



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR – CCTA  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL – UACTA  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA CAROLINE DE SOUSA ANDRADE

**ESTUDO DE PROPRIEDADES REOLÓGICAS E FÍSICO-MECÂNICAS DE  
CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE VERMICULITA**

POMBAL – PB  
2020

ANA CAROLINE DE SOUSA ANDRADE

**ESTUDO DE PROPRIEDADES REOLÓGICAS E FÍSICO-MECÂNICAS DE  
CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE VERMICULITA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, da Universidade Federal de Campina Grande, elaborado como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Ma. Fernanda Karolline de Medeiros

POMBAL – PB  
2020

A554e Andrade, Ana Caroline de Sousa.  
Estudo de propriedades reológicas e físico-mecânicas de concreto autoadensável com adição de resíduo de vermiculita / Ana Caroline de Sousa Andrade. – Pombal, 2020.  
81 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2020.  
“Orientação: Profa. Ma. Fernanda Karolline de Medeiros”. Referências.

1. Concreto autoadensável. 2. Resíduo de vermiculita. 3. Sustentabilidade. 4. Concreto - Estado fresco. 5. Concreto – Estado endurecido. I. Medeiros, Fernanda Karolline de. II. Título.

CDU 691.32(043)

ANA CAROLINE DE SOUSA ANDRADE

**ESTUDO DE PROPRIEDADES REOLÓGICAS E FÍSICO-MECÂNICAS DE  
CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE VERMICULITA**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado pelos Examinadores para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, e aprovado em unanimidade pelos Professores participantes da banca de avaliação.

Trabalho de Conclusão de Curso Defendido e Aprovado em: 25 / novembro / 2020

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

*Fernanda Karolline de Medeiros*

---

Profª Ma. Fernanda Karolline de Medeiros  
Orientadora – UACTA/CCTA/UFCG

*Sinara Martins Camelo*

---

Profª Ma. Sinara Martins Camelo  
Examinador Interno – UACTA/CCTA/UFCG

*B.S.*

---

Bremmer Carneiro Cavalcante Souto  
Examinador Externo – Engenheiro Civil

POMBAL-PB

2020

Dedico este trabalho a Deus, criador de todas coisas, fonte do conhecimento e da sabedoria. Que tudo que eu faça, seja para glorificar seu nome.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a meu Deus por me conceder o dom da vida, por conduzir os meus passos em caminhos de alegria, por me ensinar a crescer em meio as adversidades, por me presentear com família e amigos que exalam amor. Graças dou ao Senhor Deus, por ter me dado sabedoria, por ter aberto portas e usado pessoas para contribuir na realização desta pesquisa.

Aos meus pais, Rivaldo e Neusa, agradeço pelo amor, pela educação baseada nos ensinamentos de Jesus Cristo, por todo o suporte que me foi dado até aqui e além disso, por terem sido exemplo dentro e fora do nosso lar. Agradeço a minha irmã, Asley Hanna, pela paciência, compreensão e amor.

Aos meus familiares, em especial a meus tios, Marileuza e Evandro. Agradeço por todo apoio, incentivo e confiança.

À minha orientadora, Ma. Fernanda Karolline por toda assistência em conhecimento e motivação, pelo tempo dedicado a este trabalho, pela amizade, carinho, paciência, por me ouvir e me acalantar com palavras que deram ânimo à continuar. Obrigada por me inspirar a ser uma profissional e um ser humano empático.

À equipe de amigos, Lara Mylena, Vitória Martins, George Hugo, Higor, Eudes e Johhan que estiveram presentes e ajudaram na execução deste trabalho, tornando todo o processo mais leve, obrigada por cada peso carregado e pelas boas risadas, sem vocês eu não teria conseguido. Em especial, agradeço a Lara, Vitória e Hugo que ao longo desses quatro anos de curso foram como irmãos para mim. Obrigada por terem estendido a mão sempre que precisei, obrigada pelos momentos de alegria, de desespero e de descanso. Nossa amizade é sinônimo de união, de serviço e acima de tudo, de amor.

Agradeço à Delis, Preta e Gilson pelo cuidado e carinho durante todos os anos que estive em Pombal. Agradeço ao casal, Jô e Antônio, por terem me hospedado e cuidado tão bem de mim durante a execução deste trabalho.

Pelo apoio nos momentos difíceis, pela convivência ao longo dos últimos quatro anos e pelo incentivo, agradeço as amigas, Benedita Caroline, Gabrielly Soares,

Maria Celina, Nathália Letícia e Wanessa Nóbrega. Obrigada por toda amizade, paciência e amor.

À UFCG, por ter disponibilizado o Laboratório de Resíduos Sólidos e o espaço para a realização dos ensaios que fazem parte da metodologia.

Ao corpo docente do CCTA, assim como todos os servidores e terceirizados, agradeço por terem sido facilitadores da minha jornada até aqui.

À empresa GC Mix, na pessoa de Filipe, por permitir o uso da prensa hidráulica, para realização do ensaio de resistência à compressão.

Ao Eng. Yghor França, pela doação das areias utilizadas na elaboração dos concretos.

À Flávia Silva, por ter disponibilizado os equipamentos Caixa L e Funil V.

À João Pedro, por todas as orações, incentivo e apoio.

À Leonardo Guedes, Arthur Nóbrega e William Medeiros pela ajuda no transporte dos corpos de prova.

À João Torneiro, pela doação do equipamento Anel J.

Aos demais amigos, que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

*“Esforçai-vos, e ele fortalecerá o vosso coração, vós todos que esperais no Senhor.”*

*(Salmos 31:24)*



## RESUMO

Com o avanço das pesquisas na área de tecnologia do concreto, surgiu o concreto autoadensável, um material capaz de se moldar nas fôrmas sem a necessidade de vibração. A grande quantidade de finos e a utilização de aditivo superplastificante em sua composição, proporciona maior trabalhabilidade, fluidez e estabilidade ao seu estado fresco. Vários pesquisadores buscam incorporar resíduos finos na composição do concreto autoadensável (CAA), com o objetivo de melhorar suas principais propriedades, como também proporcionar maior sustentabilidade. A Paraíba é o segundo maior produtor de vermiculita no Brasil e o beneficiamento desse mineral gera grandes volumes de resíduo fino o qual não possui utilização, causando prejuízos ambientais que podem ser irreversíveis. Diante disso, resolveu-se estudar as propriedades reológicas, físicas e mecânicas dos CAAs com a incorporação do resíduo de vermiculita. Para isso, foi dosado um traço referência (sem o resíduo), cuja composição foi de Cimento Portland CP II F como algerante, areia fina e média como agregado miúdo, o agregado graúdo foi a brita 0 e o aditivo superplastificante foi fornecido pela empresa Sika Brasil. Após a dosagem do traço referência, foram produzidos 3 traços com a substituição parcial da areia fina pelo resíduo de vermiculita em teores de 10%, 15% e 20%. Em geral, no estado fresco os traços com a incorporação do resíduo apresentaram alta capacidade de resistência à segregação e ótima habilidade passante, tendo em vista que não houve bloqueio de fluxo durante os ensaios de funil V e caixa L. O concreto com substituição de 20%, apresentou redução de absorção de água e índice de vazios de 6,24% e 5%, respectivamente. Houve uma diminuição de resistência à compressão, com exceção do concreto com substituição de 15%, que obteve uma resistência de 31,87 MPa, possuindo os melhores resultados tanto no estado endurecido, como no estado fresco do concreto. É possível concluir que o uso do resíduo de vermiculita possibilitou bons resultados tanto no estado fresco como no estado endurecido do concreto.

**Palavras-chave:** Concreto autoadensável; resíduo de vermiculita; sustentabilidade; estado fresco; estado endurecido.

## ABSTRACT

With the advancement of research in the field of concrete technology, self-compacting concrete appeared, a material capable of molding itself into forms without the need for vibration. The large amount of fines and the use of superplasticizer additive in its composition, provides greater workability, fluidity and stability to its fresh state. Several researchers seek to incorporate fine waste into the composition of the SCC, with the aim of improving its main properties, as well as providing greater sustainability. Paraíba is the second largest producer of vermiculite in Brazil and the processing of this mineral generates large volumes of fine waste that has no use, causing environmental damage that can be irreversible. Therefore, it was decided to study the rheological, physical and mechanical properties of SCCs with the incorporation of vermiculite residue. For this, a reference trace (without the residue) was dosed, whose composition was Portland Cement CP II F as a binder, fine and medium sand as fine aggregate, the coarse aggregate was gravel 0 and the superplasticizer additive was supplied by the company Sika Brazil. After measuring the reference trace, 3 traces were produced with partial replacement of fine sand for vermiculite residue in ratios of 10%, 15% and 20%. In general, in the fresh state, the traces with the incorporation of the residue showed a high capacity for resistance to segregation and excellent passing ability, considering that there was no flow block during the V funnel and L box tests. The concrete with the 20% ratio replacement showed a reduction in water absorption and the voids content in the order of 6.24% and 5%, respectively. There was a decrease in compressive strength, with the exception of the concrete with the 15% ratio replacement, which obtained a strength of 31.87 MPa, with the best results both in the hardened and the fresh states of the concrete. It is possible to conclude that the use of vermiculite residue allowed good results both in the fresh and hardened state of the concrete.

**Keywords:** Self-compacting concrete; vermiculite residue; sustainability; fresh state; hardened state.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Comportamento dos Fluidos Newtonianos e de Bingham .	28
<b>Figura 2</b> - Resíduo acumulado da MPL.	30
<b>Figura 3</b> – Resistência à compressão em cada teor de substituição (0, 30, 60 e 100%) durante os dias de cura (7, 14 e 28).	36
<b>Figura 4</b> – Fluxograma da metodologia da pesquisa.	39
<b>Figura 5</b> - Ensaio de massa específica do cimento.	40
<b>Figura 6</b> - Resíduo depositado ao lado da usina.	41
<b>Figura 7</b> - Massa específica da areia.	42
<b>Figura 8</b> - Coleta do agregado graúdo.	42
<b>Figura 9</b> - Aditivo superplastificante.	43
<b>Figura 10</b> - Marca de 500 mm na placa-base do <i>slump flow</i> .	45
<b>Figura 11</b> – <i>Slump flow test</i> .	48
<b>Figura 12</b> - Medição do diâmetro de espalhamento.	49
<b>Figura 13</b> - Distância para medir o $t_{500}$ .	50
<b>Figura 14</b> – Classes do índice de estabilidade visual (IEV).	51
<b>Figura 15</b> – Anel J.	52
<b>Figura 16</b> - Ensaio anel J	52
<b>Figura 17</b> – Caixa L – Perspectiva.	53
<b>Figura 18</b> – Funil V (Dimensões em centímetro).	54
<b>Figura 19</b> - a) Funil com a comporta fechada b) Funil com a comporta aberta	55
<b>Figura 20</b> – a) Moldagem b) Desmolde c) Cura por imersão d) Rompimento dos corpos de prova	57
<b>Figura 21</b> – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos	60
<b>Figura 22</b> – Proporções de Af e Am para a mistura de agregado miúdo	62
<b>Figura 23</b> – Proporções de Ami e Agr para a composição do esqueleto granular.	62
<b>Figura 24</b> – Espalhamentos obtidos para os diferentes traços: a) TREF b) TRV10 c) TRV15 e d) TRV20.	64
<b>Figura 25</b> – Detalhe das bordas para análise visual de exsudação dos traços: a) TREF b) TRV10 c) TRV15 e d) TRV20	64
<b>Figura 26</b> – Execução dos ensaios: a) Caixa L b) Anel J c) Funil V	66
<b>Figura 27</b> – Corpos de prova do TRV15 após o ensaio de resistência à compressão	69

**Figura 28** – Média da resistência à compressão para as idades de 7 e 28 dias .....70

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Diâmetros, em cm, da argamassa espalhada nas direções D1, D2 e D3 do ensaio de consistência, e a média destas medidas. ....	35
<b>Tabela 2.2</b> – Resultados das resistências à compressão das combinações. ....	35
<b>Tabela 3.1</b> – Informações do aditivo superplastificante.....	44
<b>Tabela 3.2</b> – Proporções de substituição da areia fina pelo resíduo. ....	44
<b>Tabela 3.3</b> – Classe de agressividade ambiental.....	44
<b>Tabela 3.4</b> – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto. ....	45
<b>Tabela 3.5</b> - Proporções em porcentagem das areias ensaiadas para definição do esqueleto granular. ....	47
<b>Tabela 3.6</b> - Proporções em porcentagem do agregado miúdo e agregado graúdo ensaiadas para definição do esqueleto granular. ....	47
<b>Tabela 3.7</b> – Procedimento para mistura dos materiais. ....	48
<b>Tabela 3.8</b> – Classes de espalhamento ( <i>slump-flow</i> ).....	49
<b>Tabela 3.9</b> – Classe de viscosidade plástica aparente.....	50
<b>Tabela 3.10</b> – Classes de índice de estabilidade visual (IEV). ....	51
<b>Tabela 3.11</b> – Classes de habilidade passante pelo anel J (fluxo livre). ....	53
<b>Tabela 3.12</b> – Classes de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado). .	54
<b>Tabela 3.13</b> – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (fluxo confinado) .....	55
<b>Tabela 4.1</b> – Parâmetros físicos para agregados miúdos .....	58
<b>Tabela 4.2</b> – Parâmetros físicos para o agregado graúdo .....	59
<b>Tabela 4.3</b> – Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados. .	59
<b>Tabela 4.4</b> – Proporções da pasta.....	61
<b>Tabela 4.5</b> – Consumo de materiais para todos os traços .....	63
<b>Tabela 4.6</b> – Resultados dos ensaios para todos os traços .....	65
<b>Tabela 4.7</b> – Classificação e aplicação segundo a NBR 15823(2017) .....	67
<b>Tabela 4.8</b> – Resultados de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica.....	68

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação (2.1)</b> .....	28
<b>Equação (3.1)</b> .....	46
<b>Equação (3.2)</b> .....	46
<b>Equação (3.3)</b> .....	46
<b>Equação (3.4)</b> .....	46
<b>Equação (3.5)</b> .....	56
<b>Equação (3.6)</b> .....	56
<b>Equação (3.7)</b> .....	56
<b>Equação (3.8)</b> .....	56
<b>Equação (3.9)</b> .....	57

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
1.1	Justificativa.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2	Objetivos da pesquisa .....	20
2.1	Objetivo Geral .....	20
2.2	Objetivos Específicos .....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
3.1	Concreto autoadensável.....	21
3.1.1	Materiais constituintes do CAA.....	22
3.1.1.1	Cimento Portland .....	22
3.1.1.2	Adições minerais .....	23
3.1.1.3	Aditivos químicos .....	24
3.1.1.4	Agregados.....	26
3.1.2	Métodos de dosagem.....	26
3.1.3	Propriedades reológicas.....	28
3.1.4	Propriedades no estado endurecido.....	29
3.2	Resíduo de vermiculita .....	30
3.3	Estado da arte .....	34
4	METODOLOGIA.....	38
4.1	Escolha e caracterização dos materiais.....	39
4.1.1	Cimento.....	40
4.1.2	Resíduo de vermiculita .....	40
4.1.3	Agregado miúdo .....	41
4.1.4	Agregado graúdo .....	42
4.1.5	Aditivo superplastificante.....	43
4.2	Definição dos traços e produção dos concretos .....	44
4.2.1	Estudo da pasta .....	44

4.2.2	Esqueleto granular .....	46
4.2.3	Procedimento de mistura.....	47
4.3	Verificação das propriedades do concreto fresco .....	48
4.4	Ensaio no concreto endurecido.....	55
4.4.1	Massa específica, absorção de água, índice de vazios .....	56
4.4.2	Resistência à compressão axial .....	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	58
5.1	Caracterização física dos materiais .....	58
5.1.1	Massa específica e massa unitária.....	58
5.1.2	Granulometria .....	59
5.2	Composição dos traços de CAA .....	60
5.3	Propriedades no estado fresco .....	63
5.4	Propriedades no estado endurecido .....	68
5.4.1	Massa específica, absorção de água, índice de vazios .....	68
5.4.2	Resistência à compressão axial .....	69
6	CONCLUSÕES .....	72
6.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	73
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75



## 1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade (HELENE, 2017). No entanto, sua mistura convencional pode apresentar defeitos que prejudicam o desempenho e a durabilidade das estruturas.

Tais defeitos, como é o caso da segregação e exsudação, podem surgir no estado fresco do concreto, durante a fase de concretagem dos elementos estruturais, na qual é necessário o uso de vibradores para adensamento do material. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), esse fenômeno de separação dos componentes, pode ocorrer devido a uma dosagem com baixos teores de partículas finas e devido a utilização de métodos impróprios de adensamento que empregam excessivo tempo de vibração.

Em busca de diminuir essas deficiências, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo novas tecnologias que apresentam características denominadas especiais, como concreto leve, concreto de alta resistência, concreto de alto desempenho, concreto reforçado com fibras e concreto autoadensável (CAA).

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), o CAA tem a capacidade de se moldar nas fôrmas preenchendo os espaços, sem a necessidade de vibração ou compactação por equipamentos. Essa característica diminui significativamente falhas provenientes do processo de adensamento, principalmente em elementos com maior densidade de armadura ou em casos com pouca acessibilidade para os equipamentos que realizam essa função.

Dentre as características do concreto autoadensável se sobressaem as propriedades de trabalhabilidade, fluidez e estabilidade, alcançadas com a correta dosagem dos materiais e otimização da mistura. A alta fluidez é alcançada com a utilização de aditivos superplastificantes e a moderada viscosidade através do incremento de um percentual adequado de adição mineral com granulometria fina (FERNEDA, 2014).

Quando se trata da aplicação do CAA, Repette (2012) destaca inúmeras vantagens como a facilidade e rapidez da execução do serviço, a economia em mão de obra, a diminuição dos ruídos pois não é necessário uso de vibradores e ainda, o

fim dos ninhos de concretagem. Ele também destaca que são empregados os mesmos materiais que compõe o concreto convencional, que são a brita, areia, cimento e água, acrescidos de materiais finos (pozolânicos, ou não) e aditivos (superplastificantes e modificadores de viscosidade).

Em relação ao concreto convencional, o concreto autoadensável exige uma maior quantidade de material fino e menor volume de agregados, medidas que vão ajudar a manter a estabilidade e, conseqüentemente, a resistência à segregação do concreto (MELO, 2005). São bastante utilizadas adições de fíler calcário, cinza volante, sílica ativa, metacaulim, resíduos da construção e de alguns minerais.

O Brasil detém um enorme patrimônio mineral, sendo um dos maiores produtores e exportadores de minérios do mundo, estando entre os principais países que representam aproximadamente 97,5% da produção mundial de vermiculita (RASHAD, 2016). Esse mineral, de acordo com Luz et al. (2008), pertence ao grupo das micas e é bastante utilizado na construção civil em sua forma expandida, como agregado leve para concreto e argamassa.

Como consequência do crescimento no setor de mineração, há um aumento na produção de resíduos que são acondicionados de forma inadequada e vão se acumulando ao longo do tempo, sem nenhuma reutilização, causando prejuízos ambientais que podem ser irreversíveis. Os principais danos ao meio, por intermédio da atividade mineradora, é a remoção da vegetação, a contaminação do solo, a poluição do ar, a poluição sonora, a contaminação de bacias hidrográficas, e, principalmente, a produção de resíduos (CARVALHO et al. 2019).

Uma grande quantidade de vermiculita é usinada na Mineradora Pedra Lavrada (MPL), de responsabilidade da União Brasileira de Mineração (UBM), localizada as margens da BR230 no município de Santa Luzia-PB.

De acordo com Luz et al. (2008), a usina é alimentada por uma taxa de 15 t/h, sendo que o teor médio de vermiculita é de 25%, o que equivale cerca de 4 t/h desse material. O minério passa por várias etapas de beneficiamento e, por fim, a fração fina, com granulometria abaixo de 0,5 mm, é descartada formando pilhas de rejeitos provenientes da mineração. O acúmulo desse rejeito modifica a paisagem do Sítio Serrote Branco, pertencente a UBM, como também provoca poluição visual e pode causar danos no solo.

A parte da atividade mineradora que possui maior responsabilidade pela produção de resíduos é a de beneficiamento, onde ocorre a transformação da matéria bruta, extraída nas minas, para a matéria prima que será comercializada. A construção civil, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração, é a área que mais demanda de matéria prima proveniente das mineradoras, principalmente para o uso na forma de agregados (IBRAM, 2016). Por essa perspectiva, o ramo da construção civil se torna coparticipante dos impactos ambientais causados pela indústria da mineração.

Compreendendo que a indústria da construção civil é um grande consumidor de recursos naturais, e que o CAA, amplamente utilizado por essa indústria, se caracteriza por apresentar dosagens com grande quantidade de finos na sua composição, sua substituição pelo rejeito de vermiculita, nesse contexto, se torna um estudo relevante visto a possibilidade de reduzir danos ambientais, dando destino ecológico a um resíduo industrial.

Assim, o objetivo desse trabalho é analisar o desempenho das propriedades reológicas, físicas e mecânicas do concreto autoadensável produzido com diferentes teores do rejeito da mineração de vermiculita em substituição parcial da areia fina na composição convencional.

## **2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar as propriedades reológicas, físicas e mecânicas dos concretos autoadensáveis com a incorporação de rejeitos de vermiculita.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar os materiais utilizados;
- Obter as dosagens adequadas dos materiais componentes da pasta e argamassa;
- Encontrar os percentuais ótimos dos agregados miúdo e graúdo na composição do esqueleto granular;
- Realizar ensaios para análise e caracterização quanto aos estados fresco e endurecido do CAA.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Concreto autoadensável

O concreto autoadensável foi desenvolvido na década de 1980 no Japão inicialmente pelo Professor Hajime Okamura, frente a época em que muito se discutia a respeito do problema de durabilidade de estruturas de concreto. Nessa época a produção de estruturas duráveis exigia mão-de-obra especializada que se encontrava bastante reduzida no âmbito da construção japonesa, acarretando uma queda na qualidade dos serviços. Posto isso, foi proposto um concreto que tinha a capacidade de se depositar em todos os cantos das fôrmas sem a necessidade de vibração e que, além de dispensar mão-de-obra específica, proporciona elementos estruturais duráveis (OKAMURA; OUSHI, 2003).

A NBR 15823-1 (2017) define o CAA como um material que tem a capacidade de fluir e autoadensar graças ao seu peso. É um material que consegue preencher as formas e passar livremente pelas armaduras sem apresentar segregação nas fases de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

Um concreto só será considerado autoadensável se três propriedades forem alcançadas simultaneamente: fluidez, coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço (ou habilidade passante) e resistência à segregação (EFNARC, 2002 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008, p.9).

Gomes e Barros (2009), por sua vez, nomeiam essas propriedades como capacidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação ou estabilidade. Eles explicam que essas propriedades devem trabalhar de forma simultânea para que consiga as características desejadas para um CAA.

A capacidade de preenchimento é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA fluir e preencher todos os espaços da fôrma pelo efeito de seu peso próprio, isso só ocorre se a mistura de concreto possuir alta fluidez e coesão. A habilidade de passagem só será efetiva caso seja moderada a viscosidade da pasta e da argamassa e as características dos agregados sejam específicas, já a resistência à segregação, é a propriedade que uniformiza o compósito durante seu transporte e lançamento, dependendo sobretudo da viscosidade e coesão da mistura (GOMES; BARROS, 2009; ABNT, 2017).

### 3.1.1 Materiais constituintes do CAA

Os materiais que compõe o CAA são os mesmos utilizados no concreto convencional, acrescidos de aditivos químicos e adições minerais. Além de areia, agregados graúdos (dimensão máxima de 19 ou 25 mm) e cimento Portland comum ou composto, os ingredientes necessários para produzir concreto autoadensável incluem superplastificantes, aditivos modificadores de viscosidade e adições minerais finas (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 491).

Para se obter um CAA com fluidez, coesão e resistência à segregação, cujas propriedades são primordiais para tipificar esse tipo de concreto, é necessário que haja uma seleção minuciosa de todos os materiais que serão utilizados, que por sua vez devem ter características específicas.

Tutikian e Dal Molin (2008) consideram a escolha dos materiais para produção do CAA uma etapa difícil por existirem uma gama de opções de aditivos e adições que podem ser incorporados para obtenção da mistura. Sendo assim, foi destacado nos tópicos a seguir, algumas recomendações dos materiais que serão necessários para se obter o melhor produto final possível, de acordo com a literatura.

#### 3.1.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland (CP) consiste em um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, cujo endurecimento ocorre por meio de reações químicas quando os silicatos e aluminatos do CP entram em contato com a água, resultando em um produto final estável em meio aquoso, sólido e resistente. É o principal material na produção de concretos e argamassas (MEHTA; MONTEIRO, 2010; NEVILLE, 2010).

Para produção do CAA, podem ser utilizados todos os tipos de cimento já empregados no concreto convencional, levando em consideração as especificações de normas técnicas locais e as exigências específicas para cada aplicação. O aluminato tricálcico (C3A) e a granulometria do cimento são os fatores que controlam a trabalhabilidade, quantidade de água e conseqüentemente a resistência do concreto que será utilizado nas estruturas, isso faz dele um material de extrema importância para a construção civil. Na prática, cimentos com teores de aluminato tricálcico (C3A) menores que 10%, proporcionam um período mais longo de enrijecimento facilitando o controle reológico e a aplicação do CAA em obras (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009; REPETTE, 2012).

Klein (2008) destaca que para uma viscosidade adequada do CAA é necessário um elevado teor de finos, sendo o cimento o insumo que garante a maior parte desses finos. Dessa forma, quanto mais fino for o cimento, maior será sua superfície específica, aumentando o contato dessas partículas com a água, reduzindo a tensão de escoamento e aumentando a viscosidade da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

No entanto, o consumo de cimento deve ser moderado, pois se usado em grande quantidade pode aumentar a geração de calor pela hidratação do cimento e causar problemas como retração plástica no concreto em seu estado endurecido. Segundo Gomes e Barros (2009) o intervalo do consumo de cimento para se evitar a retração está em torno de 200 a 450 kg/m<sup>3</sup>. Uma outra solução, além de moderar o consumo de cimento, seria utilizar um tipo de adição em sua composição, utilizando cimentos compostos (CP II-E, CP II-F e CP II-Z) ou incorporar adições minerais ao concreto, as quais por serem subprodutos industriais diminuem o custo do concreto como um todo.

### **3.1.1.2 Adições minerais**

As adições minerais são comumente utilizadas nos cimentos e no concreto, com a finalidade de proporcionar características técnicas vantajosas. As mais utilizadas para obtenção do CAA são as cinzas vulcânicas e rochas sedimentares com elevado teor de sílica, microsilicas, resíduos de processos industriais ou até pela moagem de resíduos de materiais de construção ou demolição.

Para escolher esse material, é necessário que haja uma análise técnica e econômica para comprovar a viabilidade do seu uso. Elas são utilizadas no concreto com o objetivo de aumentar a coesão da mistura e evitar a segregação do agregado graúdo, como também podem desempenhar um importante papel para a resistência e durabilidade do mesmo, tanto física quanto quimicamente (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As incorporações de adições minerais no concreto, conforme Isaia (2005), promovem a redução do calor de hidratação, o que conseqüentemente reduz as chances de surgir fissuras de origem térmica e ainda têm a capacidade de diminuir a porosidade capilar do concreto, evitando a troca de umidade, íons e gases com o meio.

Deve-se salientar que a eficiência de uma adição mineral pode variar em função da quantidade utilizada e das condições de cura, bem como em função da sua composição química, mineralógica e granulométrica (MENEZES; 2006). Repette (2011)

considera a granulometria para adições ou finos os materiais com dimensões menores que 0,15mm.

As adições são divididas em dois grupos, inertes e reativas, classificadas de acordo com sua atividade no concreto. As adições inertes são de origem mineral e não reagem quimicamente com nenhum outro componente do concreto. Sua função é uma ação física de empacotamento granulométrico que proporciona maior compactação. Já as reativas, como o nome já sugere, estão relacionadas à capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio –  $\text{Ca(OH)}_2$  -, resultado da hidratação do cimento Portland para formar compostos resistentes através do silicato de cálcio hidratado (ISAIA, 2005; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009).

Além de todas as vantagens tecnológicas já citadas, o uso de adições provenientes de rejeitos diminui os impactos ambientais causados pelas indústrias que não destinam seus resíduos de forma correta, como também propicia ganhos ambientais, sociais e econômicos, promovendo o desenvolvimento sustentável através de materiais alternativos.

A inserção dos resíduos em um ciclo produtivo representa não apenas uma alternativa de barateamento da produção, mas também, uma opção de reciclagem e reutilização desses materiais, sendo interessante tanto no aspecto ambiental como no econômico (ANDREOLA et al., 2002). As maiores vantagens da utilização de resíduos minerais na produção de materiais de construção de acordo com Menezes et al. (2002) é a sua abundância e diversidade de matérias-primas, principalmente nas regiões onde estão localizadas as empresas de beneficiamento mineral, gerando como consequência, uma possível redução dos custos de produção.

### **3.1.1.3 Aditivos químicos**

Sabe-se que o uso de aditivos no CAA é um dos grandes diferenciais em relação ao concreto convencional, pois proporcionam ao material propriedades específicas a partir de interações químicas com o cimento.

Os aditivos químicos são definidos pela norma europeia EN 480 – 1 (1998), como produtos que são utilizados nos concretos em quantidades menores que 5% da massa de cimento e possuem a capacidade de melhorar as propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido. Existem variados tipos de aditivos, com composições químicas específicas para beneficiar características desejadas, sejam elas nos concretos, argamassas, pastas e grautes. Os principais tipos de aditivos usados no



concreto autoadensável são os modificadores de viscosidade e os aditivos superplastificantes.

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), os aditivos modificadores de viscosidade (VMA) melhoram a coesão da massa de CAA no estado fresco, sem a necessidade de grandes quantidades de finos em sua dosagem, prevenindo a segregação e exsudação do concreto. Apesar de seu uso não ser obrigatório, quando associado aos aditivos superplastificantes, resulta em concretos estáveis e com alta fluidez.

Segundo Gomes e Barros (2009), ao adicionar o modificador de viscosidade na mistura de concreto, a água livre do sistema pode ser absorvida por cadeias de polímeros, diminuindo as chances de ocorrer exsudação. É a partir desse processo que há um aumento na coesão da mistura e uma melhora na estabilidade do concreto.

Os superplastificantes podem ser considerados como agentes que quando adicionado em pequenas quantidades, proporcionam fluidez e alta trabalhabilidade ao concreto. Esse tipo de aditivo é bastante utilizado quando se faz necessário a produção de um concreto fluído, com baixas relações água/cimento e diminuição no calor de hidratação.

Esse grupo de aditivos redutores de água é dividido em quatro categorias de acordo com sua composição química, os lignossulfonatos (LS), naftaleno sulfonato (NS), melamina sulfonato (MS) e os policarboxilatos (PC). A última categoria é a mais utilizada para a produção de concretos autoadensáveis, visto que são os aditivos de última geração que com sua forma tridimensional e sua complexa composição, causam um efeito dispersante das partículas de cimento por meio de repulsão estérica, não interferindo na viscosidade do concreto. Os PC se destacam dentre os aditivos anteriores por permitir ao concreto um maior tempo de propriedades plastificantes e maior trabalhabilidade (PINTO BARBOSA et al., 2006; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; SILVA MENDES, 2016);

Apesar do alto preço dos aditivos, Menezes (2006) explica que seu uso sucederá em economias e benefícios, como por exemplo redução da água e do cimento (na mesma proporção) mantendo trabalhabilidade e resistência, redução da segregação, aumento de durabilidade, dentre outras vantagens. Neville (1997 apud Calado et al., 2015, p.68) defende que os aditivos não necessariamente representam despesa adicional e sim determinam ganhos em custo de mão de obra para adensamento e acabamento após lançamento nas formas.

### 3.1.1.4 Agregados

Qualquer tipo de agregado utilizado no CCV, pode ser também empregado no CAA, contanto que sejam inertes e sejam conhecidas as características petrográficas e granulométricas. A distribuição granulométrica e a forma do agregado, textura da superfície, e absorção, conforme Calado et al. (2015), podem ter significativa influência na qualidade da mistura, seja no estado fresco ou no estado endurecido.

A forma do agregado (graúdo ou miúdo) pode influenciar na trabalhabilidade do concreto, de maneira que agregados angulares necessitam de um volume maior de água na mistura para reagir melhor a essa propriedade, já os agregados arredondados necessitam de menores volumes de água para obter boa trabalhabilidade (NETO, 2011).

Do mesmo modo que a forma pode influenciar na trabalhabilidade, a textura pode influenciar na resistência do concreto, principalmente na resistência a flexão. Uma textura mais áspera permite a formação de uma aderência física mais forte entre a pasta de cimento e o agregado, enquanto a textura lisa reage de forma menos intensa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para os agregados miúdos, segundo Menezes (2006), o que influenciará a produção de um bom concreto autoadensável é a aplicação de areias médias finas (módulo de finura próximo a 2,4) e areias finas (módulo de finura próximo de 1), como também utilizar um agregado miúdo com granulometria contínua proporcionando uma melhor resistência à segregação.

O cuidado com o agregado graúdo está relacionado ao seu diâmetro máximo característico, o qual deve ser menor que 19 mm para garantir a passagem do concreto pelos obstáculos durante o lançamento e diminuir os riscos de segregação. Com relação a forma e textura do agregado graúdo para o CAA, recomenda-se agregados com coeficiente de forma o mais próximo de 1, muito embora agregados angulares e ásperos desenvolvam maior aderência com a pasta, estes podem aumentar o consumo de água prejudicando a trabalhabilidade da mistura (GOMES; BARROS, 2009).

### 3.1.2 Métodos de dosagem

A dosagem dos concretos tem por objetivo fazer com que o concreto fabricado tenha uma determinada resistência à compressão, mantendo-se uma trabalhabilidade

adequada à moldagem das peças estruturais para as quais foi imaginado (FUSCO, 2008).

O primeiro método de dosagem de CAA foi desenvolvido por Okamura e Ozawa, em 1995, e ainda hoje é utilizado por diversos pesquisadores em vários lugares do mundo. Porém, hoje já existem diversos métodos baseados no estudo dos agregados e esqueleto granular ótimo, ou na demanda de água dos materiais constituintes (KLEIN, 2008).

Não existe um método padrão para dosagem de concretos autoadensáveis (EFNARC,2005). Por isso, muitas universidades e empresas que exploram e produzem CAA elaboram suas próprias metodologias de dosagem. A seguir estão apresentados em ordem cronológica alguns métodos de dosagem já publicados.

- Método de Okamura e Ozawa (1995): consiste em fixar os agregados graúdo e miúdo para, em seguida, obter o efeito de autoadensabilidade ao realizar ajustes na quantidade de superplastificante e na relação água/finos (OKAMURA; OZAWA, 1995).

- Método de Su et al (2001): consiste no empacotamento de partículas, em que a quantidade de agregados exigida é determinada e os vazios que existem entre eles é preenchido com pasta de materiais cimentícios, assegurando assim a fluidez, capacidade de autocompactação e outras propriedades desejadas para o CAA (SU; HSU; CHAI, 2001).

- Método EFNARC (2002): nesse método a composição da mistura é selecionada para satisfazer os critérios de desempenho específicos para o concreto, tanto no estado fresco (capacidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação) quanto no estado endurecido (EFNARC, 2002).

- Método de Tutikian (2004): o CAA nesse caso, é obtido a partir da dosagem de um concreto convencional seguindo o procedimento IPT/EPUSP. A quantidade de argamassa obtida para um concreto convencional é mantida constante e seus componentes são alterados para que se torne autoadensável com a incorporação de superplastificantes e finos (TUTIKIAN, 2004).

- Método de Gomes et al. (2002): a metodologia em questão se baseia na otimização da pasta e do esqueleto granular de forma separada. Para se obter a composição final é necessário definir as quantidades ideais, de forma que a composição da pasta seja capaz de proporcionar ao concreto características autoadensáveis (GOMES; BARROS, 2009).

### 3.1.3 Propriedades reológicas

Em busca de um aprimoramento do comportamento e desempenho do CAA, vem sendo estudada a reologia desse material por pesquisadores de todo o mundo. Em termos reológicos, o concreto pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento) (CASTRO, 2007).

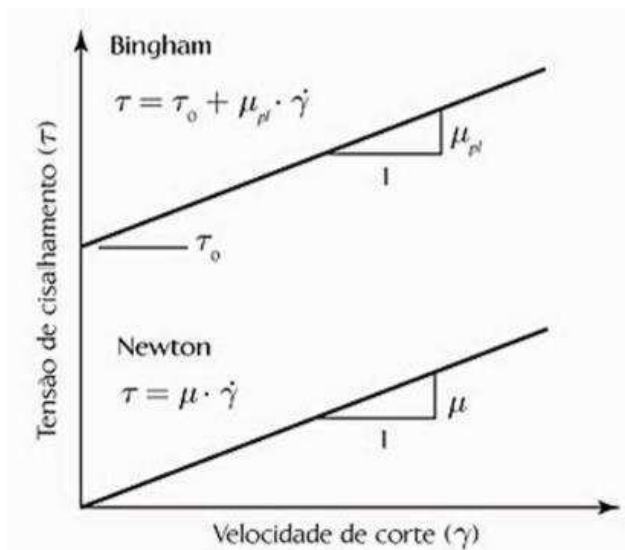
É graças as propriedades reológicas que o concreto autoadensável consegue fluir, preencher os espaços das fôrmas e passar por entre as armaduras sem apresentar segregação. Tal fluido, de acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), é caracterizado pela viscosidade plástica que se refere a medida da taxa de fluxo do material, como também pela tensão de cisalhamento, cuja propriedade é uma medida de força, necessária para o movimento do concreto.

A viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento são definidas geralmente de acordo com um modelo simplificado de Bingham, definido pela equação 2.1.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

Segundo o modelo de Billberg (2005), inicialmente, é necessário aplicar uma dada tensão de cisalhamento inicial ( $\tau_0$ ) para se iniciar o movimento do CAA, seguido pelo aumento da viscosidade plástica ( $\mu_p$ ) aplicada a uma velocidade de corte ( $\dot{\gamma}$ ) crescente. A Figura 1 mostra o comportamento dos fluidos de Bingham, o qual a curva intercepta o eixo no ponto referente à tensão de cisalhamento.

**Figura 1** - Comportamento dos Fluidos Newtonianos e de Bingham (Billberg, 2005).



Para as determinações das propriedades do concreto autoadensável no estado fresco existem métodos especiais que são detalhados na norma brasileira NBR 15823 (2017), que é dividida em seis partes. A NBR 15823-1 (2017) (classificação, controle e aceitação no estado fresco), define o CAA e especifica de modo geral os ensaios, como também os materiais adequados a serem empregados na mistura.

O ensaio que garante as especificações para fluidez do CAA está descrito na NBR 15823-2 (2017) e denomina-se *Slump Flow Teste* (SF). Neste ensaio se emprega o cone de Abrams para medir a capacidade do concreto de fluir livremente e verificar sua habilidade de preenchimento sem segregar. Ainda nessa norma é descrito o *Slump Flow T<sub>500</sub> Test*, com o qual é possível avaliar a viscosidade da mistura através taxa de fluxo encontrada a partir do tempo que a pasta leva para alcançar a marca de 500 mm. Também é possível analisar visualmente a segregação e exsudação, através do índice de estabilidade visual (IEV).

Na NBR 15823-3 (2017) (Determinação da habilidade passante – Método do anel J), esse método permite aferir a habilidade do concreto de passar por entre obstáculos. Pode-se também verificar visualmente a segregação da mistura, uma vez que ao passar pelo anel a argamassa não deve se separar do agregado graúdo (MEDEIROS, 2016). As partes 4 e 5 da NBR 15823 (2017) também determinam habilidade passante e indicadores de fluidez através do método da caixa L e do funil V, respectivamente.

Já a NBR 15823-6 (2017) apresenta dois ensaios para se determinar a resistência à segregação do concreto, que são: o método da coluna de segregação e método da peneira que é considerado opcional.

### **3.1.4 Propriedades no estado endurecido**

Apesar do grande interesse nas propriedades do CAA no estado fresco, as principais propriedades desse material são referentes ao seu estado endurecido, os quais exigem estudos que garantam resultados satisfatórios para que seja utilizado.

O concreto possui três principais propriedades que são essenciais para que ele seja considerado um concreto de qualidade, resistência mecânica, porosidade e durabilidade (SCHLINDWEIN, 2018). A resistência mecânica do concreto, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), é a capacidade do material de resistir a esforços de tensão sem que as peças entrem em colapso, é ela que garante a qualidade do concreto.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), as propriedades no estado endurecido do

CAA são as mesmas do CCV. No entanto, por utilizar uma porcentagem maior de argamassa, o concreto autoadensável apresenta um desempenho ligeiramente superior ao convencional, provavelmente em função do melhor adensamento que ocorre através do seu peso próprio ocasionado pela presença de uma quantidade maior de finos. Portanto, é possível afirmar que a porosidade do CAA é normalmente menor do que do CCV, enquanto é esperada maior durabilidade, uma vez que há uma proporção diferente entre os materiais e há normalmente a redução de falhas no adensamento.

A resistência do concreto normalmente é considerada a propriedade mais importante, pois ela dá uma ideia geral da qualidade do concreto. No mecanismo de compressão o modo de ruptura é menos frágil que no de tração, porque é necessária energia consideravelmente maior para que se formem as fissuras e se desenvolvam na matriz (NEVILLE, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O comportamento do CAA à compressão e à tração é bastante similar ao do concreto convencional. Todavia, o concreto autoadensável produzido com relação de água/cimento e água/aglomerante semelhantes ao concreto convencional, geralmente atingirá uma resistência um pouco superior, graças a sua microestrutura mais homogênea e menor porosidade na interface entre a matriz e o agregado graúdo, o que proporciona uma melhor zona de transição (EFNARC, 2005).

O trabalho de Costa e Cabral (2019), que teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre essas duas tecnologias em uma obra de edificação vertical, constatou de forma prática que a média de resistência à compressão para o CAA superou a média para o CCV em 8,8%. Segundo os autores, isso se dá devido a maior compacidade do CAA em relação ao CCV.

A relação água/cimento, porosidade da matriz, porosidade da zona de transição, propriedades dos agregados, ar incorporado, condições de cura, parâmetros de ensaios, parâmetros do corpo de prova, condições de carga e idade dos ensaios, são considerados parâmetros importantes que podem prejudicar a resistência à compressão do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### **3.2 Resíduo de vermiculita**

A vermiculita é um mineral pertencente ao grupo das micas, formado por silicato hidratado de alumínio, ferro e magnésio, possuindo estrutura cristalina. Sua estrutura acomoda uma molécula d'água que, quando submetida a aquecimento (800-1100°C), a água aprisionada evapora e provoca uma expansão ou esfoliação em até 30 vezes do

tamanho original do grão de vermiculita (SOUSA, 2012). Após a expansão, o produto se torna leve, resistente ao fogo, com baixa condutividade térmica, elétrica e acústica assim como outros materiais expandidos.

A versão expandida da vermiculita possibilita diversas aplicações industriais, como na construção civil, que é aplicada como agregados leves para concreto e argamassa, isolantes termo-acústico, elementos filtrantes, absorvente de umidade, entre outros materiais; na agricultura como condicionador de solos, retentor de umidade e veículos de macro e micronutrientes; na indústria, como isolante térmico para alta e baixa temperaturas, no esfriamento lento de moldes de fundição, como cobertura de tanques de galvanoplastia, na fabricação de lonas de freio, embalagens à prova de choques e fogo, etc.

A reserva de vermiculita da Paraíba está localizada no município de Santa Luzia – PB, onde se encontra a MPL – Mineração Pedra Lavrada, pertencente a UBM – União Brasileira de Mineração. Conforme Luz et al. (2001), a estratigrafia do depósito da mina apresenta material argiloso no capeamento e micaxisto no contato da encaixante, o que permite uma lavra com elevado teor de vermiculita e assim garantem o cumprimento das exigências para comercialização do produto.

A lavra é feita a céu aberto com desmonte mecânico, usando trator de esteira para realizar a escarificação do minério. Faz-se necessário também uma carregadeira frontal para alimentar os caminhões basculantes que executam o transporte até a mineradora. Já o beneficiamento é a seco, o minério é levado para um pátio e espalhado, formando uma fina camada para secagem ao sol, logo após a secagem, o minério é levado para a usina para ser beneficiado (LUZ et al., 2001).

O material passa por uma série de peneiras e moedores para suceder a separação do minério em médio (4 - 2 mm), fino (2 - 1 mm), superfino (1 - 0,5 mm) e pó, que será descartado (partículas menores que 0,5 mm). A correia transporta o minério para uma peneira de dois deques, com aberturas de tela de 6,35 e 0,5 mm. O minério retido segue para o moinho de martelos, que alimentam as peneiras vibratórias com telas de 0,5 mm (LUZ et al., 2001). A fração passante à peneira de 0,5 mm é o rejeito descartado próximo a usina (Figura 2), por não possuir valor econômico, devido à ausência de comércio.

Admite-se como rejeitos da vermiculita os materiais que não contêm viabilidade econômica, constituídos de solos com altos teores de nutrientes e minerais (DIAS et al., 2018). Esse material, de acordo com Sousa (2012), possui granulometria fina menor que

1 mm e de acordo com sua análise química apresenta maiores teores de silício, magnésio, ferro e alumínio.

**Figura 2** - Resíduo acumulado da MPL (Autor, 2020).



A mineração, por sua vez, causa um impacto ambiental considerável, alterando intensamente a área minerada e as áreas vizinhas, onde são feitos os depósitos de estéril e de resíduo.

O rejeito gerado pela MPL é de grande quantidade, a empresa chega a produzir 10 toneladas de minério por dia, desse total 3% é rejeitado e acumulado de forma incorreta (ALENCAR et al., 2015). Esse volume de rejeito que cresce diariamente faz com que a área impactada aumente de forma desgovernada, promova a degradação da vegetação local, irregularidades topográficas e consequente poluição visual.

Diante desse contexto, as práticas que possibilitam a mitigação dos impactos causados pela mineração local é a reutilização ou reciclagem desses rejeitos. Com isso há desenvolvimento sustentável através da criação de produtos constituídos com materiais alternativos.

O resíduo da vermiculita vem sendo estudado para utilização na agricultura, devido a sua quantidade de potássio (SOUSA; MACHADO; LEITE, 2011; GOMES; LEITE; SANTOS, 2012; MELO, 2019) e na construção civil com estudos em argamassas devido a sua composição química e granulométrica (DIAS et al., 2018; ROJAS-RAMÍREZ et al., 2019).

As maiores vantagens da utilização de resíduos minerais na produção de materiais de construção são: a sua abundância nas regiões onde se encontram



empresas mineradoras e de beneficiamento mineral, bem como a possível redução dos custos de produção (MENEZES et al., 2002).

### 3.3 Estado da arte

Neste item são apresentadas algumas pesquisas que utilizaram os variados tipos de resíduos da mineração para a produção de materiais de construção, como argamassas e concreto autoadensável.

Azerêdo (2012), em *Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais*, fez uso do resíduo da mineração de caulim e se propôs a analisar o seu uso de duas formas, in natura e calcinado. Inicialmente, foram estudadas pastas com proporções em massa de 1:1 e 1:2 de cal e resíduo de caulim calcinado, o qual se transforma em metacaulim (MC) e exerce funções pozolânicas. Em seguida, para a produção de argamassas, houve substituição parcial da areia de rio (agregado) pelo resíduo in natura, nas seguintes proporções 0%, 10%, 30% e 50% e para o aglomerante foram empregadas as mesmas proporções (cal:MC) da pasta. Os resultados de resistência das argamassas com apenas o resíduo da mineração de caulim não foram satisfatórios, pois a resistência mecânica diminuiu quando comparada com a argamassa sem o resíduo. Porém, a associação do resíduo com o metacaulim resultou em ótimo desempenho das propriedades endurecidas, como a resistência à compressão.

Neto et al. (2016), no trabalho *Uso de resíduos da mineração de scheelita em argamassas de assentamento e revestimento*, objetivou analisar o comportamento do resíduo de scheelita, substituindo parcialmente (0%, 20% e 40%) o agregado convencional (areia), a fim de se constatar novas características na argamassa, além de apresentar uma solução para destinação correta do rejeito, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Foi observado, de acordo com a Tabela 2.1, que quanto maior a proporção do resíduo na argamassa, maior seu diâmetro de abatimento, implicando numa maior plasticidade e fluidez ao material.

**Tabela 3.1** – Diâmetros, em cm, da argamassa espalhada nas direções D1, D2 e D3 do ensaio de consistência, e a média destas medidas.

Percentual de resíduo	D1	D2	D3	Média
0%	16,5	16,8	16,7	16,7
20%	17,8	17,6	18	17,8
40%	18,5	18,9	19,3	18,9

Fonte: Adaptado de Neto et al. (2016)

Silva, Santos e Scremin (2017), na pesquisa *Incorporação de resíduo de mineração em concreto autoadensável*, escolheram o resíduo de pó de rocha para substituir o cimento de forma parcial, nas proporções de 10% e 25%. Com objetivo de analisar a possibilidade de reduzir os impactos ambientais causados pelo rejeito, além de verificar mudanças nas propriedades físicas e mecânicas do CAA. Os resultados obtidos nesse trabalho concluem que a incorporação do resíduo escolhido provocou uma diminuição da resistência mecânica à compressão em todas os traços e idades analisados.

Miranda et al. (2018), em *Utilização de pó de pedra Cariri em concreto autoadensável*, selecionou o resíduo de serragem da pedra Cariri (RSPC) devido a sua elevada finura, tendo em vista que essa característica pode contribuir para o aumento da coesão da mistura do CAA. Foram produzidas amostras com diferentes percentuais, em massa, da quantidade de RSPC em relação à quantidade de areia e uma amostra referência, sem o rejeito. A Combinação 1 foi produzida com 75% de areia e 25% do resíduo, a Combinação 2 foi formada por 80% de areia e 20% de RSPC e a Combinação 3, produzida com 85% de areia e 15% de RSPC. Os autores observaram que as combinações com maiores quantidades de resíduo atingiram maiores valores de resistência a compressão quando comparados ao traço de referência, sem o resíduo, como mostra a Tabela 2.2.

**Tabela 3.2** – Resultados das resistências à compressão das combinações.

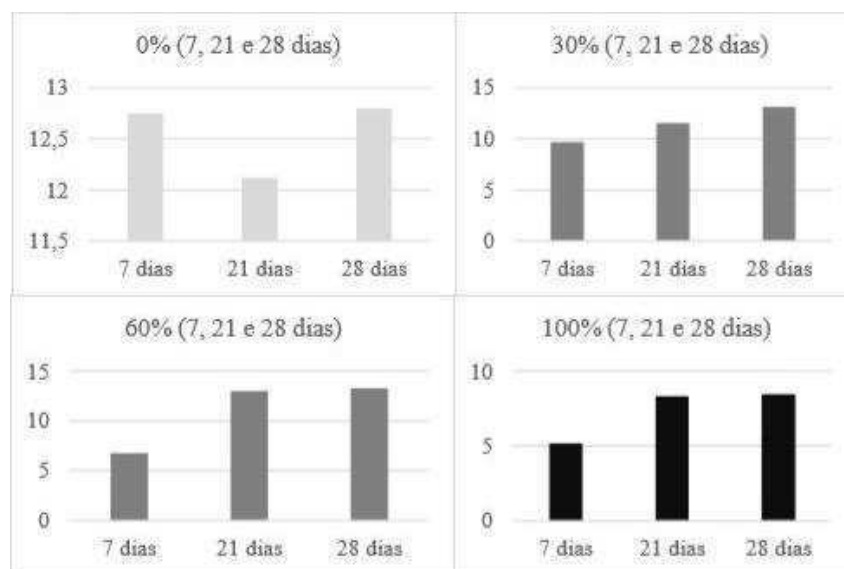
Dosagem	Valores médios de resistências (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
Referência	38,9	42,9	48,9
Combinação 1	41,2	44	50,8
Combinação 2	39,5	43,7	49,9
Combinação 3	40	43,4	49,8

Fonte: Adaptado de Miranda et al. (2018)

O resíduo de vermiculita ainda não possui aplicação comercial em larga escala, por esse motivo ele foi escolhido como objeto de estudo nas argamassas em recentes pesquisas.

Dias et al. (2018), na pesquisa *Resíduo de vermiculita na resistência à compressão em argamassa de revestimento*, objetivou avaliar a resistência à compressão em argamassas para revestimento de paredes contendo resíduos mineral de vermiculita em diferentes dias de cura (7, 21 e 28 dias). Esse resíduo foi incorporado no traço de referência 1:4, substituindo a parte fina da areia nas proporções de 0%, 30%, 60% e 100%. A Figura 3 mostra que a resistência à compressão analisada apresentou ganho gradativo ao longo do tempo em todos os teores, com exceção da argamassa com substituição de 0%, e o maior valor apresentado foi o da argamassa com substituição de 60% de areia fina, obtendo uma resistência final de 13,25 Mpa.

**Figura 3** – Resistência à compressão em cada teor de substituição (0, 30, 60 e 100%) durante os dias de cura (7, 14 e 28) (DIAS et al., 2018).



Rojas-Ramírez (2019), em *Impacto do uso de resíduo de vermiculita no estado endurecido de argamassas*, utilizou esse rejeito de duas formas, in natura e calcinado, na substituição parcial do cimento (CPV), variando os teores de substituição de 5 a 20%. O trabalho teve como objetivo único avaliar os impactos do resíduo de vermiculita nas propriedades no estado endurecido das argamassas, fixando o teor da relação água/sólidos, independente das alterações na consistência

do material. Os ensaios realizados para avaliar essa propriedade foram o de Arquimedes, resistência à tração na compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico e permeabilidade ao ar, os quais levaram a conclusão de que substituições com o teor de até 10% não apresentaram alterações relevantes nos produtos e houve indicativo de que o aumento do teor de resíduo de vermiculita resultou em diminuição da porosidade aparente.

## 4 METODOLOGIA

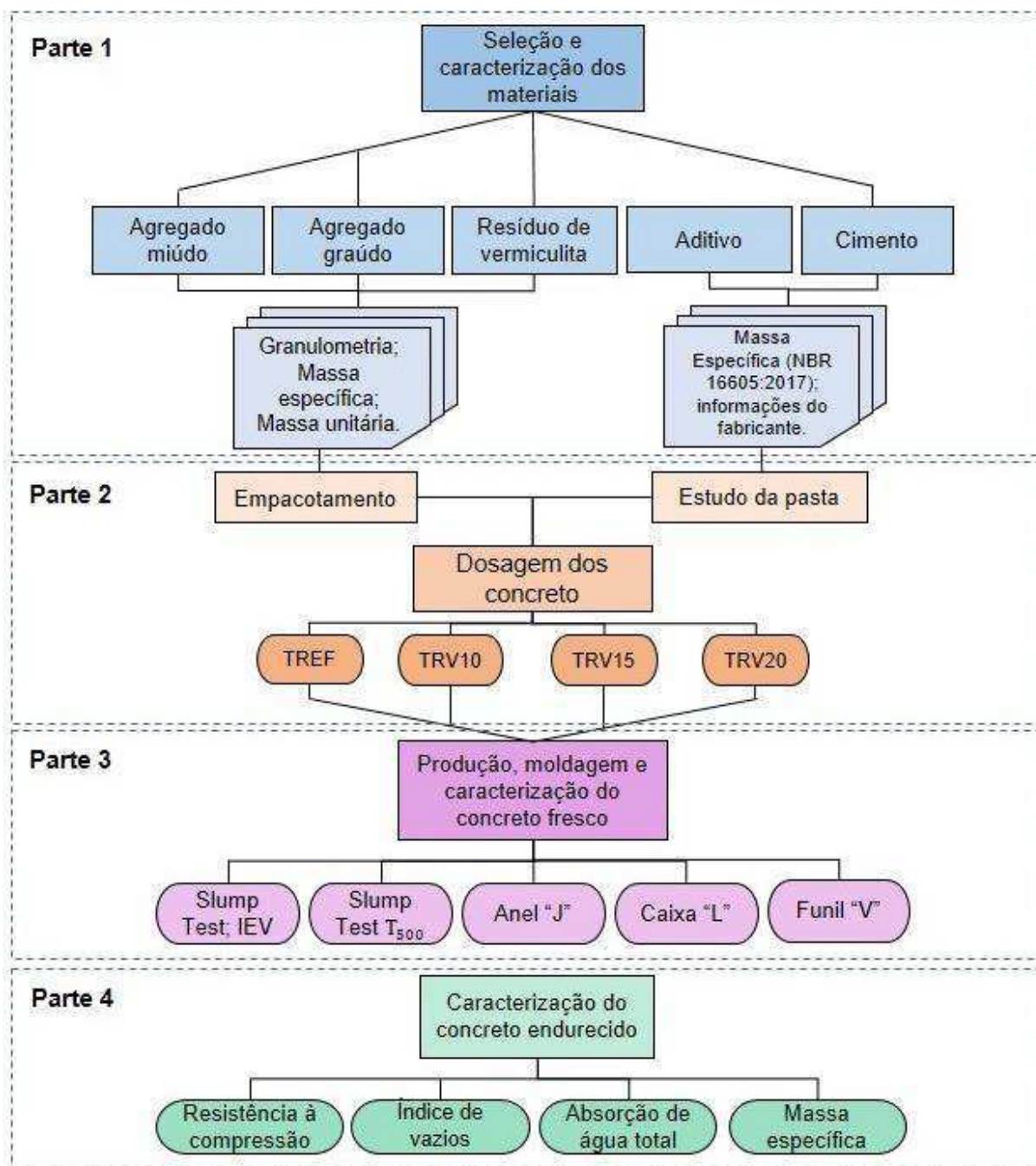
O presente trabalho buscou desenvolver três traços de concreto autoadensável, contendo em sua composição diferentes proporções de resíduo de vermiculita (RV), baseados em um traço referência de CAA sem o resíduo, com resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias.

A metodologia deste trabalho foi dividida em 4 etapas, como mostra o fluxograma da Figura 4. A primeira delas, diz respeito a coleta e estudo de caracterização do resíduo utilizado, como também a seleção e caracterização dos demais materiais que compõe o CAA.

A segunda fase refere-se ao estudo de dosagem dos CAA, os quais foram estabelecidos definindo o esqueleto granular separadamente da pasta, como proposto em Gomes (2002). Nesta fase foi definido que haveria uma substituição parcial, com teores de 0% (TREF), 10% (TRV10), 15% (TRV15) e 20% (TRV20), da areia fina pelo RV.

Na terceira etapa os concretos foram produzidos, parte do material foi moldado em corpos de prova e a outra parte foi analisada quanto ao seu desempenho no estado fresco, a partir dos ensaios descritos na NBR 15823 (2017). Na quarta etapa ocorreu a obtenção e análise das propriedades mecânicas dos CAA obtidos.

**Figura 4** – Fluxograma da metodologia da pesquisa (Autor, 2020).



#### 4.1 Escolha e caracterização dos materiais

O critério utilizado para a seleção dos materiais levou em consideração a acessibilidade dos materiais no mercado local. Todos os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), *campus* Pombal.

#### 4.1.1 Cimento

O aglomerante escolhido para o trabalho foi o Cimento Portland composto com Fíler e resistência à compressão mínima aos 28 dias de 32 Mpa (CPII F 32). Tal cimento é de fácil acesso no mercado local e é bastante utilizado nas construções da região de Pombal/PB. Sua massa específica foi obtida utilizando a NBR 16605 (2017) através do frasco de Le Chatelier, mostrado na Figura 5.

**Figura 5** - Ensaio de massa específica do cimento (Autor, 2020).

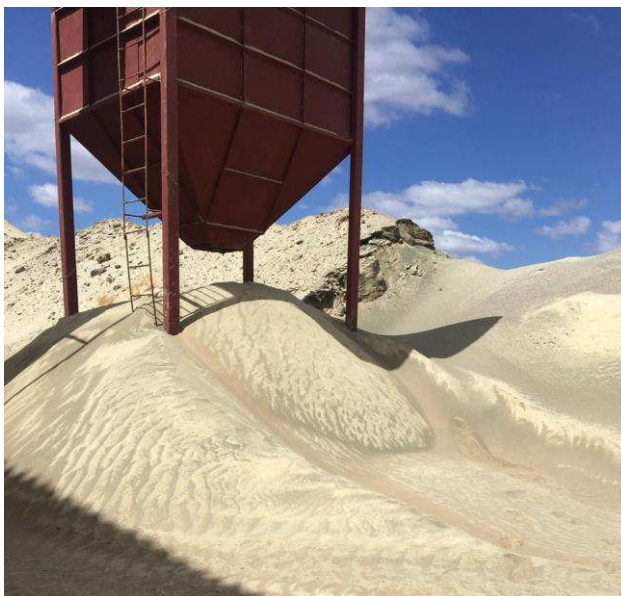


#### 4.1.2 Resíduo de vermiculita

O resíduo mineral utilizado neste trabalho é proveniente do município de Santa Luzia-PB, doado pela União Brasileira de Mineração.

O minério de vermiculita passa por moedores e uma sequência de peneiras com aberturas de 6,35 a 0,5 mm durante o beneficiamento para obter as características desejadas e assim, ser comercializado no território nacional e internacional. A coleta do resíduo é realizada após seu processo de beneficiamento. O resíduo coletado é todo material (pó) passante na peneira de 0,5 mm e é transportado para o exterior da usina, se acumulando diariamente (Figura 6).

**Figura 6** - Resíduo depositado ao lado da usina (Autor, 2020).



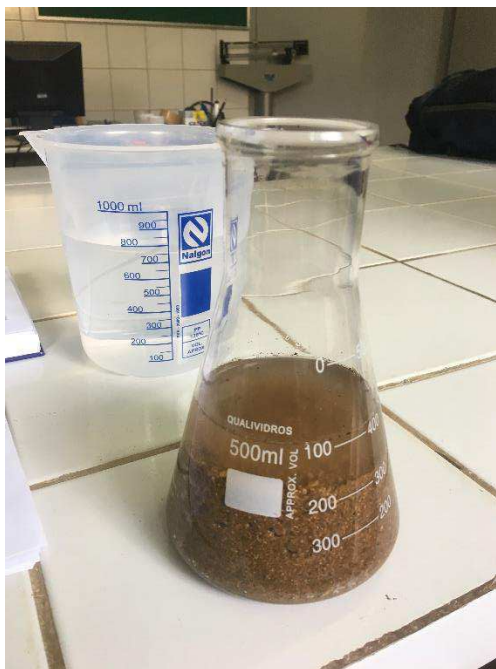
Após a coleta do RV, o mesmo foi levado ao laboratório de resíduos sólidos da UFCG, onde foi caracterizado. O resíduo foi seco em estufa a 110 °C durante 24h e logo em seguida foi realizado o ensaio de granulometria por peneiramento, através da NBR NM 45 (2002). A sua massa específica foi realizada obedecendo as instruções da NBR NM 52 (2009).

#### **4.1.3 Agregado miúdo**

Partindo da premissa de que uma ótima composição de concreto autoadensável deve possuir o mínimo possível de vazios e que esses dependem do tamanho dos agregados, foi selecionado dois tipos de agregados miúdo, com granulometrias média e fina, ambas provenientes da construção da Usina Piloto pertencente a UFCG, campus Pombal/PB. Para caracterizá-los foram realizados os ensaios de massa específica (Figura 7) de acordo com a NBR NM 52 (2009), massa unitária em estado solto, através da NBR NM 45 (2002) e composição granulométrica (granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura) baseado na NBR NM 248 (2003).



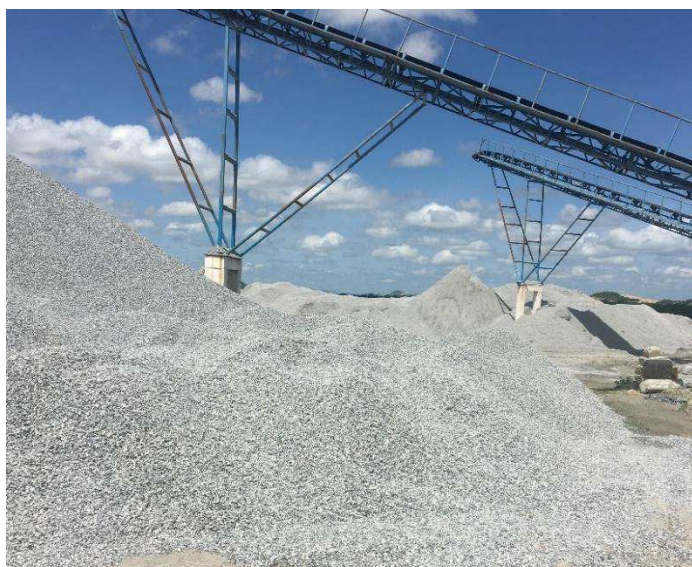
**Figura 7** - Massa específica da areia (Autor, 2020).



#### 4.1.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo coletado para o estudo foi a pedra britada de origem granítica e com diâmetro máximo característico de 9,5 milímetros, comercializado como pedrisco ou brita 0 no mercado local (Figura 8), originário de uma pedreira localizada na BR-230 próximo ao município de São Mamede/PB.

**Figura 8** - Coleta do agregado graúdo (Autor, 2020).



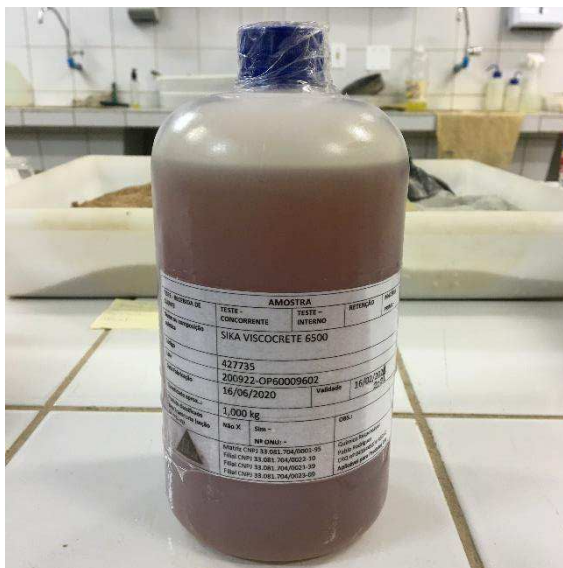
O uso da brita 0 foi escolhido em atendimento as referências encontradas sobre CAA que indicam o uso de menores diâmetros máximos característicos de agregado graúdo.

Foi seguida as instruções da NBR NM 53 (2009), para encontrar sua massa específica, já para massa unitária foi seguido os passos da NBR NM 45 (2002) e para composição granulométrica (granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura), foi utilizada a NBR NM 248 (2003).

#### 4.1.5 Aditivo superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, com aspecto líquido e cor marrom (Figura 9), especialmente formulado para concretos de alta resistência inicial, concreto de alto desempenho (CAD) e concreto autoadensável (CAA) – Sika® ViscoCrete®-6500.

**Figura 9** - Aditivo superplastificante (Autor, 2020)



Na Tabela 3.1, estão apresentados os dados do produto de acordo com informações fornecidas pela Sika Brasil, fabricante do produto.

**Tabela 4.1** – Informações do aditivo superplastificante

<b>Sika® ViscoCrete®-6500</b>	
Base química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Densidade do volume	1,08 +/- 0,02 kg/L
Valor do pH	4,5 +/- 1,0
Dosagem recomendada	0,2% à 1,50% sobre o peso de aglomerantes

Fonte: Adaptado de Sika Brasil, 2019.

## 4.2 Definição dos traços e produção dos concretos

Para o estudo dos traços deste trabalho, foram calculadas as proporções de insumos para a produção de um concreto autoadensável com resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias. A partir disso, foi definido o traço referência (0% de RV) e através dele, realizou-se a substituição em volume da areia fina com proporções de 10%, 15% e 20%, pelo RV conforme a Tabela 3.2.

**Tabela 4.2** – Proporções de substituição da areia fina pelo resíduo.

<b>Composição</b>	<b>Areia fina (%)</b>	<b>RV (%)</b>
TREF	100	0
TRV10	90	10
TRV15	85	15
TRV20	80	20

Fonte: Autor, 2020.

### 4.2.1 Estudo da pasta

Foi escolhida uma relação água/cimento de 0,55, valor esse que condiz com a NBR 12655 (2015), considerando um concreto de classe de agressividade II, moderada, com pequeno risco de deterioração da estrutura, e uma classe de resistência C25, como mostrado nas Tabelas 3.3 e 3.4.

**Tabela 4.3** – Classe de agressividade ambiental.

<b>Classe de agressividade ambiental</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno

III	Forte	Marinha Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de Maré	Elevado

Fonte: NBR 12655:2015 (ABNT, 2015)

**Tabela 4.4** – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	Concreto armado	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	Concreto protendido	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto	Concreto armado	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	Concreto protendido	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto ( $\text{kg/m}^3$ )	Concreto armado e protendido	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$

Fonte: NBR 12655:2015 (ABNT, 2015)

A proporção de aditivo foi previamente testada em traços de 7,5 L, através do *slump flow test*, com o objetivo de alcançar o espalhamento desejado, ultrapassando a marca 500 mm (Figura 10).

**Figura 10** - Marca de 500 mm na placa-base do *slump flow* (Autor, 2020)



O consumo de cimento foi calculado a partir da Equação 3.1, baseado no método de dosagem de Gomes et al. (2002). Na qual “ $V_p$ ”, diz respeito ao volume

correspondente a pasta em 1m<sup>3</sup> de concreto, “a/c” a proporção de água em relação ao cimento, “sp/c” a proporção de aditivo superplastificante em relação ao cimento, “sf/c” a proporção de pozolana em relação ao cimento, “f/c” a proporção de fíler em relação ao cimento e “ρ” a massa específica dos materiais que compõem a pasta.

$$C = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a/c}{\rho_a} + \frac{sp/c}{\rho_{sp}} + \frac{sf/c}{\rho_{sp}} + \frac{f/c}{\rho_f}} \quad (4.1)$$

#### 4.2.2 Esqueleto granular

O esqueleto granular é a composição otimizada de agregados que constituem o concreto, a qual é obtida a partir de testes com misturas de diferentes proporções de agregados graúdos e miúdos, selecionando aquela que alcançar maior massa unitária e o menor índice de vazios (GOMES; BARROS, 2009).

O procedimento para definir o esqueleto granular, consiste em colocar uma mistura de agregados miúdos e graúdos em um recipiente de volume conhecido, e assim serem pesados para que se obtenha a massa unitária ( $\omega_u$ ) da mistura através da Equação 3.2. Esse processo deve se repetir variando as proporções dos agregados e além da obtenção da massa unitária, deve-se encontrar a massa específica ( $\rho_{dm}$ ) e o teor de vazios ( $v$ ) das misturas por meios das Equações 3.3 e 3.4.

$$\omega_u = \frac{\omega_t}{V_t} \quad (4.2)$$

$$\rho_{dm} = \frac{\rho_s \cdot s/a + \rho_b \cdot b/a}{100} \quad (4.3)$$

$$v = \frac{\rho_{dm} - \omega_u}{\rho_{dm}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Os resultados são avaliados por meio de um gráfico ou tabela, de modo a identificar qual mistura possui maior massa unitária e menor teor de vazios para assim, compor o esqueleto granular. Neste trabalho foi utilizado um recipiente com 0,5 litros. O processo se repetiu para 5 tipos de proporções diferente entre as areias

fina e média e 4 tipos de proporções entre a mistura de areia escolhida (agregado miúdo) e a brita 0 (agregado graúdo), como mostrado nas Tabelas 3.5 e 3.6.

**Tabela 4.5** - Proporções em porcentagem das areias ensaiadas para definição do esqueleto granular.

<b>Agregado miúdo</b>	
Areia Fina	Areia Média
30%	70%
40%	60%
50%	50%
60%	40%
70%	30%

Fonte: Autor, 2020.

**Tabela 4.6** - Proporções em porcentagem do agregado miúdo e agregado graúdo ensaiadas para definição do esqueleto granular.

<b>Agregado miúdo e graúdo</b>	
Mistura Areia Fina e Média	Brita 0
65%	35%
55%	45%
50%	50%
45%	55%

### 4.2.3 Procedimento de mistura

Após a definição das proporções dos materiais, o procedimento de mistura se inicia molhando a betoneira antes de inserir os materiais e deixando a água escorrer, após isso a ordem de colocação dos materiais segue as etapas demonstradas na Tabela 3.7. O processo foi utilizado com o objetivo de se obter concretos homogêneos, com bom envolvimento entre a pasta e os agregados.

Para produção do concreto foi utilizada a betoneira pertencente ao laboratório de Resíduos Sólidos da UFCG campus Pombal, da marca Motomil, com capacidade adequada ao volume considerado. Foram produzidos 25 litros de concreto para cada traço executado.

**Tabela 4.7** – Procedimento para mistura dos materiais.

Ordem de adição dos materiais na betoneira	Materiais	Tempo (min)
1 <sup>o</sup>	Brita + areia média + 50% da água	1
2 <sup>o</sup>	Cimento + areia fina + RV + 50% da água	1,5
3 <sup>o</sup>	Aditivo superplastificante	1,5

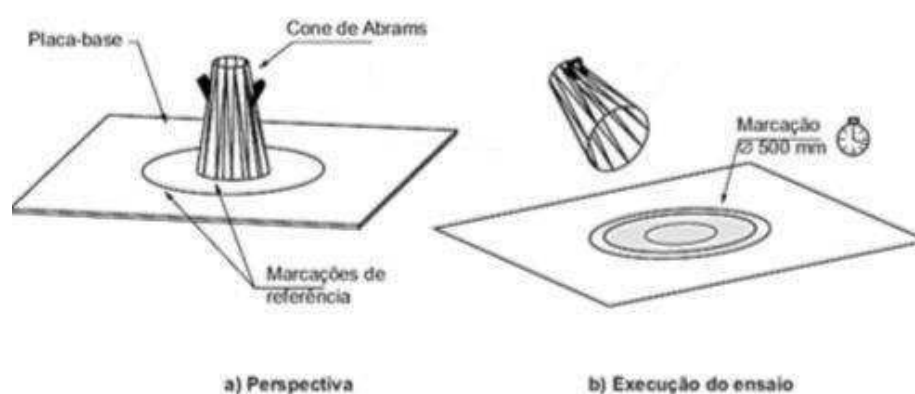
Fonte: Autor, 2020.

Após a produção do CAA conforme o procedimento de mistura, parte do material foi caracterizado em seu estado fresco de acordo com as partes da NBR 15823 (2017) e a outra parte foi moldada em corpos de prova cilíndricos metálicos, devidamente revestidos por uma fina camada de desmoldante. Foram moldados, para cada traço, 12 corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sem adensamento, totalizando 48 corpos de prova.

### 4.3 Verificação das propriedades do concreto fresco

O primeiro ensaio a ser realizado para caracterizar o CAA quanto a sua reologia, foi o ensaio *slump flow test*, executado de acordo com a NBR 15823-2 (2017), que consiste em medir o diâmetro final do material a partir da média de duas medidas perpendiculares entre si, para determinar sua fluidez e habilidade de preenchimento em fluxo livre. O ensaio inicia com o posicionamento do tronco de cone (cone de Abrams), representado na Figura 11, sobre uma placa-base de metal plana e estável.

**Figura 11** – *Slump flow test* (NBR 15823-2, 2017).



É necessário que ambos estejam previamente umedecidos, para receber o concreto. Após o preenchimento, é necessário fazer uso de uma colher de pedreiro para o arrasamento da amostra, fazendo com que haja um nivelamento do topo do equipamento. Na sequência, o cone deve ser levantado no sentido vertical e o espalhamento da amostra é medido, a Figura 12 exemplifica essa medição.

**Figura 12** - Medição do diâmetro de espalhamento (Autor, 2020)



A NBR 15823-1 (2017), classifica o espalhamento do CAA baseado na Tabela 3.8. O anexo A dessa norma, apresenta aplicações para cada classe do concreto, mostrando que quanto maior o espalhamento, mais adequado para estruturas com altas densidades de armadura, sendo o SF2 o mais utilizado, aplicado em paredes, vigas, pilares, entre outras estruturas.

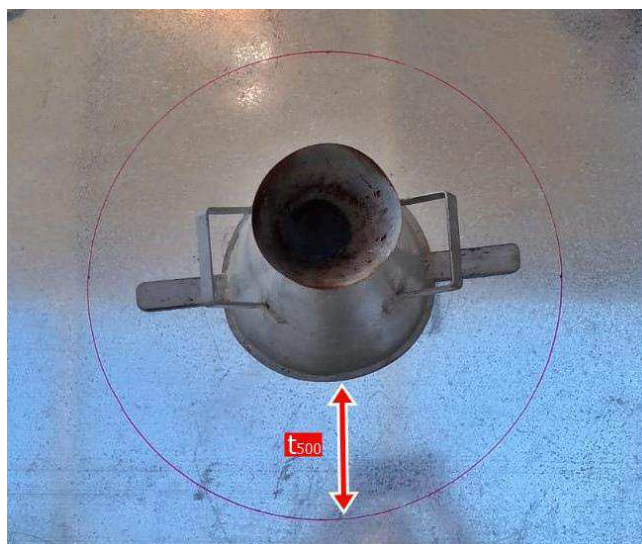
**Tabela 4.8** – Classes de espalhamento (*slump-flow*)

Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF1	550 A 650	ABNT NBR 15823-2
SF2	660 a 750	
SF3	760 a 850	

Fonte: NBR 15823-1, 2017.

Para a determinação do tempo de escoamento ( $t_{500}$ ), é também utilizado o cone de Abrams e a placa metálica, de forma simultânea ao ensaio *slump flow test*. De acordo com a NBR 15823-2 (2017), o ensaio busca encontrar o intervalo de tempo, em segundos, entre o momento que se inicia o escoamento, o qual ocorre a partir da base do cone (200 mm), até o seu final atingindo a marca de 500 mm (Figura 13).



**Figura 13** - Distância para medir o  $t_{500}$  (Autor, 2020)

A partir do  $t_{500}$ , pode-se determinar a viscosidade plástica, de acordo com Tabela 3.9 expressa no Anexo A da NBR 15823-1 (2017). Segundo a norma, a classe VS 1 representa concretos de rápido espalhamento de curta duração, são mais indicados para estruturas com alta densidade de armadura. Já a VS 2 são os concretos que se movem lentamente e se movimentam durante maior período de tempo sendo adequados para a maioria das aplicações.

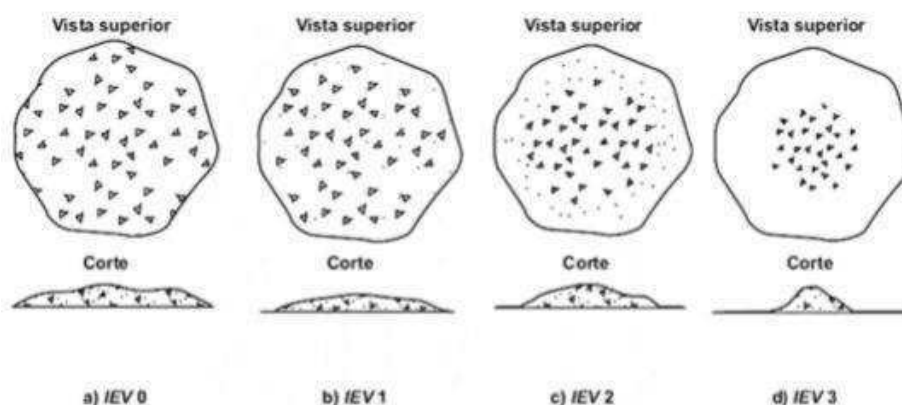
**Tabela 4.9** – Classe de viscosidade plástica aparente.

Classe	$t_{500}$	Método de ensaio
VS 1	$\leq 2$	ABNT NBR 15823-2
VS 2	$\geq 2$	

Fonte: NBR 15823-1, 2017

Através desses ensaios, é possível analisar visualmente se o concreto apresenta segregação, pois isso ocorre quando o agregado graúdo não acompanha a argamassa e se concentra no centro da circunferência, como pode ser visto na Figura 14 tópico “d”. Para essa análise, é determinado, segundo a NBR 15823-2 (2017), o índice de estabilidade visual (IEV). A Tabela 3.10, apresenta esses índices de acordo com os critérios de avaliação.

**Figura 14** – Classes do índice de estabilidade visual (IEV) (NBR 15823-2, 2017).



**Tabela 4.10** – Classes de índice de estabilidade visual (IEV).

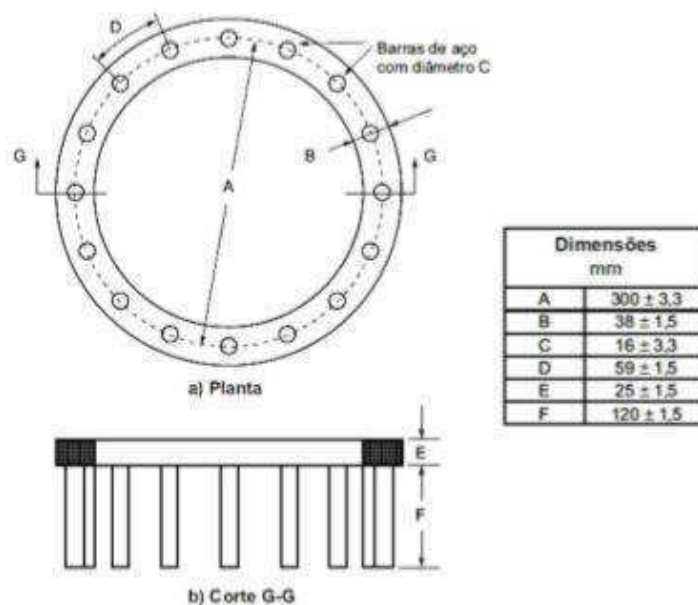
Classe	IEV
IEV 0 (Altamente instável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2 (Instável)	Presença de pequena auréola de argamassa ( $\leq 10$ mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação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

Fonte: NBR 15823-2, 2017.

Com objetivo de avaliar a habilidade passante e a fluidez do CAA sem perda de uniformidade quando submetido a descontinuidades sob fluxo livre, é necessário realizar o ensaio de habilidade passante através do método do anel J, descrito pela NBR 15823-3 (2017).

O procedimento do ensaio é uma adaptação do Método do cone de Abrams, onde um anel metálico (Figura 15), constituído verticalmente por barras de aço, é posicionado sobre a placa-base e ao redor do molde (Ferreira, 2019).

**Figura 15** – Anel J (NBR 15823-3, 2017).



O cone deve ser posicionado com sua base menor para baixo como representado na Figura 16. O resultado deste ensaio é obtido através da diferença entre o diâmetro médio de espalhamento encontrado no ensaio *slump flow test* e o diâmetro médio de espalhamento obtido neste ensaio, e será classificado de acordo com a classe de habilidade passante (Tabela 3.11).

**Figura 16** - Ensaio anel J (Autor, 2020).



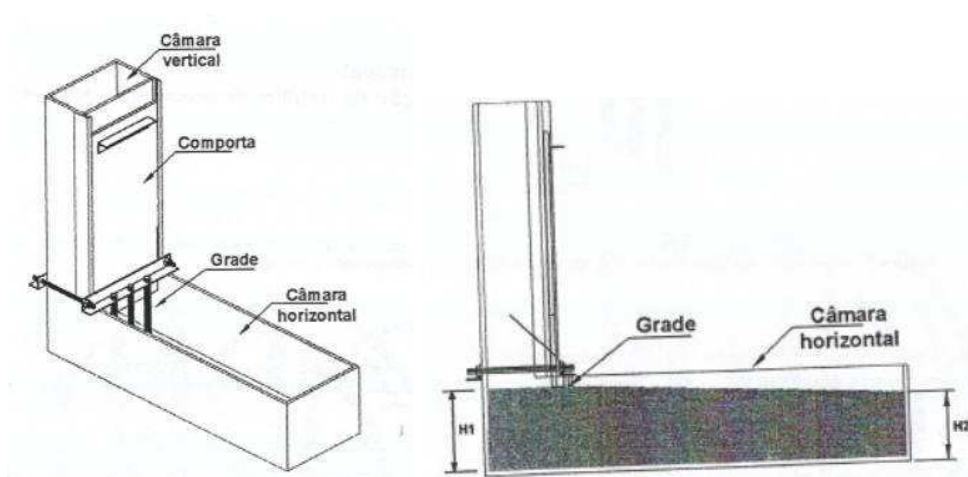
**Tabela 4.11** – Classes de habilidade passante pelo anel J (fluxo livre).

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

Fonte: NBR 15823-1, 2017.

Segundo o Anexo A da NBR 15823-1 (2017), o PJ 1 e o PL 2 (Tabela 3.12) são adequados para elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 a 100 mm, já o PJ 2 e o PL 1 (Tabela 3.12) enquadram-se em elementos com espaçamento de armadura de 60 a 80 mm.

Além do método do anel J para determinar a habilidade passante do CAA, a NBR 15823 (2017), em sua parte 4, apresenta o método da caixa L, que estuda a habilidade passante sob fluxo confinado, o que difere do método anterior. Como o nome já diz, é utilizado um equipamento de seção retangular com perfil em forma de L (Figura 17), que por sua vez é provida de uma grade com barras metálicas equidistantes entre si e entre as laterais da caixa L.

**Figura 17** – Caixa L – Perspectiva (NBR 15823-4, 2017)

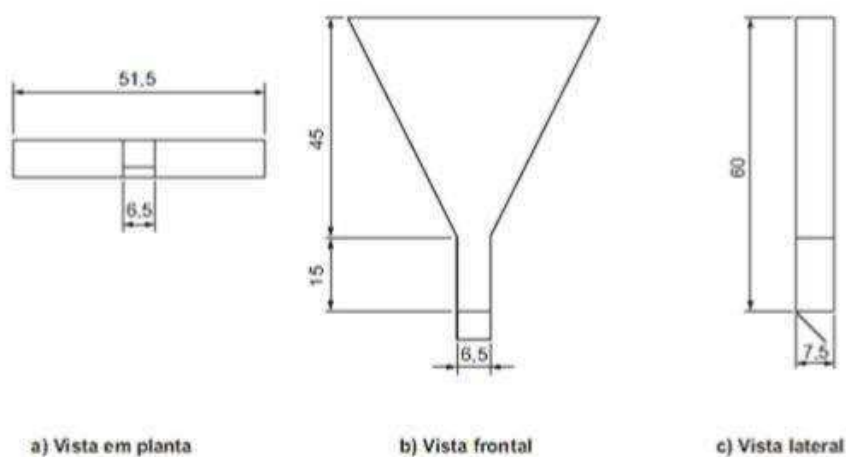
O primeiro passo do ensaio é preencher a parte vertical da caixa com concreto uniformemente e sem adensamento, mantendo a comporta fechada. Após  $(60 \pm 10)$  segundos, a comporta deve ser aberta rapidamente permitindo o escoamento do concreto para a parte horizontal da caixa L. A habilidade passante (HP) é quantificada pela razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da câmara horizontal ( $H_2/H_1$ ) e é classificada através da Tabela 3.12.

**Tabela 4.12** – Classes de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado).

Classe	Caixa L ( $H_2/H_1$ )
PL 1	$\geq 0,80$ , com duas barras de aço
PL 2	$\geq 0,80$ , com três barras de aço

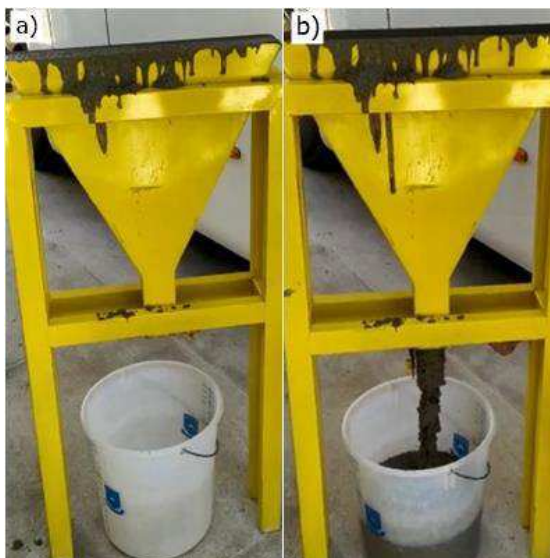
Fonte: NBR 15823-1, 2017.

A NBR 15823-5 (2017), através do método do funil V, regulamenta a determinação da viscosidade do CAA. A unidade de medida para realizar o ensaio é o tempo de escoamento do concreto e o equipamento utilizado é conhecido como funil V, apresentado na Figura 18.

**Figura 18** – Funil V (Dimensões em centímetro) (NBR 15823-5, 2017).

Para iniciar o ensaio é necessário que a comporta existente na parte inferior do funil esteja fechada, feito isso, o funil V é preenchido completamente por concreto. Após  $(10 \pm 2)$  segundos do preenchimento do funil, a comporta é aberta e a partir desse momento o cronômetro é acionado para medir o tempo (V) necessário que o concreto levará para escoar pelo funil (ABNT, 2017e). O ensaio só é válido se não houver obstruções, portanto o fluxo do concreto deve ser contínuo. A Figura 19, mostra as etapas deste teste.

**Figura 19** - a) Funil com a comporta fechada b) Funil com a comporta aberta (Autor, 2020)



A classe de viscosidade plástica aparente do concreto em função do tempo necessário para o escoamento total pelo funil V, está expressa na Tabela 3.13. A aplicação para concretos com classe VF 1 é a mesma para concretos VS 1 e para classe VF 2 se enquadra nas aplicações referentes à classe VS 2.

**Tabela 4.13** – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (fluxo confinado)

Classe	Funil V (s)
VF 1	< 9
VF 2	9 a 25

Fonte: NBR 15823-1, 2017.

#### 4.4 Ensaios no concreto endurecido

Para os ensaios de caracterização física do concreto (massa específica, absorção de água, índice de vazios), foram produzidos 4 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada composição de traço desenvolvido, totalizando 16 amostras.

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados para as idades de 7 e 28 dias, sendo ensaiados 4 corpos de prova (10 x 20 cm), para cada idade, totalizando 32 amostras.

#### 4.4.1 Massa específica, absorção de água, índice de vazios

Estes ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos, após um período de cura por imersão em água a temperatura de  $(23\pm 2)$  °C de 28 dias. Os procedimentos destes ensaios seguiram as instruções da NBR 9778 (2009).

Logo após o processo de cura, as massas das amostras submersas foram aferidas em uma balança hidrostática ( $m_i$ ), em seguida foram retiradas da água, secas com um pano para remover a umidade superficial e assim obter as massas saturadas com superfície seca ( $m_{sat}$ ). Posteriormente, as amostras de concreto foram colocadas na estufa a 105 °C, até que duas pesagens sucessivas, durante um intervalo de 24 horas, mostrasse uma redução de massa inferior a 0,5%. Após a retirada da estufa, os corpos de prova foram resfriados a temperatura ambiente, aproximadamente 23° C, para determinação da massa seca em estufa ( $m_s$ ). O resultado das massas de cada composição é a média das massas das 4 amostras de concreto.

A partir das massas encontradas, é possível calcular o índice de vazios ( $I_v$ ), a porosidade total ( $P_{TOTAL}$ ), a absorção por imersão ( $Ab_{IMERSÃO}$ ), a massa específica da amostra saturada ( $ME_{SAT}$ ), a massa específica da amostra seca ( $ME_{SECA}$ ) e a massa específica real ( $ME_{REAL}$ ), através das seguintes equações:

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (4.5)$$

$$Ab_{IMERSÃO} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (4.6)$$

$$ME_{SAT} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (4.7)$$

$$ME_{SECA} = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (4.8)$$

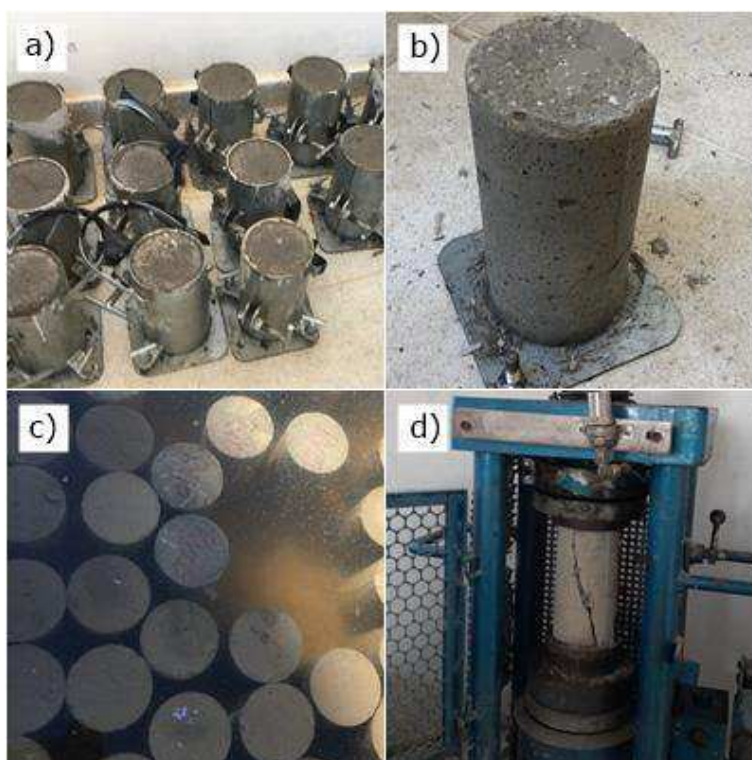
$$ME_{REAL} = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (4.9)$$

#### 4.4.2 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (2018) para as idades de 7 e 28 dias. Inicialmente o concreto de cada traço foi moldado, após 24h foram desmoldados e imersos em água a temperatura de  $23 \pm 2$  °C até as idades escolhidas. Posterior ao processo de cura, os corpos de prova cilíndricos foram rompidos para determinação da resistência à compressão axial. A Figura 20 demonstra as etapas realizadas para a execução deste ensaio.

Foi utilizada uma prensa hidráulica com aplicação de até 100 toneladas de carregamento e precisão de 10kgf, pertencente ao Laboratório GC construções e serviços especiais, localizado no anexo b do km 105, BR 361 na cidade de Patos/PB.

**Figura 20** – a) Moldagem b) Desmolde c) Cura por imersão d) Rompimento dos corpos de prova (Autor, 2020)





## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização física dos materiais

Após a coleta dos materiais com quantidade suficiente para realização do estudo completo, iniciou-se a caracterização dos materiais conforme indicado na metodologia deste trabalho. Esta etapa, foi realizada no Laboratório de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), *campus* Pombal.

#### 5.1.1 Massa específica e massa unitária

A massa específica do CPII F 32 determinada de acordo com a NBR 16605 (2017), apresentou o valor de 3,015 g/cm<sup>3</sup>.

A Tabela 4.1, mostra o resultado da massa específica, massa específica aparente do agregado seco e massa específica do agregado saturado superfície seca, referente ao resíduo de vermiculita e aos dois tipos de areia que serão utilizados no CAA (fina e média). Os ensaios de massa específica e massa unitária foram realizados de acordo com as normas NBR NM 52 (2009) e NBR NM 45 (2002), respectivamente.

**Tabela 5.1** – Parâmetros físicos para agregados miúdos

Agregado	NBR NM 52 (2009)		NBR NM 45 (2002)	
	Massa específica do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
RV	2,33	2,33	2,33	1,06
Areia fina	2,34	2,36	2,39	1,36
Areia média	2,48	2,48	2,48	1,36

Fonte: Autor, 2020

Observa-se na Tabela 4.1 que os resultados de massa específica das areias, apresentaram valores próximos aos que se encontra no trabalho de Dias et al. (2018). O resultado da massa específica do resíduo de vermiculita foi exatamente igual ao valor encontrado por Rojas-Ramírez (2019).

A massa específica do agregado graúdo, bem como a absorção de água apresentadas na Tabela 4.2, foram calculadas com base na NBR NM 53 (2009).

**Tabela 5.2** – Parâmetros físicos para o agregado graúdo

Agregado	NBR NM 53 (2009)			NBR NM 45 (2002)	
	Massa específica do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
Brita 0	2,61	2,63	2,68	0,98%	1,39

Fonte: Autor, 2020

A absorção da brita 0 está entre os valores encontrados nas britas utilizadas por Gomes (2002) de 0,7% e 1,1%.

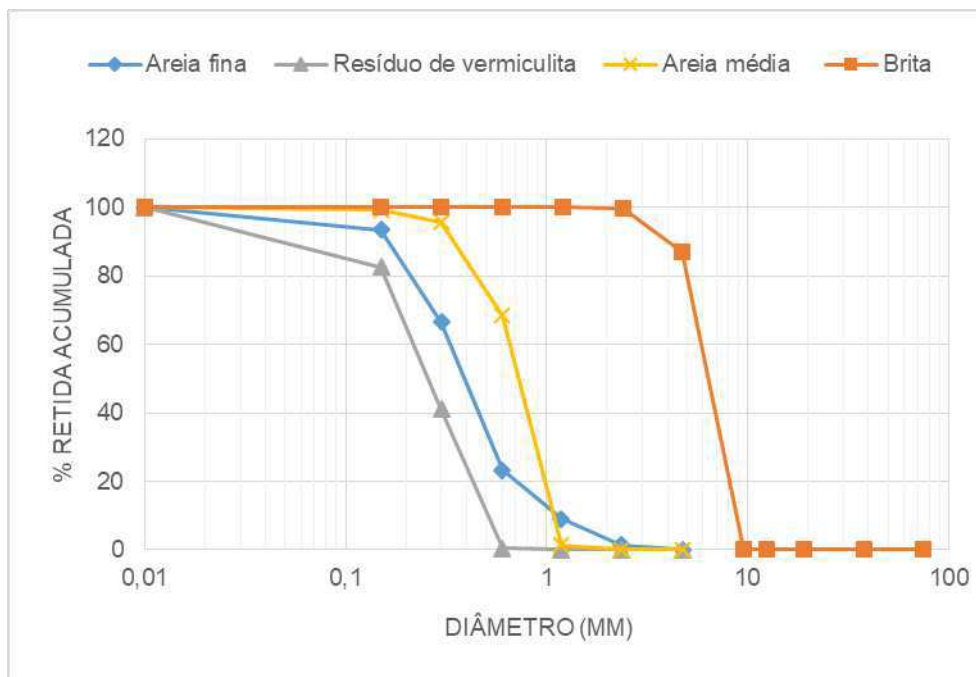
### 5.1.2 Granulometria

Realizou-se a análise da composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (2003) para todos os agregados que constituem o CAA, como também para o resíduo de vermiculita. Obteve-se o módulo de finura, a dimensão máxima característica (Tabela 4.3) e a distribuição granulométrica como representada na Figura 21.

**Tabela 5.3** – Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados.

Propriedade	NBR NM 248 (2003)			
	Areia Fina	Areia Média	RV	Brita
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	1,18	1,18	9,5
Módulo de finura	1,92	2,65	1,24	5,86

Fonte: Autor, 2020

**Figura 21** – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos (Autor, 2020)

Através dessa análise, pôde-se verificar, de acordo com a NBR 7211 (2009) a classificação das areias a serem utilizadas. Segundo a norma, temos que os módulos de finura de 1,92 e 2,65 representam areias finas e médias, respectivamente. O RV, com módulo de finura de 1,24, caracteriza-se por possuir elevada finura. Segundo Tutikian e Dal Molim (2008), a finura do material contribui no aumento da coesão do CAA, logo a presença de materiais mais finos, como o RV, gera melhores desempenhos no concreto.

Foi também verificado o diâmetro máximo característico do agregado graúdo, que é de 9,5 mm, o qual está dentro do permitido para CAA e foi utilizado nos trabalhos de Medeiros (2016), Schlindwein (2018) e Ferreira (2019). Diâmetros como esse possibilitam ao concreto autoadensável alta habilidade passante sem problemas de segregação.

## 5.2 Composição dos traços de CAA

O estudo da composição dos materiais para o concreto autoadensável deste trabalho foi realizado analisando a pasta de forma separada dos agregados, como no método de Gomes et al. (2002). Inicialmente, buscou-se encontrar o traço referência, sem a utilização do resíduo em sua composição e em seguida, realizar a

substituição em volume da areia pelo resíduo de vermiculita, mantendo os outros componentes constantes.

Para o estudo da pasta, seguindo a metodologia proposta e descrita anteriormente, obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 4.4.

**Tabela 5.4** – Proporções da pasta

a/c	0,55
Ad. superplastificante	0,60% (Com folga de 0,3%)
Consumo do cimento (kg/m <sup>3</sup> )	450

Fonte: Autor, 2020

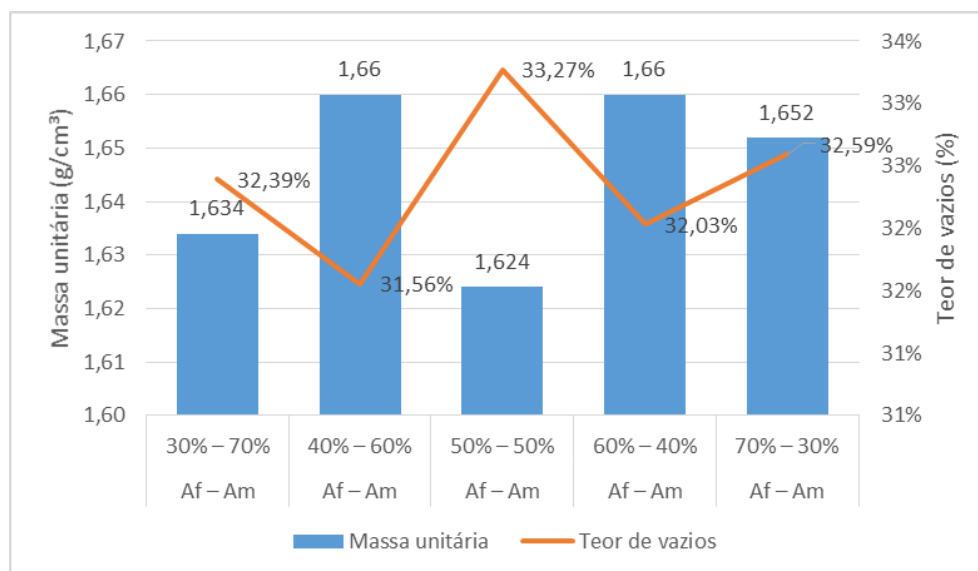
A proporção de aditivo superplastificante variou para cada traço de acordo com o comportamento de estabilidade, observado visualmente, resultando em valores entre 0,6% e 0,9% em relação à massa de cimento.

Como não foi utilizado pozolanas ou fíleres na composição da pasta, sua parte fina corresponde apenas ao cimento, por isso temos um consumo de cimento relativamente alto. Gomes e Barros (2009), consideram que esse valor está dentro dos parâmetros limites (200 a 450 kg/m<sup>3</sup>) de consumo de cimento para se evitar a retração. O trabalho de Medeiros (2016) apresenta, no seu traço referência de CAA, um valor semelhante ao consumo de cimento utilizado nesta pesquisa.

Para a composição do esqueleto granular, sabendo que foi utilizado dois tipos de areia, o processo descrito na metodologia foi dividido em dois. Primeiro foi descoberto a proporção em volume entre as areias fina e média, em seguida utilizou-se essa mistura de areia para obter as proporções entre os agregados miúdos e o agregado graúdo (brita 0), que juntos constituirão o corpo de agregados do concreto autoadensável.

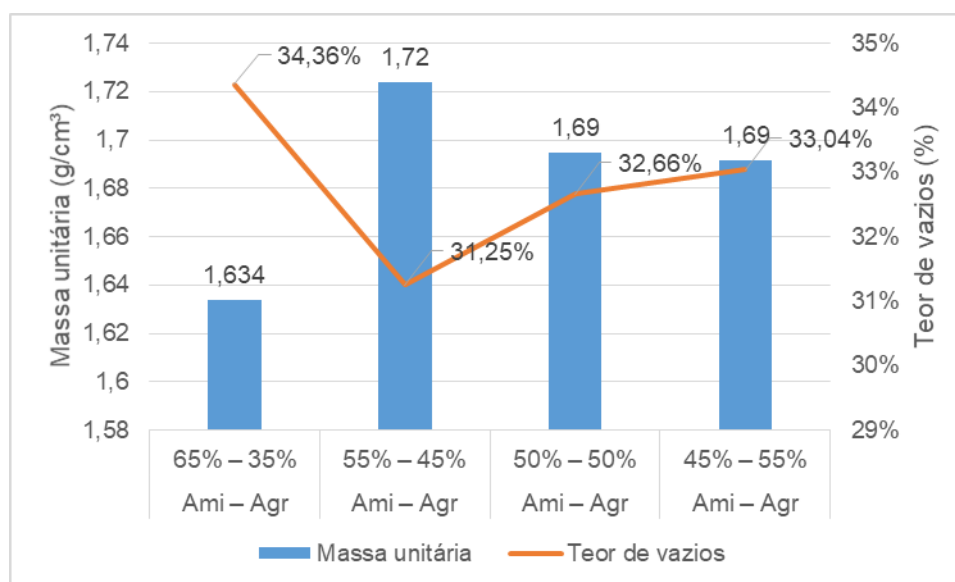
Dessa forma, foram definidas as proporções em volume de areia fina e média, selecionando a mistura que obteve menor teor de vazios. Foi escolhida a proporção de 40% de areia fina (Af) e 60% de areia média (Am), como apresentado na Figura 22.

**Figura 22** – Proporções de Af e Am para a mistura de agregado miúdo (Autor, 2020)



Em seguida, foi encontrada a proporção com menor teor de vazios e maior massa unitária da mistura entre o agregado miúdo (Ami), constituído por dois tipos de areia, e o agregado graúdo (Agr), que será a brita 0 (Figura 23).

**Figura 23** – Proporções de Ami e Agr para a composição do esqueleto granular (Autor, 2020)



A composição que deve ser escolhida é obtida considerando a densidade da mistura de agregados com o menor teor de vazios (GOMES; BARROS, 2009). A partir disso e dos resultados encontrados, a proporção escolhida foi a de 55% de agregado miúdo e 45% de agregado graúdo, tendo em vista que a mesma possui o menor teor de vazios e uma maior massa unitária. O trabalho de Ferreira (2019), apresenta proporções semelhantes a essas.

De acordo com Gomes e Barros (2009), o volume de pasta deve preencher todos os vazios entre os agregados, sendo assim, esse volume deve ser maior ou igual ao teor de vazios entre os agregados. No caso deste trabalho, o volume de pasta deve ser maior que 31,25%, assim, optou-se por utilizar um volume de pasta de 40%.

A partir da definição da pasta e do esqueleto granular, obteve-se o traço referência do estudo (TREF), sendo possível realizar a substituição em volume da areia fina pelas proporções de 10%, 15% e 20% do RV, mantendo os demais componentes constantes, com exceção do superplastificante que foi ajustado de acordo com a fluidez que o material apresentava no ensaio de espalhamento.

A Tabela 4.5 apresenta o consumo dos materiais de todos os traços analisados (TREF, TRV10, TRV15 e TRV20).

**Tabela 5.5 – Consumo de materiais para todos os traços**

<b>Consumo de materiais (kg/m<sup>3</sup>)</b>				
	TREF	TRV10	TRV15	TRV20
Cimento	450	450	450	450
Água	248	248	248	248
Superplastificante	3,6	2,7	4,05	3,38
Resíduo de vermiculita	-	30,7	46,1	61,4
Areia fina	315,7	284,1	268,3	252,5
Areia média	490,3	490,3	490,3	490,3
Brita	704,3	704,3	704,3	704,3

Fonte: Autor, 2020.

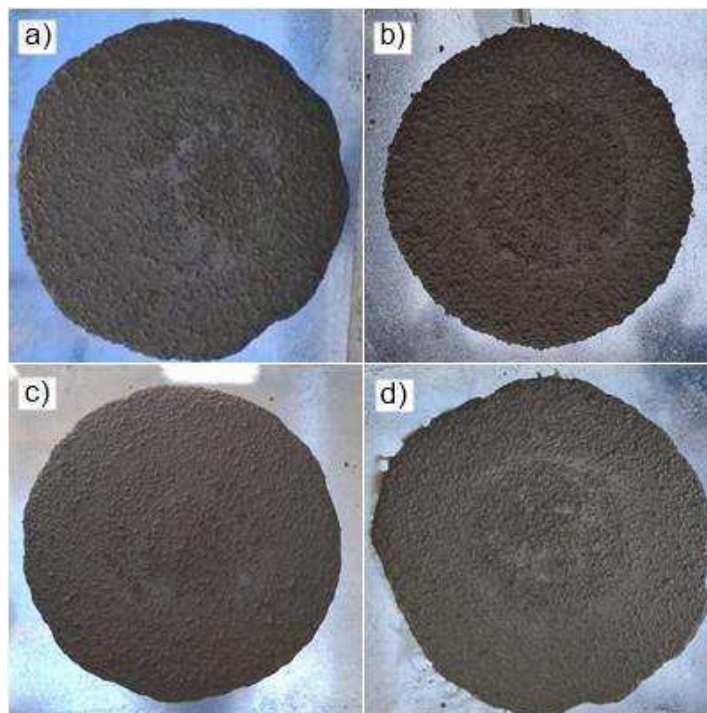
### 5.3 Propriedades no estado fresco

Após o procedimento de mistura, foram realizados os ensaios para caracterização do concreto autoadensável no estado fresco seguindo as recomendações da NBR 15823 (2017).

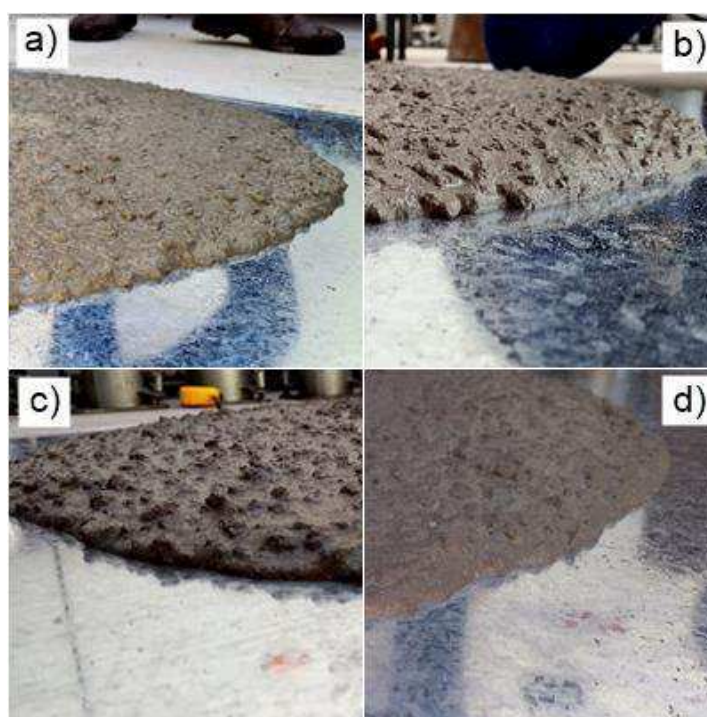
Os concretos apresentaram boa coesão, sem indícios de exsudação e segregação, como mostram as Figuras 24 e 25. Isso ocorre devido a boa interação entre a pasta e os agregados, a qual advém de uma proporção adequada entre os materiais e do emprego de agregados mais finos, proporcionando uma melhor

distribuição granulométrica, melhor empacotamento e conseqüentemente melhor coesão entre as partículas.

**Figura 24** – Espalhamentos obtidos para os diferentes traços: a) TREF b) TRV10 c) TRV15 e d) TRV20 (Autor, 2020)



**Figura 25** – Detalhe das bordas para análise visual de exsudação dos traços: a) TREF b) TRV10 c) TRV15 e d) TRV20 (Autor, 2020)



A Tabela 4.6, apresenta os resultados dos ensaios de Espalhamento (*Slump Flow Test*),  $t_{500}$ , anel J, caixa L e funil V que avaliam a fluidez, escoamento, viscosidade plástica e habilidade passante, respectivamente (Figura 26). Já o parâmetro de segregação, foi avaliado visualmente (Figura 24 e 25), através da classificação do IEV (Índice de estabilidade visual) no ensaio do *Slump Flow Test*, como recomendado na parte 2 da NBR 15823 (2017). Sendo todos os traços classificados como estáveis, pertencentes a classe IEV 1.

**Tabela 5.6** – Resultados dos ensaios para todos os traços

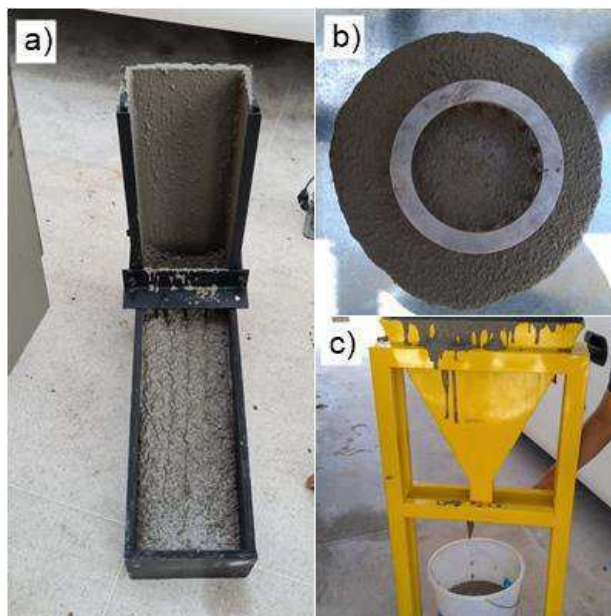
	Parâmetros	Limites da NBR 15823 (2017)	TREF	TRV10	TRV15	TRV20
<b>Slump Flow test</b>	Medida 1 (mm)	-	660	580	630	630
	Medida 2 (mm)	-	660	590	628	667
	Média (mm)	550 a 880	660	585	629	648,5
<b>T<sub>500</sub></b>		-	0,96	1,13	0,6	0,77
<b>IEV</b>		-	Estável	Estável	Estável	Estável
<b>Anel J</b>	Medida 1 (mm)	-	610	530	604	590
	Medida 2 (mm)	-	610	530	608	595
	Média (mm)	-	610	530	606	592,5
	<i>Slump flow</i> - anel J (mm)	0 a 50	50	55	23	56
<b>Caixa L</b>	H1	-	8,8	8	8,7	8,7
	H2	-	10,5	12	10	10
	H2/H1	≥ 0,8	0,84	0,67	0,87	0,87
<b>Funil V</b>		0 a 25 s	4,83	4,97	3,84	4,16

Fonte: Autor, 2020

É possível observar que o traço sem o resíduo obteve maior espalhamento no *slump flow test* quando comparado aos traços com o resíduo, implicando em uma redução de fluidez de 11,36% para o TRV10, 4,7% para o TRV15 e 1,74% para o TRV20. Rojas-Ramírez (2019) explica a redução de fluidez e trabalhabilidade no estudo de argamassas com o RV a partir dos resultados de área superficial específica (ASE). Segundo ele, a elevada ASE do RV in natura ocasiona um aumento da demanda de água o que afeta diretamente as propriedades no estado fresco do material.



**Figura 26** – Execução dos ensaios: a) Caixa L b) Anel J c) Funil V (Autor, 2020)



A grande diminuição de fluidez do TRV10 em relação aos demais traços com resíduo pode ter ocorrido devido a quantidade de aditivo superplastificante que foi de 0,6% de aditivo em relação a massa de cimento, sendo o menor entre os demais traços, que foram de 0,9% (TRV15) e 0,75% (TRV20). De acordo com Calado (2011), os finos e o teor ideal de superplastificante permitem um melhor escoamento do CAA.

É importante destacar que dentre os traços com RV, aquele que melhor escoou foi o TRV20 cuja proporção de aditivo foi menor que a do TRV15, podendo concluir que, possivelmente, o aumento da fluidez nesse caso, é devido ao aumento da proporção do RV, já que não houve aumento do aditivo superplastificante. Como também, o traço com menor quantidade de resíduo (TRV10), obteve menor escoamento.

Para os ensaios  $t_{500}$  e funil V, todos os traços apresentaram baixa viscosidade com tempo de escoamento menor que 2 segundos e 9 segundos, respectivamente. Apesar dessa classificação apresentar riscos de segregação e exsudação segundo prevê a NBR 15823-1 (2017), pôde-se observar de acordo com o IEV que todos os traços apresentaram uma boa estabilidade. A utilização do resíduo de vermiculita nesse caso, pode ter influenciado de forma positiva para o parâmetro de estabilidade dos CAA, tendo em vista que, como já comentado nesta pesquisa, os materiais finos melhoram o adensamento do concreto, tornando-o mais resistente à segregação.

Com relação aos ensaios de habilidade passante livre (anel J) e habilidade passante confinada (caixa L), percebeu-se que em ambos, o fluxo se apresentou constante sem sofrer segregação ou bloqueio, segundo Calado (2015) isso ocorre devido ao empacotamento adequado dos agregados. O fluxo ininterrupto do concreto implica, de acordo com esse mesmo autor, que o material ensaiado tem capacidade de suportar as operações de transporte e lançamento nas fôrmas sem perder características de autoadensabilidade.

Outro fator, além da quantidade de aditivo superplastificante e quantidade inferior do material mais fino (RV), que pode ter influenciado o resultado do TRV10, o qual obteve menor desempenho comparado aos demais traços na análise do estado fresco, é a temperatura ambiente no momento da produção dos concretos. A temperatura pode ter interferido nas propriedades reológicas, tendo em vista que essa produção ocorreu em ambiente aberto de temperatura não controlada e temperaturas altas diminuem a trabalhabilidade dos concretos. O mesmo motivo pode ser aplicado ao TRV20 no ensaio do anel J.

A partir desses resultados, observa-se que os valores estão dentro do permitido, obtendo assim classificação individual por ensaio de acordo com a norma, com exceção do ensaio do anel J para o TRV10 e TRV20 e ensaio da Caixa L para o TRV10.

Pôde-se então classificar, de acordo com a NBR 15823 (2017) quanto a utilização, apenas o TREF e TRV15, tendo em vista que os demais não atingiram todos os parâmetros permitidos pela norma. A Tabela 4.7, apresenta a classificação dos traços de acordo com os resultados obtidos, como também a aplicação dos mesmos.

**Tabela 5.7** – Classificação e aplicação segundo a NBR 15823(2017)

<b>Classificação - NBR 15823 (2017)</b>				
	Fluidez e escoamento	Viscosidade plástica aparente	Habilidade passante	Aplicação
TREF	SF2	VS1/VF1	PJ2/PL2	Adequado para a maioria das aplicações (Ex. Paredes, vigas, pilares e outros)

TRV10	SF1	VS1/VF1	*/PL2	-
TRV15	SF1	VS1/VF1	PJ1/PL2	Estruturas com baixa taxa de armadura, cuja concretagem é realizada do ponto mais alto, com deslocamento livre (Ex. fundações profundas)
TRV20	SF1	VS1/VF1	PJ2/*	-

\* Não possui classificação

Fonte: Autor, 2020

## 5.4 Propriedades no estado endurecido

### 5.4.1 Massa específica, absorção de água, índice de vazios

Os concretos foram ensaiados após um período de cura, por imersão em água, de 28 dias. Após os procedimentos realizados conforme o tópico 3.4 deste trabalho, obteve-se os resultados da Tabela 4.8.

**Tabela 5.8** – Resultados de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica

Composição	Absorção de água por imersão	Índice de vazios	Massa específica seca	Massa específica saturada	Massa específica real
TREF	9,30%	18,81%	2,02	2,21	2,49
TRV10	9,10%	18,88%	2,08	2,26	2,56
TRV15	8,83%	18,67%	2,12	2,30	2,60
TRV20	8,72%	17,87%	2,05	2,23	2,50

Fonte: Autor, 2020

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a quantidade de poros existente no concreto está diretamente ligada à relação a/c do material, quanto maior essa relação, maior será a quantidade de vazios. São encontrados resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios próximos aos da Tabela 4.8 na pesquisa de Fotté et al. (2017) que estuda as propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD, cuja classe de resistência é a mesma deste trabalho (C25).

É possível perceber que o aumento da proporção de resíduo de vermiculita nos traços, ocasiona uma diminuição da absorção e índice de vazios do CAA,

parâmetros esses que avaliam a sua durabilidade. Há uma diminuição de absorção no TRV20 em relação ao TREF de 6,24% e uma diminuição de índice de vazios de 5%. A existência de finos, segundo explica Coutinho (2011), proporciona de fato menor porosidade ao concreto.

Através dos resultados de massa específica dos concretos ensaiados, todos foram classificados, de acordo com a NBR 8953 (2015), como concreto normal cujas massas específicas secas estão compreendidas entre 2000 a 2800 kg/m<sup>3</sup>.

Conclui-se então que o RV propicia uma diminuição da absorção de água e índice de vazios, o que significa uma diminuição dos poros no concreto.

#### 5.4.2 Resistência à compressão axial

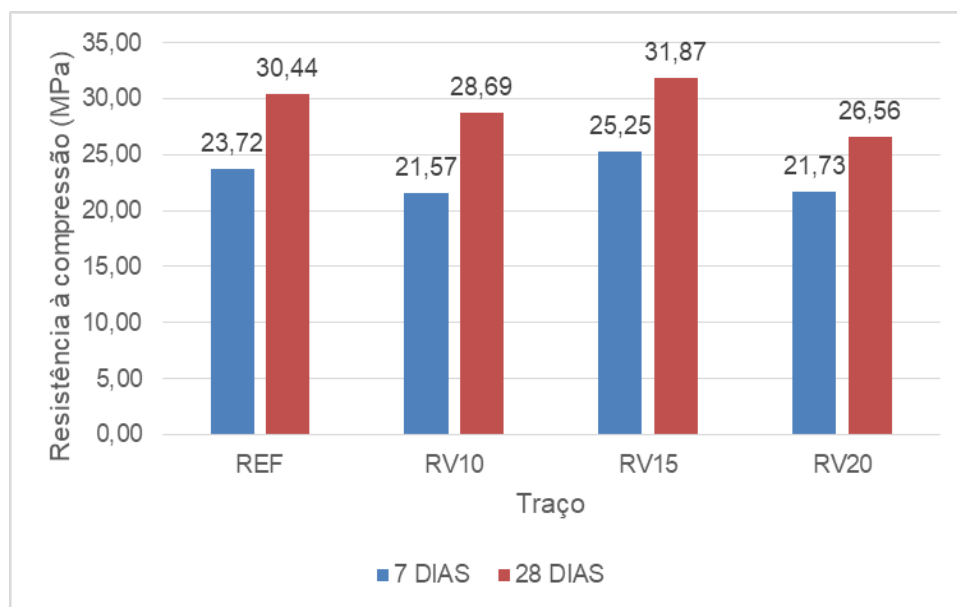
Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em trinta e dois corpos de prova (10x20 cm), sendo quatro para a idade de 7 dias e quatro para 28 dias (Figura 27), para cada traço (TREF, TRV10, TRV15 e TRV20).

A Figura 27 apresenta 4 corpos de prova com idade de 7 dias para o traço TRV15 após a realização do ensaio de resistência à compressão.

**Figura 27** – Corpos de prova do TRV15 após o ensaio de resistência à compressão



A Figura 28 apresenta as médias dos valores de resistência à compressão em forma de gráfico de barras para facilitar a interpretação dos resultados para as duas idades.

**Figura 28** – Média da resistência à compressão para as idades de 7 e 28 dias (Autor, 2020)

Diferentemente do trabalho de Dias et al. (2018), que utilizou o RV na produção de argamassas e obteve um ganho gradativo de resistência, observou-se que, de maneira geral, os concretos com RV apresentaram resultados inferiores de resistência à compressão, comparados ao concreto de referência sem o resíduo, com exceção do TRV15 que obteve valores maiores que o TREF.

A associação do aditivo juntamente com a proporção adequada de RV, também pode ter influenciado nesse resultado. Os materiais mais finos e o teor adequado de superplastificante proporcionam um melhor empacotamento e tornam a microestrutura da pasta e da zona de transição pasta-agregados dos CAA mais resistentes (COUTINHO, 2011).

Vale destacar que o traço de melhor desempenho no estado fresco foi também o que possui 15% de resíduo de vermiculita, que de acordo com os ensaios realizados, apresentou um bom escoamento, ótima habilidade passante, ótima resistência a segregação e viscosidade moderada.

Diversos fatores podem ter contribuído para a diferença de resistências à compressão obtidas nesta pesquisa. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a porosidade da matriz e a porosidade da zona de transição são parâmetros que influenciam a resistência do concreto.

Foi possível observar também que aos 28 dias de idade, todos os traços obtiveram resultados que ultrapassaram o objetivo de 25 Mpa. O mesmo ocorreu no trabalho de Ferreira (2019), no qual também foi utilizado uma relação água/cimento de 0,55 e um CPlI. Sendo assim, nota-se que todos os traços atendem a resistência prevista na dosagem e são considerados segundo a NBR 8953 (2015), concretos para fins estruturais. A resistência à compressão dos concretos ensaiados nesta pesquisa, não foram afetados de forma significativa com a substituição parcial da areia fina pelo resíduo de vermiculita.

A partir dos resultados de absorção de água e índice de vazios, esperava-se que ao aumentar as proporções de RV, aumentariam também as resistências à compressão, tendo em vista que o aumento do resíduo proporcionou diminuição da porosidade no concreto. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que quanto menor é a porosidade do concreto, maior será sua resistência.

Para uma análise mais completa desses resultados seria necessário a realização de um estudo químico do RV, para entender a interação apresentada entre ele, o cimento e o aditivo superplastificante utilizados nessa pesquisa.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo de avaliar a influência do RV nas propriedades reológicas, físicas e mecânicas do CAA foi atingido. Ao realizar a caracterização física dos materiais, foi encontrado para o resíduo de vermiculita uma massa específica de  $2,33 \text{ g/cm}^3$  e um módulo de finura de 1,24, sendo considerado como material de elevada finura, contribuindo então no aumento da coesão das partículas que compõe o CAA.

O traço referência foi calculado separando o estudo da pasta e o empacotamento dos agregados, para que então a areia fina fosse substituída pelo RV em proporções de 10%, 15% e 20%. Temos que o consumo de cimento foi de  $450 \text{ kg/m}^3$  e a proporção de aditivo variou entre 0,6% e 0,9%.

De acordo com os resultados de empacotamento granular entre as areias, as proporções em volume adequadas foram de 40% de areia fina e 60% de areia média. Para o empacotamento dos agregados miúdos e graúdo, a proporção foi de 55% e 45% respectivamente.

A partir do índice de vazios de 31,25% encontrado na mistura dos agregados, e sabendo que o volume de pasta deve ser maior que esse valor para conseguir preenchê-los, obteve-se o resultado de 40% de pasta na composição total do CAA. Essa composição proporcionou ao traço referência, boa coesão entre os agregados, com um espalhamento de 660 mm, adequado para a maioria das aplicações.

Na análise de escoamento dos concretos estudados, pôde-se concluir que houve diminuição da fluidez nos traços com incorporação do resíduo quando comparado ao traço sem resíduo, possivelmente justificada pela ASE (Área Superficial Específica) do resíduo de vermiculita.

No entanto, avaliando apenas as composições com o resíduo, temos que o diâmetro de espalhamento aumentou a medida que havia um aumento na proporção de RV, melhorando a fluidez. Observou-se também que apesar dos concretos terem apresentado baixa viscosidade, se mostraram com alta capacidade de resistência à segregação e ótima habilidade passante, tendo em vista que em nenhum dos traços houve bloqueio de fluxo durante os ensaios de funil V e caixa L.

Com relação a análise física de durabilidade desses concretos, o RV proporcionou uma diminuição de absorção de água no TRV20 em relação ao TREF

de 6,24% e uma diminuição de índice de vazios de 5%. De maneira geral, apesar da diminuição do índice de vazios dos concretos com RV, houve uma diminuição de resistência à compressão, com exceção do TRV15, que obteve os melhores resultados tanto no estado fresco, como no estado endurecido do concreto.

O TRV15 apresentou resistência de 31,87 Mpa, maior que o TREF de 30,44 Mpa. O resultado pode ter sido influenciado tanto pelo resíduo de vermiculita que melhora o empacotamento dos agregados, como também pelo superplastificante que tem a capacidade de reduzir a água da mistura e dispersar as partículas de cimento, ambos proporcionam maior resistência ao concreto.

Todos os traços estudados neste trabalho ultrapassaram o valor de 25Mpa de resistência à compressão previsto aos 28 dias de idade e podem ser utilizados para fins estruturais segundo a NBR 8953 (2015).

Dessa forma, torna-se possível a incorporação do resíduo de vermiculita no concreto autoadensável, tendo em vista que seu uso possibilitou bons resultados tanto no estado fresco como no estado endurecido do concreto. Além disso, o uso desse material reduz danos ambientais e pode ajudar a tornar a utilização do CAA mais viável, tendo em vista que seu uso possibilita menor custo de produção, por ser uma fonte de reciclagem.

## **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Avaliar proporções de RV diferentes da estudada neste trabalho, para se ter um melhor embasamento das propriedades do CAA no estado fresco e endurecido.

Estudar dosagens com diminuição do consumo de cimento para níveis de 300 e 350 kg/m<sup>3</sup>, fazendo uso de materiais finos pozolânicos, como metacaulim.

Realizar o ensaio de fluorescência e difração de raios X para determinar a composição química do resíduo de vermiculita, e assim analisar mais profundamente as interações desse material com os demais componentes do concreto autoadensável.



Realizar ensaios de durabilidade como o de carbonatação, absorção por capilaridade e migração de cloretos em concretos autoadensáveis com incorporação do resíduo de vermiculita.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, A. C. A. B. et al. Diagnóstico espaço-temporal das áreas impactadas pela MPL - Mineração Pedra Lavrada (Santa Luzia-PB), na extração de vermiculita. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, João Pessoa, v. 2, n. 2, p. 25-36, jun. 2015.

ANDREOLA, F.; BARBIERI, L.; CORRADI, A.; LANCELLOTTI, I.; MANFREDINI, T. **Utilisation of municipal incinerator grate slag for manufacturing porcelainized stoneware tiles manufacturing**. Journal of the European Ceramic Society. v.22. 2002. p.1457-1462.

CALADO, A C. F. et al. **Concreto auto-adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC)**. 1. ed. Recife: EDUPE, 2015. 262p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739 – **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007. 9p.

\_\_\_\_\_. NBR 7211 – **Agregados para concreto – Especificações**. Rio de Janeiro. 2009. 9p.

\_\_\_\_\_. NBR 8953 – **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro. 2015. 3p.

\_\_\_\_\_. NBR 9778 – **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro. 2009. 4p.

\_\_\_\_\_. NBR 12655 – **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação –Procedimento**. Rio de Janeiro. 2015. 23p.

\_\_\_\_\_. NBR 15823-1 – **Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro. 2017. 14p.

\_\_\_\_\_. NBR 15823-2 – **Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro. 2017. 5p.

\_\_\_\_\_. NBR 15823-3 – **Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J**. Rio de Janeiro. 2017. 4p.

\_\_\_\_\_. NBR 15823-4 – **Concreto autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U**. Rio de Janeiro. 2017. 7p.

\_\_\_\_\_. NBR 15823-5 – **Concreto autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V**. Rio de Janeiro. 2017. 4p.

\_\_\_\_\_. NBR 16605 – **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 2017. 4p.

\_\_\_\_\_. NM 45 – **Agregados - Determinação da massa unitária e dos espaços vazios**. Rio de Janeiro. 2006. 8p.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52 – **Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro. 2009. 6p.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53 – **Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro. 2009. 8p.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

AZERÊDO, A. F. N. **Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais**. 2012. 229 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2012.

BASTOS, A. P. O. **Análise da influência de aditivos superplastificantes no comportamento de pastas de cimento Portland com e sem adição de filer calcário**. 2016. 91 f. TCC (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos/ Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007.

COUTINHO, B. S. **Propriedades e comportamento estrutural do concreto auto-adensável**. 2011. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - COPPE) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

COSTA, A. C. S. de S.; CABRAL, A. E. B. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical. **Ambiente Construído**, Porto Alegre. v. 19, n. 4, p. 289-301, out./dez. 2019.

DIAS, R. T. V. et al. **Resíduo de vermiculita na resistência à compressão em argamassas de revestimento**. In: SEMANA OFICIAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA, 75., 2018, Maceió. Anais... Maceió: CONTECC, 2018. 5p.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. In: EFNARC. 2005. 68p.

FENATO, T.M. et al., Verificação da existência de propriedades auto-adensáveis em concretos de alto desempenho, através de ensaios experimentais. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina**, v.28, n.1, p.65-78, jan-jun. 2007.

FERNEDA, M. C. **Estudo do desenvolvimento de concreto autoadensável com areia artificial em pré-fabricados**. 2014. 118 f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. 2014.

FERREIRA, F. M. M. **Influência da incorporação de ar em concreto autoadensável para paredes de concreto moldadas no local**. 2019. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

FOTTÉ, C. et al. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, 17p. set. 2017.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 1.ed. v.1. São Paulo: PINI, 2008. 179p.

GOMES, A. D. V; LEITE, M. J. H; SANTOS, R. V. Rejeito de vermiculita comparado ao método convencional de viveiros florestais na produção de mudas de sabiá (*Mimosa Caesalpinifolia Benth*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 7, n. 2, p. 236-241, abr-jun. 2012.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1. ed. São Paulo: PINI. 2009. 165p.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002. 139f. Tese - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha. 2002.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. G. C. ISAIA 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2017. cap.29, p.905-944.

ISAIA, G. C. **CONCRETO – Ensino, Pesquisas e Realizações**. IBRACON, São Paulo, 2005.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. 2008. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2008.

LUZ, A. B. et al. vermiculita: UBM – União Brasileira de Mineração. In: SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; LINS, F.F. **Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. p. 377-382.

MEDEIROS, F. K. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. 2016. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751p.

MELO, F. J. S. **Uso de resíduos do caulim e da vermiculita como substrato para produção de mudas de mamoeiro.** 2019. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Horticultura Tropical) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal. 2019.

MENEZES, C. M. T. **Concreto auto-adensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais.** 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2006.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; LIRA, H. L. **Recycling of granite industry waste from the northeast region of Brazil.** Environmental Management and Health, v.13, 2002. p.134-142.

MIRANDA, P. S. T. et al. Utilização de pó de pedra cariri em concreto autoadensável. In: CONSTRUÇÃO2018, 6., 2018, Porto. Anais... Porto: 2018. 10p.

NETO, C. S. **Agregados Naturais, Britados, e Artificiais para Concreto.** In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed. G. C. ISAIA. 1.ed. v.1. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON, 2011.

NETO, M. L. Q. et al. **Uso de resíduos da mineração de scheelita em argamassas de assentamento e revestimento.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7., 2016, Campina Grande. Anais... Campina Grande: IBEAS, 2016. 7p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2.ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2010. 441p.

NORMA EUROPEIA. EN 480-1: **Aditivos para concretos, argamassas e grautes. Métodos de ensaio – Requisitos.** Bruxelas, 1998.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-Compacting Concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology. v.1. n. 1. 2003. p. 5-15.

PAULA, R. F; CARVALHAES, C. Vermiculita. In: AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Sumário mineral 2017.** v.37. Braisl: ANM, 2017. p. 176-178.

PINTO BARBOSA, M. et al. **Avaliação da energia aparente de ativação do Cimento CP-II e CP-V com adição de superplastificantes.** In: SIMPÓSIO EPUSP

SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., 2006, Maceió. Anais... São Paulo: IBRACON, 2012. 15p.

RASHAD, A. M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. **Construction and Building Materials**, 2016. p.53-62.

REPETTE, W. L. **Concreto Autoadensável - conquistas e desafios: foco no mercado brasileiro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. Anais... Maceió: IBRACON, 2012. 6p.

REPETTE, W. L. **Concreto Autoadensável**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed. G. C. ISAIA. 1.ed. v.1. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON, 2011.

ROJAS-RAMÍREZ, R. A. et al. Impacto do uso de resíduo de vermiculita no estado endurecido de argamassas. **Cerâmica**. v. 65, n. 373, p. 107-116, jan-mar. 2019.

SILVA MENDES, M. V. A. **Estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis**. 2016. 259 f. Tese (Doutorado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2016.

SILVA, J. M. M.; SANTOS, P. B.; SCREMIM, C. B. Incorporação de resíduo de mineração em concreto auto adensável. **Revista Eletrônica Multidisciplinar UNIFACEAR**, v. 2, n. 6, p. 1-15, ago. 2017.

SOUSA, L. D. A. **Cinética de liberação do potássio em rejeito de mineração de vermiculita para o fortalecimento do solo**. 2012. 44 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2012.

SOUSA, L. D. A; MACHADO, Á. O. D. V; LEITE, J. Y. P. **Liberação de potássio a partir de rejeito de vermiculita**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 24., 2011, Salvador. Anais... Salvador: ENTMMME, 2011. 8p.

TUTIKIAN, B, F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. 1.ed. v.1. São Paulo: PINI, 2008. 148p.