



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE SCHEELITA NO
CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

ADLA JAMILLY VIEIRA FELIPE

POMBAL – PB

2022

ADLA JAMILLY VIEIRA FELIPE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof.(a) Ma. Fernanda Karolline de Medeiros.

POMBAL – PB

2022

F315e Felipe, Adla Jamilly Vieira.

Estudo da incorporação de resíduos de scheelita no concreto autoadensável /
Adla Jamilly Vieira Felipe. – Pombal, 2022.
77 f. il. color

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2022.

“Orientação: Profa. Ma. Fernanda Karolline de Medeiros.”. Referências.

1. Concreto autoadensável. 2. Agregado miúdo - Resíduos de mineração.
3. Construção civil - Material sustentável. 4. Concreto - Estado fresco. 5. Concreto - Estado
endurecido. 6. Resistência à compressão. I. Medeiros, Fernanda Karolline de. II. Título.

CDU 691.32(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

ADLA JAMILLY VIEIRA FELIPE

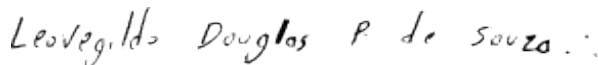
**ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE SCHEELITA NO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente (_ADLA JAMILLY VIEIRA FELIPE_) **APROVADO** em 15 junho de 2022 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

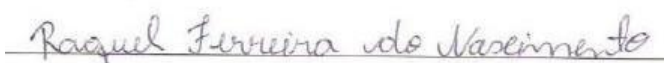
Registre-se e publique-se.



Prof. Ma. Fernanda Karolline de Medeiros
(Orientador – UFCG)



Prof^a. Dr^a. Sc. Leovegildo Douglas Pereira de
Souza
(Membro Interno – UFCG)



Prof. Ma. Raquel Ferreira do Nascimento
(Membro Externo – IFPB)

Dedico este trabalho a Deus, minha fonte inesgotável de sabedoria, que sempre me fortalece e me guia pelos melhores caminhos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, louvo e agradeço, pela minha vida e por ser o meu refúgio em momentos difíceis, me concedendo força e coragem para continuar seguindo em busca dos meus sonhos.

Aos meus pais, João e Cleonice, pelos ensinamentos, por todo o incentivo e por nunca medirem esforços para me proporcionar uma boa educação. Agradeço ao meu irmão João Felipe pela paciência e compreensão.

Aos meus familiares, em especial meus avós João Pedro (*in memoriam*) e Maria por todas as orações, pelo cuidado e carinho que sempre tiveram comigo.

Aos meus tios Marcos e Vanuza, por todo o apoio e suporte durante a realização desse trabalho. Agradeço também as minhas primas Hizadora e Izabella por estarem sempre ao meu lado.

À minha orientadora, Ma. Fernanda Karolline pela assistência, pelo conhecimento repassado durante a realização desse trabalho, por todo o incentivo, paciência, compreensão e por ser um exemplo de pessoa e profissional.

Agradeço imensamente a Ana Letícia, Édino Silva, Eudes Araújo, Helton Sousa, Jessica Rayanne, Leonardo Guedes, Thadeu Formiga, pela contribuição para a realização dos ensaios. Especialmente Thayse minha companheira de graduação e também de pesquisa, que me acompanhou durante os dias no laboratório.

Aos amigos, Danielly Maria, Brenda Stephanie, Ian Marques, Kawanna Sousa, Leonardo Guedes, Pedro Henrique, Filipe Trigueiro e William Medeiros que compartilharam comigo experiências inesquecíveis durante a graduação e que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Em especial Ana Letícia, que está sempre me encorajando e apoiando, e Helton Sousa que esteve comigo desde o primeiro período.

Agradeço também a todos os amigos que estiveram ao meu lado durante essa trajetória, por toda a paciência, empatia e conversas que tornaram meus dias mais leves, em especial Jessica Rayanne, minha amiga e irmã.

Por fim, agradeço a todo o corpo docente, técnicos e servidores que contribuíram com meu crescimento pessoal e profissional durante esse período.

*“Entregue o seu caminho ao Senhor;
confie Nele, e Ele agirá.”*

(Salmos 37:5)

RESUMO

Com o avanço tecnológico surgiram concretos especiais, como é o caso do concreto autoadensável (CAA), caracterizado por preencher as formas sem vibração. Para proporcionar a trabalhabilidade, fluidez e coesão necessárias ao CAA, utiliza-se aditivo superplastificante e uma grande quantidade de finos em sua composição. Com isso, vem-se desenvolvendo diversos estudos para a incorporação de resíduos que possam ser utilizados nessa função, ou também como agregados. Nesse trabalho foram utilizados os resíduos de scheelita, sendo o fino usado como adição e o grosso em substituição ao agregado miúdo. Foi empregada uma porcentagem de 20% do fino em todos os traços, pois com sua utilização notou-se uma melhoria nas propriedades do estado fresco. Assim, foram realizados três traços, um de referência composto por: cimento Portland CP II F, brita 0, resíduo fino, areia, água e aditivo superplastificante, e outros dois com a substituição de 50% e 25% da areia pelo resíduo grosso da scheelita. Os concretos foram avaliados em seu estado fresco através dos ensaios: slump flow test, anel J, funil V e caixa L, gerando resultados satisfatórios, exceto no traço com 50% de resíduo para o ensaio de caixa L. Com relação a caracterização física, os três traços apresentaram massas específicas semelhantes, diferente da absorção e índice de vazios, em que o concreto sem resíduo grosso apresentou melhores resultados. Porém esses resultados não influenciaram na resistência, visto que os traços nos quais se fez uso do resíduo grosso exibiram valores maiores para o ensaio de resistência à compressão realizados após 7 e 28 dias de cura. Desse modo, considera-se a incorporação dos resíduos de scheelita no concreto autoadensável como uma boa alternativa para reutilização desses, visto que apresentaram resultados favoráveis no estado fresco e endurecido, destacando-se o bom desempenho do TRS25 no estado fresco e do TRS50 no estado endurecido.

Palavras-chave: Agregado. Estado fresco. Resistência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre a proporção dos materiais que constituem o CAA e o CVV.....	19
Figura 2 - Resíduo grosso e fino de scheelita, respectivamente.....	30
Figura 3 - Concreto de referência com 50% do aditivo dosado.....	33
Figura 4 - Concreto de referência com 100% do aditivo dosado.....	34
Figura 5 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.	35
Figura 6 - Ensaio de massa específica do cimento.	36
Figura 7 - Ensaio para determinação da densidade e absorção de água da brita. ...	37
Figura 8 - Ensaio de densidade da areia.....	38
Figura 9 - Aditivo superplastificante Sika.	39
Figura 10 - Ensaio de densidade e absorção de água do resíduo grosso.	40
Figura 11 - Placa base utilizada do slump flow test. (a) Perspectiva. (b) Execução do ensaio.....	45
Figura 12 - Classes do índice de estabilidade visual (IEV).	46
Figura 13 - Anel J.	47
Figura 14 - Aparelhagem para o ensaio com anel J.....	48
Figura 15 - Detalhamento do funil V.....	49
Figura 16 - Caixa L.....	50
Figura 17 - Prensa hidráulica.	53
Figura 18 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	55
Figura 19 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	56
Figura 20 - Curva granulométrica do resíduo grosso de scheelita.	57
Figura 21 - Proporção de agregados que compõem o esqueleto granular.	59
Figura 22 - Espalhamento do concreto após o slump, (a) TREF, (b) TRS25 e (c) TRS50.	61
Figura 23 - Habilidade passante mostrada pelo ensaio do anel J, (a) TREF, (b) TRS25 e (c) TRS50.....	63
Figura 24 - Corpos de prova do traço 1 após ensaio.	66
Figura 25 - Corpo de prova após ensaio de resistência a compressão.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do aditivo.....	39
Tabela 2 - Proporções de substituição da areia média pelo resíduo grosso da scheelita.	41
Tabela 3 - Proporção em percentagem de agregados utilizados no empacotamento.	43
Tabela 4 - Procedimento da mistura.	43
Tabela 5 - Classes de espalhamento.	44
Tabela 6 - Classes de viscosidade plástica aparente T_500 (sob fluxo livre).	45
Tabela 7 - Classes de índice de estabilidade visual (IEV).....	46
Tabela 8 - Classe de habilidades passantes do CAA em função da sua aplicação. .	48
Tabela 9 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo Funil V (sob fluxo confinado).....	49
Tabela 10 - Classes de habilidade passante pela Caixa L (sob fluxo confinado).....	51
Tabela 11 - Caracterização do cimento Portland.	54
Tabela 12 - Propriedades físicas do agregado graúdo.....	54
Tabela 13 - Propriedades físicas do agregado miúdo.	55
Tabela 14 - Propriedades físicas do resíduo grosso de scheelita.	57
Tabela 15 - Massa específica do resíduo fino de scheelita.	58
Tabela 16 - Proporções dos materiais.....	58
Tabela 17 - Proporções em volume para dosagem do CAA.	60
Tabela 18 - Consumo dos materiais para o CAA.	60
Tabela 19 - Resultados para o espalhamento, tempo de escoamento (t_500) e Índice de Estabilidade Visual (IEV).	62
Tabela 20 - Habilidade passante pelo anel J.....	63
Tabela 21 - Habilidade passante pela caixa L.....	64
Tabela 22 - Viscosidade plástica aparente pelo método no funil V.	64
Tabela 23 - Resultados para massa específica, absorção de água e índice de vazios.	65
Tabela 24 - Resistência à compressão.	67

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Siglas

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- CAA – Concreto autoadensável;
- CAD – Concreto de alto desempenho;
- CP – Corpo de prova;
- CP II F – Cimento Portland com adição de fíler;
- CVV – Concreto convencional;
- DMC – Diâmetro Máximo Característico;
- HP – Habilidade passante;
- IEV – Índice de Estabilidade Visual;
- Kgf – Quilograma – força;
- Mpa – Megapascals;
- NBR – Norma Brasileira;
- PJ – Habilidade passante pelo anel J;
- PL – Habilidade passante pela caixa L;
- RBC – Resíduo da biomassa de cana-de- açúcar;
- RFS – Resíduo fino de scheelita;
- RGS – Resíduo grosso de scheelita;
- RPS – Resíduo da produção de scheelita;
- SF – Fluidez e escoamento;
- TREF – Traço de referência;
- TRS25 – Traço com substituição de 25% de agregado miúdo por scheelita;
- TRS50 – Traço com substituição de 50% de agregado miúdo por scheelita;
- VF – Viscosidade plástica aparente pelo funil V;
- VP – Volume da pasta;
- VS – Viscosidade plástica aparente pelo t_{500} .

Símbolos

- μm – Micrômetro;
- ρ – Massa específica;
- v – Teor de vazios.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Concreto Autoadensável	18
2.1.1	Materiais que compõem o CAA	18
2.1.1.1	Cimento Portland.....	19
2.1.1.2	Agregados	20
2.1.1.3	Adições.....	21
2.1.1.4	Aditivos	22
2.1.1.5	Água	23
2.1.2	Vantagens e Desvantagens	23
2.1.3	Métodos de dosagem	24
2.1.4	Propriedades no estado fresco	25
2.1.4.1	Trabalhabilidade	26
2.1.4.2	Resistência à segregação	27
2.1.4.3	Habilidade passante	27
2.1.5	Propriedades no estado endurecido	27
2.2	Resíduo de scheelita	29
2.3	Impactos ambientais e sustentabilidade	30
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Caracterização dos Materiais	36
3.1.1	Cimento Portland	36
3.1.2	Agregado Graúdo	36
3.1.3	Agregado miúdo	37
3.1.4	Aditivo	38
3.1.5	Resíduos de scheelita	39
3.2	Estudo da dosagem e definição dos traços	40
3.2.1	Composição da pasta	41

3.2.2 Determinação do esqueleto granular	42
3.2.3 Procedimento da mistura	43
3.3 Ensaio do CAA no estado fresco	44
3.3.1 Slump flow test.....	44
3.3.2 Anel J.....	46
3.3.3. Funil V	48
3.3.4. Caixa L.....	49
3.4 Ensaio do CAA no estado endurecido	51
3.4.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	51
3.4.2 Resistência à compressão axial	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 Caracterização dos materiais	54
4.1.1 Cimento.....	54
4.1.2. Agregado Graúdo	54
4.1.3 Agregado miúdo.....	55
4.1.4 Resíduos de scheelita.....	56
4.2 Dosagem e composição dos traços do CAA	58
4.3 Ensaio no estado fresco	60
4.3.1 Slump flow test.....	60
4.3.2 Anel J.....	62
4.3.3 Caixa L.....	63
4.3.4 Funil V	64
4.4 Ensaio no estado endurecido	65
4.4.1 Massa específica, absorção de água e índice de vazios	65
4.4.2 Resistência à compressão axial	65
5. CONCLUSÕES.....	69
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais usado pela construção civil no mundo, no entanto, com o avanço tecnológico nessa área, tem surgido a necessidade da utilização de concretos com propriedades como alta resistência, alto desempenho e autoadensáveis (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Nesse contexto, buscando atender as necessidades do mercado, foi desenvolvido por Okamura no Japão, em 1980, o concreto autoadensável. De acordo com Cavalcanti (2006), esse material é caracterizado por preencher as formas e atravessar obstáculos usando apenas o seu próprio peso, sem a utilização do vibrador para auxiliar no adensamento. Essa particularidade do CAA é responsável por reduzir os erros nesse processo, especialmente em ocasiões em que há dificuldade para o acesso dos equipamentos que executam essa tarefa ou em estruturas com armaduras mais espessas (ANDRADE, 2020).

Além disso, esse tipo de concreto apresenta como principais propriedades, a trabalhabilidade, a estabilidade e a fluidez. Essas características, de acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), apresentam inúmeras vantagens que incluem maior liberdade no formato e nas dimensões; redução da mão-de-obra, por não necessitar de adensamento; agilidade no processo de concretagem na obra, pois o lançamento do concreto é mais rápido e aumenta a qualidade dos acabamentos, entre outros benefícios.

Conforme Sathler *et al.* (2017) para atingir as propriedades citadas acima é necessário fazer uso de aditivos químicos superplastificantes, alteradores de viscosidade, além de exigir uma grande proporção de finos, como cinza volante, pozolanas e sílica-ativa.

A construção civil é uma das indústrias que mais geram resíduos no mundo, além disso, é também um ramo de serviços considerado grande consumidor de energia e recursos naturais, causando assim incontáveis impactos ao meio ambiente. De acordo com Roth e Garcias (2009) os processos construtivos contribuem para o desenvolvimento de áreas degradadas que acontecem em três fases: na compra de materiais, incluindo extração e fabricação desses, durante a execução da obra e no descarte final dos rejeitos.

Com isso, é necessário desenvolver alternativas mais sustentáveis, que reduzam o uso de matéria-prima não renovável, que sejam menos poluentes e apresentem soluções de descarte correto ou reutilização de resíduos. Conforme Silveira (2015), o aproveitamento dos rejeitos da exploração mineral vem se destacando nesse aspecto, por apresentarem uma produção em larga escala que resulta em uma grande quantidade de resíduos.

Nesse cenário, o reaproveitamento de resíduos da mineração têm sido tema de inúmeras pesquisas, evidenciando-se entre essas, o emprego de rejeitos oriundos do beneficiamento da scheelita, em minas localizadas no Rio Grande do Norte e Paraíba. Silva (2019) afirma que o material apresenta uma elevada porção de Calcita, podendo ser utilizado na produção de cimento e possui também alguns óxidos, como o Óxido de Cálcio (CaO) podendo ser empregado na construção civil.

Paiva (2013) utilizou o resíduo em substituição ao agregado miúdo no concreto de cimento Portland e concluiu que o resíduo de scheelita por ser mais fino e denso, influenciou na pasta, tornando-a mais fluida e gerando também absorção e índice de vazios dentro dos percentuais da norma, que contribuem para uma melhor durabilidade do concreto convencional (CVV). E Medeiros (2019), que fez uso do resíduo de scheelita associado a areia, observou valores favoráveis de trabalhabilidade, e índices reduzidos de absorção e porosidade, além de resultados para a resistência semelhantes aos exigidos em norma.

Com isso, o presente trabalho tem o objetivo de estudar a viabilidade do uso dos resíduos de scheelita no concreto autoadensável, onde o resíduo grosso (RGS) será empregado para substituir o agregado miúdo e o resíduo fino (RFS) como adição, reduzindo o uso dos materiais convencionais, além de desenvolver uma alternativa de reutilização para esses rejeitos, contribuindo para amenizar os impactos ambientais gerados pela produção e descarte incorreto dos insumos da construção civil e da mineração.

1.1 Justificativa

O CAA é resultado do desenvolvimento tecnológico do concreto, em que utilizando de aditivos químicos e adições minerais, obtêm-se um material mais fluido, coeso e resistente a segregação se comparado ao concreto convencional, e sem a necessidade de adensamento, gerando redução de custos e de ruídos na obra, permitindo variadas formas de estruturas, além de favorecer a diminuição dos impactos ambientais, entre outras vantagens. Portanto, o estudo do CAA torna-se relevante, visto que esse apresenta-se como uma alternativa para minimizar deficiências como exsudação e segregação, apresentadas pelo concreto convencional.

Paralelo a isso, existem outras pesquisas que avaliam a utilização de resíduos da mineração como uma alternativa para substituir os agregados miúdos, considerando que a areia natural é retirada dos leitos dos rios, causando a remoção da cobertura vegetal e alterações nos cursos d'água.

Alguns desses são os resíduos de quartzo, caulim e scheelita, frutos da exploração mineral no nordeste brasileiro, mais precisamente nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, que geram uma quantidade considerável de rejeitos, oriundos do processo de beneficiamento. Com a reutilização desse material, minimiza-se os impactos ambientais gerados pelo seu descarte, pois os resíduos são geralmente dispostos em montantes a céu aberto, acarretando uma série de problemas, desde a degradação da paisagem à poluição e contaminação do solo e da água por metais pesados, oriundos da atividade mineradora.

Sendo assim, essa pesquisa apresenta uma opção de reutilização para o resíduo de scheelita, através do seu uso como agregado na produção de concreto autoadensável e também como fíler, visando desenvolver um material sustentável e eficiente, considerando que deve atender às exigências apresentadas na norma para concreto autoadensável, a ABNT NBR 15823 (2017).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades no estado fresco e endurecido dos concretos autoadensáveis com resíduos de scheelita.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as propriedades físicas, mecânicas e reológicas do CAA através de ensaios nos estados fresco e endurecido.
- Desenvolver as dosagens adequadas dos materiais, visando otimizar o uso dos resíduos de scheelita como substitutos do agregado miúdo e como filer na composição da pasta.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto Autoadensável

No ano de 1983, a estabilidade das estruturas de concreto armado era um tema em evidência no Japão, devido à carência de mão-de-obra de qualidade no país, que refletia diretamente no padrão das edificações (POLUCHA, 2016). Sendo assim, para solucionar esse problema buscou-se desenvolver um concreto mais fluido, com capacidade para passar pelas armaduras e ocupar todos os espaços vazios, sem exigir adensamento (VIEIRA, 2021).

Nesse contexto, em 1988, surgiu na Universidade de Tóquio, fruto de pesquisas do professor Hajime Okamura, o concreto autoadensável, um composto que apresenta maior fluidez e facilidade para preencher fôrmas, sem necessitar de vibração, diminuindo a quantidade de operários na obra e melhorando o desempenho do concreto (SATHLER et al., 2017).

De acordo com Cavalcanti (2006), o CAA no estado fresco deve apresentar habilidade passante, fluidez e resistência à segregação, sendo essas características fundamentais para sua utilização em obras. A habilidade passante é a responsável pela facilidade do concreto escoar pelo molde, entre as armaduras. A fluidez é descrita como a capacidade que o material possui de preencher os espaços devido ao seu peso próprio. E a resistência à segregação é a propriedade do CAA de permanecer uniforme (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

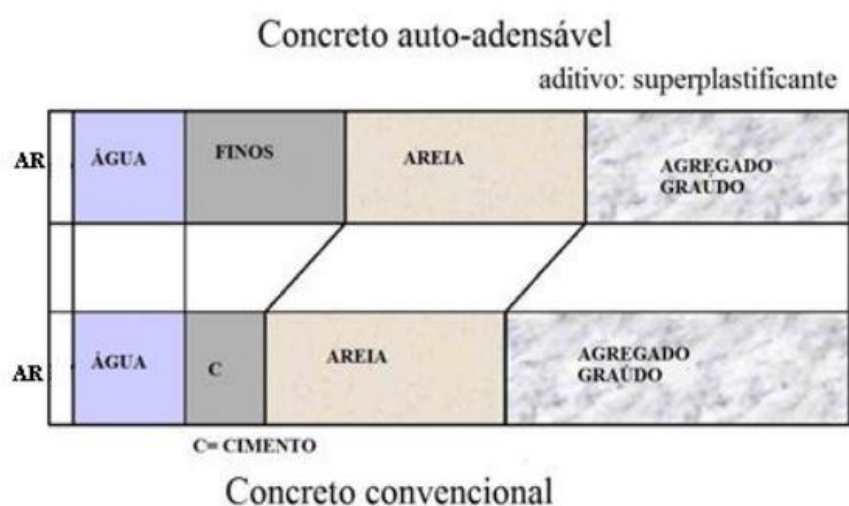
Portanto, o concreto autoadensável pode ser explicado como um material de grande eficiência, com ótima capacidade de se deformar no estado fresco e resistente à segregação (BRANCO, 2012).

2.1.1 Materiais que compõem o CAA

O CAA possui em sua composição os mesmos materiais que constituem o concreto convencional, sendo: areia, agregado graúdo, agregado miúdo, cimento Portland e água. Porém são utilizados para a produção do CAA uma maior quantidade de finos se comparado ao CVV, além de ser acrescido de adições e aditivos dispersantes com alta eficácia, dentre os quais tem se considerado os

policarboxilatos como mais apropriados, pois proporcionam uma melhor distribuição das partículas cimentícias (COSTA; CABRAL, 2019). Na Figura 1 observa-se a comparação entre a proporção de materiais utilizados para a produção do concreto convencional e do concreto autoadensável.

Figura 1 – Comparação entre a proporção dos materiais que constituem o CAA e o CVV.



Fonte: Okamura; Oushi (2003).

Medeiros, F. (2016) afirma que ter conhecimento sobre os materiais que compõem a mistura de concreto, bem como suas propriedades e quantidades é fundamental para assegurar o autoadensamento, analisado por meio de ensaios, especialmente no estado fresco. Adiante será apresentada a descrição de cada material que compõe o CAA, com suas principais características.

2.1.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland trata-se de um pó fino que apresenta características: aglomerante, ligante ou aglutinante e ao entrar em contato com a água sofre uma reação química endurecendo, não podendo haver depois uma desintegração do mesmo (CALADO et al., 2015).

Para atingir a viscosidade necessária ao CAA, é preciso utilizar de uma alta proporção de finos e o cimento é responsável por suprir parte desses finos. Porém, o

uso de grandes quantidades do material tende a causar alguns resultados desfavoráveis, como o aumento da geração de calor por hidratação e retração plástica, tanto no estado fresco como no endurecido (POLUCHA, 2016).

Conforme Andrade (2020) qualquer cimento que já foi utilizado para a produção de CCV pode ser usado no CAA, desde que esteja de acordo com as normas técnicas, atentando-se a sua indicação. No entanto, segundo Cavalcanti (2006), o cimento Portland composto, CPII, se mostra como o mais adequado para ser empregado em concretos autoadensáveis, por sua composição estar de acordo com a EFNARC e por ser de fácil acesso no Brasil, devido à grande demanda desse no país.

2.1.1.2 Agregados

Os agregados utilizados no CAA são semelhantes àqueles usados no CCV, contudo, no primeiro emprega-se uma quantidade menor, sobretudo da parte graúda, visto que o concreto autoadensável carece de uma maior fração de finos para manter a coerência da mistura.

Na seleção desses agregados deve-se levar em consideração algumas propriedades importantes como: granulometria, formato e textura dos grãos (MATOS, 2019). A granulometria pode interferir no desempenho do concreto, alterando suas características nos estados fresco e endurecido, pois ao aumentar a dimensão das partículas, reduz a fluidez do material e sua habilidade passante, mas ao diminuir o tamanho máximo do agregado graúdo melhora resistência à compressão (HIGUCHI, 2018).

Quanto à forma dos grãos, são desejáveis os mais arredondados, uma vez que exigem um menor volume de argamassa, por favorecerem o empacotamento das partículas, melhorando sua lubrificação e a fluidez da mistura (MATOS, 2019). Já a textura não deve ser áspera, pois embora proporcione melhorias na aderência, tende a elevar o consumo de água e limitar a trabalhabilidade (FENGLER, 2020).

Os agregados miúdos utilizados no CAA, podem ser naturais (areia) ou artificiais, obtidos a partir de processos industriais. Todavia, as areias são mais indicadas pois seus grãos geralmente apresentam uma distribuição contínua, além de serem esféricos e lisos. De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008) agregados

com essas características melhoram a capacidade de escoamento da pasta, e reduzem a demanda por água.

Por outro lado, atualmente vem tornando-se cada vez mais necessário o estudo sobre novas alternativas de agregados miúdos para concretos, pois a ausência de areias naturais, especialmente nas cidades mais desenvolvidas, associadas as exigências determinadas pelos órgãos ambientais para a extração em novas fontes, estão dificultando o acesso a esse material (POLUCHA, 2016).

Ao que tange o volume de agregado miúdo a ser usado no CAA, Gomes e Barros (2009) afirmam que este, deve estar entre 40% e 50% do volume de argamassa, com proporções em torno de 710 a 900 kg/m³.

Já o agregado graúdo deve representar entre 28% e 35% do volume de concreto, com uma proporção de peso do agregado graúdo/concreto de 32% a 40% com porções de 710 a 900 kg/m³ (GOMES; BARROS, 2009). Além disso, para este material é recomendado segundo Andrade (2020), um diâmetro máximo característico inferior a 19 mm, a fim de facilitar o deslocamento do concreto pela armadura e reduzir a possibilidade de segregar.

2.1.1.3 Adições

As adições ao CAA, apresentam-se como uma alternativa para suprir a necessidade de finos, sendo utilizadas para substituir parte do cimento, reduzindo seu consumo, ou acrescentadas ao concreto (MATOS, 2019). De acordo com Silva (2019) a quantidade dessas adições varia de 20% a 70% da massa do material cimentício, de acordo com as características desejadas. Para isso, precisam conter áreas superficiais superiores à do material que irão substituir e são definidas após uma análise técnica (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Cavalcanti (2006) classifica as adições como predominantemente reativas (APR), quando reagem com o hidróxido de cálcio, auxiliando na composição dos hidratos como: cinza volante, metacaulim, escória de alto-forno, sílica ativa e cinza da casca de arroz, e predominantemente inertes (API), quando proporcionam um efeito físico agindo para melhorar as condições de compacidade.

As APIs também chamadas de fíler, apresentam diâmetro de 5 a 75 µm e por isso são utilizados com o intuito de facilitar o empacotamento com as partículas de

cimento, reduzindo a segregação e exsudação, além de diminuir a porosidade existente na zona de transição entre os agregados e a pasta, melhorando a trabalhabilidade do concreto (SILVA, 2005).

Conforme Mehta e Monteiro (2014) a inserção de adições na constituição do CAA, também oferece inúmeras vantagens no estado endurecido, salientando-se as melhorias nas propriedades geradas pelo refinamento dos poros como resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade.

2.1.1.4 Aditivos

Os aditivos são substâncias desenvolvidas com o objetivo de proporcionar ao CAA uma melhoria em suas propriedades tanto no estado fresco, como no endurecido. Existem diversos tipos de aditivos, que se diferenciam pela constituição química, determinada conforme sua finalidade.

Para esse tipo de concreto são mais comumente utilizados os aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade. Os superplastificantes conferem ao CAA alta fluidez e reduzem quantidade de água (MATOS, 2019). Essa classe de aditivos pode ser dividida em quatro grupos: lignossulfonados ou lignossulfonados modificados (LS), sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído (NS), sais sulfonatos de policondensado de melanina e formaldeído (MS) e policarboxilatos (PC). E dentre esses, os PC são os mais apropriados para se usar no CAA, pois diminuem em até 40% a quantidade de água, preservando a trabalhabilidade da mistura e causando a desfloculação e dispersão das partículas de cimento (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os aditivos modificadores de viscosidade são normalmente usados para gerar essa propriedade e contribuir com a redução da segregação, quando há um baixo teor de finos, além de auxiliar na homogeneidade da mistura (POLUCHA, 2016). Gomes e Barros (2009) explicam que esse aditivo atua na etapa em que a pasta de cimento está aquosa, onde cadeias de polímeros solúveis em água conseguem captar determinada quantidade de água disponível no composto, corroborando com a viscosidade do mesmo.

Apesar do emprego dos modificadores de viscosidade não ser essencial na produção do CAA, quando associados aos superplastificantes, formam misturas de

alta fluidez e boa consistência, atentando-se, porém, a afinidade entre os aditivos, principalmente acerca do cimento (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.1.1.5 Água

A proporção de água da mistura de concreto está dividida em quatro fases: hidratação do cimento, absorção e adsorção dos agregados e porção de finos, completando a porosidade do esqueleto granular e assegurando a fluidez do concreto (GOMES; BARROS, 2009).

No CAA deve ser utilizada uma água com características que obedecem às mesmas normas especificadas para o CVV. Todavia, para o CAA é empregada uma proporção menor, pois com o uso de aditivos superplastificantes é suprida a necessidade de parte dessa água, formando assim a coesão e fluidez essencial ao bom desempenho do material (VIEIRA, 2021).

Conforme Silva (2019), mesmo quando se utiliza uma mesma relação água/cimento para o CVV e para o CAA, o concreto autoadensável apresenta uma maior resistência à compressão, devido a alguns fatores como a baixa relação água/finos, a utilização do aditivo superplastificante e o tipo de adição usada.

2.1.2 Vantagens e Desvantagens

O CAA vem se tornando tema de inúmeras pesquisas e despertando interesse pelo mundo, devido às vantagens proporcionadas pela sua aplicação em obras correntes, especiais e na indústria de pré-moldados. Tutikian e Dal Molin (2008) apresentam diversos benefícios da utilização do CAA, entre as quais vale destacar:

- Agiliza o andamento da construção, por não necessitar de adensamento e possuir um lançamento mais breve;
- Por não carecer de vibração, favorece o espalhamento e o nivelamento, reduzindo também a mão-de-obra;
- Proporciona uma maior liberdade no que diz respeito a formas e tamanhos;
- Acaba com ruído gerado pelo vibrador, reduzindo a poluição sonora causada por essa ferramenta, especialmente em grandes centros urbanos;

- Promove melhorias no que se refere a poluição ambiental, pois é constituído por uma grande quantidade de finos, os quais são geralmente compostos por resíduos da indústria;
- Tem a capacidade de minimizar o custo final, se levados em consideração todos benefícios citados acima.

Apesar das diversas vantagens apresentadas, o CAA ainda precisa aprimorar alguns aspectos a respeito da sua aplicação, através do estudo de dosagens e utilização de novos materiais. Para, com isso, eliminar ou reduzir as desvantagens como: necessidade de mão-de-obra qualificada para sua execução, controle tecnológico e de aplicação mais minucioso, aperfeiçoamento dos métodos de dosagens e maior cuidado com o transporte e com o tempo para ser aplicado. [A1]

2.1.3 Métodos de dosagem

A dosagem do concreto consiste em determinar a porcentagem adequada de cada material que o constitui. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) entre as finalidades da dosagem estão atender as condições pré-definidas, principalmente trabalhabilidade do concreto no estado fresco e resistência do concreto no estado endurecido para determinada idade.

Sabe-se que o primeiro método de dosagem de CAA foi desenvolvido por Okamura e Ozawa em 1995, e desde então vem surgindo outros novos com o intuito de melhorar cada vez mais as propriedades do material, tornando seu processo de produção e aplicação mais simples. Com isso, diversos outros pesquisadores elaboraram seus métodos, a exemplo de Su et al. (2001), EFNARC (2002), Gomes et al. (2002), Tutikian (2004) e Tutikian e Dal Molin (2007). A seguir serão descritos de forma sucinta os métodos citados.

- Método de Okamura e Ozawa (1995): consiste em fixar as quantidades de agregado graúdo e miúdo, com o intuito de promover a autoadensabilidade do concreto por meio da quantidade de água, finos e aditivos superplastificantes necessárias para suprir todas as propriedades desejadas (OKAMURA; OZAWA, 1995).
- Método de Su et al (2001): baseia-se no empacotamento do esqueleto granular, preenchendo os vazios existentes com argamassa, alcançando

assim fluidez, trabalhabilidade, entre outras propriedades essenciais ao CAA (SU; HSU; CHAI, 2001).

- EFNARC (2002): consiste em utilizar materiais que estejam de acordo com as exigências de desempenho para esse tipo de concreto, atingindo as propriedades no estado fresco (capacidade passante e de preenchimento das formas e resistência à segregação) e no estado endurecido (EFNARC, 2002).
- Gomes et al (2002): trata-se de um método em que o CAA é obtido através da otimização da composição da pasta e do esqueleto granular separadamente, chegando a essa composição através da análise das quantidades de materiais necessárias para que a mistura atinja as propriedades de um concreto autoadensável (GOMES; BARROS, 2009).
- Tutikian (2004): é fundamentado em um método para CVV do IPT/EPUSP. Consiste em produzir uma mistura de argamassa ideal para um concreto convencional e após isso são acrescentados aditivos superplastificantes e finos em quantidades necessárias a transformar esse composto em um CAA (TUTIKIAN, 2004).
- Tutikian e Dal Molin (2007): trata-se de um aperfeiçoamento do método de Tutikian (2004), adicionando alguns pontos como: o teor de argamassa variável, a introdução da curva de custo no diagrama de dosagem e o diagrama de desempenho, tornando o método mais atual.

2.1.4 Propriedades no estado fresco

No estado fresco do concreto é estudada a reologia, título definido pelo pesquisador Bingham como a análise da deformidade e do escoamento dos materiais (SILVA, 2019). Em termos reológicos o concreto autoadensável é caracterizado pela viscosidade plástica e tensão de cisalhamento, a primeira obtida através do aditivo superplastificante e da água, enquanto a influência dos finos é responsável por conferir ao material a tensão de cisalhamento. Essas propriedades reológicas proporcionam ao CAA a fluidez necessária para escoar entre as armaduras sem segregar, preenchendo os espaços vazios (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; ANDRADE, 2020).

Para cada uma das propriedades citadas anteriormente foram desenvolvidos métodos de ensaios e equipamentos responsáveis por determinar se essas estão de acordo com as especificações da ABNT NBR 15823 (2017) (classificação, controle e aceitação no estado fresco). A seguir serão descritas as propriedades com seus respectivos ensaios.

2.1.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é considerada uma das principais características do CAA, uma vez que esse concreto não é adensado pela ação humana, mas sim devido as propriedades que possui. E para isso é necessário que o material apresente boa fluidez e viscosidade, resultando em um espalhamento uniforme, com o deslocamento dos agregados graúdos sem que haja segregação (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A fluidez é descrita por Tutikian e Dal Molin (2008) como a capacidade do concreto de se moldar nas fôrmas, ocupando todos os espaços e sem a necessidade de adensamento. Essa propriedade é analisada pelo Slump Flow Test, descrito pela NBR 15823-2 (2017), o qual verifica o desempenho do concreto em fluxo livre, determinando também o índice de estabilidade visual (IEV) e o tempo de escoamento (t_{500}).

Já a viscosidade é definida por Silva (2019) como a habilidade do material em resistir ao escoamento. Deste modo, quanto menor a resistência ao escoamento maior será a viscosidade. Portanto, a diminuição excessiva dessa propriedade na pasta de concreto pode gerar uma divisão de fases no instante do lançamento, ou também depois da moldagem.

A realização desse ensaio se faz necessário por permitir avaliar o comportamento em fluxo livre do concreto, na ausência de obstruções, além de possibilitar a determinação de outros parâmetros, como o tempo de escoamento (t_{500}) e o índice de estabilidade visual.

Através do ensaio descrito pela NBR 15823-2 (2017), denominado de Slump Flow- Test (SF), o qual emprega o cone de Abrams para avaliar o espalhamento e o tempo que o composto leva para escoar e analisa a capacidade do concreto autoadensável fluir livremente por ação do seu próprio peso. Simultaneamente é

realizado o Slump Flow Test t_{500} , que avalia a viscosidade da pasta, por meio do tempo que usa para escoar até a marca de 500 mm. Além de ser possível, avaliar a segregação e exsudação a partir do Índice de Estabilidade Visual (IEV), ao final do escoamento (ABNT NBR 15823-2, 2017).

2.1.4.2 Resistência à segregação

No concreto autoadensável, a segregação representa a separação do agregado graúdo da pasta formada pelos outros materiais. Fengler (2020) explica que a segregação ocorre devido a diferença de densidade dos materiais, fazendo com que a parte maior e mais pesada desça para o fundo ou também em razão do excesso de água.

Para avaliar a resistência à segregação do concreto é utilizado o método da coluna de segregação e da peneira conforme a ABNT NBR 15823-6 (2017), no entanto esse ensaio pode ser dispensável, visto que é possível analisar essa propriedade por outros ensaios como o Slump Flow Test t_{500} , citado anteriormente.

2.1.4.3 Habilidade passante

Diz respeito a capacidade do material de passar pela armadura, mantendo-se uniforme, sem segregar. Tutikian e Dal Molin (2008) afirmam que essa característica interfere também no estado endurecido e funciona como um parâmetro de qualidade, visto que o CAA deve ser adensado apenas pelo seu próprio peso, sem a influência de nenhum tipo de vibração e compactação.

Para analisar a habilidade passante do concreto são realizados os métodos do anel J, caixa L e funil V, descritos pelas partes 3,4 e 5, respectivamente da NBR 15823 (2017).

2.1.5 Propriedades no estado endurecido

Apesar das principais vantagens de o uso de concreto autoadensável estarem atreladas às propriedades no estado fresco, sua aplicação de maneira efetiva em

elementos estruturais depende das propriedades no estado endurecido (CAVALCANTI, 2006).

Segundo Matos (2019), as principais propriedades a serem observadas são resistência mecânica, módulo de elasticidade e a durabilidade que o concreto deve proporcionar à estrutura, para que seja preservado seu bom desempenho ao longo da vida útil, previamente estabelecida.

Dentre as propriedades mecânicas, Polucha (2016) considera a resistência à compressão como sendo de fundamental importância para a avaliação de concretos no estado endurecido, por exibir uma apresentação geral da qualidade do concreto, analisada conforme abordado na ABNT NBR 5739 (2018). Essa resistência é consequência da influência de diversos fatores, que incluem características e proporções dos materiais, condições de cura e parâmetros de ensaio, onde a dosagem dos materiais é um fator significativo para atingir a resistência estabelecida (VIEIRA, 2021).

Outros fatores que interferem na resistência à compressão, são a relação água/cimento e a porosidade, considerando que se atinge a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em relação ao módulo de elasticidade, podemos descrevê-lo como a associação entre a tensão aplicada e a deformação elástica para um limite de proporcionalidade adotado (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Considera-se que o módulo de elasticidade serve para avaliar estruturas, cujos elementos devem apresentar deformações compatíveis com seu uso. O ensaio realizado para determinação dessa característica deve ser feito de acordo com a ABNT NBR 8522 (2021).

Já a durabilidade, é definida por Silva (2005) como a habilidade do concreto de preservar suas características, mesmo estando exposto à ação de intempéries, ataques físicos e químicos, destacando-se como um parâmetro a ser analisado no dimensionamento de estruturas de concreto. Esta propriedade é determinada pela ABNT NBR 6118 (2014), a qual determina critérios para garantir que seja atendida nas obras de concreto, levando em consideração nos cálculos estruturais os estados limites últimos, estados limites de serviço e especificando os materiais utilizados, para garantir o desempenho do concreto para o qual foi projetado (CALADO et al., 2015).

2.2 Resíduo de scheelita

A scheelita é um mineral constituído por Tungstato de Cálcio de fórmula CaWO_4 ($\text{CaO} = 19,4\%$ e $\text{WO}_3 = 80,6\%$), e consiste em uma matriz considerável de Tungstênio (W), elemento químico usado nas indústrias metalúrgica, bélica, elétrica, mecânica, aeroespacial e petrolífera para a fabricação de diversos itens, por apresentar características como boa condutividade elétrica, elevado ponto de fusão (3.419°C) e alta densidade ($19,3\text{ g/cm}^3$). Entre alguns materiais que utilizam o tungstênio em sua composição estão caixas pretas de avião, brocas de sondas de perfuração para petróleo e nas ferramentas da indústria bélica (MEDEIROS, M. 2016; SOUZA, 2019).

As principais fontes de scheelita no Brasil estão localizadas nas minas do Rio Grande do Norte e Paraíba, tornando a região conhecida como Província Scheelitífera do Seridó, com aproximadamente 700 pontos de exploração distribuídos em uma área em torno de 20.000 km^2 (ALMEIDA et al., 2016).

Para essa pesquisa foi utilizado o resíduo proveniente da Mina Brejuí, situada no município de Currais Novos-RN, classificada como a maior mina de scheelita da América do Sul (PAIVA, 2013). Esse resíduo é resultado do processo de beneficiamento do mineral, considerado bem rudimentar, no qual depois da fase da cominuição, passa por métodos gravimétricos, servindo-se dos aspectos físicos dos materiais, a exemplo da densidade, e utilizando mesas vibratórias e jigsawes. É realizada a princípio uma etapa por jigagem, onde se acumula a porção com maior granulometria, enquanto o resíduo do jigage abastecer as mesas, produzindo o acumulado final (FERNANDES, 2011).

Ramos Filho (2021) explica que desse processo derivam três materiais: a scheelita, uma mistura de scheelita com resíduo e um resíduo semelhante a areia, que é a parte mais grossa. O segundo material é retirado e levado a um equipamento com uma hélice, sendo conduzido a outras mesas de concentração. Extraída toda a scheelita do composto, transporta-se o restante para o classificador, onde será feita a divisão da parte mais grossa e da parte fina com água. A lama mais úmida é encaminhada para um recipiente com o intuito de amenizar sua turbidez para que possa ser reaproveitada com a água e a lama mais seca é transportada para um depósito em ambiente aberto. Depois de seca essa lama

resulta em um resíduo fino. Portanto, desse processo derivam dois resíduos, um fino e um grosso (Figura 2).

Figura 2 - Resíduo grosso e fino de scheelita, respectivamente.



Fonte: Autor (2022).

De acordo com Paiva (2013) são gerados aproximadamente 50m³ de resíduos por dia, resultando em 18.000 m³ anualmente, originados pela produção na Mina Brejuí. Os quais provocam um impacto relevante ao ambiente, pois a extração da scheelita em si já trata-se de um processo poluente, além do processo de beneficiamento, e seus resíduos que se descartados de maneira incorreta em montantes a céu aberto também podem ocasionar uma série de problemas à natureza e a população local. Com isso, diversos trabalhos tem sido desenvolvidos por pesquisadores, com o intuito de promover a reutilização desses resíduos.

2.3 Impactos ambientais e sustentabilidade

As atividades antrópicas realizadas para suprir a demanda de consumo humano, incentivadas pelos padrões da sociedade atual, fazem uso de recursos naturais e manufaturados, ocasionando a formação de resíduos que podem ser sólidos, semi-sólidos ou líquidos. Enquanto que seu processo produtivo também gera impactos ao ambiente acarretando mudanças de aspecto físico, químico e biológico, intervendo nas relações entre o meio biótico e abiótico (MEDEIROS, 2019).

A exemplo disso, temos a mineração, uma atividade que está em crescimento constante no Brasil. Dados do Ministério da Casa Civil (2020) apontam uma alta de 36% do faturamento do setor em 2020, se comparado ao ano anterior. Como

consequência dessa produção é gerado todos os dias um volume significativo de resíduo, que na maioria das vezes é depositado em montantes a céu aberto, resultando em uma série de problemas.

Podem causar desde uma aparência negativa, à poluição do ar, contaminação do lençol freático, degradação do relevo e do solo do local onde é descartado (Souza, 2019). Além disso, segundo Medeiros, M. (2016), apesar de a forma como o resíduo é armazenado não ser colocada como o motivo direto para o rompimento de barragens, é um fator que influencia para que isso aconteça, como o ocorrido com a barragem de rejeitos de Samarco, acarretando graves impactos socioambientais, com o desgaste da bacia do Rio Doce e a morte de pessoas.

Nesse contexto, outra atividade que gera danos ao meio ambiente é a construção civil, pois apresenta uma cadeia produtiva formada por fases que necessitam de recursos naturais e econômicos, tendo início com a extração de matéria-prima, passando pela fabricação e deslocamento de insumos e ferramentas, até a etapa da construção, demolição e descarte dos resíduos oriundos do processo construtivo (PAIVA, 2013).

A indústria da construção civil utiliza de mais de 50% dos recursos naturais do planeta conforme o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2009). O que vem motivando diversos estudos para encontrar alternativas que possam substituir a matéria-prima, e minimizar os impactos gerados por esse consumo. A exemplo disso, tem-se pesquisas cujos temas se baseiam na reutilização de rejeitos da mineração para substituir agregados ou até mesmo emprega-los como finos em argamassas e concretos.

Adiante serão apresentados alguns estudos realizados com o reaproveitamento de resíduos da mineração para a produção de materiais de construção.

Sousa (2020) desenvolveu um estudo sobre concretos leves autoadensáveis utilizando agregados leves provenientes do reaproveitamento de rejeitos da agroindústria e mineração, respectivamente, agregados com o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e o resíduo da produção de scheelita (RPS), comparando-o com o concreto leve autoadensável fabricado com agregado comercializado no Brasil, a argila expandida. Os resultados mostraram-se satisfatórios para a produção de concretos leves autoadensáveis com agregados leves não convencionais. Todos

os traços apresentaram valores condizentes com a norma, tanto no estado fresco como no endurecido, com massa específica final variando entre 1,94 a 2,03 g/cm³ e resistência à compressão aos 28 dias entre 36,72 a 26,11 MPa.

Medeiros, M. (2016) analisou a utilização do resíduo de scheelita em argamassas de revestimento, em que ao examinar o resíduo observou-se que o mesmo apresentava granulometria semelhante à da areia natural, porém com uma quantidade maior de finos e massa específica superior. No estado fresco obteve melhorias na retenção de água, além de valores maiores para a densidade de massa e menores para o teor de ar incorporado, quando comparado ao traço convencional, produzindo assim um material com menor trabalhabilidade e mais denso. Quanto ao estado endurecido, para a absorção de água por imersão e capilaridade foram obtidos resultados superiores a argamassa de referência, assim como na resistência em que os melhores resultados foram os da argamassa com 100% de substituição do agregado natural pelo resíduo de scheelita.

Medeiros (2019) buscou desenvolver concretos sustentáveis, usando 15% do resíduo do pó de porcelanato e 81% do resíduo de scheelita, como substituição de cimento e areia, respectivamente. Ao final do estudo foram obtidos índices satisfatórios de trabalhabilidade, faixa similar de resistência, menores valores de absorção e porosidade total, maior resistência à penetração de íons cloreto e microestrutura densificada de C-S-H rodeado de placas hexagonais de hidróxidos de cálcio, se comparado ao concreto de referência.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada para esta pesquisa consiste na produção de três traços de concreto autoadensável contendo resíduos grosso e fino de scheelita para análise de suas propriedades físicas, químicas e reológicas. Após a dosagem inicial, o traço com 50% do aditivo dosado segregou e não apresentou boa fluidez (Figura 3). Ao aumentar o aditivo para o máximo permitido, o concreto continuou a apresentar segregação e também exsudação (Figura 4), justificada pela falta de finos na mistura. Dessa forma, foi definido que para cada traço seria adicionado 20% de resíduo fino de scheelita, com o objetivo de melhorar as propriedades do concreto no estado fresco.

Figura 3 - Concreto de referência com 50% do aditivo dosado.



Fonte: Autor (2022).

Figura 4 - Concreto de referência com 100% do aditivo dosado.



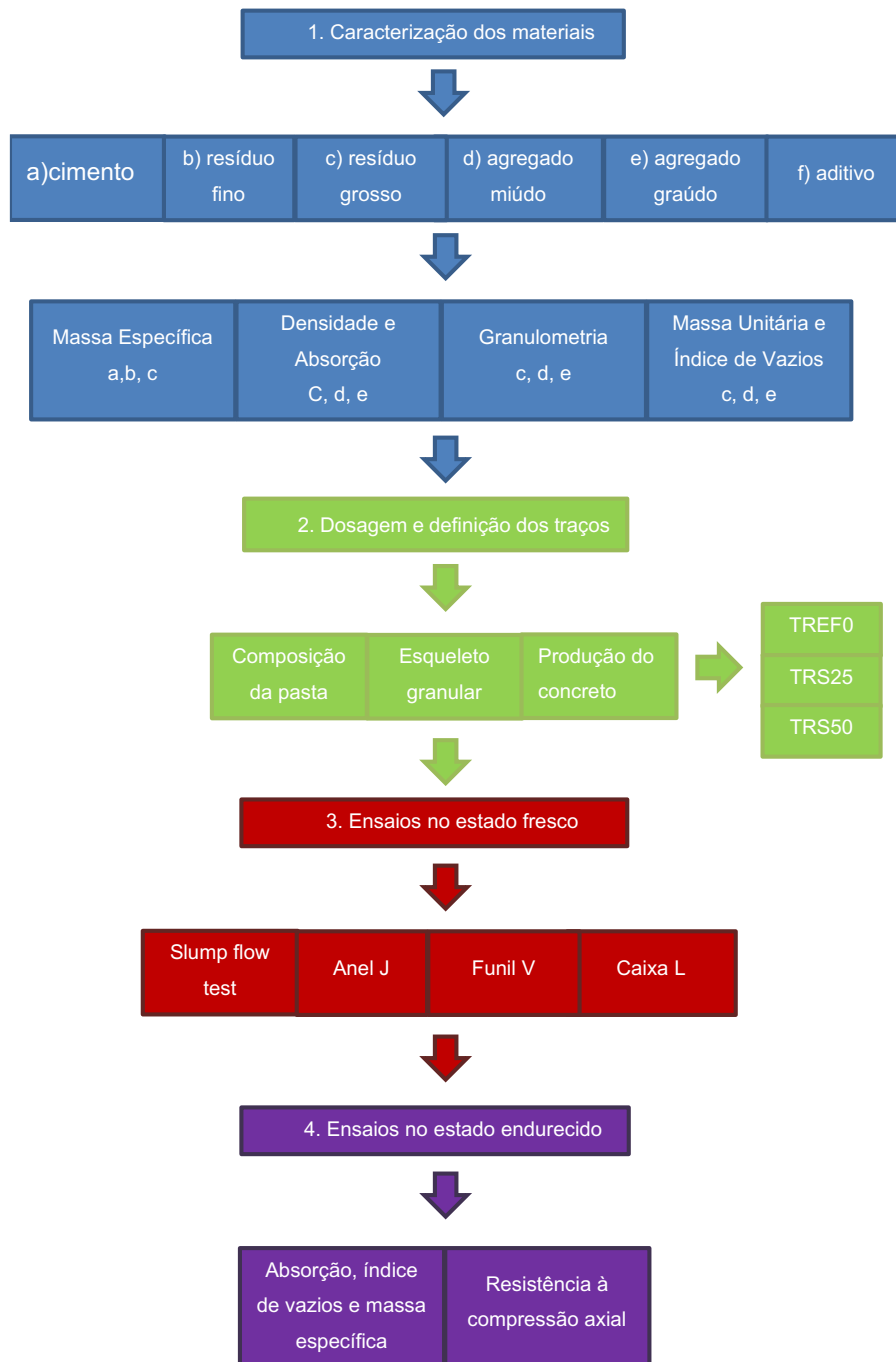
Fonte: Autor (2022).

Além do resíduo fino em todos os traços, no segundo traço foi realizada a substituição de 50% do agregado miúdo pelo resíduo grosso de scheelita e no terceiro traço 25%.

Adiante, serão descritos os materiais e métodos adotados para o trabalho, com base nas normas regulamentadoras. A etapa experimental dessa pesquisa foi realizada no Laboratório de Resíduos Sólidos e no Laboratório de Materiais de Construção e Técnicas Construtivas, ambos da Universidade Federal de Campina Grande, campus Pombal.

A metodologia da pesquisa foi realizada em quatro etapas, conforme mostrado no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.



Fonte: Autor (2022).

3.1 Caracterização dos Materiais

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland composto com Fíler, que apresenta resistência à compressão mínima aos 28 dias de 32 MPa (CPII F 32), foi o cimento utilizado para a pesquisa, por ser facilmente encontrado no mercado local e possuir uma constituição que obedece às normas da EFNARC. O ensaio de massa específica para caracterização desse material foi realizado conforme a ABNT NBR 16605 (2017), empregando para isso o frasco de Le Chatelier (Figura 6).

Figura 6 - Ensaio de massa específica do cimento.



Fonte: Autor (2022).

3.1.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado é originário de uma pedreira, localizada às margens da BR-230, no município de São Mamede/PB. E possui um diâmetro máximo característico de 9,5 milímetros, sendo catalogado no comércio como brita 0.

O agregado foi submetido ao ensaio de granulometria por peneiramento, descrito pela ABNT NBR NM 248 (2003), para a determinação da composição granulométrica. Já para a obtenção da massa unitária e índice de vazios realizou-se

o ensaio de acordo com o método A da ABNT NBR 16972 (2021). A determinação da densidade e absorção de água foi executada de acordo com as prescrições da ABNT NBR 16917 (2021) (Figura 7).

Figura 7 - Ensaio para determinação da densidade e absorção de água da brita.



Fonte: Autor (2022).

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo consiste em uma areia natural, de granulometria média, coletado no território da UFCG, campus Pombal/PB. Para sua caracterização foram realizados os ensaios para determinação da densidade e absorção de água (Figura 8), baseado na ABNT NBR 16916 (2021), determinação da massa unitária e índice de vazios, usando o método A, conforme a ABNT NBR 16972 (2021) e granulometria por peneiramento descrita pela ABNT NBR NM 248 (2003).

Figura 8 - Ensaio de densidade da areia.



Fonte: Autor (2022).

Para a produção de concreto autoadensável, quanto menor o módulo de finura melhor será o agregado, pois essa característica é responsável por melhorar a fluidez da mistura. No entanto, em casos como o presente trabalho em que se utiliza uma areia média, faz-se necessário o uso de finos, visando melhorar a consistência da mistura e evitar a segregação.

3.1.4 Aditivo

Foi utilizado como aditivo o Sika® ViscoCrete®-6090 hw (Figura 9), superplastificante líquido de pega normal com cor marrom, indicado para concreto de alta resistência inicial, concreto de alto desempenho (CAD) e concreto autoadensável (CAA), proporcionando a esses a redução de água, mantendo a fluidez e coesão da mistura.

Figura 9 - Aditivo superplastificante Sika.



Fonte: Autor (2022).

Os dados do produto disponibilizados pelo fabricante estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados do aditivo.

Composição	PH	Densidade (kg/l)	Dosagem (%)
Solução de policarboxilato em meio aquoso	$3,7 \pm 1,0$	$1,08 \text{ kg} \pm 0,02$	0,7 à 1,8

Fonte: Ficha técnica do produto.

3.1.5 Resíduos de scheelita

Os resíduos foram coletados na Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos- RN, provenientes do processo de extração e beneficiamento da scheelita. O resíduo grosso vem sendo explorado em inúmeras pesquisas para a substituição do agregado miúdo, por apresentar uma granulometria semelhante a areia, como Souza (2019) que utilizou essa substituição na produção de argamassas, Ferreira (2020) que fez esse procedimento para a fabricação de pavers e Paiva (2013) que avaliou o uso do resíduo grosso de scheelita no concreto de cimento Portland. Com base nisso foram realizados os ensaios para caracterização desse resíduo com base nas normas: NBR 16916 (2021), que determina a densidade e absorção de água (Figura 10); NBR 16972 (2021), através do método A, responsável por apontar a metodologia para obtenção da massa unitária e índice

de vazios e a ABNT NBR NM 248 (2003) que descreve o ensaio de granulometria por peneiramento.

Figura 10 - Ensaio de densidade e absorção de água do resíduo grosso.



Fonte: Autor (2022).

O resíduo fino se trata de um material inerte, ainda pouco estudado e com aspecto de pó. Por isso, foi caracterizado utilizando as instruções descritas pela ABNT NBR 16605 (2017), que determina a massa específica do cimento. Para a realização do ensaio o material foi destorroado e passado na peneira n°100.

3.2 Estudo da dosagem e definição dos traços

Para a pesquisa foi utilizado o método de Gomes (2002), que se baseia na otimização da pasta separada do esqueleto granular, a fim de se obter a constituição adequada dessa pasta, para que a mistura seja considerada um concreto autoadensável.

Inicialmente foi proposta a produção de um concreto com materiais convencionais, encontrados na região, como: areia, cimento Portland CII F 32, brita zero, água e aditivos. No entanto, ao realizar o primeiro teste da dosagem verificou-se a necessidade de incluir uma maior proporção de finos à mistura, para que se tornasse mais homogênea, sem exsudação e segregação. Com isso, foi empregado o RFS da scheelita, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, pois apresenta um aspecto de pó.

Ao realizar alguns testes com menores proporções chegou-se a quantidade de 20% por traço, que foi a quantidade mínima alcançada para suprir a necessidade de finos e tornar o concreto autoadensável, por isso foi aplicada essa mesma proporção em todos os traços. A partir daí se sucedeu o cálculo de todos os materiais em volume para a execução do concreto autoadensável com uma resistência de 25 MPa aos 28 dias.

Após essa etapa definiu-se o traço de referência sem o resíduo grosso, e em seguida foi produzido um traço com a substituição de 50% da areia pelo resíduo. Depois de observar o desempenho dessa mistura no estado fresco, realizou-se um último traço com 25%, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Proporções de substituição da areia média pelo resíduo grosso da scheelita.

Composição	Areia Média (%)	Resíduo grosso de scheelita (%)
TREF	100	0
TRS25%	75	25
TRS50%	50	50

Fonte: Autor (2022).

3.2.1 Composição da pasta

Foi definida uma relação água/cimento de 0,55, considerando um concreto de classe de agressividade II, com pequeno risco de deterioração da estrutura, conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 12655 (2015). E classe de resistência C25, de acordo com a Tabela 2 da mesma norma.

Para o cálculo do consumo de cimento foi utilizada a Equação (1), de acordo com o Método proposto por Gomes et al. (2002), onde V_p representa um volume da pasta de 1 m³, “a/c”, “sp/c”, “f/c”, são as proporções de água, superplastificante, e fíler, respectivamente, em relação ao cimento. E ρ corresponde a massa específica desses materiais.

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

O teor de aditivo superplastificante inicial foi fixado em 1,5%, que está entre os intervalos de 0,7% e 1,8% descritos pela ficha técnica do produto e determinado

a partir de testes com 2 litros de concreto. No entanto, durante o processo de mistura dos materiais na betoneira, realizava-se o ajuste dessa quantidade de acordo com a fluidez que o material apresentava, visando impedir o excesso de aditivo, que pode causar a exsudação e segregação do concreto, além de interferir na resistência do mesmo.

3.2.2 Determinação do esqueleto granular

O esqueleto granular é obtido a partir do método do empacotamento, onde ao final do ensaio são aferidas as densidades dos agregados secos, sem nenhuma compactação e selecionada a proporção que obtiver menor teor de vazios e maior densidade (GOMES; BARROS, 2009).

De acordo com Sotomaior (2017) esse método visa ocupar os vazios de maneira que os espaços deixados pelos grãos maiores são preenchidos pelos menores, reduzindo o consumo da pasta de cimento e conseqüentemente o valor final do concreto, sem interferir nas suas propriedades.

O empacotamento é feito adicionando uma mistura de agregados em um recipiente de volume conhecido e pesando-o para se obter a massa unitária (w_u), pela Equação 2. Utilizando dos resultados dos ensaios para massa específica seca dos agregados e da porcentagem inserida de cada um, é possível calcular por meio da Equação 3 a massa específica (ρ_{dm}) e através da Equação 4, o teor de vazios (v).

$$w_u = w_t / v_t \quad (2)$$

$$\rho_{dm} = (\rho_s \cdot s / a(\%) + \rho_b \cdot b / a(\%))/100 \quad (3)$$

$$v(\%) = (\rho_{dm} - w_u) / \rho_{dm} \times 100\% \quad (4)$$

Gomes e Barros (2009) recomendam que esse processo seja realizado no mínimo duas vezes e ao final é definida a porcentagem de agregado graúdo e miúdo com menor teor de vazios e maior massa unitária que deve ser utilizada nas dosagens.

O procedimento foi então realizado 5 vezes, com diferentes proporções mostradas na Tabela 3 de areia média (agregado miúdo) e brita zero (agregado graúdo), utilizando-se de um molde de concreto cilíndrico com volume de 1,57 litros.

Tabela 3 - Proporção em porcentagem de agregados utilizados no empacotamento.

Areia	Brita 0
65%	35%
60%	40%
55%	45%
50%	50%
45%	55%

Fonte: Autor (2022).

3.2.3 Procedimento da mistura

Após obter os resultados referentes ao consumo de todos os materiais em volume e massa, foi realizada a mistura utilizando uma betoneira. Porém, antes de dar início ao procedimento, todos os equipamentos foram umedecidos e depois deixou-se escorrer a água, para então começar a adicionar os componentes conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Procedimento da mistura.

Ordem de adição dos materiais	materiais	tempo de mistura (min.)
1°	Brita + areia + 50% da água	1
2°	Cimento + areia + resíduo + 50% água	1
3°	Resíduo fino	1,5
4°	Aditivo superplastificante	1,5

Fonte: Autor (2022).

Dessa forma realizou-se os 3 traços e para cada um foram executados os ensaios no estado fresco, sempre na mesma sequência, slump flow test, anel J, funil V e caixa L, de acordo com a NBR 15823 (2017). Considerando o desempenho no primeiro ensaio era adicionado ou não mais aditivo, com o cuidado para não ultrapassar a quantidade referente a 1%.

Ao final desses ensaios, o concreto era moldado em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm, com uma camada interna de desmoldante para facilitar sua remoção. Após 24 horas, eram desmoldados e imediatamente levados para a cura em água a uma temperatura de aproximadamente 25°C. Para cada traço foram moldados 9 corpos de prova, os quais 3 seriam usados para ensaios de absorção, massa específica e índices de vazios, para avaliar a resistência aos 7 dias e 28 dias.

3.3 Ensaios do CAA no estado fresco

3.3.1 Slump flow test

Através da realização do slump é possível avaliar a fluidez do CAA e sua habilidade passante em fluxo livre, por meio da média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro do espalhamento, sendo classificado conforme a Tabela 5.

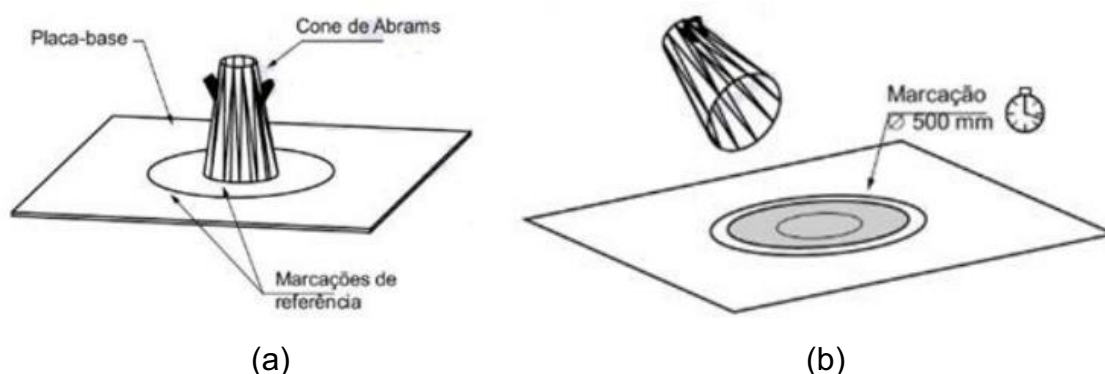
Tabela 5 - Classes de espalhamento.

Classe	Espalhamento (mm)	Aplicação
SF 1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre. Estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto autoadensável
SF 2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes.
SF 3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).

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

Para a realização do ensaio foram utilizados o cone de Abrams, uma placa base metálica com a marcação de 500 mm como na Figura 11 e um cronômetro, conforme prescrito pela NBR 15823-1 (2017).

Figura 11 - Placa base utilizada do slump flow test. (a) Perspectiva. (b) Execução do ensaio.



Fonte: ABNT NBR 15823-2 (2017).

Antes de dar início ao ensaio, o cone e a placa foram umedecidos e nivelados. Em seguida o concreto foi despejado no cone sem nenhuma vibração ou compactação. Após encher e arrasar o mesmo com uma colher de pedreiro, o cone é retirado no sentido vertical. Ao final do escoamento são realizadas duas medidas perpendiculares m_1 e m_2 , que determinam o espalhamento.

Durante esse processo é medido o tempo entre o início do escoamento e o momento em que o CAA atinge a marca dos 500 mm (T_{500}). Com esse resultado é analisada a viscosidade plástica aparente de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Classes de viscosidade plástica aparente T_{500} (sob fluxo livre).

Classe	T_{500} (s)	Aplicação
VS 1	≤ 2	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação. Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.
VS 2	> 2	Adequado para a maiorias das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.

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

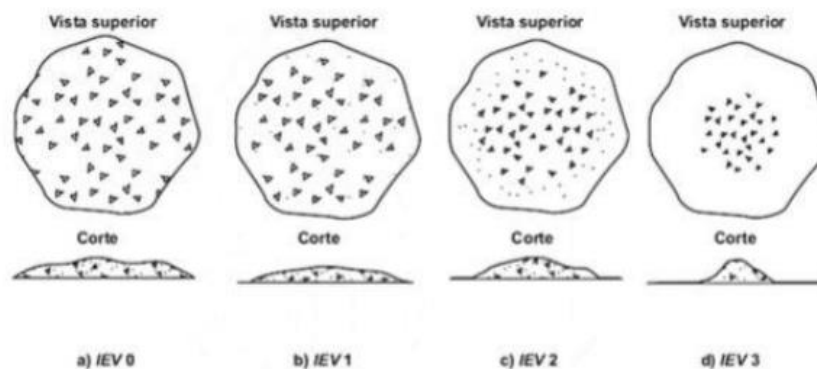
Também foi analisado ao longo do ensaio o índice de estabilidade visual (IEV), o qual classifica o concreto em quatro classes (Tabela 7), baseado na distribuição dos agregados e da pasta, observando se há exsudação ou segregação na mistura, como representado pela Figura 12.

Tabela 7 - 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 (≤ 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).

Figura 12 - Classes do índice de estabilidade visual (IEV).

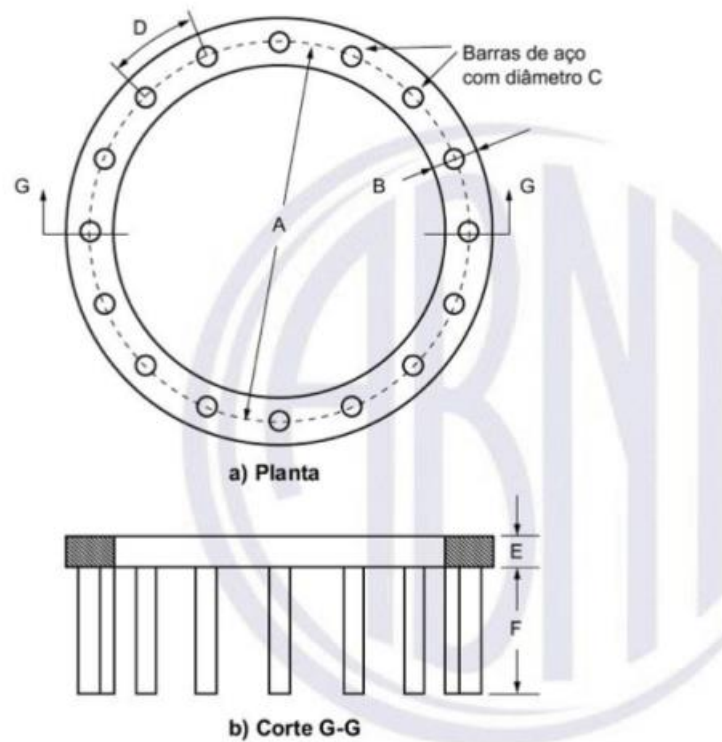


Fonte: NBR 15823-2 (2017).

3.3.2 Anel J

Outro método usado para analisar as propriedades do CAA no estado fresco é o método do anel J, que se assemelha ao slump, porém com a utilização de um equipamento descrito pela ABNT NBR 15823-3 (2017), que deve apresentar 300 mm de diâmetro, 120 mm de altura, com barras de aço distribuídas verticalmente com 16 mm de diâmetro a cada 59 mm, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Anel J.



Fonte: NBR 15823-3 (2017).

Os procedimentos para o ensaio foram basicamente os mesmos do slump, com o acréscimo do anel J em torno do cone de Abrams, que deve ser colocado com a base menor para baixo, como representado pela Figura 14.

Figura 14 - Aparelhagem para o ensaio com anel J.



Fonte: Autor (2022).

Como resultado do ensaio temos a média realizada com as medidas perpendiculares dos diâmetros após o espalhamento. E a partir daí é feita a diferença entre a média do ensaio anterior e essa, utilizada para classificar o concreto quanto a sua habilidade passante conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Classe de habilidades passantes do CAA em função da sua aplicação.

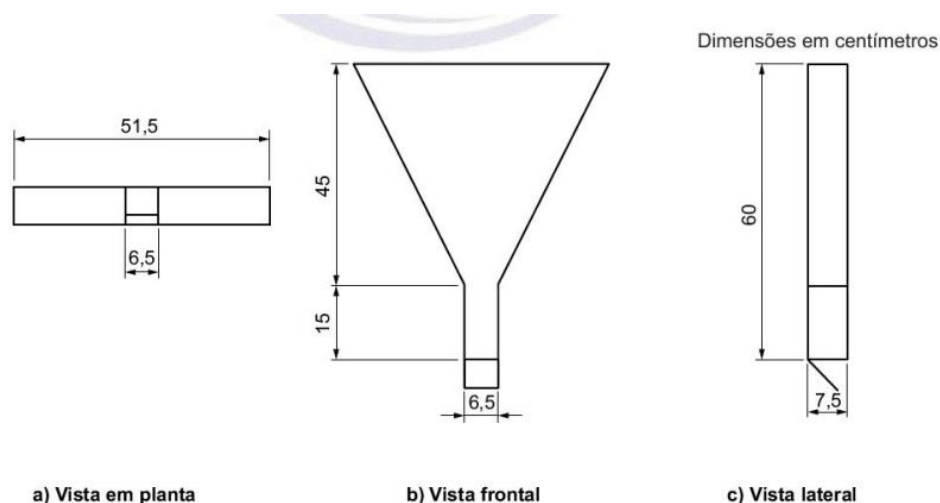
Classe	Anel J (mm)
PL 1/ PJ 2	25 mm a 50 mm com 16 barras de aço.
PL 2/ PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço.

Fonte: NBR 15823-1 (2017).

3.3.3. Funil V

Normatizado pela ABNT NBR 15823-5 (2017), esse ensaio visa analisar a viscosidade do CAA, através da medida do tempo em que o concreto leva para escoar sob fluxo confinado. Para isso, foi utilizado um funil com dimensões apresentadas na Figura 15, o qual foi preenchido totalmente por concreto e após 10 segundos foi aberta a comporta localizada na parte inferior do funil, registrando-se o intervalo de tempo para o escoamento completo do material ($T_{10\text{ seg}}$).

Figura 15 - Detalhamento do funil V.



Fonte: NBR 15823-5 (2017).

Com o tempo de escoamento obtido por meio do ensaio foi realizada a classificação do CAA com relação a viscosidade plástica aparente utilizando a Tabela 9.

Tabela 9 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo Funil V (sob fluxo confinado).

Classe	Funil V (s)	Aplicação
VF 1	< 9	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação. Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.
VF 2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.

Fonte: NBR 15823-1 (2017).

3.3.4. Caixa L

Assim como o método do anel J, o ensaio de caixa L também é responsável por analisar a habilidade passante, porém sob fluxo confinado. O ensaio é especificado pela ABNT NBR 15823 - 4 (2017) e fundamenta-se em observar se o concreto consegue atravessar obstáculos como as armaduras, sem dificuldades, sob a ação apenas do seu peso próprio.

O ensaio consiste em preencher a parte vertical da caixa com o CAA, mantendo a comporta fechada. Após encher totalmente e retirar o excesso com uma colher de pedreiro, espera-se (60 ± 10) s e em seguida realiza-se a abertura da comporta, atentando-se ao deslocamento do concreto pela grade, evidenciando sua habilidade passante (Figura 16).

Figura 16 - Caixa L.



Fonte: Autora (2022).

Por fim, são aferidas alturas do início (H_1) e do final (H_2) da superfície do concreto na parte horizontal da caixa L, para o cálculo da habilidade passante (HP), através da Equação 5. Com o resultado é feita a classificação do concreto quanto a habilidade passante sob fluxo confinado, por meio da Tabela 10.

$$HP = \frac{H_2}{H_1} \quad (5)$$

Tabela 10 - Classes de habilidade passante pela Caixa L (sob fluxo confinado).

Classe	Caixa L (H2/H1)	Aplicação
PL 1	≥ 0,80, com duas barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm.
PL 2	≥ 0,80, com três barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm.

Fonte: NBR 15823-1 (2017).

3.4 Ensaios do CAA no estado endurecido

3.4.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Esses ensaios foram realizados após a cura do concreto por imersão em água após 28 dias, utilizando 3 corpos de prova de cada traço. O processo realizado no ensaio é descrito pela ABNT NBR 9778 (2009) e foi realizado no Laboratório de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Campina Grande, campus Pombal.

Após o período de cura, os corpos de prova foram retirados do tanque e levados para o laboratório, onde foram pesados submersos em água, em uma balança hidrostática, determinando a massa da amostra saturada imersa em água (m_1).

Logo depois, retirou-se os corpos de prova da água, enxugou-os com um pano úmido a fim de remover a umidade superficial, e em seguida foi efetuada a pesagem, determinando a massa saturada com superfície seca (m_{sat}).

E por último, o material foi levado a estufa à uma temperatura de 105°C por 72 horas ou até que duas pesagens sucessivas, com intervalos de 24 horas não apresentassem diferença de 0,5% em relação a menor massa. Ao retirar da estufa, foram deixados em temperatura ambiente para esfriar e em seguida pesados, determinando a massa seca em estufa (m_s).

Com os dados fornecidos pelo ensaio foram calculados o índice de vazios (I_v) pela Equação 6, a absorção ($Ab_{IMERSÃO}$) por meio da Equação 7, a massa específica da amostra seca (ME_{SECA}) a partir da Equação 8, a massa específica da amostra saturada (ME_{SAT}) pela Equação 9 e a massa específica real (ME_{REAL}) através da Equação 10.

$$Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (6)$$

$$AB_{IMERSÃO} = \frac{msat - ms}{ms} \quad (7)$$

$$ME_{SECA} = \frac{ms}{msat - mi} \quad (8)$$

$$ME_{SAT} = \frac{msat}{msat - mi} \quad (9)$$

$$ME_{REAL} = \frac{ms}{ms - mi} \quad (10)$$

3.4.2 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi executado conforme a prescrição da ABNT NBR 5739 (2018) e foi realizado para as idades de 7 e 28 dias, com 3 corpos de prova por traço para cada idade. Antes de ser rompido, o concreto foi moldado e depois de 24 horas desmoldado e levado à cura, imerso em água até o dia do seu rompimento.

Nos períodos mencionados, os corpos de prova de concreto foram rompidos em uma prensa hidráulica (Figura 17), com carga máxima de 200 toneladas-força e precisão de 10 kgf. Porém antes disso, foram retificados para nivelar suas faces e garantir que as cargas aplicadas seriam distribuídas uniformemente.

Figura 17 - Prensa hidráulica.



Fonte: Autor (2022).

O cálculo da resistência foi efetuado a partir da Equação 11, da ABNT NBR 5739 (2018).

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (11)$$

Em que:

f_c : resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa).

F : força máxima alcançada, expressa em newtons (N).

D : diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Cimento

A caracterização do cimento (CP II F 32) foi realizada através da determinação da massa específica desse material, apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Caracterização do cimento Portland.

Propriedade	Norma	Valor	Unidade
Massa específica	ABNT NBR 16605 (2017)	3,05	g/cm ³

Fonte: Autor (2022).

4.1.2. Agregado Graúdo

Os resultados obtidos para a caracterização do agregado graúdo com relação a suas propriedades físicas estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades físicas do agregado graúdo.

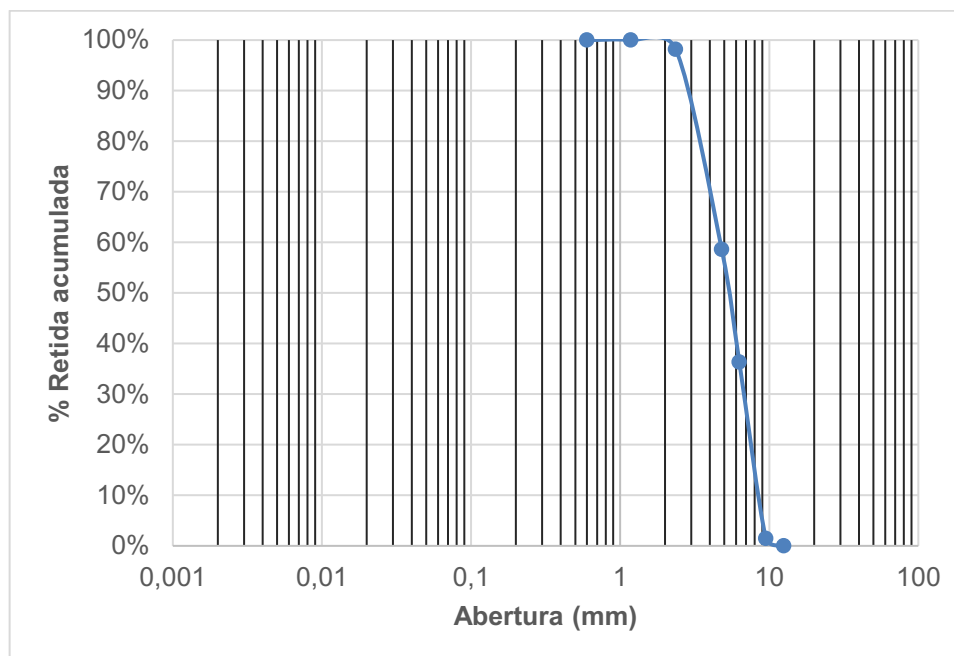
Propriedades	Normas	Valores	Unidades
Massa específica do agregado na condição seca	ABNT NBR 16917 (2021)	2,52	g/cm ³
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca	ABNT NBR 16917 (2021)	2,59	g/cm ³
Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021)	1,53	g/cm ³
Índice de vazios	ABNT NBR 16972 (2021)	39,17	%

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 18 está apresentada a curva granulométrica do agregado graúdo, de onde são extraídas informações para o cálculo do módulo de finura, obtendo-se um valor de 3,4 e da dimensão máxima característica (DMC), cujo resultado é igual a 9,5 mm, sendo assim denominado de brita 0, como utilizado por Ferreira (2019),

Fengler (2020) e Vieira (2021). Conforme Higuchi (2018) em concretos com menor DMC são constatadas maiores resistências à compressão.

Figura 18 - Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Autor (2022).

4.1.3 Agregado miúdo

Na Tabela 13 estão expostos os dados obtidos para a caracterização física do agregado miúdo.

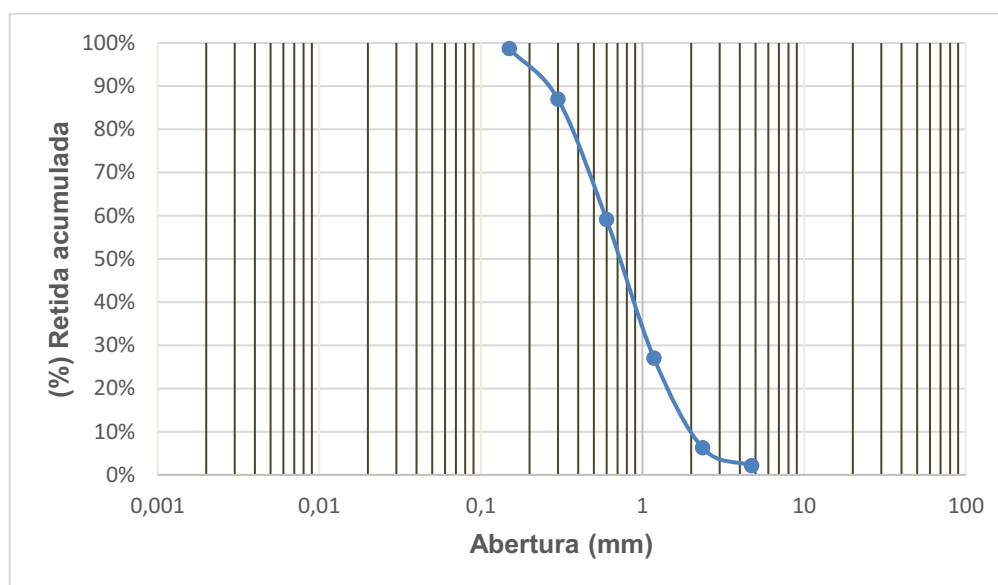
Tabela 13 - Propriedades físicas do agregado miúdo.

Propriedades	Normas	Valores	Unidades
Massa específica do agregado na condição seca	ABNT NBR 16916 (2021)	2,43	g/cm ³
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca	ABNT NBR 16916 (2021)	2,57	g/cm ³
Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021)	1,56	g/cm ³
Índice de vazios	ABNT NBR 16972 (2021)	35,84	%

Fonte: Autor (2022).

A Figura 19 apresenta a curva granulométrica da areia, a partir da qual foi calculado o módulo de finura com valor de 2,8, que a classifica como areia média, segundo a ABNT NBR 7211 (2009), estando, portanto, em uma zona utilizável, pois de acordo com Tutikian e Dal Molin (2008) é necessário utilizar areias com módulo de finura inferior a 3, porque acima desse valor pode ocasionar segregação. O DMC obtido foi igual a 4,75 mm.

Figura 19 - Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2022).

4.1.4 Resíduos de scheelita

A caracterização das propriedades físicas do resíduo grosso apresentada na Tabela 14 é semelhante à da areia, portanto realizada conforme as normas para agregado miúdo.

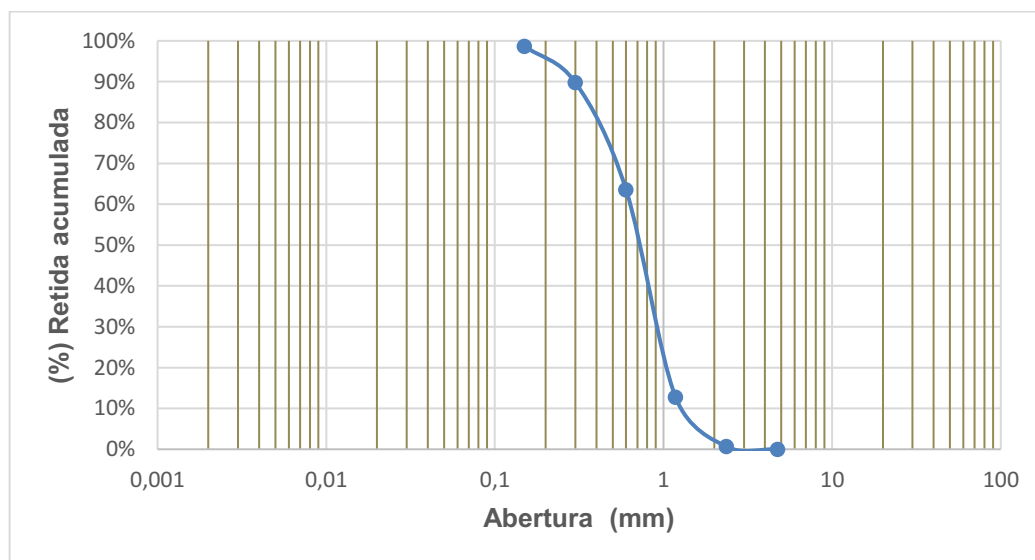
Tabela 14 - Propriedades físicas do resíduo grosso de scheelita.

Propriedades	Normas	Valores	Unidades
Massa específica do agregado na condição seca	ABNT NBR 16616 (2021)	2,49	g/cm ³
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca	ABNT NBR 16616 (2021)	2,69	g/cm ³
Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021)	1,57	g/cm ³
Índice de vazios	ABNT NBR 16972 (2021)	36,95	%

Fonte: Autor (2022).

A Figura 20 mostra a curva granulométrica referente ao resíduo grosso da scheelita, de onde se extrai os valores necessários para determinar o DMC e o módulo de finura, obtendo os valores de 2,36 mm e 2,67, respectivamente. Assim, foi verificada uma semelhança aos resultados de Ferreira (2020), que foram de 2,4 mm para DMC e 2,64 para o módulo de finura. Além disso, constatou-se ainda que o resíduo é mais fino se comparado a areia.

Figura 20 - Curva granulométrica do resíduo grosso de scheelita.



Fonte: Autor (2022).

Para a caracterização do resíduo fino da scheelita foi realizado o ensaio para determinação da massa específica, cujos resultados estão descritos pela Tabela 15.

Tabela 15 - Massa específica do resíduo fino de scheelita.

Propriedade	Norma	Valor	Unidade
Massa específica	ABNT NBR 16605 (2017)	2,99	g/cm ³

Fonte: Autor (2022).

O resultado obtido para massa específica do resíduo fino da scheelita aproxima-se dos resultados de Souza (2019), que é igual a 2,91 g/cm³ e de Medeiros, M. (2016), passante na peneira de n°100, igual a 2,93 g/cm³.

4.2 Dosagem e composição dos traços do CAA

A dosagem dos traços foi realizada de acordo com o método descrito por Gomes et. al (2002), no qual deve-se fazer a análise da pasta separadamente do esqueleto granular. Portanto, inicialmente buscou-se definir as proporções dos materiais constituintes da pasta, a partir da determinação das relações da água, superplastificante e fíler, no caso o resíduo fino da scheelita, em relação à massa de cimento, para depois calcular o consumo desse material.

Os resultados obtidos para as proporções desses materiais são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Proporções dos materiais.

a/c	0,55
sp/c	1,5
f/c	0,2
consumo de cimento (kg/m ³)	428,95

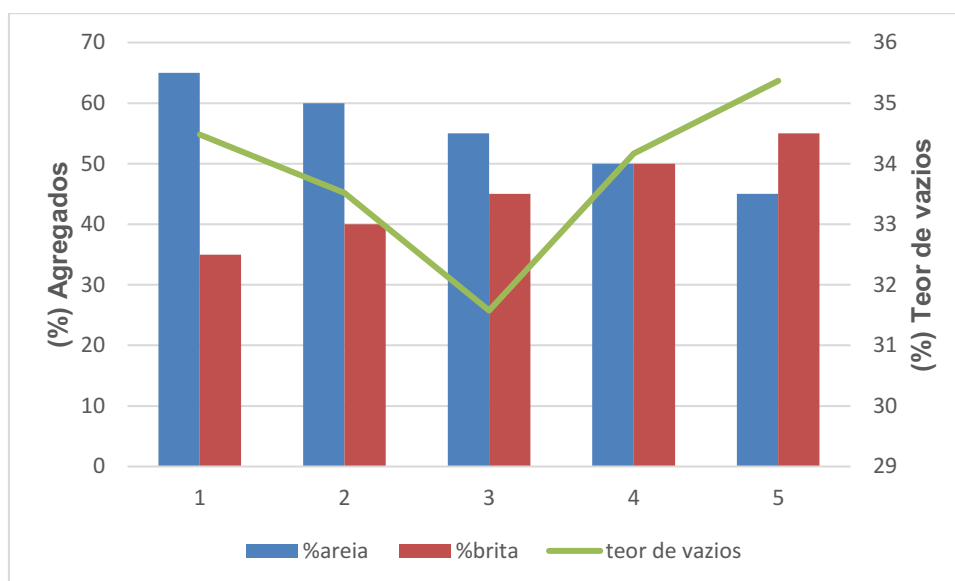
Fonte: Autor (2022).

A quantidade de aditivo superplastificante variou um pouco entre os traços, de acordo com o comportamento do concreto, estando sempre entre 0,8% e 1,5%, no entanto para fins de cálculo foi utilizado sempre o valor de 1,5%.

Quanto ao consumo do cimento, Gomes e Barros (2009) estabeleceram um limite entre 200 a 450 kg/m³, portanto o valor obtido está entre esses parâmetros, além aproximar-se dos resultados de Medeiros, F. (2016) e Santos (2019).

Para determinar a composição do esqueleto granular, foi realizado o empacotamento, escolhendo a partir desse método a porcentagem de agregados que apresentou o menor teor de vazios. O empacotamento foi realizado para cinco proporções diferentes como apresenta a Figura 21.

Figura 21 - Proporção de agregados que compõem o esqueleto granular.



Fonte: Autor (2022).

Como observado no gráfico da Figura 21, a proporção que apresentou menor teor de vazios, sendo igual à 31,57 foi a de 55% de agregado miúdo (areia) para 45% de agregado graúdo (brita). Estudos anteriores utilizaram porcentagens semelhantes, como Polucha (2016), que utilizou 50% de agregado miúdo e 50% de agregado graúdo, e Andrade (2020) e Vieira (2021), que chegaram a porcentagem ideal em 55% de agregado miúdo para 45% de agregado graúdo.

Baseado na definição do esqueleto granular, foi adotado um traço com 40% de volume de pasta, partindo da afirmação de Gomes e Barros (2009) que esse volume deve ser superior ou igual ao teor de vazios, para que se preencha os espaços entre os agregados.

Com isso foi determinado o traço de referência mostrado na Tabela 17. Em que o TREF corresponde ao traço de referência, TRS25 ao com 25% de substituição de agregado miúdo pelo resíduo grosso da scheelita e TRS50 diz respeito a substituição de 50%.

Tabela 17 - Proporções em volume para dosagem do CAA.

Proporções dos materiais (g/cm ³)							
Traço	Cimento	Areia	Resíduo grosso	Brita	Resíduo fino	Água	Aditivo (%)
TREF	1	1,95	0	1,65	0,07	0,55	1,5
TRS25	1	1,46	0,49	1,65	0,07	0,55	1,5
TRS50	1	0,98	0,98	1,65	0,07	0,55	1,5

Fonte: Autor (2022).

A partir das proporções dos materiais mostradas pela Tabela 17 e do consumo do cimento foi calculado o consumo dos demais componentes, apresentados pela Tabela 18.

Tabela 18 - Consumo dos materiais para o CAA.

Consumo de materiais (kg/m ³)							
Traço	Cimento	Areia	Resíduo grosso	Brita	Resíduo fino	Água	Aditivo (%)
TREF	428,95	834,45	0	708,02	28,6	235,92	3,43
TRS25	428,95	625,84	208,61	708,02	28,6	235,92	3,86
TRS50	428,95	417,23	417,23	708,02	28,6	235,92	4,29

Fonte: Autor (2022).

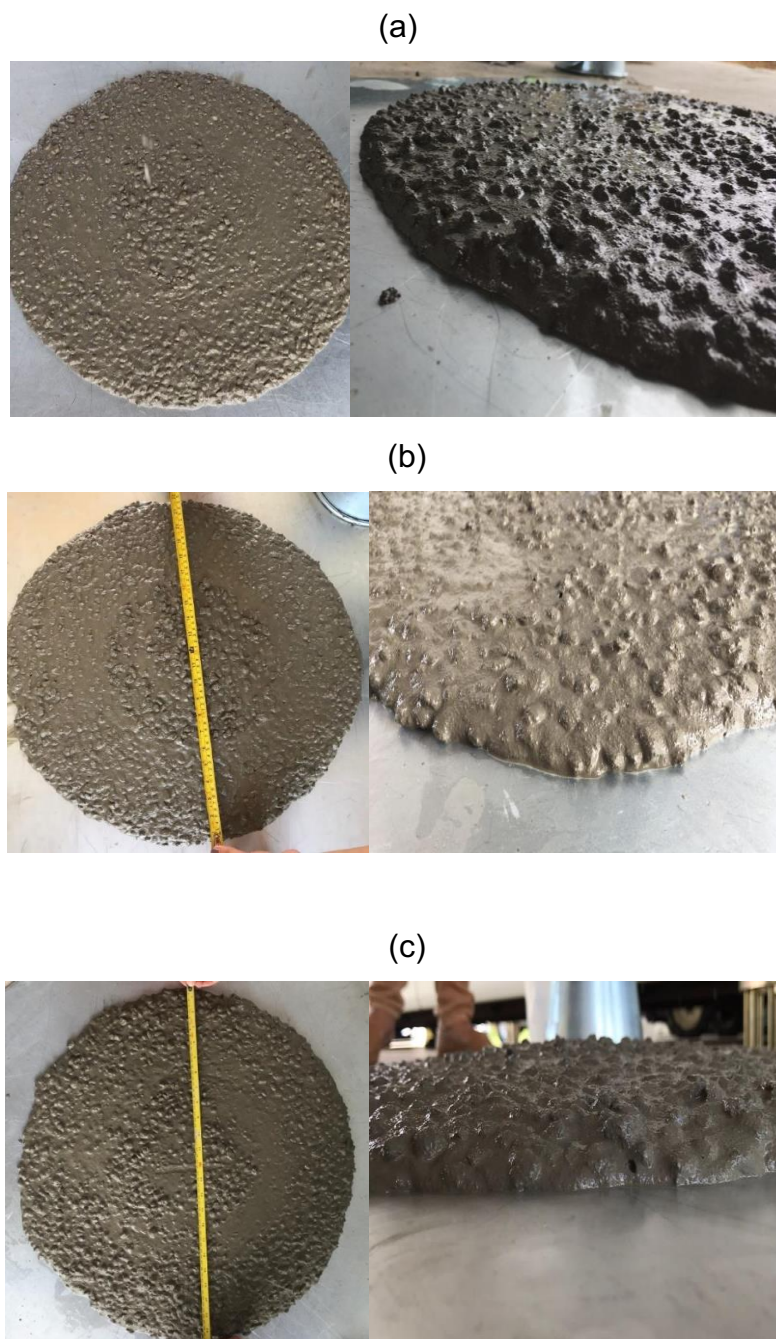
4.3 Ensaios no estado fresco

Após a mistura dos materiais, para cada um dos traços foram realizados uma série de ensaios para caracterizar o CAA em seu estado fresco, conforme recomendado pela ABNT NBR 15823 (2017), que define os limites para as classes de autoadensabilidade. A seguir serão apresentados os resultados desses ensaios.

4.3.1 Slump flow test

Na Figura 22 ilustra o espalhamento obtido para cada traço, onde a letra (a) corresponde ao TREF, letra (b) ao TRS25 (2) e letra (c) o TRS50.

Figura 22 - Espalhamento do concreto após o slump, (a) TREF, (b) TRS25 e (c) TRS50.



Fonte: Autor (2022).

Através da média entre as medidas de dois diâmetros é possível analisar o espalhamento do CAA e classificá-lo conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 15823-1 (2017), além de indicar a fluidez do concreto e sua habilidade passante ao escoar sob a ação de seu peso próprio em fluxo livre. Nesse ensaio também são verificados

o tempo de escoamento até a marca de 500 mm, classificando-o conforme a tabela 2 da mesma norma e além disso é realizada uma análise visual para determinar o índice de estabilidade do material, conforme a Tabela 3 da referida norma. A Tabela 19 mostra os resultados desse ensaio.

Tabela 19 - Resultados para o espalhamento, tempo de escoamento (t_{500}) e Índice de Estabilidade Visual (IEV).

Traço	Espalhamento (mm)	Classe de espalhamento	t_{500} (s)	Classe de viscosidade plástica aparente	IEV
TREF	59,5	SF1	0,89	VS1	0
TRS25	60	SF1	0,9	VS1	0
TRS50	55,5	SF1	0,78	VS1	0

Fonte: Autor (2022).

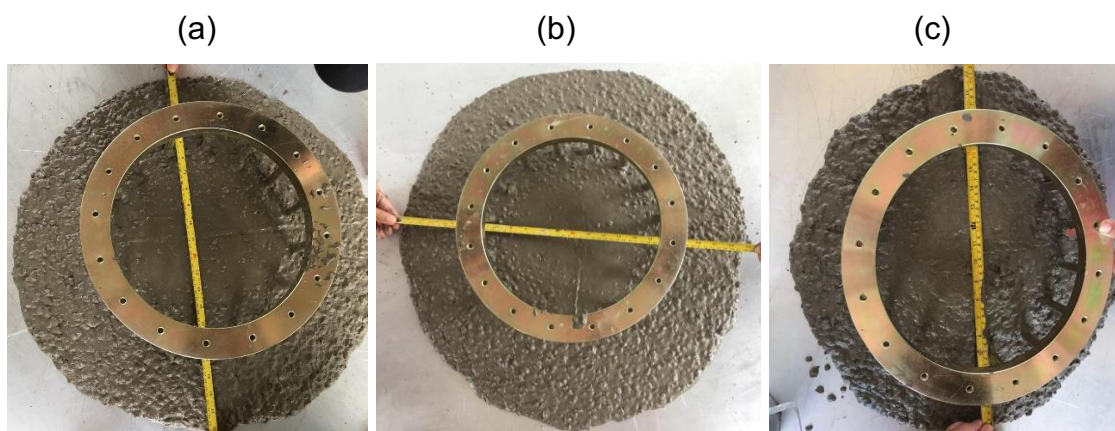
Com base nos dados exibidos pela Tabela 19, observa-se que o TRS50 com 50% do resíduo grosso apresentou um menor espalhamento e com a redução do resíduo no TRS25 obteve-se um melhor resultado. Além disso, todos os traços não ultrapassaram a média de 65 cm de espalhamento, sendo assim classificados SF1.

Os concretos apresentaram tempo de escoamento inferior a 2s e foram classificados como VS1/VF1 conforme a ABNT NBR 15823-1 (2017) e também foram considerados altamente estáveis, por não exibirem exsudação e/ou segregação.

4.3.2 Anel J

A Figura 23 mostra o ensaio do anel J, que determina a habilidade passante sob fluxo livre para cada traço de CAA, onde (a) corresponde ao TREF, (b) TRS25 e (c) TRS50.

Figura 23 - Habilidade passante mostrada pelo ensaio do anel J, (a) TREF, (b) TRS25 e (c) TRS50.



Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 20 é possível observar os resultados desse ensaio.

Tabela 20 - Habilidade passante pelo anel J.

Traço	Habilidade passante (mm)	Classe da habilidade passante
TREF	10	P J 1
TRS25	0	P J 1
TRS50	0	P J 1

Fonte: Autor (2022).

Considerando os limites estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1 (2017), entre 0 e 25 para PL1, todos os traços obtiveram essa classificação por apresentarem PJ dentro desses intervalos.

4.3.3 Caixa L

Na Tabela 21, são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de caixa L realizado em cada traço.

Tabela 21 - Habilidade passante pela caixa L.

Traço	Habilidade passante (mm)	Classe da habilidade passante
TREF	0,83	P L 2
TRS25	0,8	P L 2
TRS50	0,64	P L 2

Fonte: Autor (2022).

Tendo em vista os resultados mostrados pela Tabela 19, pode-se afirmar que apenas o traço referente a substituição de 50% do agregado miúdo (TRS50) não obteve bom desempenho, ficando abaixo do limite estabelecido pela ABNT NBR 15823-1 (2017), na qual o valor deve ser ≥ 80 mm.

4.3.4 Funil V

Esse ensaio avalia a capacidade de preenchimento do CAA e é classificado conforme a ABNT NBR 15823-1 (2017). Abaixo, na Tabela 22 temos o resultado desse ensaio para todos os traços.

Tabela 22 - Viscosidade plástica aparente pelo método no funil V.

Traço	Funil V (s)	Classe de viscosidade plástica aparente
TREF	2,5	V F 1
TRS25	2	V F 1
TRS50	3	V F 1

Fonte: Autor (2022).

Através dos dados da Tabela 20, pôde-se constatar que todos os traços foram classificados como VS1, sendo que o TRS50 apresentou um maior tempo de escoamento e conseqüentemente uma maior viscosidade.

4.4 Ensaios no estado endurecido

4.4.1 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

Depois de um período de cura úmida de 28 dias, foram realizados os ensaios para determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios, conforme recomendado pela ABNT NBR 9778 (2009). Para esses ensaios foram utilizados três corpos de prova por traço. Os resultados estão descritos na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados para massa específica, absorção de água e índice de vazios.

Traço	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca	Massa específica saturada	Massa específica real
TREF	6,24	13,55	2,17	2,31	2,51
TRS25	8,77	18,53	2,11	2,3	2,59
TRS50	8,43	17,97	2,13	2,31	2,6

Fonte: Autor (2022).

Analisando-se os dados da Tabela 23, nota-se que o TREF apresentou menores porcentagens de absorção de água e índice de vazios, considerando que essas propriedades estão diretamente relacionadas, pois quanto menor o número de vazios no concreto, menos água será absorvida.

Observou-se também que entre os traços com substituição do agregado graúdo pelo resíduo grosso de scheelita, o de 50% obteve melhores resultados para ambas.

Quanto à massa específica todos foram classificados como concretos normais por possuírem valores situados entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 8953 (2015) de 2000 a 2800 kg/m³.

4.4.2 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em corpos-de-prova (CP) de (10 x 20 cm) de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018). Analisou-se

as resistências nas idades de 7 e 28 dias, sendo rompidos 3 (CP) por traço para cada idade.

A Figura 24 mostra 3 CPs do traço 1 (referência), após o rompimento com 7 dias para determinar a resistência à compressão.

Figura 24 - Corpos de prova do traço 1 após ensaio.



Fonte: Autor (2022).

Como apresentado na Figura 24 os CPs romperam-se com fraturas próximas ao topo, denominadas pela ABNT NBR 5739 (2018) como tipo G. Já aos 28 dias os CPs rompidos apresentaram ruptura cisalhada, classificada como tipo E, com fissuras inclinadas em direção à força cortante como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Corpo de prova após ensaio de resistência a compressão.



Fonte: Autor (2022).

A Tabela 24 informa os dados resultantes dos ensaios de resistência à compressão para cada um dos traços em suas referidas idades.

Tabela 24 - Resistência à compressão.

Resistência à compressão (MPa)		
Traço	7 dias	28 dias
TREF	16,92	18,69
TRS25	19,11	19,8
TRS50	20,63	26,37

Fonte: Autor (2022).

Além desses resultados obteve-se também a resistência à compressão do concreto sem resíduos aos 28 dias, alcançando o valor de 13,05 MPa, considerado bem abaixo dos outros, e também da resistência calculada de 25 Mpa, justificado pela exsudação e segregação em seu estado fresco, o que interfere diretamente na resistência.

Como mostra a Tabela 24, os três traços apresentaram melhores resistência à compressão com o aumento das idades. No entanto, observa-se resultados mais

significativos para o traço com maior substituição do agregado miúdo. Paiva (2013) também obteve melhores resultados com a incorporação de porcentagens de 20% e 60% de resíduo de scheelita, se comparado ao seu traço padrão.

Souza (2019) afirma que a substituição da areia por esse resíduo proporciona um ajuste da granulometria, que ocasiona a produção de uma estrutura mais compacta do agregado miúdo, contribuindo para o aumento na resistência.

5. CONCLUSÕES

Conforme os resultados apresentados os resíduos da scheelita podem ser aplicados no concreto autoadensável. O resíduo fino caracterizado assim por ser um material passante na peneira de nº100 e apresentar massa específica igual a 2,99 g/cm³, foi utilizado como adição. Já o grosso obteve 2,49 g/cm³ de massa específica e módulo de finura igual a 2,67, resultados bem semelhantes ao agregado miúdo, sendo usado para substituição do mesmo.

Como descrito na metodologia o resíduo fino da scheelita influenciou nas propriedades do estado fresco, suprimindo a necessidade de finos do concreto e reduzindo a segregação e exsudação gerada pelo acréscimo de aditivo necessário para torná-lo autoadensável. No entanto, os resultados não são suficientes para avaliar a melhor porcentagem do seu uso e também sua influência no estado endurecido do CAA, devido ao fato de ter sido usada uma mesma porcentagem em todos os traços.

Com isso, pode se concluir que por se tratar de um material ainda pouco estudado, seriam necessárias outras pesquisas que complementem as informações obtidas por esse trabalho sobre a influência do uso desse resíduo no CAA.

Quanto à utilização do resíduo grosso foram obtidos resultados satisfatórios para o traço com substituição de 25% de agregado miúdo em todos os ensaios no estado fresco, sem diferenças muito significativas se comparado ao traço de referência.

O traço com 50% também exibiu resultados semelhantes para o estado fresco, exceto no ensaio de caixa L, em que apresentou habilidade passante igual a 0,64, valor inferior ao estabelecido pela ABNT NBR 15823-1 (2017) que é de $\geq 0,80$. Porém, considerando que esse ensaio era o último a ser realizado, esse valor pode ser explicado devido à redução do desempenho do aditivo com o passar do tempo, gerando uma perda da trabalhabilidade do concreto.

Analisando as propriedades físicas no estado endurecido, foi observada uma constância quanto aos resultados de massa específica de todos os concretos, com valores que os classificaram como concretos normais, segundo a ABNT NBR 8953 (2015).

Já para absorção de água e índice de vazios, os concretos com resíduo grosso de scheelita apresentaram resultados semelhantes valores maiores do que o

traço de referência. Contudo, apesar de apresentar maiores valores para essas propriedades não houve redução da resistência, visto que os concretos com substituição do agregado miúdo por scheelita obtiveram melhores resistências, especialmente o CAA com 50%.

Dessa forma, considera-se que o concreto autoadensável com a adição de resíduo fino de scheelita e substituição do agregado miúdo pelo resíduo grosso pode proporcionar uma redução no consumo dos materiais e apresentar-se como uma alternativa sustentável para a destinação dos resíduos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Analisar o resíduo fino da scheelita em proporções diferentes da utilizada nesse trabalho, a fim de entender melhor sua influência no concreto autoadensável.

Realizar ensaios de durabilidade como o de carbonatação, absorção por capilaridade e migração de cloretos em concretos autoadensáveis com incorporação dos resíduos de scheelita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. B. D. et al. Adição de resíduo de scheelita da mina Bodó em Cerro Corá/ RN na composição de materiais cerâmicos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 22., 2016, Natal. Anais... Natal: Instituto Brasileiro de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2016.

ANDRADE, A. C. S. Estudo de propriedades reológicas e físico-mecânicas de concreto autoadensável com adição de resíduo de vermiculita. 2020. 80 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739. Concreto. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

_____. NBR 6118. Projeto para estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

_____. NBR 7211. Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro. 2009. 9p.

_____. NBR 8522-1 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro. 2021. 24p.

_____. 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.

_____. NBR 16916. Agregado miúdo. Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. 7p.

_____. NBR 16917. Agregado graúdo. Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. 6p.

_____. NBR 16972. Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021. 6p.

_____. NBR NM 248. Agregados. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

BRANCO, R. P. Utilização de resíduos de concreto em concreto autoadensável. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

CALADO, C. F. A. et al. Concreto autoadensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC). 1. ed. v. 1. Recife: Editora Universidade de Pernambuco, 2015.

CAVALCANTI, D. J. H. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

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, 2019.

FATURAMENTO do setor de mineração no Brasil tem alta de 36%, em 2020. Gov.br, 04 fevereiro 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/fevereiro/faturamento-do-setor-de-mineracao-no-brasil-tem-alta-de-36-em-2020>. Acesso em: 07 fev. 2021.

FENGLER, S. B. Concreto autoadensável para uso em indústria de pré-fabricados. 2020. 78 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2020.

FERNANDES, B. R. B. Aproveitamento dos finos de scheelita utilizando concentração centrífuga e lixiviação ácida. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

FILHO, R. E. B. R. Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manipueira com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos. 2021. 156 f. Tese

(Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

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.

FERREIRA, M. L. M. Substituição parcial e total do agregado miúdo por resíduo de scheelita na produção de pavers. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2020.

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

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.

HIGUCHI, A. M. D. Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho. 2018. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Materiais de construção) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

MATERIAIS, Componentes, e a Construção Sustentável. CBCS, São Paulo, agosto 2009. Disponível em:
http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS_CT Materiais_Posicionamento_Materiais%20componentes.pdf. Acesso em: 08 de fev. 2022.

MATOS, P. R. Estudo do uso de resíduo do polimento de porcelanato em concreto autoadensável. 2019. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

MEDEIROS, A. G. Propriedades de concreto sustentável produzido com pó do polimento do porcelanato e resíduo da scheelita. 2019. 91 f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo e Água) – Universidade Federal do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

MEDEIROS, F. K. Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MEDEIROS, M. Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita. 2016. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – 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.

PAIVA, E. H. G. Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

POLUCHA, A. C. Substituição parcial e total do agregado miúdo por resíduo de scheelita na produção de pavers. 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Materiais e estruturas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. Construção civil e a degradação ambiental. Desenvolvimento em questão, n.13, p.111-128, 2009.

SANTOS, L. H. S. Desenvolvimento de dosagem de concreto autoadensável aplicado à produção de pré-moldados de concreto utilizando agregados da região sul da Bahia. 2019. 90 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Eunápolis, 2019.

SATHLER, J. E. V. et al. Comparativo do concreto convencional com o concreto autoadensável. Revista Vozes do Vale. Minas Gerais, v. 12, n.7, 2017.

SILVA, G. J. B. Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, W. G. Concreto autoadensável com substituição parcial de cimento por finos menores que 75 µm de resíduo de telha cerâmica vermelha: aspectos reológicos e físicos. 2019. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

SILVEIRA, M. D. Utilização de resíduos de mineração na construção civil. 2015. 39 f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SOTOMAIOR, M. J. Estudo de modelos de empacotamento de agregados para concretos. 2017. 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SOUSA, J. T. F. Propriedades de concretos leves autoadensáveis com agregados leves artificiais produzidos a partir da calcinação de resíduos agroindustrial e de mineração. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Materiais e Processos Construtivos), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

SOUZA, R. S. Argamassas produzidas a partir da substituição do agregado miúdo pelo resíduo do beneficiamento da scheelita e da água de hidratação por manipueira. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

VIEIRA, F. S. Estudo do comportamento do concreto autoadensável com a adição do resíduo de beneficiamento de mármore e granito em diferentes porcentagens. 2021. 81 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2021.

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