



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

FLÁVIA SILVA VIEIRA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM A
ADIÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO EM
DIFERENTES PORCENTAGENS**

POMBAL - PB

2021

FLÁVIA SILVA VIEIRA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM A
ADIÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO EM
DIFERENTES PORCENTAGENS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia civil, pela Universidade Federal de Campina Grande, Campus Pombal.

Orientadora: Prof^ª Dra. Elisângela Pereira da Silva
Coorientador: Prof^º Me. Rodrigo Mendes Patrício Chagas

POMBAL – PB

2021

V658e Vieira, Flávia Silva.

Estudo do comportamento do concreto autoadensável com a adição do resíduo de beneficiamento de mármore e granito em diferentes porcentagens / Flávia Silva Vieira. - Pombal, 2021.

81 f. : il. Color

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2021.

"Orientação: Profa. Dra. Elisângela Pereira da Silva, Prof. Me Rodrigo Mendes Patrício Chagas".

Referências.

1. Resíduo de Beneficiamento. 2. Concreto Autoadensável (CAA). 3. Concreto - Estado Fresco. 4. Concreto - Estado Endurecido. 5. Mármore e Granito. I. Silva, Elisângela Pereira da. II. Chagas, Rodrigo Mendes Patrício. III. Título.

CDU 628.4.043(043)

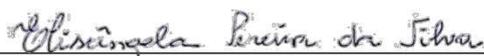
FLÁVIA SILVA VIEIRA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM A
ADIÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO EM
DIFERENTES PORCENTAGENS

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

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em: 06 / agosto / 2021

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof^ª. Dra. Elisângela Pereira da Silva
Orientadora – UACTA/CCTA/UFCG



Prof^º. Me. Rodrigo Mendes Patrício Chagas
Coorientador – UACTA/CCTA/UFCG



Prof^ª. Ma. Sinara Martins Camelo
Examinadora interna – UACTA/CCTA/UFCG



Prof^º. Dr. Carlos Mavial de Carvalho
Examinador externo – UNIFESSPA

POMBAL – PB

2021

Dedico este trabalho ao meu Deus por me direcionar para os melhores caminhos e aos meus pais, pilares da minha formação como ser humano.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus por me permitir chegar até aqui, por me conduzir sempre para os melhores caminhos, pela família que me concedeu, pela sabedoria e discernimento para superar os obstáculos e dificuldades impostos em minha vida, pelo dom da vida e por me abençoar e me proteger sempre. Sou só grato por todas as realizações em minha vida.

Aos meus pais, Francisco e Fabiula, por todo o amor, afeto, dedicação, apoio incondicional durante toda a minha trajetória acadêmica, por me ajudarem em tudo sem medir esforços, por todos os ensinamentos e por estes me conduzirem pelos caminhos da vida. Ao meu pai pela ajuda na confecção dos equipamentos para a execução dos ensaios no estado fresco. À minha irmã, Ryanna, por todo o carinho, amor e por me ajudar sempre.

À minha avó, Maria (*in memoriam*), por ter me ajudado e incentivado bastante para que eu chegasse até aqui. Por todo o carinho, amor e pelas palavras de fé e motivação.

Ao meu companheiro de todas as horas, Thiago, por estar sempre junto a mim, por ter sido fundamental para a realização dessa pesquisa, me ajudando com todo o amor, paciência e compreensão. Só tenho a agradecer por tudo que fez e faz por mim a cada dia.

À minha orientadora, prof.^a Dr.^a Elisângela Pereira, por toda assistência e contribuição para esse estudo, pelo carinho, paciência, dedicação, pelas palavras de ânimo e por todo o conhecimento transmitido.

Ao meu co-orientador, prof.^o Me. Rodrigo Chagas, por todo o tempo dedicado para a realização desse trabalho, pela paciência, compreensão e por todo o conhecimento repassado.

Às minhas primas, Simara, Sabrina, Bruna e Lívia, por todo o apoio, ajuda, paciência e pelas palavras de força e motivação durante toda a minha graduação.

Às minhas amigas, Estéfany e Ianca, minhas companheiras de estudo e de vida nesses cinco anos de graduação. Só tenho a agradecer pela parceria, apoio, pela ajuda na realização dessa pesquisa e por todas as palavras de motivação.

À UFCG, pela disponibilização dos laboratórios de Resíduos Sólidos e de Materiais de Construção e Processos Construtivos para a realização dos ensaios.

À concreteira GC Mix, pela disponibilização da prensa hidráulica para a realização do ensaio de resistência à compressão.

À empresa Suape Aditivos pela disponibilização do aditivo superplastificante.

“Ainda que a minha mente e o meu corpo enfraqueçam, Deus é a minha força, Ele é tudo o que sempre preciso.”

(Salmos 73:26)

RESUMO

Para a obtenção de um concreto autoadensável (CAA) é necessária uma grande quantidade de finos em sua mistura, de modo a preencher os vazios existentes e, conseqüentemente proporcionar maior fluidez, trabalhabilidade e coesão. O resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) foi adicionado como material fino para a produção do concreto autoadensável, visando a análise de suas propriedades nos estados fresco e endurecido. Além disso, buscou-se uma forma de destinação adequada para esse resíduo, visto que é gerado em grandes quantidades, causando danos ambientais. Os concretos autoadensáveis foram dosados a partir da mistura dos seguintes materiais: cimento CP V – ARI, areia fina como agregado miúdo, brita 0 como agregado graúdo, aditivo superplastificante Superflow e adição do RBMG. Foram produzidos quatro traços para esse estudo, sendo um sem a presença de adição e os demais com adições em percentuais de 10%, 30% e 50%, com os respectivos teores de aditivo de 1,21%, 1,26%, 1,28% e 1,30%. No estado fresco, todos os traços apresentaram resultados satisfatórios com relação ao espalhamento, habilidade passante, viscosidade e resistência à segregação. Em relação ao estado endurecido, foi realizado o ensaio de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias, foi observado que à medida que se adicionou o resíduo, houve aumento na resistência à compressão para todas as idades. As propriedades físicas, como absorção de água, índice de vazios e massa específica apresentaram resultados semelhantes em todos os traços. Sendo assim, a adição do RBMG é uma boa alternativa, visto que apresenta bom desempenho tanto no estado fresco, quanto endurecido. Além disso, possibilita uma destinação ambientalmente viável.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Resíduo. Estado fresco. Estado endurecido.

ABSTRACT

To obtain a self-compacting concrete (SCC) a large amount of fines is needed in its mixture, in order to fill the existing voids and, consequently, provide greater fluidity, workability and cohesion. The marble and granite beneficiation residue (MGBR) was added as a fine material for the production of self-compacting concrete, aiming to analyze its properties in the fresh and hardened states. In addition, an adequate way of disposing of this waste was sought, since it is generated in large quantities, causing environmental damage. The self-compacting concretes were dosed from a mixture of the following materials: cement CP V – ARI, fine sand as fine aggregate, gravel 0 as coarse aggregate, Superflow superplasticizer additive and addition of MGBR. Four mixes were produced for this study, one without the presence of addition and the others with additions in percentages of 10%, 30% and 50%, with the respective additive contents of 1.21%, 1.26%, 1.28% and 1.30%. In the fresh state, all mixes showed satisfactory results in terms of spreading, passing ability, viscosity and resistance to segregation. Regarding the hardened state, the compressive strength test was performed at 7, 14 and 28 days, it was observed that as the residue was added, there was an increase in compressive strength for all ages. Physical properties, such as water absorption, void index and specific mass, showed similar results for all mixes. Therefore, the addition of MGBR is a good alternative, as it performs well both in the fresh and hardened state. Furthermore, it makes an environmentally viable destination possible.

Keywords: Self-compacting concrete. Residue. Fresh state. Hardened state.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre a resistência do concreto em diferentes idades e a finura do cimento	22
Figura 2 – Cone de Abrams.....	28
Figura 3 – Anel J.....	29
Figura 4 – Caixa L	29
Figura 5 – Funil V.....	30
Figura 6 – Coluna de segregação.....	31
Figura 7 – Máquina de corte utilizada no processo de beneficiamento do mármore e granito	33
Figura 8 – Fluxograma de procedimento experimental	37
Figura 9 - Ensaio de massa específica do cimento CP V – ARI	38
Figura 10 - Resíduo de beneficiamento de mármore e granito. a) Seco e destorroado e b) Peneirado.....	39
Figura 11 - Aditivo superplastificante	41
Figura 12 - Determinação da massa da mistura dos agregados.....	42
Figura 13 - Slump flow test.....	45
Figura 14 - Classes de índice de estabilidade visual (IEV).....	45
Figura 15 – Anel J.....	46
Figura 16 – Caixa L	47
Figura 17 – Funil V.....	48
Figura 18 – Coluna de segregação.....	49
Figura 19 – Prensa hidráulica utilizada.....	50
Figura 20 - Curva granulométrica do agregado graúdo	53
Figura 21 - Curva granulométrica do agregado miúdo	55
Figura 22 - Relação entre as proporções de misturas dos agregados e índice de vazios	58
Figura 23 - Espalhamento obtido para cada um dos traços. a) CAA-0, b) CAA-10, c) CAA-30 e d) CAA-50	60
Figura 24 – Habilidade passante sob fluxo livre pelo anel J. a) CAA-0, b) CAA-10, c) CAA-30 e d) CAA-50	62
Figura 25 – Habilidade passante sob fluxo confinado pela caixa L	63
Figura 26 – Viscosidade a partir do funil V	64

Figura 27 – Determinação da resistência à segregação pela coluna de segregação. a) preenchimento da coluna, b) amostra retirada e c) amostra lavada.....	66
Figura 28 – Corpo de prova submetido à compressão.....	69
Figura 29 – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. a) Obtenção de massa submersa em balança hidrostática, b) corpos de prova após serem secos com pano úmido, c) massa saturada com superfície seca e d) corpos de prova na estufa	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das adições minerais	25
Tabela 2 - Resultados de resistência à compressão aos 28 dias	34
Tabela 3 – Características técnicas do aditivo superplastificante.....	41
Tabela 4 - Procedimento da mistura	44
Tabela 5 – Caracterização do cimento CP V – ARI	52
Tabela 6 – Composição granulométrica do agregado graúdo	52
Tabela 7 - Propriedades físicas do agregado graúdo	53
Tabela 8 - Composição granulométrica do agregado miúdo.....	54
Tabela 9 - Propriedades físicas do agregado miúdo	55
Tabela 10 - Propriedades físicas do RBMG	56
Tabela 11 - Determinação da proporção ideal dos agregados	57
Tabela 12 - Dosagem dos materiais constituintes do CAA.....	58
Tabela 13 - Consumo de materiais para a produção do CAA	59
Tabela 14 - Espalhamento, tempo de escoamento (t_{500}) e Índice de Estabilidade Visual (IEV)	61
Tabela 15 - Habilidade passante pelo método do anel J	62
Tabela 16 - Habilidade passante pelo método da caixa L	64
Tabela 17 - Viscosidade a partir do tempo de escoamento pelo método do funil V	65
Tabela 18 - Resistência à segregação pelo método da coluna de segregação	66
Tabela 19 - Consumo de materiais utilizados neste estudo e nos estudos de Xavier (2019) e Lisbôa (2004).....	67
Tabela 20 - Comparação dos resultados obtidos no estado fresco desse estudo com os que foram obtidos por Xavier (2019) e Lisbôa (2004)	68
Tabela 21 - Resistência à compressão média	69
Tabela 22 - Resultados obtidos dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica	71
Tabela 23 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios do estado endurecido desse estudo com os que foram obtidos por Xavier (2019) e Lisbôa (2004)	72

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	42
Equação 2	43
Equação 3	43
Equação 4	47
Equação 5	48
Equação 6	50
Equação 7	51
Equação 8	51
Equação 9	51
Equação 10	51
Equação 11	51

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

γ	Massa específica;
a	Relação agregado miúdo seco / cimento em massa;
a/c	Relação água / cimento em massa;
Ab	Absorção;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
C	Consumo de cimento;
CAA	Concreto Autoadensável;
CP	Corpo de prova;
CP V – ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial;
d	Diâmetro do corpo de prova;
F	Força máxima alcançada;
f_c	Resistência à compressão;
IEV	Índice de Estabilidade Visual;
IV	Índice de vazios;
ME	Massa específica;
NBR	Norma Brasileira;
NM	Norma Mercosul;
p	Relação agregado graúdo seco / cimento em massa;
pH	Potencial Hidrogeniônico;
RBMG	Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito;
RCC	Resíduos da Construção Civil;
t ₅₀₀	Determinação do tempo de escoamento.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo geral.....	19
2.2. Objetivos específicos.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Concreto Autoadensável.....	20
3.1.1. Definição e histórico.....	20
3.1.2. Vantagens e desvantagens.....	21
3.1.3. Materiais constituintes	21
3.1.3.1. Cimento.....	21
3.1.3.2. Agregado graúdo	23
3.1.3.3. Agregado miúdo	23
3.1.3.4. Aditivos.....	23
3.1.3.5. Água de amassamento.....	24
3.1.3.6. Adições minerais	24
3.1.4. Métodos de dosagem.....	25
3.2. Ensaio e requisitos do CAA	27
3.2.1. Ensaio no estado fresco	27
3.2.1.1. Slump flow test.....	27
3.2.1.2. Anel J	28
3.2.1.3. Caixa L.....	29
3.2.1.4. Funil V	30
3.2.1.5. Coluna de segregação	30
3.2.2. Propriedades no estado endurecido.....	31
3.3. Resíduo de beneficiamento de mármore e granito.....	32
3.3.1. Processo de extração e beneficiamento do resíduo.....	33
3.4. Concreto autoadensável com resíduo de mármore e granito	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1. Seleção e caracterização dos materiais.....	37
4.1.1. Cimento Portland.....	37
4.1.2. Agregado graúdo	38
4.1.3. Agregado miúdo	38
4.1.4. Resíduo de beneficiamento de mármore e granito	39

4.1.5.	Água de amassamento.....	40
4.1.6.	Aditivo	40
4.2.	Dosagem e moldagem dos corpos de prova	41
4.2.1.	Determinação do esqueleto granular.....	41
4.2.2.	Determinação da relação a/c ou percentual de aditivo superplastificante	43
4.2.3.	Procedimento de mistura.....	44
4.3.	Ensaio realizado no estado fresco	44
4.3.1.	Slump flow test.....	44
4.3.2.	Anel J	46
4.3.3.	Caixa L	46
4.3.4.	Funil V	47
4.3.5.	Coluna de segregação	48
4.4.	Ensaio realizado no estado endurecido.....	49
4.4.1.	Resistência à compressão	49
4.4.2.	Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
5.1.	Caracterização dos materiais	52
5.1.1.	Cimento	52
5.1.2.	Agregado graúdo	52
5.1.3.	Agregado miúdo	54
5.1.4.	Resíduo de beneficiamento de mármore e granito	56
5.2.	Definição e composição dos traços do CAA	56
5.3.	Ensaio no estado fresco.....	59
5.3.1.	Slump flow test.....	59
5.3.2.	Anel J	61
5.3.3.	Caixa L.....	63
5.3.4.	Funil V	64
5.3.5.	Coluna de segregação	65
5.4.	Ensaio no estado endurecido	69
5.4.1.	Resistência à compressão	69
6.	CONCLUSÕES.....	74
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
8.	REFERÊNCIAS.....	76

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material obtido da mistura de agregados graúdos, agregados miúdos, água e cimento Portland. Na composição do concreto pode conter também adições e aditivos, sendo utilizados com a finalidade de modificar uma ou mais propriedades da mistura.

Apesar do concreto convencional ser considerado um material de uso intenso em todo o mundo, com diversas aplicações, existem deficiências importantes nesse material, dentre elas, a dificuldade do concreto fluir e ser adensado em elementos estruturais com elevada quantidade de armadura, podendo ocasionar o surgimento de vazios na estrutura, reduzindo assim a sua durabilidade (SOHLER; SANTOS, 2018).

Ao longo dos anos, através de pesquisas, surgiram os concretos especiais, apresentando propriedades diferentes, que trouxeram avanços importantes em relação aos concretos convencionais.

Segundo Figueiredo et al. (2004, p.14), os concretos especiais podem ser definidos como:

“Concretos com características particulares devido à evolução tecnológica: melhorando as deficiências do concreto convencional ou incorporando propriedades não inerentes a este material;

Concretos com características particulares para atender necessidade das obras: desenvolvimento de produtos para serem empregados em locais/condições em que o concreto convencional não pode ser aplicado.”

Um dos tipos de concreto que apresenta características especiais é o concreto autoadensável, representando um avanço na tecnologia do concreto. O concreto autoadensável (CAA) possui a capacidade de fluir sob a ação do seu peso próprio, de modo a preencher completamente as formas dos elementos estruturais sem necessitar de adensamento por equipamento de vibração, mesmo em estruturas com alta taxa de armaduras.

O CAA foi desenvolvido no Japão, em 1988, tendo como principal interesse o desenvolvimento de um concreto que resolvesse o problema da durabilidade das estruturas, devido ser um local com frequentes abalos sísmicos, era necessária uma grande concentração de armaduras, o que dificultava o adensamento e proporcionava o surgimento de nichos e vazios nos elementos estruturais (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Para um concreto ser considerado autoadensável, ele deve atender a três propriedades simultaneamente: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação (EFNARC, 2002). O CAA deve fluir dentro das formas, de modo a preencher todos os espaços vazios, sem a presença de bolhas de ar e nichos, mantendo-se coeso ao passar pelas armaduras.

Quando comparado o concreto autoadensável com o convencional, observa-se que os materiais utilizados são os mesmos. No entanto, o CAA exige uma maior quantidade de finos, onde é feito o uso de adições minerais, com a finalidade de proporcionar o empacotamento das partículas e reduzir os vazios e, o uso de aditivos para melhorar a trabalhabilidade da mistura.

A construção civil é uma das áreas que mais consomem matéria-prima, principalmente na produção do concreto, o que vem gerando preocupação, visto que só fica abaixo do consumo de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, é um dos setores que mais geram resíduos, representando cerca de 51% a 70%, superando em massa os resíduos sólidos urbanos, tornando-o um agente impactante ao meio ambiente (SANTANA, 2016; EVANGELISTA; COSTA e ZANTA, 2010).

Atualmente, várias pesquisas são realizadas com o intuito de proporcionar a reutilização dos resíduos na própria indústria da construção civil, de modo a diminuir a quantidade desses resíduos descartados no meio ambiente. O resíduo do beneficiamento de mármore e granito, proveniente da indústria de rochas ornamentais, é um dos que vem sendo reutilizado para a produção de concreto.

O Brasil é um dos grandes produtores de rochas ornamentais, tendo em vista que em 2018 foram exportados 2,20 milhões de toneladas para 120 países, correspondendo a 77,52% do total de exportações brasileiras de rochas (ABIROCHAS, 2018).

As atividades de beneficiamento de rochas ornamentais geram uma quantidade significativa de resíduos, onde o aproveitamento de resíduos industriais pode contribuir de maneira significativa para o desenvolvimento sustentável (SILVA, 1998). O Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG) é classificado como sendo de classe III – Inerte, não causando risco ambiental e nem a saúde humana quando aplicado a construção civil, no entanto a lama pode causar sérios problemas ambientais (LOPES, 2007).

Como a indústria da construção civil é responsável por grande parte da geração de resíduos e o CAA necessita de uma grande quantidade de finos em sua composição, então, a presente pesquisa tem como objetivo a análise do comportamento do CAA a partir da adição de diferentes percentuais de RBMG, buscando uma aplicação para este resíduo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estudar o comportamento físico e mecânico do concreto autoadensável quando adicionado o Resíduo de beneficiamento de mármore e granito.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento do concreto autoadensável com a incorporação do RBMG como fíler em percentuais de 10%, 30% e 50%.
- Avaliar o CAA no estado fresco a partir dos ensaios do slump flow test, anel J, caixa L, funil V e coluna de segregação;
- Analisar o comportamento do CAA no estado endurecido a partir dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Concreto Autoadensável

3.1.1. Definição e histórico

O concreto é um dos materiais mais consumidos em todo o mundo, sua demanda é em torno de 11 bilhões de toneladas por ano, correspondendo a um consumo médio de aproximadamente 1,9 toneladas por habitante por ano (SOHLER; SANTOS, 2018). No entanto, atualmente não se pode considerar apenas o uso de concretos convencionais. O mercado exige concretos com características especiais, cada um com as suas particularidades, atendendo a demandas que os concretos convencionais não conseguem atender (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

Dentre os concretos especiais, temos o concreto autoadensável que pode ser definido como um material capaz de fluir sob a ação do seu peso próprio, dispensando a necessidade de adensamento. Além disso, deve permanecer coeso desde a mistura até a sua aplicação em determinado elemento estrutural (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

O conceito de concreto autoadensável é utilizado desde 1975, onde eram produzidos concretos com elevada fluidez e boa resistência à segregação, sendo utilizado em obras submersas, conhecido como concreto reoplástico. Somente no final dos anos 90 foi adotado o termo concreto autoadensável (COLLEPARDI, 2001).

Segundo Okamura e Ouchi (2003), a durabilidade das estruturas era um assunto bastante relevante na década de 1980, no Japão, visto que as estruturas de concreto necessitam de grande quantidade de armadura para resistir aos abalos sísmicos. Dessa forma, uma alternativa viável para esse problema foi o desenvolvimento de um concreto que não necessitasse de adensamento e tivesse fluidez necessária para percorrer toda a estrutura, de modo a preencher todos os vazios.

Em 1988, na Universidade de Tóquio, foi desenvolvido o primeiro estudo com o CAA, onde foram realizados ensaios com a finalidade de analisar a fluidez do concreto, sendo produzido a partir de materiais existentes na época, apresentando resultados satisfatórios em relação a análise das propriedades nos estados fresco e endurecido (GOMES; BARROS, 2009).

No início da década de 1990, apenas as corporações japonesas possuíam conhecimentos para a produção do CAA. No entanto, o seu desenvolvimento culminou com a criação de um comitê técnico, onde foram desenvolvidos ensaios, métodos de dosagem, sendo apresentados em diversas conferências (RILEM, 2006).

O CAA vem atraindo cada vez mais interesse no Brasil, principalmente para o uso em indústrias de pré-moldados e em obras correntes e especiais. Contudo, é pouco usado em obras verticais, visto que o seu custo de aquisição é mais elevado, porém, quando analisado no geral, proporciona redução de mão de obra, equipamentos e maior agilidade na concretagem (TUTIKIAN, 2015).

3.1.2. Vantagens e desvantagens

O concreto autoadensável é considerado uma inovação na tecnologia do concreto, tendo em vista o seu crescente uso e os diversos benefícios obtidos com a sua utilização (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021). A seguir serão apresentadas algumas das principais vantagens do seu uso.

- Possui rápido lançamento, dispensando o uso de equipamentos de vibração para o seu adensamento;
- Possibilita a concretagem de elementos estruturais com diversas formas, tamanhos e elevada quantidade de armadura;
- Redução da mão de obra durante a concretagem;
- Maior durabilidade às estruturas, visto que devido a sua capacidade de fluir sob a ação do seu peso próprio, toda a forma é preenchida, evitando o aparecimento de nichos e vazios na estrutura;
- Possibilita a incorporação de diversos resíduos industriais em sua mistura, apresentando-se como alternativa para correta reutilização desses resíduos.

Apesar do CAA apresentar diversas vantagens, sendo elas técnicas, econômicas e ambientais, existem ainda algumas dificuldades com relação a sua aplicação, sendo elas:

- Devido a sua elevada fluidez, dificulta a aplicação em superfícies com grandes inclinações e desníveis;
- Necessidade de procedimentos específicos para a sua aplicação;
- Exigência de planejamento eficiente e maior controle durante a execução de uma concretagem.

3.1.3. Materiais constituintes

3.1.3.1. Cimento

Para a produção do CAA, podem ser utilizados todos os tipos de cimentos Portland, desde que estejam de acordo com as especificações das normas técnicas. A escolha do tipo de

cimento está relacionada com a aplicação, frequência de uso e sua disponibilidade em determinada região (TUTIKIAN, 2015).

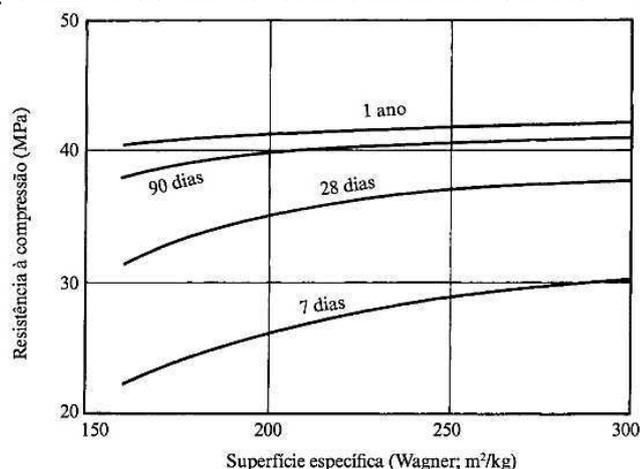
Quando se trata da necessidade de água e trabalhabilidade da mistura, os fatores de controle são o conteúdo de aluminato tricálcico (C_3A) e a granulometria do cimento, sendo que a reologia do cimento depende principalmente do controle de C_3A , pois quanto menor for a sua quantidade, mais fácil será o seu controle reológico e o enrijecimento da mistura será em um prazo mais longo (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

Levando em conta a finura do cimento, quanto mais fino for o cimento, maior será o contato das partículas com a água, aumentando assim a viscosidade da mistura. No entanto, utilizando-se um cimento com maior superfície específica, requer-se maior quantidade de água para a obtenção de uma pasta com consistência normal.

O cimento CP V-ARI é o cimento que apresenta maior finura em comparação com os demais, devendo apresentar no máximo 6% de material retido na peneira #200. Contudo, apresenta elevado teor de C_3A , o que ocasiona um endurecimento mais rápido e resistências elevadas com maior velocidade (PINHEIRO; CRIVELARO, 2016).

A figura 1 indica a relação entre a resistência à compressão do concreto e a finura do cimento, onde, concretos produzidos com cimento de maior superfície específica apresentarão rápido desenvolvimento de resistência, contudo, a longo prazo a resistência não é afetada.

Figura 1 – Relação entre a resistência do concreto em diferentes idades e a finura do cimento



Fonte: Neville (2016)

A quantidade de cimento a ser utilizada no concreto autoadensável varia em torno de 200 a 450 kg/m³, essa variação depende da utilização de adições reativas ou inertes. Deve-se ter cuidados adicionais, quando na dosagem for adicionado mais de 500 kg/m³, em virtude dos

possíveis problemas de retração e também quando a dosagem for feita com menos de 300 kg/m³, devendo assim, incluir outro material cimentício (GOMES; BARROS, 2009).

3.1.3.2. Agregado graúdo

Para a escolha do agregado graúdo, uma propriedade importante a ser observada é a sua dimensão máxima, visto que quanto maior for a sua dimensão, menor será a sua habilidade passante. Não deve apresentar dimensão máxima superior a 19 mm, pois dificulta a passagem entre as armaduras e aumenta o risco de segregação da mistura (DACKZO, 2012).

A forma e a textura também são fatores importantes na escolha do agregado graúdo, devendo-se optar por agregados graúdos com partículas arredondadas e lisas, tendo em vista que necessitam de um menor consumo de água e apresentam maior trabalhabilidade em relação as partículas angulares (TUTIKIAN, 2015).

3.1.3.3. Agregado miúdo

Os agregados miúdos a serem utilizados no CAA podem ser areias naturais ou industriais, sendo que as areias naturais são as mais indicadas, pois possuem um formato mais arredondado e textura mais lisa. A escolha desse agregado está relacionada com a demanda de água, visto que partículas esféricas e lisas reduzem a demanda de água, em decorrência disso, aumentam a fluidez e a coesão da mistura. Quando se leva em conta o módulo de finura da areia, valores mais baixos aumentam a coesão do CAA (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

A quantidade de finos dos agregados a ser utilizada deve ser cuidadosamente controlada, tendo em vista a manutenção da qualidade do CAA. Além disso, o tamanho e forma das partículas do agregado miúdo afetam a compactação e o índice de vazios do concreto. O volume de agregado miúdo a ser usado no CAA deve variar entre 40% e 50% do volume de argamassa, apresentando proporções de aproximadamente 710 a 900 kg/m³ (GOMES; BARROS, 2009).

3.1.3.4. Aditivos

Os aditivos são produtos utilizados na mistura de compósitos cimentícios, tendo a finalidade de alterar suas propriedades, sejam elas no estado fresco ou endurecido (ACI, 2013). Para a produção do CAA, os aditivos mais usados são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade.

Os aditivos superplastificantes são fundamentais para que se consiga uma das principais propriedades do concreto autoadensável, a fluidez (GOMES; BARROS, 2009). Para a execução

de um CAA, os aditivos superplastificantes mais utilizados são à base de policarboxilatos, tendo em vista que proporcionam uma melhor dispersão das partículas de cimento, exigindo uma menor quantidade de água para fluidificar a pasta (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

Os aditivos modificadores de viscosidade têm sua composição a partir de três grupos, sendo eles: sintéticos solúveis em água e polímeros orgânicos, emulsões acrílicas e, à base de polissacarídeos naturais solúveis. Sendo que, os dois primeiros são aplicados geralmente em concretos submersos, enquanto o terceiro é mais utilizado em concretos autoadensáveis (GOMES; BARROS, 2009).

3.1.3.5. Água de amassamento

A água a ser utilizada para a produção do CAA deve atender as mesmas especificações para o uso no concreto convencional. Mesmo a água sendo potável, ela ainda pode ser inadequada como água de amassamento quando apresentar uma alta concentração de sal e potássio, podendo ocasionar a reação álcali-agregado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para a produção do CAA, a quantidade de água é reduzida, visto que parte deve ser substituída por aditivos superplastificantes, de modo a proporcionar a coesão e fluidez necessárias.

3.1.3.6. Adições minerais

As adições minerais são materiais finamente moídos, usados como adição ou substituição de parte do cimento Portland, originados através de fontes naturais ou subprodutos industriais. São geralmente adicionadas ao concreto em percentuais que variam entre 6% e 70% em relação a massa do cimento total (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para a produção do CAA, as adições minerais são comumente utilizadas para aumentar a viscosidade e coesão, proporcionando maior resistência à segregação. Além disso regulam a quantidade de cimento para reduzir o calor de hidratação e a retração (EFNARC, 2005).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2021), as adições minerais, de acordo com a sua ação físico-química, podem ser classificadas em dois grandes grupos: adições minerais quimicamente ativas e adições minerais sem atividade química. A tabela 1 apresenta as principais finalidades e exemplos de cada um dos grupos de adições.

Tabela 1 - Classificação das adições minerais

Grupo	Função	Exemplos
Quimicamente ativas	Reage quimicamente com o produto de hidratação do cimento Portland à temperatura ambiente para formar compostos resistentes. Mostram-se efetivas no aumento da coesão, durabilidade e resistência do CAA.	Cinza volante, sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz.
Sem atividade química	Promove um efeito físico de empacotamento granulométrico. Melhora as condições de compactação e coesão da mistura.	Fílers (calcário e areia fina), pó granítico.

Fonte: Adaptado de Tutikian e Dal Molin (2021)

3.1.4. Métodos de dosagem

A dosagem consiste na seleção e mistura dos materiais constituintes do concreto, tendo como finalidade a obtenção de propriedades previamente estabelecidas. Para a obtenção de um concreto estrutural com boas características é necessário que haja uma seleção de agregados e aglomerantes adequados. Além disso, é fundamental a determinação da proporção entre os componentes, de modo a reduzir o índice de vazios. (CHAGAS, 2011).

Os métodos de dosagem do CAA diferem dos utilizados para concretos convencionais, entretanto, são igualmente empíricos. Têm como meta o atendimento às propriedades que estabelecem uma relação entre a habilidade de fluir com facilidade nas fôrmas, independentemente da sua complexidade e dificuldade, e a estabilidade das misturas que garante a ausência de segregação (GOMES; BARROS, 2009).

O primeiro método de dosagem foi desenvolvido por Okamura e Ozawa em 1995, no Japão. Desde então, diferentes métodos surgiram em todo o mundo (GOMES; BARROS, 2009). Não existe um método padrão para a dosagem do CAA, sendo assim, diversos institutos de pesquisa, centrais de concreto, indústrias de pré-fabricados têm desenvolvido seus próprios

métodos (TUTIKIAN, 2015). A seguir são apresentados alguns dos métodos de dosagem do CAA:

- Método de Okamura e Ozawa (1995): consiste em fixar as quantidades de agregado graúdo e miúdo. Os componentes da pasta, relação água/finos e aditivo superplastificante são decisivos para a obtenção da autoadensabilidade, tendo em vista que são ajustados para a obtenção das características esperadas (TUTIKIAN, 2015).

- Método de Su et al (2001): consiste na obtenção de um CAA, cuja principal consideração é o preenchimento dos vazios do esqueleto granular pouco compactados com argamassa, de modo a atingir as propriedades de trabalhabilidade, habilidade passante e fluidez desejadas (SU; HSU; CHAI, 2001).

- Método de Gomes, Gettu e Agulló (2002): é um método para CAA de alta resistência, sendo obtido otimizando-se a composição e o esqueleto granular separadamente. Sua composição final é definida buscando o teor de pasta necessário para se obter um material com características autoadensáveis (GOMES; BARROS, 2009).

- Método de Tutikian (2004): é baseado no método de dosagem para concretos convencionais do IPT/EPUSP. Consiste nas seguintes etapas: escolha dos materiais constituintes do CAA; determinação do teor de argamassa seca ideal para a mistura a partir dos materiais escolhidos, sem incluir aditivo e finos, devendo ser mantido constante; produção de no mínimo três traços, sendo um rico, um intermediário e um pobre em relação ao teor de argamassa seca, para que possam ser desenhadas as curvas de dosagem para a família de materiais selecionados; incorporação do aditivo superplastificante e adição de materiais finos. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

- Método de Repette-Melo (2005): tem como base a dosagem de composições de CAA para resistências pré-determinadas, assim como ocorre com os concretos convencionais. Todos os componentes do concreto são ajustados a partir de ensaios na pasta e na argamassa, sendo o aditivo ajustado no final, em função do espalhamento, viscosidade e habilidade passante (MELO, 2005).

- Método de Tutikian e Dal Molin (2007): é semelhante ao método de Tutikian, desenvolvido em 2004, porém foi aperfeiçoado. Ele é um método científico que busca o máximo empacotamento dos agregados, onde os agregados são empacotados dois a dois em ordem decrescente de diâmetro das partículas, visando a obtenção de menores índices de vazios.

Para a dosagem do CAA devem ser seguidos alguns passos, sendo eles: escolha dos materiais; determinação do esqueleto granular; determinação da relação a/c ou percentual de

aditivo superplastificante; mistura dos traços – rico, intermediário e pobre; determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades requeridas e, desenho dos diagramas de dosagem e de desempenho (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

O método de dosagem propõe que, ou deve-se fixar o teor de aditivo com base no histórico de outros concretos similares e contando com a experiência do responsável, ou se determina a relação a/c com base nas tabelas 6.1 e 7.1 da ABNT NBR 6118: 2014. Como essas tabelas só fornecem a relação a/c máxima, servindo apenas como uma aproximação para o valor final, então pode-se também arbitrar uma relação a/c próxima, baseada em uma dosagem com materiais semelhantes (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

Ao final são obtidos os diagramas de dosagem e desempenho do CAA, onde, a partir de qualquer condição inicial, estando dentro do intervalo do estudo experimental é possível dosar qualquer CAA com os materiais escolhidos.

3.2. Ensaios e requisitos do CAA

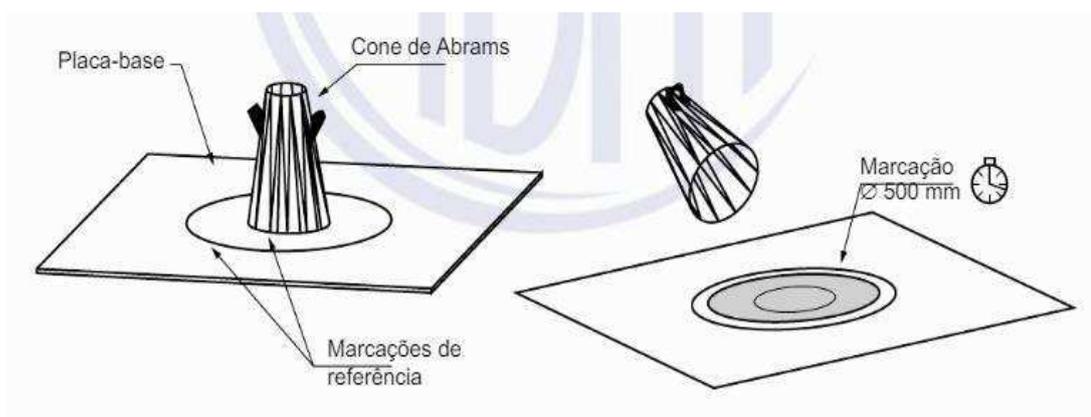
3.2.1. Ensaios no estado fresco

O CAA no estado fresco deve apresentar boas características de fluidez, viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação, de modo que a mistura fique uniforme, com a pasta envolvendo bem os agregados, sem haver o bloqueio entre as armaduras. Com a finalidade de verificar se o concreto produzido atende aos requisitos de autoadensabilidade, foram desenvolvidos ensaios, normatizados pela ABNT NBR 15823:2017.

3.2.1.1. Slump flow test

De acordo com a ABNT NBR 15823-2 (2017), o ensaio é realizado para avaliação da fluidez do concreto autoadensável, em fluxo livre, sob a ação do seu peso próprio, pela determinação do espalhamento e do tempo de escoamento do concreto autoadensável, empregando-se o cone de Abrams (figura 2). É um ensaio utilizado para medir a capacidade de fluidez e o espalhamento do concreto, sem haver segregação.

Figura 2 – Cone de Abrams



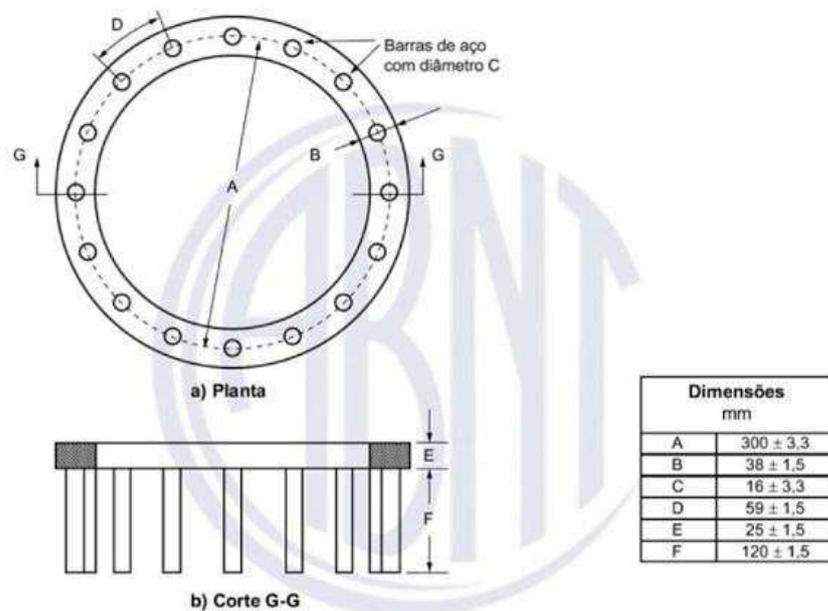
Fonte: ABNT NBR 15823-2 (2017)

Um outro teste realizado simultaneamente com o slump flow test é o ensaio de viscosidade plástica aparente (t_{500}), realizado com a finalidade de avaliar a viscosidade do CAA ao escoar a partir do diâmetro do molde (200 mm) até a marca circular (500 mm), medindo-se o tempo que leva para alcançar essa marca. Também é avaliado nesse ensaio o índice de estabilidade visual (IEV), determinado a partir da análise visual do concreto imediatamente após o fim do escoamento (ABNT NBR 15823-2, 2017).

3.2.1.2. Anel J

O ensaio é normatizado pela ABNT NBR 15823-3 (2017), tem como finalidade a determinação da habilidade passante do CAA ao fluir por barras de aço. É realizado com o auxílio do cone de Abrams, consistindo no preenchimento do cone com o concreto e após isso verifica-se a habilidade do CAA de passar pelas barras de aço, simulando assim o concreto passando pelas armaduras (figura 3).

Figura 3 – Anel J

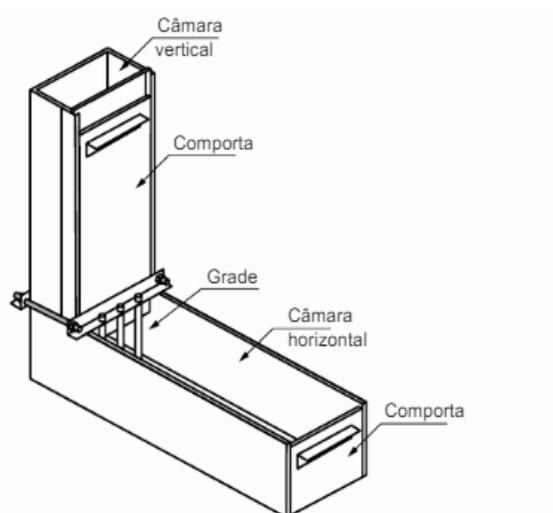


Fonte: ABNT NBR 15823-3 (2017)

3.2.1.3. Caixa L

Ensaio normatizado pela ABNT NBR 15823-4 (2017), realizado com a finalidade de analisar a capacidade do CAA ao escoar por barras de aço, simulando as armaduras e, permanecer coeso. Consiste na utilização de uma caixa com porta móvel, separando a parte vertical da horizontal, possui também barras de aço que simulam uma armadura real, construindo obstáculos para a passagem do concreto. A figura 4 ilustra o equipamento usado para a execução do ensaio da caixa L.

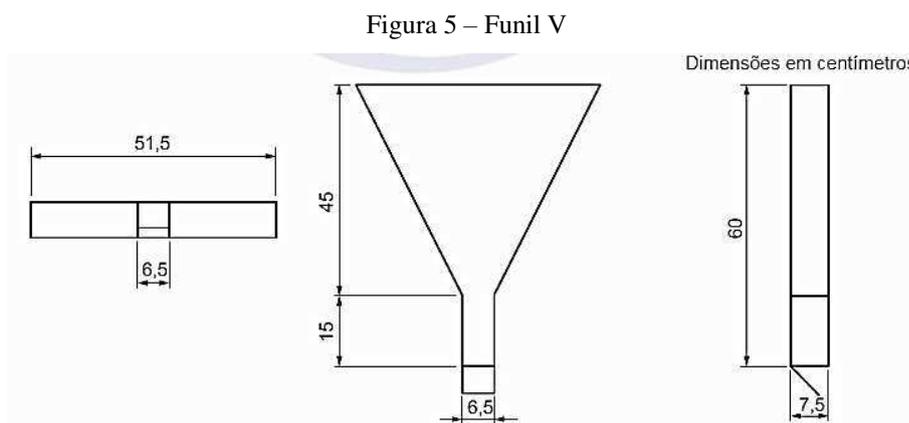
Figura 4 – Caixa L



Fonte: ABNT NBR 15823-4 (2017)

3.2.1.4. Funil V

Ensaio regulamentado pela ABNT NBR 15823-5 (2017), que consiste na determinação da viscosidade do CAA, pela medida do tempo de escoamento de uma massa de concreto através do funil V (figura 5), sendo que o agregado graúdo não deve possuir dimensão máxima característica superior a 20 mm. A viscosidade plástica aparente do concreto é um aspecto importante na obtenção de um bom acabamento superficial ou quando for feito o uso de alta densidade de armadura (ABNT 15823-1, 2017).

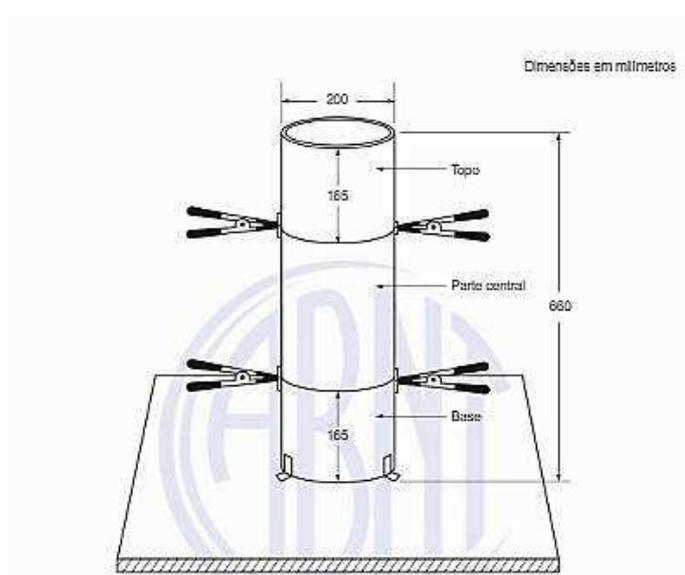


Fonte: ABNT NBR 15823-5 (2017)

3.2.1.5. Coluna de segregação

Método de ensaio regulamentado pela ABNT NBR 15823-6 (2017), consistindo na determinação da resistência à segregação do CAA, a partir da diferença existente entre as massas de agregado graúdo da base e do topo da coluna de segregação (figura 6). Apresenta-se como uma propriedade bastante importante, pois a ocorrência de segregação pode conduzir a defeitos de fissuração e enfraquecimento da superfície (ABNT 15823-1, 2017).

Figura 6 – Coluna de segregação



Fonte: ABNT NBR 15823-6 (2017)

3.2.2. Propriedades no estado endurecido

As propriedades mecânicas e de durabilidade do CAA no estado endurecido apresentam-se como resultado das decisões tomadas na dosagem e mistura do material. Quando é dosado com alto consumo de cimento apresentará fissuração de secagem e alto calor de hidratação. Se for utilizado um alto teor de aditivo superplastificante, terá sua pega inicial retardada (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

Uma das principais vantagens do uso do CAA é o fato dele não necessitar de adensamento, evitando assim o surgimento de nichos e falhas de concretagem, visto que proporcionam redução de resistência e durabilidade.

De acordo com Sohler e Santos (2018), a resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes do estado endurecido. No geral, consiste no valor material característico para a classificação de um concreto nas especificações nacionais e internacionais.

A relação água/cimento e a porosidade são fatores que influenciam diretamente na resistência à compressão, visto que, independentemente dos demais fatores, afeta a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado graúdo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A resistência à compressão é utilizada como um índice para diversos outros tipos de resistência. É obtida da interação entre vários fatores, agrupados em categorias, sendo elas: características e proporções dos materiais, condições de cura e parâmetros de ensaio. A

determinação das proporções adequadas dos materiais é um passo importante para atender à resistência especificada. Outro fator de influência é a geometria do corpo de prova, visto que, quanto maior a razão da altura do corpo de prova sobre o diâmetro, menor será a resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A composição da mistura e a microestrutura do concreto autoadensável afetam o comportamento da resistência à compressão ao longo do tempo. Contudo, no geral, o desenvolvimento das resistências à compressão apresentando a mesma idade no CAA e no concreto convencional é bastante similar, somente em alguns casos, como por exemplo, com a incorporação de adições minerais, o CAA apresenta resistências ligeiramente superiores (HOLSCHEMACHER; KLUG, 2002; DOMONE, 2006).

3.3. Resíduo de beneficiamento de mármore e granito

De acordo com Vidal, Azevedo e Castro (2014), as rochas ornamentais são materiais rochosos extraídos e beneficiados, em maior ou menor grau, para serem utilizados com funções de revestimento, decorativas ou estruturais. O termo abrange outros como pedras naturais, materiais lapídeos, rochas dimensionadas e rochas de cantaria.

Do ponto de vista geológico, as rochas podem ser classificadas em três grandes grupos: ígneas, sedimentares e metamórficas. As rochas ígneas são provenientes da solidificação do magma, em diferentes profundidades da crosta terrestre. As rochas sedimentares resultam da deposição química e detrítica de rochas transportadas e acumuladas em ambientes subaquáticos e eólicos. Por fim, as rochas metamórficas são oriundas da transformação de rochas preexistentes, devido ao aumento da pressão e temperatura no ambiente (MELLO; FILHO; CHIODI, 2011).

O mercado de rochas ornamentais e revestimentos compreende os mármore e granitos como sendo os mais utilizados, sendo responsáveis por cerca de 90% da produção mundial. Os mármore são rochas calcárias ou dolomíticas, sedimentares ou metamórficas, podendo receber desdobramento seguido de beneficiamento (polimento ou apicoamento). Já os granitos, são rochas silicáticas de origem tanto ígnea como metamórfica, que apresentam também condições de desdobramento e beneficiamento (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2007).

3.3.1. Processo de extração e beneficiamento do resíduo

O processo de extração e beneficiamento das rochas ornamentais compreende quatro etapas, sendo elas: lavra, que consiste na extração de blocos de rocha aproximadamente retangulares; desdobramento das rochas, onde os blocos de rochas são cortados em placas brutas; apicoamento, que é o processo no qual são transformadas em rochas ornamentais; e o processo de beneficiamento que consiste na serragem dos blocos em chapas e polimento das chapas, criando uma superfície lisa, opaca e mais impermeável (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2007; VIDAL et al., 2014).

Durante o processo de beneficiamento dos mármore e granitos, ocorre uma grande geração de resíduo. No processo é feito o uso de água, granalha de aço e cal para o corte das chapas, onde é gerada uma lama. Essa lama é recolhida em canaletas e armazenadas em tanques, onde ocorre a decantação do pó e possibilita a reutilização da água. O material sólido é removido dos tanques e disposto em áreas abertas nas marmorarias. A figura 7 ilustra a máquina de corte, que durante o processo de beneficiamento gera o resíduo.

Figura 7 – Máquina de corte utilizada no processo de beneficiamento do mármore e granito



Fonte: Autor (2021)

Os resíduos provenientes do beneficiamento do mármore e granito, na maioria das vezes, são dispostos inadequadamente no meio ambiente, mesmo não possuindo constituintes perigosos em sua composição, deve receber um tratamento adequado. Quando despejados diretamente em um recurso hídrico, podem ocasionar seu assoreamento e aumento da turbidez, além da possibilidade de contaminação do lençol freático, do solo, podendo também causar danos à saúde (SILVA, 2011; MAGACHO et al., 2006).

3.4. Concreto autoadensável com resíduo de mármore e granito

As atividades relacionadas a construção civil possuem grande impacto ambiental, tendo em vista que é um dos maiores consumidores de recursos naturais, fazendo-se necessária a busca por soluções ambientalmente corretas, e com qualidade técnica.

O resíduo obtido do beneficiamento de mármore e granito é um material que apresenta potencial para ser utilizado na produção de concreto, visto que estudos mostram que o seu uso em CAA proporciona melhorias tanto nas propriedades do estado fresco, quanto no estado endurecido. A seguir são apresentados estudos que mostram a aplicação do resíduo de mármore e granito na produção de concretos autoadensáveis.

Em um estudo realizado por Barros (2008) foi feita uma análise de propriedades relacionadas à durabilidade e resistência à compressão em concreto. Para isso, foram produzidos três traços: dois traços referência, ambos sem adições, sendo um com aditivo inibidor de corrosão (C-I-COMP) e o outro sem aditivo (C-REF) e, um concreto autoadensável com adição do Resíduo de Corte de Mármore e Granito (CAA-RCMG). Para a determinação dos dois traços de concreto convencional foi adotado o método da ABCP. Já para a produção do concreto autoadensável, a obtenção da mistura foi a partir do método de Gomes (2002).

A tabela 2 indica os resultados de resistência à compressão obtidos para cada um dos traços, onde é possível observar que o traço que apresenta o resíduo possui melhor desempenho. Dessa forma, concluiu-se que a adição de RCMG contribui para a melhoria da resistência à compressão do CAA.

Tabela 2 - Resultados de resistência à compressão aos 28 dias

Concreto	CAA-RCMG	C-REF	C-I-COMP
f_{c1}	37,6	34,39	27,58
f_{c2}	35,2	36,05	28,98
Resistência à compressão média (MPa)	36,4	35,2	28,3

Fonte: Barros (2008)

Vieira (2017) estudou as propriedades do CAA a partir do uso de cinco diferentes tipos de adições minerais: fíler calcário, resíduo de marmoraria, rocha fosfática, estéril de fosfato e cinza de eucalipto em quatro teores de substituição ao cimento (10%, 20%, 30% e 40%). Os

traços foram obtidos a partir dos parâmetros definidos no ACI 237R-07 (2007). Foram analisadas as propriedades físicas, de autoadensabilidade e resistência mecânica. Analisando-se os resultados obtidos para os ensaios no estado fresco, o resíduo de marmoraria se destacou em todos os ensaios quando comparado com as demais adições.

Xavier (2019) realizou um estudo comparando as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do CAA com adição do RBMG nas proporções 0%, 20%, 40% e 50%. Os traços foram dosados a partir dos métodos propostos por Gomes e Barros (2009) e Tutikian e Dal Molin (2007). Os resultados da análise das propriedades do estado fresco mostraram que todos os concretos produzidos com o resíduo superaram o concreto sem adição, principalmente na capacidade de escoamento.

Analisando as propriedades dos concretos no estado endurecido, para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, os concretos com adição apresentaram resultados superiores em todos os ensaios, quando comparados com o CAA referência (XAVIER, 2019).

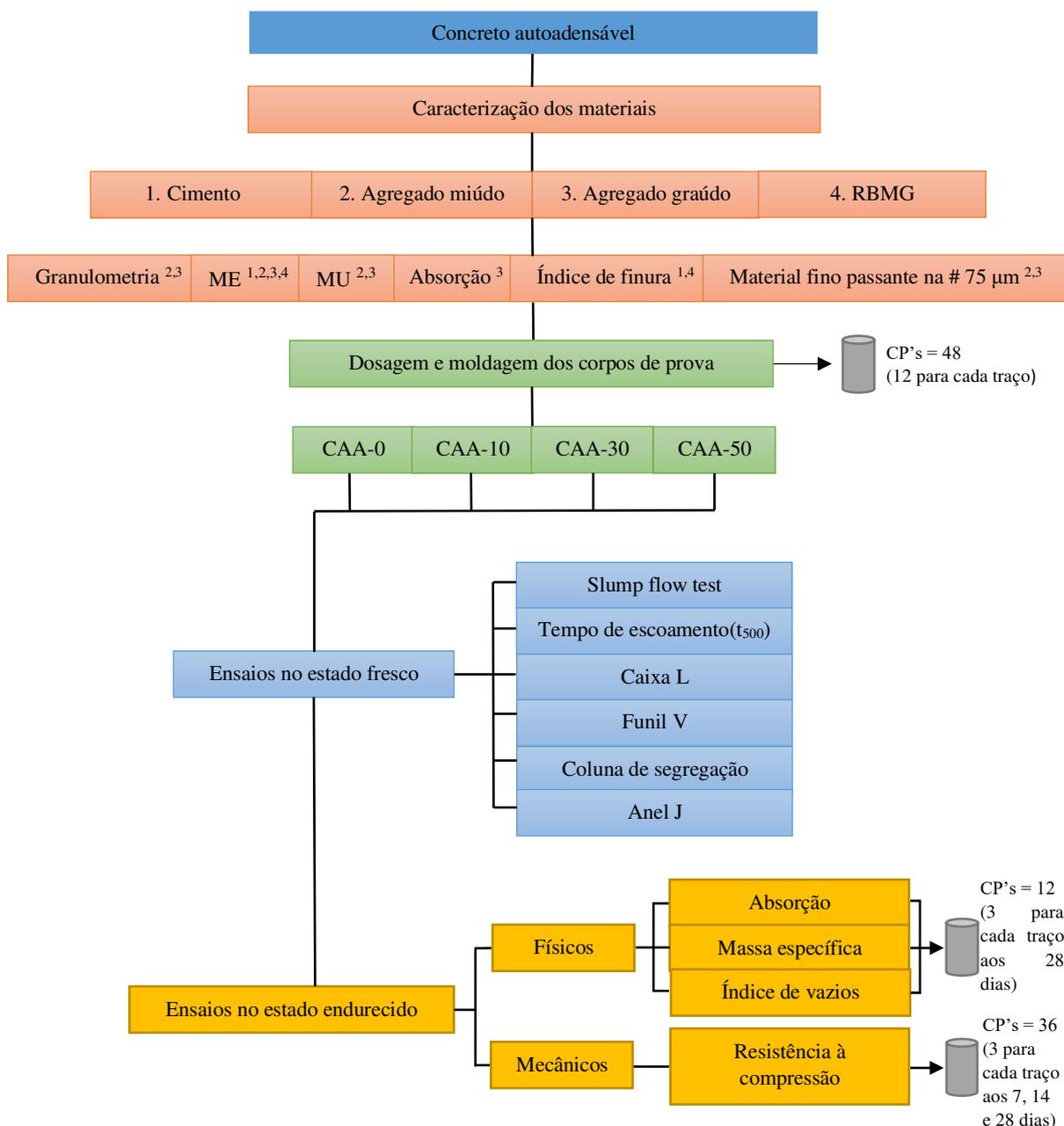
Xavier (2019) constatou que na análise realizada a partir do ensaio de microscopia eletrônico de varredura (MEV), à medida que se aumentou a taxa de adição de RBMG, mais compacta e densa estava a sua microestrutura, com menos poros e com maior interação entre os agregados e a pasta. Sendo assim, a incorporação do resíduo em quantidades adequadas é uma boa alternativa, tanto em relação à tecnologia do concreto, quanto aos benefícios ambientais proporcionados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa consiste na análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto autoadensável com a adição do resíduo de beneficiamento de mármore e granito. Foram produzidos quatro traços, sendo um traço referência (sem adição do RBMG) e três traços com a adição do RBMG em percentuais (10%, 30% e 50%), com a finalidade de observar a influência dessas porcentagens no CAA.

O estudo foi desenvolvido de acordo com as seguintes etapas: seleção e caracterização dos materiais, dosagem e moldagem dos corpos de prova (CP's) e ensaios com os CP's nos estados fresco e endurecido. Na figura 8 pode ser observado o fluxograma referente ao desenvolvimento da pesquisa.

Figura 8 – Fluxograma de procedimento experimental



Fonte: Autor (2021)

4.1. Seleção e caracterização dos materiais

4.1.1. Cimento Portland

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). A escolha desse cimento se deu devido a necessidade de transporte dos corpos de prova com pouca idade. Foi ensaiado quanto à massa específica, conforme a ABNT NBR 16605:2017 e determinação do índice de finura, segundo a ABNT NBR 11579:2013. A figura 9 ilustra o ensaio da massa específica com o uso do frasco de Le Chatelier.

Figura 9 - Ensaio de massa específica do cimento CP V – ARI



Fonte: Autor (2021)

4.1.2. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita com dimensão máxima de 9,5 mm. A brita foi ensaiada com relação à massa específica e absorção de água, conforme a ABNT NBR NM 53:2009; massa unitária no estado solto e massa unitária compactada, de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006; determinação da composição granulométrica, segundo a ABNT NBR NM 248:2003 e determinação do material fino passante na peneira 75 μm , de acordo com a ABNT NBR NM 46:2003.

4.1.3. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia fina, sendo ensaiado com relação à massa específica, segundo a ABNT NBR NM 52:2009; massa unitária no estado solto e massa unitária compactada, de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006; determinação da composição granulométrica, conforme a ABNT NBR NM 248:2003 e determinação do material fino passante na peneira 75 μm , de acordo com a ABNT NBR NM 46:2003.

Para a produção do CAA, quanto menor for o módulo de finura do agregado miúdo, mais adequado será para atingir elevada fluidez e coesão. Sendo assim, foi feito o uso de uma areia fina com duas granulometrias diferentes, tendo em vista que no mercado local não havia disponibilidade de agregado miúdo com módulo de finura adequado. Dessa forma, 50% da

quantidade necessária para a realização dos traços foi obtida pelo peneiramento em malha de 4,75 mm e o restante foi peneirado em malha de 0,60 mm. Após isso, foram misturadas visando um melhor empacotamento de partículas e, conseqüentemente um menor índice de vazios.

4.1.4. Resíduo de beneficiamento de mármore e granito

O RBMG foi obtido em uma marmoraria da cidade de Pombal-PB, em forma de lama, proveniente do corte e polimento das chapas de mármore e granito. A metodologia adotada para a preparação do RBMG para a realização dos ensaios foi baseada no estudo de Xavier (2019).

Inicialmente foi pesado e colocado em uma estufa à 105 °C durante 24 horas, onde foi pesado novamente e verificado que a diferença de massa nas duas pesagens era inferior a 0,1 g. Em seguida, foi resfriado e peneirado em uma peneira de malha 600 µm. Na figura 10 é identificado o material antes de passar na peneira 600 µm, no estado seco e destorroado (figura 10.a) e o material após ser peneirado (figura 10.b).

Figura 10 - Resíduo de beneficiamento de mármore e granito. a) Seco e destorroado e b) Peneirado



a)



b)

O resíduo foi caracterizado quanto à massa específica conforme a ABNT NBR 16605:2017 e índice de finura de acordo com a ABNT NBR 11579:2013. Para o RBMG não foi determinada a composição granulométrica, tendo em vista que é um material muito fino, estando abaixo do intervalo da zona utilizável inferior (1,55 a 2,20), devendo ser caracterizado pelo método do granulômetro a laser. Como o laboratório em que foi realizado o estudo não possuía o equipamento para a realização deste ensaio, o mesmo não foi realizado.

4.1.5. Água de amassamento

A água de amassamento a ser utilizada é a água potável obtida do sistema de abastecimento público do município de Pombal-PB.

4.1.6. Aditivo

Foi utilizado o aditivo superplastificante Superflow da empresa Suape Aditivos, indicado na figura 11, baseado em uma cadeia de éter policarboxilato, utilizado como dispersante para sistemas cimentícios, com o objetivo de reduzir a quantidade de água, proporcionando assim, uma melhor hidratação do cimento e aumento das resistências mecânicas.

Figura 11 - Aditivo superplastificante



Fonte: Autor (2021)

As características técnicas do aditivo, disponibilizadas pelo fabricante, estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Características técnicas do aditivo superplastificante

Propriedades	Parâmetros
Aparência	Pó
Redução de água (%)	≥ 30
PH (solução 20% em água à 25 °C)	7,0 – 9,0
Umidade (%)	≤ 5

Fonte: Ficha técnica disponibilizada pelo fabricante

4.2. Dosagem e moldagem dos corpos de prova

O método de dosagem adotado foi proposto por Tutikian e Dal Molin (2007). Consiste em um procedimento simples, experimental e que permite a utilização de quaisquer materiais locais, desde que sejam cumpridos os requisitos apresentados nos tópicos 4.2.1. e 4.2.2 a seguir.

4.2.1. Determinação do esqueleto granular

Inicialmente foi feita a seleção e caracterização dos materiais constituintes do CAA. Após isso, foi determinada a proporção ideal dos agregados, de modo que a mistura contivesse a menor quantidade de vazios. Para isso, foram empacotados os agregados em ordem decrescente de diâmetro das partículas. A mistura se iniciou com 100% do agregado graúdo e

0% de agregado miúdo, foi variando de 10% em 10% a quantidade, à medida que foi decrescendo a proporção de agregado graúdo, foi aumentando a mesma proporção de agregado miúdo. No entanto, ao se aproximar do empacotamento máximo foi variando de 5% em 5%, a fim de obter uma maior precisão no resultado. Na figura 12 é possível identificar a determinação da massa da mistura dos agregados graúdo e miúdo.

Figura 12 - Determinação da massa da mistura dos agregados



Fonte: Autor (2021)

Através da massa obtida pelas misturas dos agregados em diferentes proporções, foi possível calcular a massa unitária compactada, dada pela divisão entre a massa e o volume contido no recipiente usado. Em seguida, foi calculada a massa específica da mistura, obtida pela multiplicação das massas específicas pela quantidade de cada um dos agregados, conforme apresentada na equação 1.

$$M_{espAB} = \frac{(M_{espA} * \%A) + (M_{espB} * \%B)}{100} \quad \text{Equação 1}$$

O índice de vazios da mistura, em percentual, foi obtido pela razão da subtração entre as massas específica e a massa unitária da mistura dividido pela massa específica, conforme observado na equação 2.

$$V = \frac{M_{espAB} - M_{unitAB}}{M_{espAB}} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Após a determinação da massa unitária compactada e do índice de vazios para cada mistura, foi escolhida a proporção ideal dos agregados, sendo esta, a que apresenta maior massa unitária compactada e menor índice de vazios.

O consumo de cimento foi calculado conforme a equação 3. A partir dessa equação obtém-se o consumo de cimento para a moldagem de 1 m³ de concreto. “a” corresponde a relação agregado miúdo seco / cimento em massa; “p” a relação agregado graúdo seco / cimento em massa; “a/c” a relação água / cimento em massa; “ γ_c ” a massa específica do cimento, em kg/dm³; “ γ_a ” a massa específica do agregado miúdo, em kg/dm³; “ γ_p ” a massa específica do agregado graúdo, em kg/dm³.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c} \quad \text{Equação 3}$$

4.2.2. Determinação da relação a/c ou percentual de aditivo superplastificante

De acordo com a tabela 6.1 da ABNT NBR 6118 (2014), que trata do procedimento para projeto de estruturas de concreto, a classe de agressividade ambiental do local é II, visto que está situado em um ambiente urbano com pequeno risco de deterioração da estrutura. A partir da classe de agressividade ambiental, conforme a tabela 7.2 da ABNT NBR 6118 (2014), obteve-se a relação a/c máxima que é de 0,60.

Tendo em vista que a ABNT NBR 6118 (2014) estabelece apenas a relação a/c máxima, a relação a/c foi fixada em 0,54, tendo como base o estudo realizado por Xavier (2019), que utilizou materiais com características semelhantes. O teor de aditivo superplastificante adotado também foi o mesmo usado por Xavier (2019), sendo de 1% em relação a massa do cimento. No entanto, o teor de aditivo e a relação a/c foram modificados durante a mistura, visto que as quantidades fixadas inicialmente não foram suficientes para atender aos requisitos de autoadensabilidade.

4.2.3. Procedimento de mistura

Após a determinação das proporções ideais de cada um dos materiais, foi realizada a mistura, sendo utilizada uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros.

Antes de iniciar a mistura a betoneira foi molhada, após isso deixou-se a água escorrer para a colocação dos materiais. Na tabela 4 é apresentada a ordem de colocação dos materiais na betoneira.

Tabela 4 - Procedimento da mistura

Ordem de colocação dos materiais	Materiais	Tempo de mistura (min)
1°	Brita + areia + 30% da água	1,0
2°	Cimento + RBMG + 35% da água	1,5
3°	Aditivo superplastificante diluído nos 35% de água restantes	1,5

Fonte: Autor (2021)

Foi determinado apenas um traço para cada um dos percentuais de adição, tendo em vista a limitação da quantidade de aditivo. Sendo produzidas três betonadas para cada traço, sendo uma para a realização do slump flow test e moldagem dos corpos de prova, uma para o anel J e outra para a caixa L, funil V e coluna de segregação.

Após a produção do CAA, conforme descrito, foram realizados os ensaios no estado fresco e moldados os corpos de prova cilíndricos nas dimensões 100 mm x 200 mm para posterior avaliação da resistência à compressão. Foram moldados 12 corpos de prova para cada traço, totalizando 48 corpos de prova. Decorridas 24 horas após a moldagem, foram desmoldados e armazenados em cura úmida, e rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias.

4.3. Ensaio realizados no estado fresco

4.3.1. Slump flow test

Foi executado de acordo com a NBR 15823-2 (2017), onde foi verificado inicialmente o tempo em segundos que o concreto levou para atingir a marca circular de 500 mm de diâmetro (t_{500}). Primeiramente preencheu-se o cone de Abrams, fez-se o arrasamento e em seguida o

mesmo foi elevado. Após isso, aguardou-se até que o concreto estivesse em situação de aparente repouso e realizou-se duas medições perpendiculares entre si do diâmetro de espalhamento do concreto, sendo calculada a média aritmética desses dois valores. Na figura 13 é observado o cone de Abrams posicionado sobre a placa-base para a realização do ensaio.

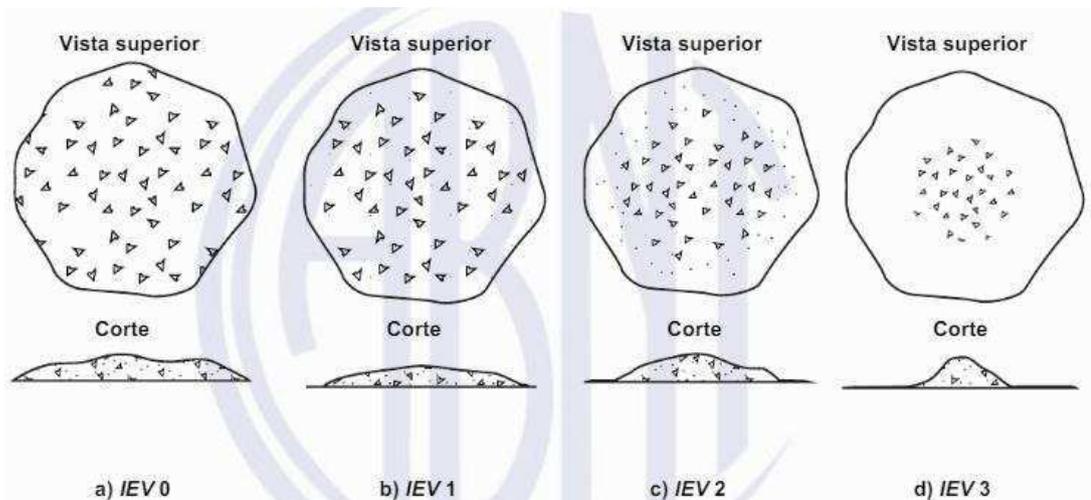
Figura 13 - Slump flow test



Fonte: Autor (2021)

Durante a execução do ensaio também foi verificado o índice de estabilidade visual (IEV), onde foi analisada a distribuição dos agregados na mistura, a distribuição de argamassa e a possível ocorrência de exsudação e/ou segregação. A figura 14 ilustra a classificação com relação ao IEV, sendo classificado visualmente pela aparência do concreto.

Figura 14 - Classes de índice de estabilidade visual (IEV)



Fonte: ABNT NBR 15823-2 (2017)

4.3.2. Anel J

Para a execução desse ensaio foi confeccionado o anel J metálico, com 300 mm de diâmetro e 25 mm de espessura, sendo constituído verticalmente por 16 barras de aço com diâmetro de 16 mm, 120 mm de altura, espaçadas a cada 59 mm, conforme as recomendações da ABNT NBR 15823-3 (2017). A placa-base utilizada foi confeccionada com madeirite plastificado de 12 mm de espessura. Inicialmente preenche-se o cone de Abrams com o material, sem adensamento, em seguida, é realizado o arrasamento e o cone é elevado para que o material flua pelas barras de aço. Ao final do ensaio são realizadas duas medições do diâmetro, perpendiculares ao espalhamento, sendo realizada uma média aritmética desses valores.

O ensaio resulta na determinação da diferença entre o diâmetro médio do espalhamento obtido no slump flow test e o diâmetro médio de espalhamento obtido neste ensaio. A figura 15 ilustra o cone de Abrams e o anel J posicionados sobre a placa-base para a execução do ensaio.

Figura 15 – Anel J



Fonte: Autor (2021)

4.3.3. Caixa L

Para esse ensaio foi confeccionada uma caixa L com as mesmas dimensões mencionadas na ABNT NBR 15823-4 (2017). O material utilizado foi madeirite plastificado com espessura de 12 mm, pintado com tinta óleo. O ensaio constituiu em preencher o compartimento vertical com a comporta fechada, ao fim do preenchimento foi aberta a comporta, permitindo o

escoamento do concreto. Quando cessou o escoamento foi calculada a habilidade passante através da equação 4.

$$HP = \frac{H2}{H1} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

HP é a habilidade passante;

H1 é a altura da superfície do concreto, medida a partir do fundo, na extremidade da câmara horizontal junto à câmara vertical da caixa, expressa em milímetros;

H2 é a altura da superfície do concreto, medida a partir do fundo, na extremidade da câmara horizontal junto à face oposta da câmara vertical da caixa, expressa em milímetros.

Figura 16 – Caixa L



Fonte: Autor (2021)

4.3.4. Funil V

Para esse ensaio foi confeccionado o funil em chapa metálica com 1,5 mm de espessura, obedecendo as especificações da ABNT NBR 15823-5 (2017). O ensaio consistiu em preencher o funil e após 10 segundos foi aberta a comporta e registrou-se o intervalo de tempo para o escoamento completo do concreto (T_{10seg}). A figura 17 representa o funil V.

Figura 17 – Funil V



Fonte: Autor (2021)

4.3.5. Coluna de segregação

Para a execução desse ensaio foi confeccionada a coluna com um tubo de PVC de 200 mm de diâmetro e 660 mm de altura, sendo seccionado em três partes, onde a base e o topo tem 165 mm de altura e a parte central tem 330 mm, tendo suas partes unidas por presilhas metálicas, obedecendo as especificações da ABNT NBR 15823-6 (2017).

O ensaio teve início com o preenchimento total da coluna de segregação com concreto (figura 18), após aproximadamente 20 minutos foram retiradas porções de concreto do topo e da base da coluna com o auxílio de chapas metálicas de 1,5 mm de espessura, onde cada uma dessas porções foi lavada individualmente sobre a peneira de malha 4,75 mm, de modo a remover totalmente a argamassa. Em seguida, os agregados graúdos foram secos superficialmente com a utilização de um pano e após isso foram pesadas cada uma das amostras, obtendo-se assim a resistência à segregação, calculada pela equação 5.

$$SR = \frac{2 * (m_B - m_T)}{m_B + m_T} * 100$$

Equação 5

Onde:

SR é a resistência à segregação do concreto, expressa em porcentagem (%);

m_B é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada da base da coluna, expressa em gramas (g);

m_T é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada do topo da coluna, expressa em gramas (g).

Figura 18 – Coluna de segregação



Fonte: Autor (2021)

4.4. Ensaios realizados no estado endurecido

4.4.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme as regulamentações da ABNT NBR 5739 (2018). Foram ensaiados para as idades de 7, 14 e 28 dias, sendo três corpos de prova para cada idade. Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e, em seguida foram imersos em água, a uma temperatura de 23 ± 2 °C, onde permaneceram até as idades estabelecidas. Antes da execução do ensaio, os corpos de prova foram regularizados com neoprene. Foi utilizada uma prensa hidráulica (figura 19), cuja carga máxima é de 100 toneladas e precisão de 10 kgf, pertencente ao laboratório da GC mix concreto, localizado no anexo b do km 105, BR 361 na cidade de Patos-PB.

Figura 19 – Prensa hidráulica utilizada



Fonte: Autor (2021)

A resistência à compressão dos corpos de prova foi obtida pela equação 6, presente na ABNT NBR 5739 (2018).

$$f_c = \frac{4 * F}{\pi * d^2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão, expressa em megapascal (MPa);

F é a força máxima alcançada, expressa em newton (N);

d é o diâmetro do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

4.4.2. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Estes ensaios foram realizados aos 28 dias, sendo utilizados três corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada uma das misturas, seguindo as recomendações da ABNT NBR 9778 (2009).

Os ensaios foram executados no Laboratório de materiais da Universidade Federal de Campina Grande, campus Pombal, conforme as seguintes etapas:

- Os corpos de prova foram imersos em água a 21°C durante 28 dias e após esse período de cura, foram medidas as massas dos corpos de prova submersos (m_i) em uma balança hidrostática;
- Após os corpos de prova serem retirados da água, eles tiveram suas superfícies secas com o auxílio de um pano úmido, com a finalidade de remover a umidade superficial e foram novamente pesados para determinação das massas saturadas com superfície seca (m_{sat});
- Em seguida, as amostras foram levadas para a estufa a 105 °C até que duas pesagens sucessivas, em intervalos de 24 horas, mostrassem uma redução de massa inferior a 0,5%. Após serem retiradas da estufa, foram resfriadas em temperatura ambiente (23 °C) para a determinação da massa seca em estufa (m_s).

Após a obtenção das massas mencionadas anteriormente, tornou-se possível o cálculo de absorção por imersão ($Ab_{IMERSÃO}$) a partir da equação 7, índice de vazios (I_V) a partir da equação 8, massa específica da amostra seca (ME_{SECA}) de acordo com a equação 9, massa específica da amostra saturada (ME_{SAT}) de acordo com a equação 10 e a massa específica real (ME_{REAL}) conforme a equação 11.

As características físicas foram determinadas conforme as seguintes equações:

$$Ab_{IMERSÃO} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad \text{Equação 7}$$

$$I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} * 100 \quad \text{Equação 8}$$

$$ME_{SECA} = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 9}$$

$$ME_{SAT} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 10}$$

$$ME_{REAL} = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Equação 11}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização dos materiais

5.1.1. Cimento

A tabela 5 apresenta os dados dos ensaios realizados para a caracterização do cimento CP V – ARI.

Tabela 5 – Caracterização do cimento CP V – ARI

Propriedades	Normas	Valores	Unidades
Massa específica	ABNT NBR 16605:2017	3,12	g/cm ³
Índice de finura	ABNT NBR 11579:2013	1,10	%

Fonte: Autor (2021)

Para o índice de finura foi obtido um percentual de 1,10%, estando dentro do limite imposto pela ABNT NBR 16697:2018. O valor obtido para a massa específica do cimento foi de 3,12 g/cm³.

5.1.2. Agregado graúdo

A seguir estão apresentados os dados obtidos a partir da caracterização do agregado graúdo. A tabela 6 apresenta os dados obtidos da composição granulométrica da brita.

Tabela 6 – Composição granulométrica do agregado graúdo

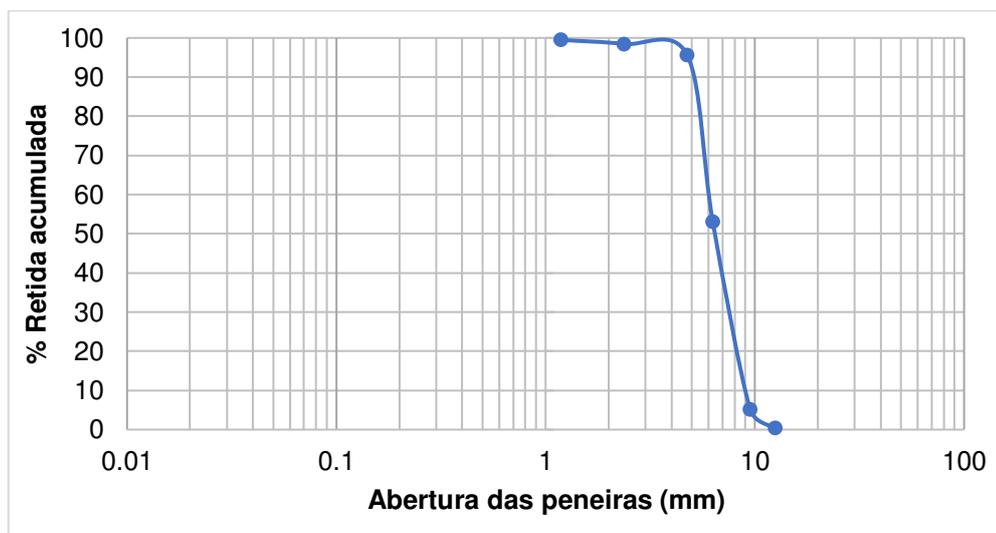
Abertura da peneira (mm)	% retida	% acumulada
12,5	0	0
9,5	5	5
6,3	48	53
4,75	43	96
< 4,75	4	100
D _{máx} característica	9,5 mm	
Módulo de finura	3,52	
Classificação	Zona 4,75/12,5	

Fonte: Autor (2021)

Diante da composição granulométrica do agregado graúdo, obteve-se que a brita utilizada no estudo apresenta dimensão máxima de 9,5 mm, sendo classificada como brita 0. O módulo de finura obtido foi de 3,52.

Conforme a ABNT NBR 7211:2009, o agregado graúdo está classificado na zona 4,75/12,5, tendo em vista que se encontra dentro dos limites de porcentagem, em massa retida acumulada estabelecidos para esta zona. A figura 20 representa a curva granulométrica do agregado graúdo.

Figura 20 - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2021)

Na tabela 7 estão apresentados os dados obtidos a partir da determinação das propriedades físicas do agregado graúdo.

Tabela 7 - Propriedades físicas do agregado graúdo

Propriedades	Normas	Valores	Unidades
Massa específica	ABNT NBR NM 53:2009	2,66	g/cm ³
Absorção	ABNT NBR NM 53:2009	1,27	%
Massa unitária no estado solto	ABNT NBR NM 45:2006	1,43	g/cm ³
Massa unitária compactada	ABNT NBR NM 45:2006	1,45	g/cm ³
Material fino (#75 µm)	ABNT NBR NM 46:2003	0,4	%

Fonte: Autor (2021)

Para o agregado graúdo obteve-se uma massa específica de 2,66 g/cm³. No estado solto foi encontrada uma massa unitária de 1,43 g/cm³ e no estado compactado foi de 1,45 g/cm³. Para a absorção foi obtido um percentual de 1,27%. A quantidade de material fino passante na #75 µm foi de 0,4%, estando dentro do limite aceitável, visto que, conforme a ABNT NBR 7211:2009 não deve ultrapassar 1,0% para agregados graúdos.

5.1.3. Agregado miúdo

A tabela 8 apresenta os dados obtidos com a determinação da composição granulométrica da areia obtida com a mistura de duas granulometrias diferentes.

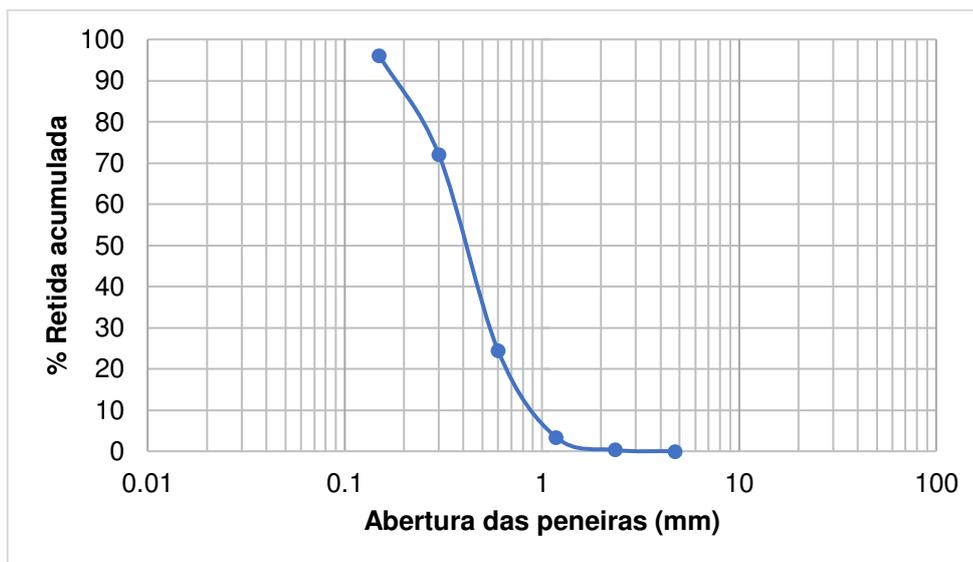
Tabela 8 - Composição granulométrica do agregado miúdo

Abertura da peneira (mm)	% retida	% acumulada
4,75	0	0
2,36	0	0
1,18	3	3
0,6	21	24
0,3	48	72
0,15	24	96
fundo	4	100
D_{máx} característica	1,18 mm	
Módulo de finura	1,95	
Classificação	Zona utilizável inferior	

Fonte: Autor (2021)

A partir da análise da composição granulométrica do agregado miúdo, foi classificado como uma areia fina, visto que o seu módulo de finura se encontra entre 1,55 e 2,20, estando classificado na zona utilizável inferior, segundo a ABNT NBR 7211:2009. Obteve-se uma dimensão máxima de 1,18 mm para o agregado miúdo. A figura 21 representa a curva granulométrica obtida para o agregado miúdo.

Figura 21 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2021)

Na tabela 9 estão expostos os dados obtidos com a determinação das propriedades físicas do agregado miúdo.

Tabela 9 - Propriedades físicas do agregado miúdo

Propriedades	Normas	Valores	Unidades
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009	2,51	g/cm ³
Massa unitária no estado solto	ABNT NBR NM 45:2006	1,41	g/cm ³
Massa unitária compactada	ABNT NBR NM 45:2006	1,50	g/cm ³
Material fino (#75 µm)	ABNT NBR NM 46:2003	5,38	%

Fonte: Autor (2021)

Para o agregado miúdo obteve-se uma massa específica de 2,51 g/cm³. A massa unitária no estado solto foi de 1,41 g/cm³ e a massa unitária compactada foi de 1,50 g/cm³. Apresentou 5,38% de material fino passante na #75 µm, ultrapassando assim a quantidade máxima aceitável pela ABNT NBR 7211:2009, que é de 5%. No entanto, mesmo ultrapassando esse limite, a areia foi utilizada, pois a composição granulométrica e o módulo de finura estiveram dentro dos parâmetros estabelecidos, visto que, de acordo com Tutikian e Dal Molin (2021), o módulo de finura do agregado miúdo não deve ser superior a 3, podendo levar a ocorrência de segregação da mistura.

5.1.4. Resíduo de beneficiamento de mármore e granito

A tabela 10 apresenta os resultados obtidos com a caracterização do RBMG.

Tabela 10 - Propriedades físicas do RBMG

Propriedades	Normas	Valores	Unidades
Massa específica	ABNT NBR 16605:2017	2,80	g/cm ³
Índice de finura	ABNT NBR 11579:2013	12,89	%

Fonte: Autor (2021)

Para o ensaio da massa específica do RBMG obteve-se 2,80 g/cm³. No estudo realizado por Xavier (2019), a massa específica foi de 2,58 g/cm³, apresentando assim um valor próximo ao que foi obtido nesta pesquisa.

O RBMG apresentou um índice de finura de 12,89%, sendo considerado um percentual elevado de finos, visto que para os cimentos Portland o valor máximo é de 12%.

5.2. Definição e composição dos traços do CAA

A determinação das proporções adequadas de agregado graúdo e miúdo foram obtidas a partir da escolha da mistura que apresentou maior massa unitária compactada e menor índice de vazios. Para isso, foram variados os percentuais de agregado graúdo e miúdo. Inicialmente, à medida que foi decrescendo 10% de agregado graúdo, foi aumentado na mesma proporção o agregado miúdo, e à medida que se aproximou da proporção ideal decresceu-se 5%.

A tabela 11 apresenta o procedimento realizado até a obtenção do índice de vazios para cada uma das misturas.

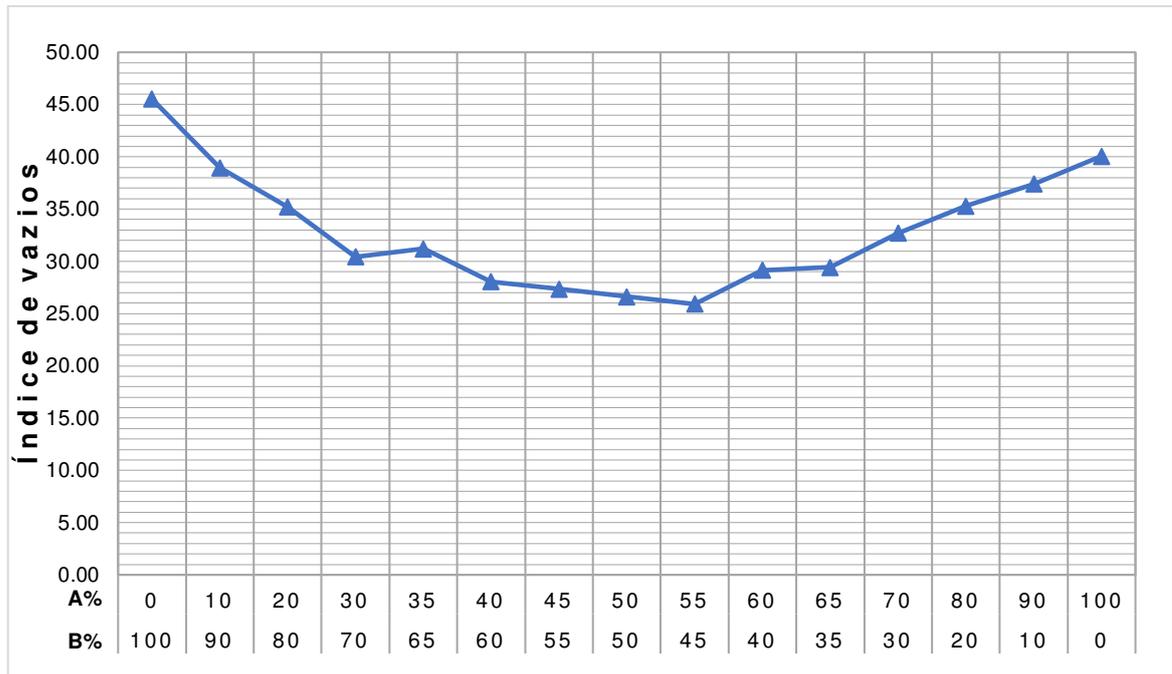
Tabela 11 - Determinação da proporção ideal dos agregados

Brita	Areia	MAB (Kg)	Vol. do recipiente (m³)	Munit. Comp. (kg/m³)	Mesp. brita (kg/m³)	Mesp. areia (kg/m³)	Mesp AB (kg/m³)	V (%)
100	0	2,28	0,0016	1451,49	2664,42	2506,60	2664,42	45,52
90	10	2,54	0,0016	1617,01	2664,42	2506,60	2648,64	38,95
80	20	2,68	0,0016	1706,14	2664,42	2506,60	2632,86	35,20
70	30	2,86	0,0016	1820,73	2664,42	2506,60	2617,07	30,43
65	35	2,82	0,0016	1795,27	2664,42	2506,60	2609,18	31,19
60	40	2,94	0,0016	1871,66	2664,42	2506,60	2601,29	28,05
55	45	2,96	0,0016	1884,39	2664,42	2506,60	2593,40	27,34
50	50	2,98	0,0016	1897,13	2664,42	2506,60	2585,51	26,62
45	55	3,00	0,0016	1909,86	2664,42	2506,60	2577,62	25,91
40	60	2,86	0,0016	1820,73	2664,42	2506,60	2569,73	29,15
35	65	2,84	0,0016	1808,00	2664,42	2506,60	2561,84	29,43
30	70	2,70	0,0016	1718,27	2664,42	2506,60	2553,95	32,70
20	80	2,58	0,0016	1642,48	2664,42	2506,60	2538,16	35,29
10	90	2,48	0,0016	1578,82	2664,42	2506,60	2522,38	37,41
0	100	2,36	0,0016	1502,42	2664,42	2506,60	2506,60	40,06

Fonte: Autor (2021)

De acordo com os resultados apresentados na tabela 11, a proporção adotada foi de 55% de agregado miúdo e 45% de agregado graúdo, tendo em vista que foi a mistura que apresentou maior massa unitária compactada e menor índice de vazios, sendo igual a 25,91%. A figura 22 representa a relação entre as proporções das misturas dos agregados e o índice de vazios.

Figura 22 - Relação entre as proporções de misturas dos agregados e índice de vazios



Fonte: Autor (2021)

A partir da determinação do empacotamento das partículas, foi adotado um traço de 1:4, apresentando um teor de argamassa de 64%. Após isso, foi realizada a mistura do traço referência, a fim de ajustar as proporções da relação a/c e do teor de aditivo superplastificante, até que o concreto estivesse com fluidez e trabalhabilidade de um CAA.

A tabela 12 apresenta o traço unitário para o CAA sem adição e com adições de 10%, 30% e 50% de RBMG.

Tabela 12 - Dosagem dos materiais constituintes do CAA

Traço	Proporção dos materiais					
	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo (%)	RBMG (%)
CAA-0	1	2,20	1,80	0,57	1,21	0
CAA-10	1	2,20	1,80	0,59	1,26	10
CAA-30	1	2,20	1,80	0,59	1,28	30
CAA-50	1	2,20	1,80	0,59	1,30	50

Fonte: Autor (2021)

As proporções de aditivo superplastificante e relação a/c sofreram variações em cada um dos quatro traços, quando comparado com os teores fixados inicialmente, com a finalidade de atingir o espalhamento e a trabalhabilidade de um CAA.

À medida que se adicionou o aditivo superplastificante também foi necessário aumentar a relação a/c, como o aditivo utilizado foi em forma de pó e o mesmo diluído em água, percebeu-se um aumento de água na mistura. Isso é devido a uma maior quantidade de finos, visto que o teor de aditivo aumentou à medida que foi acrescentado maiores teores de RBMG. Ainda assim, a relação a/c esteve dentro do limite estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014.

A tabela 13 apresenta o consumo de cada um dos materiais constituintes do CAA para cada um dos traços (CAA-0, CAA-10, CAA-30 e CAA-50).

Tabela 13 - Consumo de materiais para a produção do CAA

Traço	Consumo de materiais (kg/m ³)					
	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	RBMG
CAA-0	412,58	907,68	742,65	235,17	4,99	0,00
CAA-10	412,58	907,68	742,65	243,42	5,20	41,26
CAA-30	412,58	907,68	742,65	243,42	5,28	123,77
CAA-50	412,58	907,68	742,65	243,42	5,36	206,29

Fonte: Autor (2021)

O consumo de cimento obtido esteve dentro do limite aceitável, apresentando um consumo de 412,58 kg/m³, tendo em vista que, de acordo com Gomes e Barros (2009), a faixa aceitável para que não ocorram problemas de retração é entre 200 e 450 kg/m³.

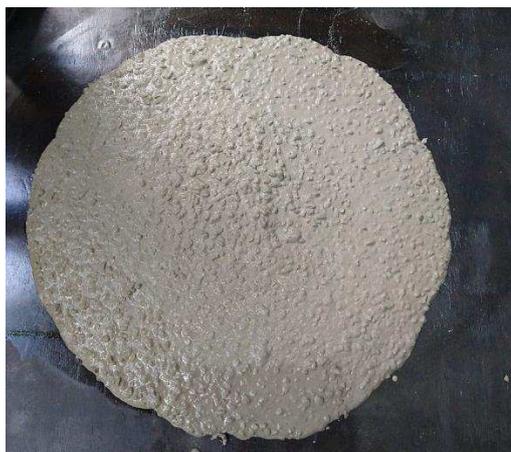
5.3. Ensaio no estado fresco

Após a mistura de cada um dos traços, foram realizados os ensaios para análise das propriedades do CAA no estado fresco.

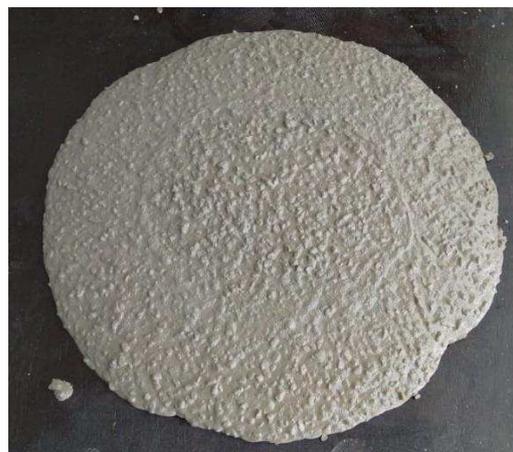
5.3.1. Slump flow test

A figura 23 ilustra o espalhamento obtido para cada um dos traços.

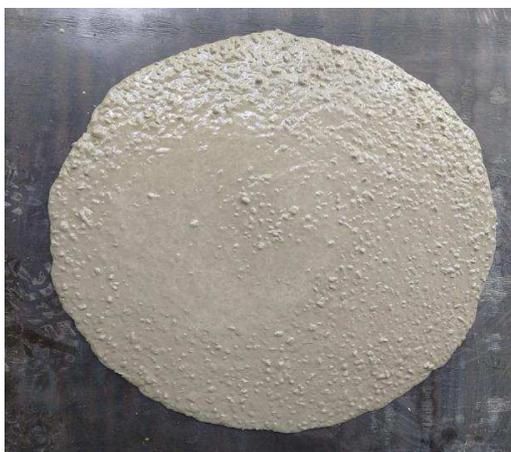
Figura 23 - Espalhamento obtido para cada um dos traços. a) CAA-0, b) CAA-10, c) CAA-30 e d) CAA-50



a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor (2021)

Os resultados obtidos do espalhamento, tempo que levou para atingir a marca de 500mm e do índice de estabilidade visual (IEV) estão dispostos na tabela 14.

Tabela 14 - Espalhamento, tempo de escoamento (t_{500}) e Índice de Estabilidade Visual (IEV)

Traço	Espalhamento (mm)	Classe de espalhamento - ABNT NBR 15823-1 (2017)	t_{500} (s)	Classe de viscosidade plástica aparente - ABNT NBR 15823-1 (2017)	IEV
CAA-0	625	SF1	2,50	VS 2	IEV 0
CAA-10	580	SF1	3,18	VS 2	IEV 0
CAA-30	660	SF2	4,00	VS 2	IEV 0
CAA-50	765	SF3	5,00	VS 2	IEV 0

Fonte: Autor (2021)

A partir dos resultados obtidos no ensaio do t_{500} , observou-se que a viscosidade aumentou à medida que se adicionou mais RBMG na mistura, visto que para o CAA-0 foram necessários 2,50 s para o escoamento do material, para o CAA-10 foram 3,18 s, para o CAA-30 foram 4,00 s e para o CAA-50 foram 5,00 s.

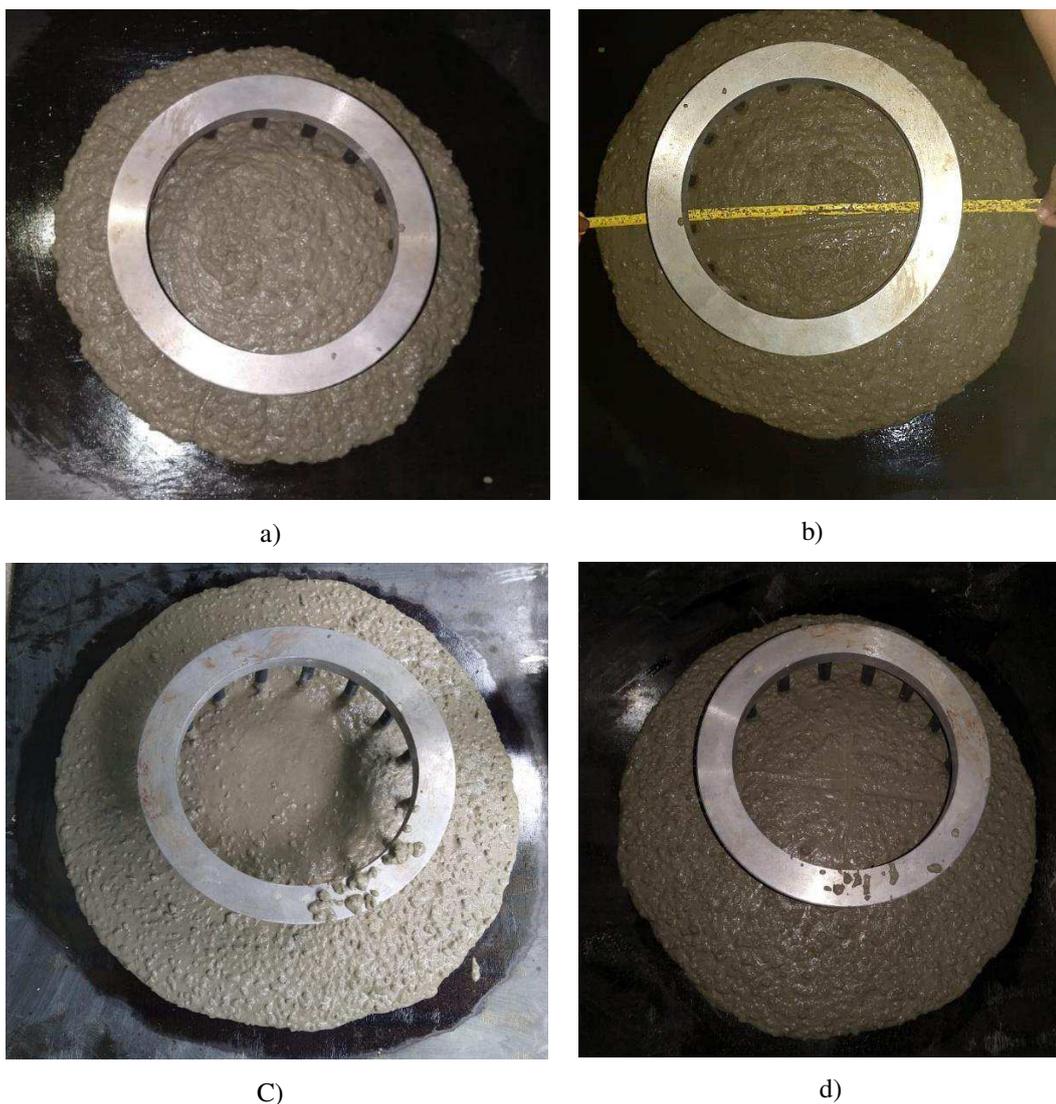
Todas as misturas atenderam aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1 (2017). Observou-se que à medida que se aumentou a quantidade de resíduo, o espalhamento também aumentou, exceto para o CAA-10, que apresentou um espalhamento de 580 mm, enquanto o CAA-0 ficou com 625 mm. Para o CAA-30 o espalhamento foi de 660 mm e para o CAA-50 foi de 765 mm. Essa redução no espalhamento pode ter ocorrido por não ter sido adicionado o teor de aditivo ideal para que essa mistura fluísse como as demais, tendo vista que foi ajustado experimentalmente.

Diante da análise visual do concreto, notou-se que todos ficaram estáveis, sem evidências de segregação e/ou exsudação.

5.3.2. Anel J

A figura 24 ilustra a determinação da habilidade passante sob fluxo livre, a partir do anel J para cada um dos traços executados.

Figura 24 – Habilidade passante sob fluxo livre pelo anel J. a) CAA-0, b) CAA-10, c) CAA-30 e d) CAA-50



Fonte: Autor (2021)

Os dados obtidos a partir da realização do ensaio do anel J estão expostos na tabela 15.

Tabela 15 - Habilidade passante pelo método do anel J

Traço	Habilidade passante pelo anel J (mm)	Classe de habilidade passante pelo anel J - ABNT NBR 15823-1 (2017)
CAA-0	55,00	Fora do intervalo
CAA-10	5,00	PJ 1
CAA-30	55,00	Fora do intervalo
CAA-50	57,50	Fora do intervalo

Fonte: Autor (2021)

Com relação ao ensaio do anel J, somente o CAA-10, com habilidade passante de 5,00 mm, ficou dentro das classes estabelecidas pela ABNT NBR 15823-1 (2017), sendo classificado como PJ 1. Todos os demais traços ultrapassaram os limites estabelecidos, pois não possuíam habilidade passante suficiente para fluir entre as barras de aço.

Para cada ensaio do anel J realizado em cada um dos traços foi produzida uma nova betonada, visto que, devido a capacidade da betoneira só era possível misturar os materiais de um ensaio por vez, podendo assim ter influenciado. Além disso, outro fator que pode ter interferido nos resultados foi a temperatura ambiente, pois foram produzidos em local aberto, sujeito a temperaturas mais elevadas, visto que, segundo Andrade (2020) temperaturas altas proporcionam a diminuição da trabalhabilidade dos concretos.

5.3.3. Caixa L

A figura 25 ilustra o ensaio para a obtenção da habilidade passante sob fluxo confinado a partir da caixa L.

Figura 25 – Habilidade passante sob fluxo confinado pela caixa L



Fonte: Autor (2021)

Na tabela 16 estão apresentados os resultados obtidos para cada um dos traços com relação ao ensaio da caixa L.

Tabela 16 - Habilidade passante pelo método da caixa L

Traço	Habilidade passante pela caixa L	Classe de habilidade passante pela caixa L - ABNT NBR 15823-1 (2017)
CAA-0	0,83	PL 2
CAA-10	0,81	PL 2
CAA-30	0,87	PL 2
CAA-50	0,91	PL 2

Fonte: Autor (2021)

Analisando-se os dados obtidos para o ensaio da caixa L, foi possível observar que todos atenderam aos limites prescritos pela ABNT NBR 15823-1, estando todos classificados como PL 2. O CAA-50 foi o que apresentou maior habilidade passante, devido possuir uma grande quantidade de finos em sua mistura. O CAA-10 foi o que apresentou menor habilidade passante, podendo ter ocorrido devido a menor quantidade de finos presente na mistura. Além disso, a quantidade de aditivo pode não ter sido suficiente para que fosse atingida a trabalhabilidade necessária.

5.3.4. Funil V

Na figura 26 está ilustrada a determinação da viscosidade a partir do funil V.

Figura 26 – Viscosidade a partir do funil V



Fonte: Autor (2021)

Na tabela 17 estão apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio do funil V.

Tabela 17 - Viscosidade a partir do tempo de escoamento pelo método do funil V

Traço	Funil V (s)	Classe de viscosidade plástica aparente - ABNT NBR 15823-1 (2017)
CAA-0	6 s	VF 1
CAA-10	5 s	VF 1
CAA-30	7 s	VF 1
CAA-50	9 s	VF 2

Fonte: Autor (2021)

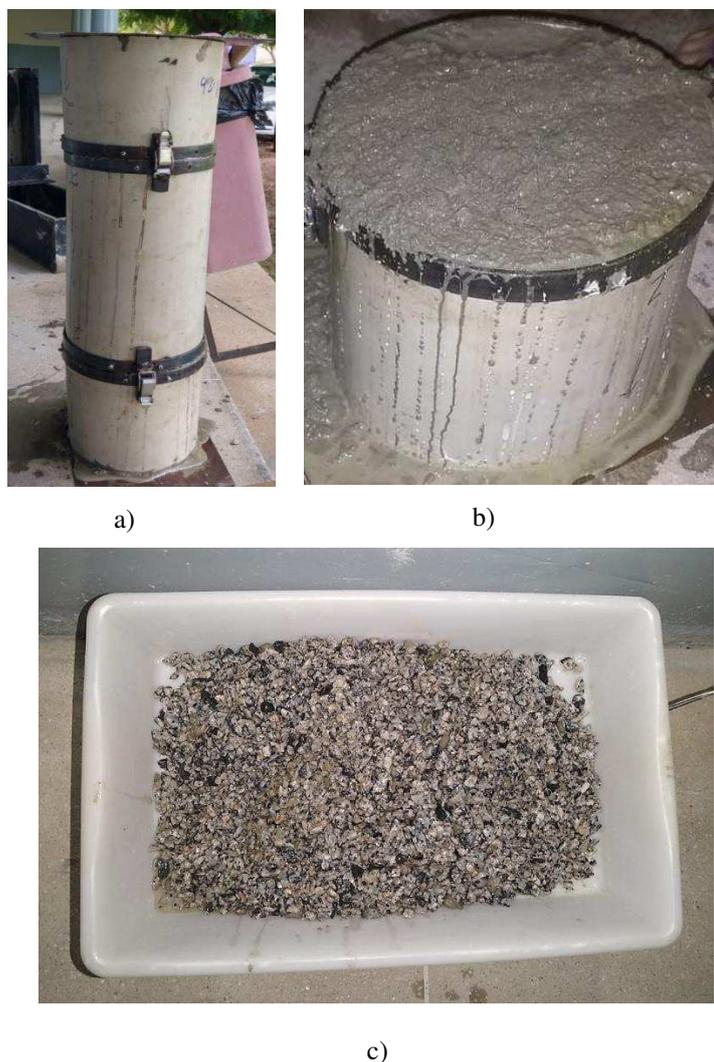
A partir dos dados obtidos do tempo de escoamento de cada um dos traços, foi possível observar que quanto maior o percentual de adição, maior foi a viscosidade da mistura, apresentando assim um maior tempo de escoamento.

Os traços CAA-0, CAA-10 e CAA-30 foram classificados como VF 1, requerendo assim um maior controle de segregação e exsudação, visto que foram misturas que apresentaram baixa viscosidade, pois escoaram em tempo inferior a 9 segundos, o CAA-50 apresentou maior viscosidade, apresentando um tempo de escoamento de 9 segundos. Somente o CAA-50 foi classificado como VF 2, conforme a ABNT NBR 15823-5 (2017), sendo a classe adequada para a maioria das aplicações, tendo em vista que apresenta maior resistência à segregação.

5.3.5. Coluna de segregação

Na figura 27 estão representados os procedimentos para a realização do ensaio da coluna de segregação.

Figura 27 – Determinação da resistência à segregação pela coluna de segregação. a) preenchimento da coluna, b) amostra retirada e c) amostra lavada



Fonte: Autor (2021)

A tabela 18 apresenta os resultados obtidos para a resistência à segregação a partir do método da coluna de segregação.

Tabela 18 - Resistência à segregação pelo método da coluna de segregação

Traço	Coluna de segregação (%)	Classe de resistência à segregação - ABNT NBR 15823-1 (2017)
CAA-0	10,67	SR 2
CAA-10	17,89	SR 1
CAA-30	8,41	SR 2
CAA-50	5,31	SR 2

Fonte: Autor (2021)

O traço CAA-10 foi classificado como SR 1, sendo a classe que atende a maioria das aplicações. Pois, de acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2017), a classe SR 1 é indicada para estruturas convencionais de pequena espessura e pouca complexidade, não exigindo um alto controle de segregação. Todos os demais traços foram classificados como SR 2, sendo a classe mais utilizada para elementos altos e com maior quantidade de armadura (ABNT 15823-1, 2017).

A resistência à segregação está associada a viscosidade da mistura, o que explica o fato do CAA-10 ser classificado como SR 1, tendo em vista que apresentou a menor viscosidade pelo método do funil V e, conseqüentemente a maior segregação.

A tabela 19 apresenta o consumo dos materiais do CAA-50 utilizado nesse trabalho e dos traços selecionados dos estudos de Xavier (2019) e Lisbôa (2004).

Tabela 19 - Consumo de materiais utilizados neste estudo e nos estudos de Xavier (2019) e Lisbôa (2004)

Material	Consumo de materiais (kg/m³)		
	CAA-50	CAA-50 (Xavier, 2019)	CR40 (Lisbôa, 2004)
Cimento	412,58	380,00	401,00
Agregado miúdo	907,68	1075,40	752,00
Agregado graúdo	742,65	790,40	827,00
Água	243,42	205,20	201,00
Aditivo	5,36	3,80	4,70
RBMG	206,29	190,00	201,00

Fonte: Autor (2021)

Analisando-se os dados apresentados na tabela 19, observa-se que o consumo de cimento desse estudo foi de 412,58 kg/m³, valor semelhante ao encontrado por Lisbôa (2004) que foi de 401,00 kg/m³.

O consumo de água e de aditivo utilizados nesse estudo foram respectivamente, 243,42 kg/m³ e 5,36 kg/m³. No estudo realizado por Xavier (2019), o consumo de água foi de 205,20 kg/m³ e o de aditivo foi de 3,80 kg/m³. Na pesquisa de Lisbôa (2004), o consumo de água foi de 201,00 kg/m³ e o de aditivo foi de 4,70 kg/m³. Sendo assim, o consumo de água e aditivo utilizados nesse estudo foram superiores aos obtidos pelos outros dois autores, tendo em vista que nesse estudo foi necessário um maior teor de aditivo para atingir o espalhamento mínimo

de um CAA e, a relação a/c aumentou devido o aditivo ter sido diluído em água antes de ser adicionado a mistura.

Na tabela 20 é apresentada a comparação dos resultados dos ensaios no estado fresco do traço CAA-50.

Tabela 20 - Comparação dos resultados obtidos no estado fresco desse estudo com os que foram obtidos por Xavier (2019) e Lisbôa (2004)

Ensaio	Amostras		
	CAA-50	CAA-50 (Xavier, 2019)	CR40 (Lisbôa, 2004)
Espalhamento (mm)	765,00	735,00	770,00
t ₅₀₀ (s)	5,00	1,90	0,81
Anel J (mm)	57,50	50,00	-
Caixa L	0,91	0,89	0,98
Funil V (s)	9,00	7,10	6,00
Coluna de segregação (%)	5,31	-	-

Fonte: Autor (2021)

A partir dos valores obtidos no estado fresco, o espalhamento desse estudo foi de 765,00 mm, na pesquisa de Xavier (2019) foi de 735,00 mm. Lisbôa (2004) obteve 770,00 mm.

Com relação a viscosidade obtida pelos ensaios do t₅₀₀ e funil V, o CAA-50 desse trabalho apresentou tempo de escoamento de 5 s no t₅₀₀ e 9 s no funil V, enquanto Xavier (2019) obteve 1,90 s no t₅₀₀ e 7,10 s no funil V. Lisbôa (2004) obteve 0,81 s no t₅₀₀ e 6,00 s no funil V. Sendo assim, o presente trabalho apresentou maior tempo de escoamento pelos dois métodos e, conseqüentemente, maior viscosidade.

Com relação a habilidade passante, obtida pelos ensaios do anel J e caixa L, o resultado obtido pelo método do anel J nesse estudo foi de 57,50 mm, ultrapassando o limite estabelecido pela ABNT NBR 15823-1 (2017) que é de 50 mm. Xavier (2019) obteve uma habilidade passante de 50 mm, estando classificado como PJ2. Em relação ao ensaio da caixa L, todos foram classificados como PL 2, visto que nesse trabalho obteve-se uma habilidade passante de 0,91, Xavier (2019) obteve 0,89 e Lisbôa (2004) obteve 0,98.

5.4. Ensaio no estado endurecido

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão, absorção, índice de vazios e massa específica.

5.4.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em 36 corpos de prova, sendo três corpos de prova para cada idade de rompimento (7, 14 e 28 dias).

Os corpos de prova rompidos apresentaram ruptura do tipo cisalhada, ocorrendo sempre em planos inclinados em relação à direção da força cortante. A figura 28 ilustra a ruptura cisalhada do corpo de prova submetido à compressão.

Figura 28 – Corpo de prova submetido à compressão



Autor (2021)

A tabela 21 apresenta os dados obtidos com o ensaio de resistência à compressão para cada um dos traços em suas referidas idades.

Tabela 21 - Resistência à compressão média

Traço	Resistência à compressão média (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
CAA-0	21,48	24,27	26,52
CAA-10	21,23	26,84	28,39
CAA-30	27,49	28,35	30,24
CAA-50	32,27	35,96	36,55

Fonte: Autor (2021)

Analisando os dados obtidos com a determinação da resistência à compressão, ficou evidente que em todos os traços a resistência aumentou com o decorrer do tempo de cura. Para o CAA-0 houve aumento de 12,99% aos 14 dias e 9,27% aos 28 dias. Para o CAA-10 houve elevação de 26,42% aos 14 dias e 5,77% aos 28 dias. Para o CAA-30 houve aumento de 3,13% aos 14 dias e 6,67% aos 28 dias. O CAA-50 aumentou 11,43% aos 14 dias e 1,64% aos 28 dias.

O aumento da resistência à compressão foi pequeno de 14 para 28 dias, ocorrendo devido ao uso do cimento CP V-ARI, visto que, de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018), apresenta alta resistência inicial e depois não apresenta crescimento expressivo ao decorrer do tempo.

Analisando os resultados obtidos para cada um dos traços aos 7 dias, foi possível observar que houve redução de 1,16% do CAA-0 para o CAA-10, do CAA-10 para o CAA-30 houve um aumento de 29,49% e do CAA-30 para o CAA-50 aumentou 17,39%. Aos 14 dias observou-se que houve aumento de 10,59% do CAA-0 para o CAA-10, de 5,63% do CAA-10 para o CAA-30 e de 26,84% do CAA-30 para o CAA-50. A partir da análise dos dados obtidos aos 28 dias, percebeu-se aumento de 7,05% do CAA-0 para o CAA-10, de 6,52% do CAA-10 para o CAA-30. Já do CAA-30 para o CAA-50 aumentou 20,87%.

Foi possível observar que à medida que foram adicionados maiores percentuais de adição, maiores foram os valores obtidos para a resistência à compressão, sendo explicado em virtude do melhor empacotamento granular proporcionado pela maior adição de finos, o que ocasiona em maior viscosidade da mistura, tornando-a mais consistente e com menor quantidade de vazios.

O aditivo superplastificante utilizado pode ter contribuído também para o aumento da resistência à compressão, visto que, à medida que se aumentou a quantidade de aditivo, a resistência também aumentou. Além disso, a ficha técnica do mesmo afirma que ele proporciona aumento das resistências mecânicas.

Todos os corpos de prova apresentaram resistência à compressão superiores a 20 MPa. De acordo com a ABNT NBR 8953 (2015) são classificados como concretos estruturais da classe de resistência do grupo I, tendo em vista que essa classe varia de 20 MPa a 50 MPa.

5.4.2. Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Após o período de cura úmida de 28 dias, foram realizados os ensaios para a obtenção da absorção de água, índice de vazios e massa específica, sendo utilizados três corpos de prova para cada um dos traços, totalizando 12 CP's. A figura 29 ilustra a execução desses ensaios.

Figura 29 – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. a) Obtenção de massa submersa em balança hidrostática, b) corpos de prova após serem secos com pano úmido, c) massa saturada com superfície seca e d) corpos de prova na estufa



a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor (2021)

Na tabela 22 são apresentados os dados obtidos para os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Tabela 22 - Resultados obtidos dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Traço	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca	Massa específica saturada	Massa específica real
CAA-0	7,71	14,79	2,01	2,07	2,25
CAA-10	5,93	11,61	2,05	2,08	2,22
CAA-30	7,85	15,30	2,03	2,10	2,30
CAA-50	5,30	11,02	2,08	2,19	2,33

Fonte: Autor (2021)

A partir da análise dos dados de absorção de água, foi possível observar que o CAA-0 apresenta 7,71%, para o CAA-10 foi 5,93%, para o CAA-30 foi 7,85% e para o CAA-50 foi 5,30%. Para o ensaio de índice de vazios obteve-se 14,79% para o CAA-0, 11,61% para o CAA-10, 15,30% para o CAA-30 e 11,02% para o CAA-50. Percebeu-se que à medida que se aumentou a absorção de água também aumentou o índice de vazios, visto que quanto mais vazios existirem no concreto, mais água ele irá absorver.

Através dos dados obtidos de massa específica, todos foram classificados como concretos normais, visto que, conforme a ABNT NBR 8953 (2015) as massas específicas estão compreendidas entre 2000 e 2800 kg/m³.

Na tabela 23 foi realizada a comparação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, índice de vazios, absorção de água, massa específica seca, massa específica saturada e massa específica real nesse ensaio e nos estudos realizados por Xavier (2019) e Lisbôa (2004).

Tabela 23 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios do estado endurecido desse estudo com os que foram obtidos por Xavier (2019) e Lisbôa (2004)

Ensaio	Amostras		
	CAA-50	CAA-50 (Xavier (2019))	CR40 (Lisbôa, 2004)
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	36,55	61,50	38,90
Absorção de água (%)	5,30	5,00	-
Índice de vazios (%)	11,02	11,80	-
Massa específica seca	2,08	2,35	-
Massa específica saturada	2,19	-	-
Massa específica real	2,33	-	-

Fonte: Autor (2021)

Analisando os dados expostos na tabela 23, observa-se que nessa pesquisa foi obtida uma resistência à compressão aos 28 dias de 36,55 MPa, no estudo realizado por Xavier (2019) foi de 61,50 MPa e no de Lisbôa (2004) foi de 38,90 MPa. Comparando-se a resistência à compressão obtida nesse estudo com o de Lisbôa (2004), observa-se que houve uma redução de 6,04%. Relacionando esse estudo com o de Xavier (2019), observa-se uma redução de 40,57%.

A partir dos dados obtidos no ensaio de absorção de água, observa-se um percentual de 5,30% nesse estudo e na pesquisa de Xavier (2019) foi de 5%. Em relação ao índice de vazios,

esse estudo apresentou um percentual de 11,02%. Em contrapartida, Xavier (2019) obteve 11,80%, que equivale a um aumento de 7,08%. Para a massa específica seca, essa pesquisa obteve 2,08 kg/m³ e Xavier (2019) obteve 2,35 kg/m³.

6. CONCLUSÕES

O resíduo de beneficiamento de mármore e granito apresentou características satisfatórias para ser utilizado como fíler no CAA, tendo em vista que possui finura adequada, proporcionando trabalhabilidade e coesão a mistura.

A partir da análise das propriedades no estado fresco, observou-se que o espalhamento aumentou à medida que foi adicionado mais resíduo. Foi necessário um tempo maior para o escoamento da mistura à medida que se aumentou o percentual de adição, o que proporcionou maior viscosidade e, conseqüentemente maior resistência à segregação.

Os traços CAA-0, CAA-30 e CAA-50 não atenderam aos limites de habilidade passante quando analisada em fluxo livre, a partir do ensaio do anel J. No entanto, apresentaram resultados satisfatórios para a determinação da habilidade passante em fluxo confinado pelo método da caixa L.

Avaliando-se a resistência à compressão, foi possível concluir que ao elevar o teor de adição de RBMG, a resistência à compressão aumentou, onde a maior resistência obtida aos 28 dias foi para o CAA-50, sendo de 36,55 MPa e a menor foi para o CAA-0, sendo de 26,52 MPa. Os resultados obtidos podem ter sido influenciados pelo melhor empacotamento proporcionado pelo RBMG, reduzindo a quantidade de vazios presentes na mistura e melhorando as propriedades mecânicas. Além disso, o aditivo superplastificante pode também ter contribuído, visto que reduz a quantidade de água das misturas, proporcionando melhor hidratação do cimento e, conseqüentemente, melhorando a resistência do concreto.

As propriedades físicas analisadas, como absorção de água, índice de vazios e massa específica apresentaram valores semelhantes em todos os traços. Em relação a massa específica seca, foram todos classificados como concreto normal.

Dessa forma, o concreto autoadensável com a adição de resíduos de beneficiamento de mármore e granito é considerado uma boa alternativa, tendo em vista que proporciona resultados satisfatórios tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Apresenta-se como uma destinação adequada para esse resíduo, visto que possibilita a redução dos danos causados ao meio ambiente, pois o seu uso em grandes quantidades para a produção do CAA apresentou um bom desempenho.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise da durabilidade do CAA com a incorporação do RBMG em diferentes percentuais.
- Avaliação da microestrutura e das propriedades do CAA a partir da adição do RBMG em teores acima de 50%.

8. REFERÊNCIAS

1. ABIROCHAS. **Balço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2018**. Brasília-DF: [s.n.]. Disponível em: <https://www.abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2018/06/Informes/Informe_01_2019_Balanco_2018.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2021.
2. ACI CT-13. **Concrete terminology**. Farmington Hills, 2013.
3. ANDRADE, A. C. DE S. **Estudo de propriedades reológicas e físico-mecânicas de concreto autoadensável com adição de resíduo de vermiculita**. Universidade Federal de Campina Grande. Pombal, 2020.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5739. Concreto. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6118. Projeto para estruturas de concreto. Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7211. Agregados para concreto. Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 8953. Concreto para fins estruturais. Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 11579. Cimento Portland. Determinação do índice de finura por meio da peneira de 75 µm**. Rio de Janeiro, 2013.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15823. Concreto autoadensável. Classificação, controle e recebimento no estado fresco - Parte 1.** Rio de Janeiro, 2017.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15823. Concreto autoadensável. Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams - Parte 2.** Rio de Janeiro, 2017.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15823. Concreto autoadensável. Determinação da habilidade passante – Método do anel J - Parte 3.** Rio de Janeiro, 2017.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15823. Concreto autoadensável. Determinação da habilidade passante – Método da caixa L e da caixa U - Parte 4.** Rio de Janeiro, 2017.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15823. Concreto autoadensável. Determinação da viscosidade – Método do funil V - Parte 5.** Rio de Janeiro, 2017.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15823. Concreto autoadensável. Determinação da resistência à segregação – Métodos da coluna de segregação e da peneira - Parte 6.** Rio de Janeiro, 2017.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 16697. Cimento Portland. Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NM 30. Agregado miúdo. Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NM 45. Agregados. Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NM 46. **Agregados. Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 µm, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NM 52. **Agregado miúdo. Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NM 53. **Agregado graúdo. Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NM 248. **Agregados. Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
24. BARROS, P. G. DOS S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo De corte de mármore e granito.** Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2008.
25. CHAGAS, R. M. P. **Estudo do concreto laterítico dosado com aditivo plastificante à base de lignosulfato.** Dissertação - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB, 2011.
26. COLLEPARDI, M. **A very close precursor of self-compacting concrete (SCC).** In: Supplementary volume of the Proceedings of Three-day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology, p. 16-19, set., 2001.
27. DACZKO, J. A. **Self-Consolidating Concrete: Applying what we know.** 1. ed. New York: Spon Press, 2012.
28. DOMONE, P. L. **Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. Cement and concrete composites.** Elsevier, v. 28, p. 197-208, 2006.

29. EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Reino Unido, 2002.
30. EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete - Specification, Production and Use. **The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems**, 2005.
31. EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B; ZANTA, V. M. **Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras**. Ambiente construído, Porto Alegre, v.10, n.3, p. 23-40, jul., 2010.
32. FIGUEIREDO, A.D.; DJANIKIAN, J.G.; HELENE, P.R.L.; SELMO, S.M.S.; JOHN, V.M. **Concretos especiais**. São Paulo, Escola Politécnica – USP, p.14, 2004.
33. GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1. ed. São Paulo: PINI. 2009.
34. HOLSCHEMACHER, K.; KLUG, Y. **A database for the evaluation of hardened properties of SCC**. Lacer, n. 7, p. 123-134, 2002.
35. LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2004.
36. LOPES, J. L. M. P. **Influência da utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler, nas propriedades do concreto**. Universidade Federal de Goiás-GO. Goiânia, 2007.
37. MAGACHO, I. et. al. **Identificação e gerenciamento dos resíduos gerados em empresas de beneficiamento de rochas ornamentais localizadas no município de Nova Venécia/ES – Brasil**. In: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental. Punta del Este – Uruguay, 2006. p. 1-9. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/16992114-Xxx->

congreso-interamericano-de-ingenieria-sanitaria-y-ambiental-26-al-30-de-noviembre-de-2006-punta-del-este-uruguay.html>. Acesso em: 05 mai. 2021.

38. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
39. MELLO, I. S. C.; FILHO, C. C.; CHIODI, D. K. **Atlas de rochas ornamentais da Amazônia brasileira – Projeto consolidação e sustentabilidade da produção de rochas para revestimento na construção civil da Região Amazônica**. Amazônia, 2011.
40. MELO, K.A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis – SC, 2005.
41. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Rochas ornamentais**. Brasília, 2007.
42. NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
43. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
44. OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. In: **Journal of Advanced Concrete Technology**. Vol. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.
45. PINHEIRO, A. C. F. B.; CRIVELARO, M. **Materiais de construção**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2016.
46. RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Final report of RILEM TC 188-CSC: **Casting of self compacting concrete**. Materials and Structures, France, n. 39, p. 937-954, 2006.
47. SANTANA, I. C. **Análise dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos de construção e demolição em Conceição do Almeida – BA**. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas - BA, 2016.
48. SILVA, A. A. A. **Gestão de resíduos na indústria de rochas ornamentais, com enfoque para a lama abrasiva**. In: congresso nacional de excelência em gestão, 7., 2011, Rio

de Janeiro: Excelência em Gestão, 2011. p. 1-19 Disponível em:<http://www.excelenciaemgestao.org/Portals/2/documents/cneg7/anais/T11_0350_2134.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2020.

49. SILVA, S. A. **Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granitos. Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento.** Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória – ES, 1998.

50. SOHLER, F. A. S.; SANTOS, S. B. D. **Projeto, execução e desempenho de estruturas e fundações.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda.,2018.

51. SU, N.; HSU, K. C.; CHAI, H. W. **A simple mix design method for selfcompacting concrete.** In: Cement and Concrete Research, n. 31, p. 1799-1807, 2001.

52. TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-adensável.** 1. ed. São Paulo: Pini, 2008.

53. TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável.** 3. ed. São Paulo: Leud, 2021.

54. TUTIKIAN, B. F. Práticas recomendadas IBRACON. **Concreto autoadensável.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2015.

55. VIDAL, et al. **Lavra de rochas ornamentais.** Rio de Janeiro: CETEM, 2014.

56. VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento.** Rio de Janeiro: CETEM, 2014.

57. VIEIRA, S. P. **Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições.** Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

58. XAVIER, B. C. **Comparação do concreto autoadensável com adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito com o concreto autoadensável convencional.** Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2019.