * 0,369}{\left( \frac{1}{2.990} - \frac{(0,2)}{2.880} + \frac{(1 - 0,2) * 0,08}{2.220} + \frac{(1 + (1 - 0,2)) * 0,4}{1.000} + \frac{(1 - 0,2) * 0,0045}{1.090} \right)} \right)$ $M_{cim} = 1.164 \text{ kg}$
	$M_{PB} = 1.164 * 0,2 = 233 \text{ kg}$ $M_{SA} = (1.164 - 233) * 0,08 = 74,5 \text{ kg}$ $V_{SP} = \frac{0,0045 * (1.164 - 233)}{1.090} = 3,8 \text{ L}$ $V_{\acute{a}gua} = 0,4 * (1.164 + 233) = 495 \text{ L}$

Fonte: A Autora

Segundo o procedimento proposto, o volume final de argamassa é igual ao volume de agregado miúdo (1 m<sup>3</sup>), desconsiderando os vazios (0,369 m<sup>3</sup>), somado ao volume de pasta. Sendo que os volumes de pasta das argamassas ARGPB-SA100, ARGPB-SA135 e ARGPB-SA140 são iguais à 0,738; 0,867 e 0,886 m<sup>3</sup>, respectivamente. Dessa maneira, o volume de argamassa produzido no é de 1,37; 1,50 e 1,52 m<sup>3</sup>, respectivamente. Os consumos por metro cúbico de todas as argamassas produzidas, portanto, foram apresentados no item 4.2.2, na Tabela 34.

## APÊNDICE C – PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS COM COMBINAÇÃO BINÁRIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Nas Tabela 50 a 53 é possível visualizar os resultados das propriedades no estado endurecido – resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e massa específica de cada corpo de prova produzido, assim como suas médias, desvio padrão e coeficiente de variação das argamassas com combinação binária de materiais cimentícios.

**Tabela 50** - Resistência à compressão, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

Amostra	CPs	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
ARGPB0	1	72,28	66,9	4,71	7,04
	2	64,50			
	3	63,80			
ARGPB10	1	49,87	48,3	1,37	2,83
	2	47,95			
	3	47,22			
ARGPB20	1	55,46	57,5	1,86	3,24
	2	57,77			
	3	59,15			
ARGPB30	1	47,10	48,9	2,31	4,73
	2	48,19			
	3	51,54			

Fonte: A Autora

**Tabela 51** - Módulo de elasticidade, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

Amostra	CPs	Vp (m/s)	Ts (µs)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coef. de variação (%)
ARGPB0	1	4426	22,7	38,2	38,8	1,14	3,0
	2	4540	21,2	40,1			
	3	4426	21,9	38,2			
ARGPB10	1	4231	23,4	34,4	35,7	1,20	3,4
	2	4374	22,4	36,8			
	3	43205	23,2	35,9			
ARGPB20	1	4279	22,9	34,4	34,9	1,54	4,4
	2	4416	23,7	36,6			
	3	4279	23,4	33,7			
ARGPB30	1	4229	23,7	32,9	33,4	1,50	4,5
	2	4184	23,9	32,9			
	3	4367	22,9	35,1			

Fonte: A Autora

**Tabela 52** - Absorção de água, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

Amostra	CPs	Absorção de água (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)
ARGPB0	1	6,85	6,90	0,07	0,98
	2	6,94			
ARGPB10	1	7,73	7,87	0,20	2,61
	2	8,02			
ARGPB20	1	8,35	8,42	0,10	1,15
	2	8,49			
ARGPB20	1	9,26	9,26	0,00	0,00
	2	9,26			

Fonte: A Autora

**Tabela 53** - Massa específica, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação binária de materiais cimentícios

Amostra	CPs	Massa Esp. (kg/m <sup>3</sup> )	Média (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Coef. de variação (%)
ARGPB0	1	2.168,3	2.164,2	5,88	0,27
	2	2.160,0			
ARGPB10	1	2.135,0	2.138,2	4,54	0,21
	2	2.141,4			
ARGPB20	1	2.116,1	2.087,2	40,95	1,96
	2	2.058,2			
ARGPB20	1	2.043,7	2.043,7	0,00	0,00
	2	2.043,7			

Fonte: A Autora

## APÊNDICE D – PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS COM COMBINAÇÃO TERCIÁRIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Nas Tabela 54 a 57 é possível visualizar os resultados das propriedades no estado endurecido – resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e massa específica de cada corpo de prova produzido, assim como suas médias, desvio padrão e coeficiente de variação das argamassas com combinação terciária de materiais cimentícios.

**Tabela 54** - Resistência à compressão, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

Amostra	CPs	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
ARGPB-SA135	1	56,6	56,8	3,7	6,5
	2	53,7			
	3	60,9			
	4	60,5			
	5	57,6			
	6	51,5			
ARGPB-SA140	1	54,7	52,8	4,23	8,0
	2	48,1			
	3	54,7			
	4	54,7			
	5	47,1			
	6	57,7			

Fonte: A Autora

**Tabela 55** - Módulo de elasticidade, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

Amostra	CPs	Vp (m/s)	Ts (µs)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coef. de variação (%)
ARGPB-SA135	1	4059	23,9	34,2	35,5	1,66	4,68
	2	4231	23,4	37,2			
	3	4184	23,9	36,4			
	4	4231	23,9	37,2			
	5	4016	24,9	33,5			
	6	4057	24,7	34,2			
ARGPB-SA140	1	4142	23,9	35,8	36,3	1,66	4,59
	2	4188	23,4	36,6			
	3	4100	23,9	35,0			
	4	4057	24,7	34,3			
	5	4229	23,7	37,3			
	6	4323	22,9	38,9			

Fonte: A Autora

**Tabela 56** - Absorção de água, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

Amostra	CPs	Absorção de água (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)
ARGPB-SA135	1	8,29	8,4	0,09	1,06
	2	8,41			
ARGPB-SA140	1	7,65	8,0	0,45	5,65
	2	8,29			

Fonte: A Autora

**Tabela 57** - Massa específica, média, desvio padrão e coeficiente de variação para as argamassas com combinação ternária de materiais cimentícios

Amostra	CPs	Massa Esp. (kg/m <sup>3</sup> )	Média (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Coef. de variação (%)
ARGPB-SA135	1	2.311,4	2.310,0	1,40	0,61
	2	2.308,6			
ARGPB-SA140	1	2.319,5	2.315,5	4,07	0,18
	2	2,311,4			

Fonte: A Autora

## APÊNDICE E – DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA OS CONCRETOS LEVES AUTOADENSÁVEIS COM DIFERENTES EXCESSOS DE ARGAMASSA

Para obtenção do consumo de materiais para a produção dos concretos leves autoadensável com diferentes excessos de argamassa utilizou-se das Equações 12 a 17, as quais foram substituídas pelos seguintes valores:

- $V_{conc} = V_{agl} = 1 \text{ m}^3$ ;
- $Iv_{AGL} = 58\% = 0,58$ ;
- $\rho_{AGL} = 497 \text{ kg/m}^3$ ;
- $EX_{arg} = 0,4; 0,7 \text{ ou } 1,0$ ;
- $\gamma_{cim} = 2.990 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{PB} = 2.880 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{SA} = 2.220 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{\text{água}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma_{SP} = 1.090 \text{ kg/m}^3$ ;
- $AD = 0,2$  para o pó de basalto em substituição;
  - $AD = 0,08$  para a sílica ativa em adição;
    - $SP = 0,0045$ ;
    - $a/cim = 0,4$ ;
    - $\frac{am}{arg} = 0,42$ .

Ao substituir os valores acima nas Equações 12 a 17, temos o desenvolvimento de cálculo como apresentado nos Quadros 11 a 13 para argamassas com excesso de pasta de 40%, 70%, 100%, respectivamente.

**Quadro 11 - Desenvolvimento da dosagem dos concretos leves autoadensáveis com excesso de argamassa de 40%**

<b>CLAA40</b>	
Eq.	Desenvolvimento de cálculo
(12)	$Vv_{AGL} = 1 * 0,58$ ; $V_{VAGL} = 0,58 \text{ m}^3$
(13)	$M_{AGL} = 1 * 497 = 497 \text{ kg}$ ;
(14)	$V_{arg} = 0,58 * (1 + 0,4) = 0,812 \text{ m}^3$
(17)	$M_{cim} = \left( \frac{0,812 - (0,42 * 0,812)}{\left( \frac{1}{2,99} - \frac{(0,2)}{2,88} + \frac{(1 - 0,2) * 0,08}{2,22} + \frac{(1 + 0,08 * (1 - 0,2)) * 0,4}{1,0} + \frac{(1 - 0,2) * 0,0045}{1,09} \right)} \right)$ $M_{cim} = 650 \text{ kg};$
$M_{PB} = 650 * 0,2 = 130,1 \text{ kg}; M_{cim} - M_{PB} = 520,2$ ; $M_{SA} = (650 - 130,1) * 0,08 = 52 \text{ kg}; M_{AM} = (0,812 * 0,42) * 1,66 = 567,7 \text{ kg}$ ; $V_{SP} = \frac{0,0045 * (520,2)}{1,090} = 2,15 \text{ L}; V_{\text{água}} = 0,4 * (650,3 + 52) = 280,9 \text{ L}$	

Fonte: A Autora

**Quadro 12 - Desenvolvimento da dosagem dos concretos leves autoadensáveis com excesso de argamassa de 70%**

<b>CLAA70</b>	
<b>Eq.</b>	<b>Desenvolvimento de cálculo</b>
(12)	$Vv_{AGL} = 1 * 0,58 = 0,58 \text{ m}^3$
(13)	$M_{AGL} = 1 * 497 = 497 \text{ kg};$
(14)	$V_{arg} = 0,58 * (1 + 0,7) = 0,986 \text{ m}^3$
(17)	$M_{cim} = \left( \frac{0,986 - (0,42 * 0,986)}{\left( \frac{1}{2,99} - \frac{(0,2)}{2,88} + \frac{(1 - 0,2) * 0,08}{2,22} + \frac{(1 + 0,08 * (1 - 0,2)) * 0,4}{1,0} + \frac{(1 - 0,2) * 0,0045}{1,09} \right)} \right)$ $M_{cim} = 789,7 \text{ kg};$
$M_{PB} = 789,7 * 0,2 = 157,9 \text{ kg}; M_{cim} - M_{PB} = 631,7;$ $M_{SA} = (789,7 - 157,9) * 0,08 = 63,2 \text{ kg}; M_{AM} = (0,986 * 0,42) * 1,66 = 689,4 \text{ kg}$ $V_{SP} = \frac{0,0045 * (631,7)}{1,090} = 2,61 \text{ L}; V_{\acute{a}gua} = 0,4 * (650,3 + 63,2) = 341,1 \text{ L}$	

Fonte: A Autora

**Quadro 13 - Desenvolvimento da dosagem dos concretos leves autoadensáveis com excesso de argamassa de 100%**

<b>CLAA100</b>	
<b>Eq.</b>	<b>Desenvolvimento de cálculo</b>
(12)	$Vv_{AGL} = 1 * 0,58 = 0,58 \text{ m}^3$
(13)	$M_{AGL} = 1 * 497 = 497 \text{ kg}$
(14)	$V_{arg} = 0,58 * (1 + 1) = 1,160 \text{ m}^3$
(17)	$M_{cim} = \left( \frac{1,160 - (0,42 * 1,160)}{\left( \frac{1}{2,99} - \frac{(0,2)}{2,88} + \frac{(1 - 0,2) * 0,08}{2,22} + \frac{(1 + 0,08 * (1 - 0,2)) * 0,4}{1,0} + \frac{(1 - 0,2) * 0,0045}{1,09} \right)} \right)$ $M_{cim} = 929,0 \text{ kg};$
$M_{PB} = 929,0 * 0,2 = 185,8 \text{ kg}; M_{cim} - M_{PB} = 743,2;$ $M_{SA} = (929 - 185,8) * 0,08 = 74,3 \text{ kg}; M_{AM} = (1,16 * 0,42) * 1,66 = 811,0 \text{ kg};$ $V_{SP} = \frac{0,0045 * (743,2)}{1,090} = 3,07 \text{ L}; V_{\acute{a}gua} = 0,4 * (929 + 74,3) = 401,3 \text{ L}$	

Fonte: A Autora

De acordo com o procedimento proposto, o volume final de concreto é igual ao volume de agregado graúdo (1 m<sup>3</sup>), desconsiderando os vazios (0,58 m<sup>3</sup>), somado ao volume de argamassa. Sendo que os volumes de argamassa dos concretos CLAA40, CLAA70 e CLAA100 são iguais a 0,812; 0,986; 1,16 m<sup>3</sup>, respectivamente. Dessa maneira, o volume de concreto produzido é de 1,23; 1,41 e 1,58 m<sup>3</sup>, respectivamente. Os consumos por metro cúbico de todas os CLAAs produzidos, foram apresentados no item 4.4, na Tabela 40.

## APÊNDICE F – PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO DOS CONCRETOS LEVES AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS NA ETAPA 3

Nas Tabelas 58 a 63 é possível visualizar os resultados das propriedades no estado endurecido – resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e estático, absorção de água, índice de vazios e massa específica de cada corpo de prova produzido e ensaiado aos 28 dias, assim como suas médias, desvio padrão e coeficiente de variação dos concretos produzidos na Etapa 3 do procedimento de dosagem proposto.

**Tabela 58** - Resistência à compressão, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA's produzidos na Etapa 3

Amostra	CPs	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
CLAA70	1	24,64	29,1	3,42	11,76
	2	29,17			
	3	29,66			
	4	32,97			
CLAA100	1	30,20	33,5	3,20	9,55
	2	36,96			
	3	31,39			
	4	35,39			

Fonte: A Autora

**Tabela 59** - Módulo de elasticidade dinâmico, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA's produzidos na Etapa 3

Amostra	CPs	Vp (m/s)	Ts (µs)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coef. de variação (%)
CLAA70	1	3.984	49,2	22,69	22,3	0,36	1,86
	2	3.910	49,1	21,85			
	3	3.926	48,9	22,03			
	4	3.944	49,7	22,24			
	5	3.983	48,2	22,68			
CLAA100	1	3.906	48,9	25,34	25,65	0,48	1,59
	2	3.903	49,7	25,30			
	3	3.901	48,7	25,27			
	4	3.951	48,6	25,92			
	5	3.988	48,4	26,41			

Fonte: A Autora

**Tabela 60** - Módulo de elasticidade estático, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAAs produzidos na Etapa 3

Amostra	CPs	Módulo de elasticidade estático (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
CLAA70	1	17,08	17,77	0,72	4,07
	2	17,70			
	3	18,52			
CLAA100	1	27,50	23,18	6,59	28,44
	2	26,46			
	3	15,59			

Fonte: A Autora

**Tabela 61** - Absorção de água, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAAs produzidos na Etapa 3

Amostra	CPs	Absorção de água (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)
CLAA70	1	9,5	9,99	0,68	6,85
	2	10,5			
CLAA100	1	9,4	9,23	0,26	2,82
	2	9,0			

Fonte: A Autora

**Tabela 62** - Índice de vazios, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAAs produzidos na Etapa 3

Amostra	CPs	Índice de vazios (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)
CLAA70	1	15,09	15,32	0,33	2,18
	2	15,56			
CLAA100	1	17,11	16,48	0,89	5,41
	2	16,47			

Fonte: A Autora

**Tabela 63** - Massa específica, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAAAs produzidos na Etapa 3

Amostra	CPs	Massa Esp. (kg/m <sup>3</sup> )	Média (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Coef. de variação (%)
CLAA70	1	1.582,7	1.536,4	71,86	4,68
	2	1.485,6			
CLAA100	1	1.817,6	1.784,9	46,24	2,59
	2	1.752,2			

Fonte: A Autora

## APÊNDICE G – PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO DOS CONCRETOS LEVES AUTOADENSÁVEIS COM DIFERENTES ÁGUAS DE ABSORÇÃO INCORPORADA À MISTURA

Nas Tabela 64 a 69 é possível visualizar os resultados das propriedades no estado endurecido – resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e estático, absorção de água, índice de vazios e massa específica de cada corpo de prova produzido e ensaiado aos 28 dias, assim como suas médias, desvio padrão e coeficiente de variação dos concretos produzidos para avaliação da incorporação da absorção de água do agregado graúdo leve.

**Tabela 64** - Resistência à compressão, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h

Amostra	CPs	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
CLAA <sub>10min</sub>	1	24,64	29,1	3,42	11,76
	2	29,17			
	3	29,66			
	4	32,97			
CLAA <sub>24h</sub>	1	30,43	27,6	2,62	9,48
	2	26,73			
	3	21,35			
	4	31,8			

Fonte: A Autora

**Tabela 65** - Módulo de elasticidade dinâmico, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h

Amostra	CPs	Vp (m/s)	Ts (µs)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coef. de variação (%)
CLAA <sub>10min</sub>	1	3.984	49,2	22,69	22,3	0,36	1,86
	2	3.910	49,1	21,85			
	3	3.926	48,9	22,03			
	4	3.944	49,7	22,24			
	5	3.983	48,2	22,68			
CLAA <sub>24h</sub>	1	3.866	50,7	21,46	21,53	0,64	2,96
	2	3.851	49,9	21,29			
	3	3.984	48,6	22,79			
	4	3.760	51,6	20,30			
	5	3.906	49,9	21,91			

Fonte: A Autora

**Tabela 66** - Módulo de elasticidade estático, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h

Amostra	CPs	Módulo de elasticidade estático (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
CLAA <sub>10min</sub>	1	17,08	17,77	0,72	4,07
	2	17,70			
	3	18,52			
CLAA <sub>24h</sub>	1	19,72	18,39	2,41	13,13
	2	19,85			
	3	15,60			

Fonte: A Autora

**Tabela 67** - Absorção de água, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h

Amostra	CPs	Absorção de água (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)
CLAA <sub>10min</sub>	1	9,5	9,99	0,68	6,85
	2	10,5			
CLAA <sub>24h</sub>	1	10,5	10,16	0,44	4,31
	2	9,9			

Fonte: A Autora

**Tabela 68** - Índice de vazios, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h

Amostra	CPs	Índice de vazios (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)
CLAA <sub>10min</sub>	1	15,09	15,32	0,33	2,18
	2	15,56			
CLAA <sub>24h</sub>	1	16,81	15,70	1,56	9,96
	2	14,60			

Fonte: A Autora

**Tabela 69** - Massa específica, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os CLAA10min e CLAA24h

Amostra	CPs	Massa Esp. (kg/m <sup>3</sup> )	Média (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Coef. de variação (%)
CLAA <sub>10min</sub>	1	1.582,7	1.536,4	71,86	4,68
	2	1.485,6			
CLAA <sub>24h</sub>	1	1.605,1	1.543,3	87,42	5,66
	2	1.481,5			

Fonte: A Autora