

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PATO BRANCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE**

DEIVID WILLIAN PREIS

**UTILIZAÇÃO DO FÍLER DE BRITAGEM EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS
VISANDO À REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO - PR

2023

DEIVID WILLIAN PREIS

**UTILIZAÇÃO DO FÍLER DE BRITAGEM EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS
VISANDO À REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO**

**Use of crushing filer in self-comfortable concrete with aim to reducing cement
consumption**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Materiais e Componentes da Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Caroline Angulski da Luz.

PATO BRANCO – PR

2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco**



DEIVID WILLIAN PREIS

UTILIZAÇÃO DO FÍLER DE BRITAGEM EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS VISANDO À REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Materiais E Engenharia De Estruturas.

Data de aprovação: 24 de Agosto de 2023

Dra. Caroline Angulski Da Luz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Eduardo Roberto Batiston, Doutorado - Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó)

Dr. Jose Ilo Pereira Filho, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 24/08/2023.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder saúde e sabedoria para seguir em frente. Obrigado por ser minha força e guia em todos os momentos.

À minha família: pai Augustinho, mãe Celicia e irmãs Eliane, Liliane, Elaine e Juliana, por todo apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida, sem eles nada seria possível. A vocês todas as minhas conquistas e vitórias, amor e agradecimentos todos os dias.

À minha companheira Victoria, por todo apoio diário, me dando força e ajuda sempre que necessário, com paciência, entusiasmo e amor. Obrigado por caminhar junto!

Agradeço imensamente à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Caroline Angulski da Luz, por todo o conhecimento repassado, pela paciência e apoio durante esse trabalho.

À banca, Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho e Prof. Dr. Eduardo Batiston, pelas valiosas contribuições técnicas na construção deste trabalho.

A todo o corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UTFPR - Pato Branco, por todo o aprendizado proporcionado no mestrado.

À Central de Análises da UTFPR - Câmpus Pato Branco, pela realização das análises químicas.

A todos os colegas do PPGEC pelo companheirismo e amizade nesse período.

Ao Laboratório Contem Controle Tecnológico de Materiais e seus profissionais, que forneceram todo suporte e estrutura para o desenvolvimento dos ensaios físicos.

A todos que de alguma forma participaram desta etapa, meu agradecimento eterno.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.
Charles Chaplin.

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) tem por característica obter simultaneamente fluidez, coesão e habilidade passante. Para que se obtenha essas propriedades, a dosagem necessita de maior volume de finos na composição da pasta. Nesse cenário, o uso de adições no CAA busca uma melhoria nas características de autoadensabilidade, redução de custos do concreto e o emprego de resíduos que reduzem impactos ambientais proporcionados pela emissão de CO₂ na fabricação do cimento. Adições comumente utilizadas no CAA são materiais finos que tem por finalidade garantir as propriedades do CAA. Assim, se torna interessante a utilização de fileres alternativos de origens mineralógicas, como o de origem basáltica (FB), o qual é gerado nos campos de britagem, implicando em problemas de armazenamento, saúde e poluição ambiental por não possuir utilização em escala gradual. Perante o exposto, o presente trabalho tem como objetivo verificar o controle de segregação do CAA feito com o FB nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, além de incentivar a redução do consumo de cimento. Os resultados do estado fresco apresentaram desempenho de fluidez, coesão e habilidade passante nas substituições de 5 a 25%. No estado endurecido, conforme o aumento do teor de substituição do cimento por FB observou-se uma redução da resistência à compressão e tração, que foi esperada devido à diminuição do consumo de cimento. No ensaio de absorção foi observado um aumento significativo da porosidade associado à forma lamelar do grão de FB. Por fim, a utilização de FB em substituição de até 25% do cimento mostrou resultados satisfatórios no estado fresco e apresentou resistência superior aos 30 MPa aos 90 dias, evidenciando potencial inovador para o melhoramento da sustentabilidade da construção civil.

Palavras-chaves: concreto autoadensável; filer basáltico; pó de pedreiras; reutilização de resíduos.

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) is characterized by simultaneously obtaining fluidity, cohesion and passing ability. To obtain these properties, the dosage requires a greater volume of fines in the paste composition. In this scenario, the use of additions in SCC seeks to improve the self-compacting characteristics, reduce concrete costs and use waste that reduces environmental impacts caused by CO₂ emissions in the manufacture of cement. Additions commonly used in CAA are fine materials that aim to guarantee the properties of CAA. Therefore, it becomes interesting to use alternative fillers of mineralogical origins, such as that of basaltic origin (FB), which is generated in crushing fields, resulting in storage, health and environmental pollution problems as it is not used on a gradual scale. In view of the above, the present work aims to verify the segregation control of CAA made with FB in the proportions of 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30%, in addition to encouraging the reduction of consumption of cement. The fresh state results showed performance of fluidity, cohesion and passing ability in substitutions of 5 to 25%. In the hardened state, as the content of cement replacement by FB increased, a reduction in compressive and tensile strength was observed, which was expected due to the decrease in cement consumption. In the absorption test, a significant increase in porosity associated with the lamellar shape of the FB grain was observed. Finally, the use of FB to replace up to 25% of cement showed satisfactory results in the fresh state and presented resistance greater than 30 MPa at 90 days, demonstrating innovative potential for improving the sustainability of civil construction.

Keywords: self-compacting concrete; basaltic filler; quarry dust; waste reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ensaio de <i>Slump Flow</i>	25
Figura 2 - Caixa L.	29
Figura 3: Equipamento e simulação de execução do ensaio de anel J.	31
Figura 4 - Caixa U.....	32
Figura 5 - Coluna de segregação.	33
Figura 6 - Fluxograma da metodologia de dosagem de acordo com Gomes (2002).	39
Figura 7 - Processo via úmida com roda d' água e bacias de decantação.	41
Figura 8 - Processo por via seca.....	41
Figura 9 - Resistência à compressão aos 28 dias.	43
Figura 10 - Resistência à tração aos 28 dias.	44
Figura 11: Módulo de elasticidade aos 28 dias.....	44
Figura 12 - Resistência à compressão.	45
Figura 13 - Resistência à tração.....	45
Figura 14 - Microestrutura dos concretos sem adição (A) e com pó de basalto (B).	46
Figura 15 - Resistência à compressão aos 3 e 28 dias de hidratação e teor das pastas.	47
Figura 16 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.	51
Figura 17 - Resistência à compressão em argamassa de cimento.....	54
Figura 18 - Distribuição granulométrica dos agregados.	55
Figura 19 - Distribuição granulométrica fíler basalto in natura.	57
Figura 20 - Granulometria a laser do fíler de basalto passante na peneira 0,075mm.	58
Figura 21: Imagem de microscopia eletrônica de varredura para determinação da forma das partículas de FB	59
Figura 22 - Ensaio de Cone Marsh e Mini <i>Slump</i>	61
Figura 23 - Composição do esqueleto granular.....	61
Figura 24 - Resultados de espalhamento <i>Slump Flow Test</i> do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.....	66
Figura 25 – Resultados do Ensaio T500 do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	67
Figura 26 - Análise visual do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	69
Figura 27 - Ensaio de Anel J do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	70
Figura 28 - Ensaio de anel J do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	71
Figura 29 - Ensaio de funil V do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	72
Figura 30 - Ensaio de Caixa L do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	73
Figura 31 - Resistência à compressão do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	75

Figura 32 - Consumo de cimento para obtenção de 1 MPa em relação a resistência obtida do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	76
Figura 33 - Resistência à tração por compressão diametral do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	77
Figura 34 – Distribuição granulométrica do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	78
Figura 35 - Ensaio de absorção do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	79
Figura 36 - Ensaio de Módulo de Elasticidade do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.	80
Figura 37 - Imagens de MEV de CAA's com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% com 28 dias de hidratação.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação e aplicação CAA conforme resultado de Slump Flow.	26
Tabela 2: Classes de índice visual.	27
Tabela 3: Classificação do concreto quanto a viscosidade aparente.	28
Tabela 4: Classe de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado).	30
Tabela 5: Classificação da habilidade passante em relação a sua aplicação.	31
Tabela 6: Classes de resistência à segregação do CAA, em função da sua aplicação.	35
Tabela 7: Valores típicos de proporção do CAA.	38
Tabela 8 : Resultados estado fresco	43
Tabela 9: Utilização do fíler basáltico.	48
Tabela 10: Ficha técnica Cimento CP-V ARI (análise mecânica e física).	52
Tabela 11: Caracterização física dos agregados.....	56
Tabela 12: Especificação do aditivo.	56
Tabela 13: Distribuição granulométrica do FB.....	57
Tabela 14: Diâmetro médio das partículas D50.....	58
Tabela 15: Definição do esqueleto granular (índice de vazios).	62
Tabela 16: Traço unitário (padrão).	62
Tabela 17: Traços utilizados.	63
Tabela 18: Classificação CAA.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAA: Concreto autoadensável

CCV: Concreto convencional

SNIC: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

CO₂: Dióxido de Carbono

FB: Fíler basáltico

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CaOH₂: Hidróxido de cálcio

NBR: Norma Brasileira

IEV: Índice de estabilidade visual

HP: Habilidade passante

mB: Massa de agregado obtido da base da coluna, em gramas

mT: Massa do agregado obtido do topo da coluna, em gramas

SR: Resistência à segregação do concreto

A/C: Relação água/cimento

CADAR: Concreto autoadensável de alta resistência

SP/C: Dosagem de superplastificante em relação ao cimento

F/C: Dosagem de finos em relação ao cimento

G: Gnaisse

D: Diabásio

L: Calcário

C-S-H: Silicato de cálcio hidratado

CP V-ARI: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

D (g/cm³): Massa específica do agregado

D máx: Dimensão máxima do agregado

ISO: Organização Internacional de Normalização

UTFPR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	17
1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	CONCRETO AUTOADENSÁVEL	18
2.1.1	Materiais Constituintes	19
2.1.1.1	Cimento	19
2.1.1.2	Adições minerais	20
2.1.1.3	Agregados miúdos	21
2.1.1.4	Agregados graúdos	22
2.1.1.5	Aditivos	22
2.1.1.6	Água	23
2.1.2	Aplicação do CAA na construção civil	23
2.2	PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO	24
2.2.1	Capacidade de Fluxo	24
2.2.1.1	Slump Flow	25
2.2.1.2	Funil V	27
2.2.2	Habilidade Passante	28
2.2.2.1	Caixa L	29
2.2.2.2	Anel J	30
2.2.2.3	Caixa U	31
2.2.3	Resistência à segregação	32
2.2.3.1	Coluna de Segregação	33
2.3	PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO	35
2.3.1	Resistência à compressão e tração	36
2.3.2	Módulo de Elasticidade	36
2.4	MÉTODO DE DOSAGEM	37
2.5	FÍLER DE BRITAGEM	40
2.5.1	Origem	40
2.5.2	Utilização do fíler basáltico em concretos	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	MATERIAIS	50
3.1.1	Cimento	51

3.1.2	Agregados.....	54
3.1.3	Aditivos.....	56
3.1.4	Adições - Fílers	56
3.2	MÉTODOS	60
3.2.1	Definição dos parâmetros para compor o CAA segundo método de Gomes (2002)	60
3.2.2	Definição dos traços de CAA com uso de FB.....	63
3.2.3	Propriedades do estado fresco.....	63
3.2.4	Propriedades do estado endurecido	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1	ESTUDO EM CONCRETO FRESCO.....	66
4.1.1	Ensaio de espalhamento e T500.....	66
4.1.2	Índice de estabilidade visual.	68
4.1.3	Anel J.....	69
4.1.4	Funil V.....	72
4.1.5	Caixa L.....	73
4.1.6	Classificação estado fresco	74
4.2	ESTUDO EM CONCRETO ENDURECIDO	74
4.2.1	Resistência à compressão	75
4.2.2	Resistência à tração	77
4.2.3	Absorção	79
4.2.4	Módulo de elasticidade.....	80
4.2.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	81
5	CONCLUSÃO	84
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUTOS	86
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A.....	93
	APÊNDICE B.....	94

1 INTRODUÇÃO

Com o passar das últimas décadas a tecnologia e o emprego do concreto autoadensável (CAA) foi comumente disseminado no mercado da construção civil, efetivando um avanço nas aplicações em escala gradual. Tal aplicação somente foi possível com a apresentação de vários benefícios que impulsionaram sua utilização.

O CAA surgiu no Japão, durante a década de 80, com o intuito de sanar problemas com a durabilidade das estruturas de concreto, devido à má compactação e a falta de mão de obra qualificada, sendo necessária a busca por novos materiais e tecnologias que solucionassem este problema. Como solução, desenvolveu-se o CAA que apresenta como vantagens a capacidade de se ajustar às formas devido a sua fluidez, descartando a compactação vibratória, pois tem seu adensamento garantido através de seu peso próprio (OKAMURA; OUCHI, 2003).

O CAA é caracterizado por alcançar simultaneamente três propriedades, sendo a fluidez, habilidade passante e resistência à segregação. A fluidez é a habilidade do concreto fluir e preencher todos os espaços vazios da forma, a habilidade passante ocorre pela mistura escoar sem que haja bloqueio, e à resistência a segregação é a capacidade do concreto ficar coeso (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

O uso do CAA está associado a diversos fatores e benefícios, como a redução de ruídos na obra, em função da não utilização de equipamento vibratório para seu adensamento, facilidade de moldar variados modelos e tamanhos, redução de falhas em sua execução e maior duração das estruturas em virtude do seu adensamento e homogeneidade comparadas a estruturas de concreto convencional. O preparo do CAA é feito com os mesmos materiais utilizados no concreto convencional (CCV) (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água), entretanto o CAA possui uma demanda elevada de materiais finos, a fim de garantir as suas características de estado fresco, que podem ser compensados com o uso de adições minerais e fílers, além de aditivos plastificantes, superplastificantes e modificadores de viscosidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Dentre os materiais, o cimento Portland é responsável pela emissão de 7% da emissão de CO₂ no mundo, associado ao grande consumo de energia em sua fabricação (SNIC, 2020). Sua fabricação libera CO₂, resultado das altas temperaturas do processo de fabricação aliado a decomposição química do carbonato de cálcio,

esse que resulta na emissão de uma tonelada de CO₂ para cada tonelada de cimento Portland produzida Ali *et al.* (2011). De acordo Matos *et al.* (2019) o cimento Portland é responsável por 90% da emissão total de CO₂ da fabricação do concreto.

O CAA permite a utilização de adições em sua composição, como de origem minerais ou naturais, de processos industriais ou propriamente do ramo da construção. As adições são importantes na compensação dos finos do CAA buscando uma redução do consumo de cimento e conseqüentemente uma diminuição constante de emissão de CO₂.

De acordo com Bastos (2016), a construção civil é um dos ramos que mais faz uso dos recursos naturais, tornando-se responsável pelo consumo de 15% a 50%, sendo também considerado uma das áreas que mais produzem resíduos em âmbito geral.

Devido aos efeitos globais e os impactos causados pela construção civil atualmente, busca-se alternativas sustentáveis para reduzir impactos e o consumo de recursos naturais por meio de reutilização de materiais, fato esse que é evidenciado com o aumento de pesquisas no setor. Toubal Seghir *et al.* (2018) e Ashish (2019) avaliaram por meios de suas pesquisas os efeitos da incorporação de pó de mármore nas propriedades de pasta de cimento. Azevedo *et al.* (2019) investigou a utilização de pó em argamassas e concretos convencionais. Dobiszewska *et al.* (2018) avaliaram a zona de transição interfacial e as propriedades mecânicas com a incorporação de subproduto de origem basáltica de pedreiras. Thapa *et al.* (2019) investigaram o potencial da utilização de lama de arenito calcinado na substituição do cimento Portland em argamassas.

Schankoski *et al.* (2017) e Schankoski *et al.* (2019) avaliaram a produção de pastas de cimento e concreto autoadensável substituindo o cimento por calcário e resíduos de pedreiras de gnaiss e diabásio e obtiveram resultados de resistência à compressão de até 21% maiores em comparação a concretos que não continham as adições aplicadas. Além disso, Schankoski *et al.* (2020) avaliaram as peças produzidas com concreto autoadensável produzido com as substituições propostas, evidenciado que a qualidade da superfície e o acabamento das peças foi equivalente ao traço referência.

A utilização do CAA foi disseminada com o aumento de publicações, que buscaram a otimização do real custo do CAA, bem como utilização de materiais

alternativos, redução do consumo de cimento, aplicação de aditivos dentre outros, que facilitaram e disseminação do CAA por todo o mundo.

Atualmente são comumente utilizadas no do CAA pozolanas, metacaulim, cinza volante, sílica ativa, areias com módulo de finura baixo, fíler calcário, escórias de alto forno, cinza da casca de arroz. Dentre os produtos citados, mesmo que alguns passem por processos industriais e de preparação para utilização, ainda continuam a ser um passivo ambiental, porém com impacto reduzido, devido a sua utilização no concreto, pois todo volume dos materiais citados é comumente utilizado pelas indústrias cimenteiras.

Sendo o concreto um dos materiais mais utilizados dentro da construção civil, diversas pesquisas no setor estão sendo desenvolvidas para a adição de novas tecnologias buscando suprir as necessidades construtivas, bem como a implementação de novos materiais visando uma otimização da utilização de recursos naturais, e um reaproveitamento de materiais até então descartados, reforçando assim a adoção de práticas sustentáveis no concreto.

A busca por novas substituições torna-se imprescindível pela crescente demanda da utilização de CAA atualmente. Um material de resíduo industrial que apresenta características de substituição como material fino do CAA é o material pulverulento dos processos de britagem de rochas.

O setor de produção de agregados em britadores registra globalmente cerca de 35 milhões de toneladas de material extraído anualmente (BIANCO; BLENGINI, 2019). Desse material são extraídas partículas finas menores que 75 μm representam de 10 a 15 % na produção em escala gradual (GELATAKIS;SOULTANA, 2016). No cenário nacional, a produção de areia industrial de acordo com os dados de uma pedreira localizada na região de Florianópolis a cada 50 toneladas produzida, 1 tonelada se enquadra como pó (SCHANKOSKI *et al.* 2017).

Na produção de areias de origem de britagem, parte do produto oriundo do processo é retirado e não se enquadra nas classificações normativas para aplicação. Com isso o material fino retido nos britadores é prejudicial pois não é encontrado nenhum destino para o então resíduo, sendo depositado nos pátios e tornando-se um passivo ambiental. Seu descarte é problemático, por ser um material com alto teor de finos que acaba por poluir o ar e a água, além de gerar custo para estocagem nos pátios. A gestão desse resíduo é um problema ambiental, pois segue sendo descartado em aterros, onde suas partículas finas dificultam a infiltração da água para

camadas inferiores, prejudicando aquíferos e a vida vegetal (MEDINA *et al.* 2017). No mercado atual se tem breves utilizações de tal produto na composição de base e sub-bases de pavimentos, além de utilização na recuperação de solos na agricultura, porém sendo pouca para tamanha geração de resíduos dos processos.

A aplicação do pó residual dos processos de britagem em concretos foi por muitos anos considerada prejudicial em relação à produção do concreto convencional (CVV), pois com o aumento do teor resultava no aumento de água. Com a crescente produção do CAA em centrais dosadoras de concreto e indústrias de pré-fabricados é imprescindível avaliar a real utilização do pó residual na produção de CAA.

Dessa maneira busca-se a aplicação do pó residual do processo de britagem como promotor de viscosidade na produção de CAA, em virtude de ser uma necessidade empregar grande quantidade de finos em sua mistura, (cerca de 200 litros de finos por m³ de concreto produzido) (EFNARC, 2005; FELEKOGLU, 2007).

Segundo Schankoski *et al.* (2020) a utilização de resíduos de pedreiras é uma solução interessante para a construção sustentável, desde que obtido com propriedades adequadas. Os inúmeros estudos voltados para a produção e otimização elencam a importância das adições de variadas origens na substituição de finos do CAA, a fim de otimizar os custos de sua produção.

Em virtude do alto consumo de cimento e por requerer maior quantidade de finos busca-se a implementação de adições de origem de britagem na composição do CAA, buscando uma contribuição na dosagem e nas propriedades do concreto, reduzindo assim o consumo de cimento, na emissão de gases contribuintes ao efeito estufa e no descarte de resíduos de maneira inadequada, minimizando assim impactos ambientais. A utilização de materiais cimentícios suplementares é uma alternativa para suprir a demanda de finos da mistura, evitando consumos excessivos da mistura (DE MATOS *et al.*, 2019).

Mediante ao exposto, esta pesquisa busca verificar o desempenho do CAA produzido com FB em substituição parcial ao cimento, avaliando suas propriedades no estado fresco (fluidez, coesão e resistência à segregação), e estado endurecido por meio dos ensaios de resistência à compressão e tração, absorção, módulo de elasticidade, além de avaliar os compostos e produtos gerados no concreto por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando adições de origem de britagem em sua composição.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o emprego do fíler de britagem em substituição ao cimento em concretos autoadensáveis visando à redução do consumo de aglomerante.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do fíler de britagem nas propriedades do estado fresco e endurecido do CAA.
- Recomendar teores de substituição do cimento pelo FB em concretos autoadensáveis.
- Analisar o atendimento do concreto autoadensável com emprego de FB às normas vigentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O concreto autoadensável (CAA) é capaz de fluir e de autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos) enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas e mistura, transporte, lançamento e acabamento NBR 15823 (ABNT, 2017).

O CAA surgiu no Japão, durante a década de 80, com o intuito de sanar problemas com a durabilidade das estruturas de concreto, devido à má compactação e a falta de mão de obra qualificada, sendo necessária a busca por novos materiais e tecnologias que solucionassem este problema. Como solução, desenvolveu-se o CAA que apresenta como vantagens a capacidade de se ajustar às formas devido a sua fluidez, descartando a compactação vibratória, (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Seu desenvolvimento na década de 1980 ocorreu basicamente pela necessidade da concretagem de estruturas com alta demanda de armaduras, onde se tinha muita dificuldade para a introdução de vibradores para a homogeneização do concreto.

Com a disseminação do concreto autoadensável por todo o mundo, surgem vantagens quanto ao uso, como também desvantagens. De acordo com EFNARC (2002), o CAA é um dos produtos mais revolucionário na construção em meio ao concreto dos últimos anos, trazendo benefícios em relação a vários fatores do dia a dia das obras, sendo eles:

- a) Redução de mão de obra devido à autoadensabilidade do concreto, reduzindo os ruídos nas obras;
- b) Construção efetuadas e finalizadas com maior facilidade e velocidade;
- c) Acabamento superficial superior em relação ao CVV, pois dispensa o uso de vibração;
- d) Fácil aplicação, com aumento de durabilidade.
- e) Possibilidade de aplicação em estruturas com altas taxas de armação.

O CAA também apresenta algumas desvantagens. Segundo Nagaratnam *et al.* (2016), o elevado custo para produção devido ao maior consumo de cimento, necessidade de maior controle tecnológico durante sua dosagem e aplicação, maior

tempo de mistura, maior suscetibilidade à retração devido ao aumento do teor de pasta na mistura e conseqüentemente aumento no calor de hidratação.

2.1.1 Materiais Constituintes

Os materiais que constituem o CAA são: cimento, adições, aditivos, água e agregados. Gomes *et al.* (2009), afirmam que a qualidade dos materiais empregados no CAA é fator predominante para garantir as propriedades de fluidez, coesão e habilidade passante.

Em comparação aos concretos convencionais, o CAA necessita de maior quantidade de finos na mistura para garantir as propriedades de fluidez, assim aumenta-se a superfície específica e conseqüentemente a capacidade de absorção de água da composição.

2.1.1.1 Cimento

No CAA, as recomendações em função da durabilidade das estruturas são as mesmas empregadas no concreto convencional usado estruturalmente. Embora o tipo de cimento e seu módulo de finura possa interferir diretamente nas propriedades do estado fresco e na relação de aditivo no CAA (Tutikian e Dal Molin 2008). Ainda não se tem especificações científicas que restrinjam o uso de um determinado cimento no CAA, mas se tem cimentos que preservam as propriedades do estado fresco com maior facilidade, é o caso do CP V – ARI, cimento mais fino que os demais, desta maneira garante com maior facilidade as características do CAA.

Para que se consiga obter um CAA que apresente suas características do estado fresco, a área específica do cimento é um fator predominante. Segundo Gomes *et al.* (2009) a quantidade necessária de aditivo superplastificante aumenta conforme a área específica do cimento. Assim, quanto mais fino for o cimento utilizado, maior será o consumo de superplastificante e mais fluido será o CAA.

Embora o emprego de cimento com mais finos seja benéfico para manter as características do estado fresco da mistura, sabe-se que a reação entre o cimento e

a água pode causar fissuração no concreto. Quanto mais fino for o cimento, maior será a superfície específica, que por sua vez aumenta o consumo de água, aumentando o calor de hidratação. Em virtude do relatado, fica claro que, para obter uma mistura coesa a demanda por material fino no CAA é elevada, uma vez que se empregam com a utilização de cimento e adições. A maior quantidade de finos juntamente com o consumo de água elevado diminui a tensão de escoamento e aumentam a coesão da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.1.1.2 Adições minerais

Dentre as adições comumente empregadas no CAA tem-se o fíler calcário, a cinza volante, pozolana, sílica ativa, cinza da casca de arroz e o metacaulim. A principal função do emprego desse tipo de adição é a compensação do volume de finos requeridos na dosagem do concreto.

O emprego da alta quantidade de finos é necessária a fim de garantir coesão, evitando a segregação dos agregados graúdos com o emprego de aditivos. As adições aumentam a densidade da mistura melhorando as propriedades do estado fresco e endurecido, garantindo o preenchimento dos espaços vazios do concreto e conseqüentemente aumentando a resistência à compressão e durabilidade. Segundo Tutikian e Dal Molin, (2008) as adições podem ser inertes ou quimicamente ativas, quando inertes agem apenas fisicamente no concreto, melhorando sua composição, ou quimicamente ativa quando reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) no processo de hidratação do cimento.

Em relação ao CAA no seu estado fresco, as adições inertes ou quimicamente ativas, são utilizadas para aumentar a coesão e viscosidade, além da resistência de segregação do concreto. Segundo EFNARC, (2005) as adições também atuam no conceito de ajuste do consumo de cimento, reduzindo a retração e o calor de hidratação.

2.1.1.3 Agregados miúdos

Tanto a areia natural quanto a artificial, pode ser utilizada no concreto autoadensável, porém a primeira possui forma mais arredondada e textura mais lisa, aumentando a fluidez da mistura devido ao baixo atrito entre as partículas, sendo mais utilizada, enquanto areias artificiais apresentam granulometria descontínua, forma mais lamelar, resultando em argamassas menos deformáveis e com maior consumo de pasta, Tutikian; Dal Molin (2008). Segundo os autores, é primordial o controle da umidade do agregado miúdo, pois estimativas erradas da umidade dos agregados e água excedente na mistura é a principal causa de variação de fluidez da mistura, alterando também as propriedades mecânicas e de durabilidade do CAA.

Okamura e Ouchi (2003), reforçam que a resistência ao cisalhamento da argamassa é maior quanto mais angulosas forem as partículas do agregado miúdo, dificultando a deformabilidade do concreto.

Com relação à quantidade de agregado miúdo, Okamura e Ouchi (2003) afirmam que devem ser empregados volumes baixos, entre 40% e 50%, evitando a redução da deformabilidade causada pelo contato entre as partículas.

Tutikian e Dal Molin (2008) afirmam que areias grossas, com módulo de finura superior a 3, devem ser evitadas, pois podem causar a segregação da mistura. O CAA necessita de grande volume de finos, assim quanto menor for o módulo de finura, mais coeso será o concreto produzido. Quando existir o emprego de areia artificiais, deve-se atenção ao formato das partículas mais lamelares, além das frações granulométricas com variáveis quando comparadas a areia natural. Tais características podem ser corrigidas com o emprego de areias naturais em conjunto, diminuindo assim a lamelaridade das partículas bem como as frações granulométricas.

2.1.1.4 Agregados graúdos

No CAA por requerer grande quantidade de finos e maior consumo de argamassa para consolidação também tem uma redução em relação ao consumo de agregados graúdos. Para garantir as propriedades de fluidez do CAA, a dimensão característica do agregado graúdo deve ser de 19mm. É comum a utilização de dimensões entre 12,5 e 19mm, desde que possuam uma granulometria contínua diminuindo ao máximo os vazios da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A forma das partículas dos agregados graúdos é de suma importância, uma vez que agregados lamelares tem forma alongada e acabam por consumirem alto volume de pasta para obter trabalhabilidade, conseqüentemente se tem um aumento nos custos de produção. Partículas uniformes e arredondadas diminuem os vazios e aumentam a fluidez com um consumo menor de pasta na mistura. O consumo de água e de quantidade de pasta fatores essenciais para obtenção da fluidez também cresce com o aumento da área superficial do agregado (GOMES; BARROS, 2009).

2.1.1.5 Aditivos

Os aditivos do CAA devem atender às exigências normativas disponíveis, para assim garantir desempenho satisfatório, como redução de água, melhoramento na coesão e conseqüentemente melhora significativa de resistência à compressão.

O CAA tem por característica a utilização de aditivos que visam ajudar a alcançar as propriedades do estado fresco. Os mais empregados são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade, sendo que os dois atuam em conjunto afim de garantir fluidez elevada e a estabilidade da mistura, evitando a segregação e a exsudação (MEIRELES, 2009).

2.1.1.6 Água

A água a ser utilizada no CAA, é a mesma empregada em concretos convencionais. Sua relação com a mistura e a quantidade é definida de acordo com o método de dosagem e propriedades requeridas principalmente no estado fresco. O volume de água utilizado também está relacionado a quantidade de finos da mistura, uma vez que consomem taxas maiores de água quando adicionados a composição.

O CAA é sensível a variações na relação água/finos, por isso é imprescindível o controle de umidade de adições e agregados afim de não alterar o volume de água da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Gomes *et al.* (2009) afirmam que a quantidade de água na mistura depende de fatores, dos quais pode-se citar: propriedades dos agregados, tipo de cimento, quantidade total de partículas finas e uso de adições ou aditivos. A água por sua vez é usada em quatro partes diferentes uma para a hidratação do cimento, uma para absorção e adsorção dos agregados e materiais finos, uma para preencher a porosidade do esqueleto granular e a última para garantir a fluidez do concreto (Gomes *et al.* (2009).

2.1.2 Aplicação do CAA na construção civil

Com o passar dos anos o Brasil e o mundo buscam por novas tecnologias que buscam por otimizar processos, reduzir a mão de obra necessária, diminuindo os custos, aumentando a durabilidade. Uma alternativa para tal situação é o emprego do CAA em peças pré-fabricadas, que chegam prontas até as obras, onde se deve apenas realizar a fixação da mesma otimizando todo o processo.

A racionalização dos processos no mercado construtivo está relacionada muito a utilização do pré-fabricado, uma vez que emprego de tecnologia e controle de ponta a ponta no processo é primordial, garantindo resistência em curto espaço de tempo juntamente com o acabamento superficial das peças.

No cenário geral, sua aplicação consiste também nas obras de infraestrutura, onde se encontram com estruturas com alta demanda de armadura, espaços reduzidos dificultam o adensamento mecânico, desta maneira o emprego do CAA é muito importante para garantir a qualidade final da estrutura.

Além da qualidade final da peça, a utilização do CAA é importante para aumentar a produtividade das peças, não necessitar de vibração, especialmente em peças altamente armadas. O emprego do CAA tem por finalidade aumentar a produtividade, acelerando toda a produção, diminuindo o esforço físico e o número de trabalhadores para a obtenção de elementos com maior qualidade de acabamento, resistência mecânica e durabilidade.

2.2 PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

O CAA em seu estado endurecido possui basicamente as mesmas características do concreto convencional (CVV).

As diferenças entre o CAA e o CVV ocorrem principalmente no estado fresco. No concreto CVV para análise de seu abatimento é comumente utilizado o ensaio de tronco de cone (*Slump Test*) regido pela NBR 16889 (ABNT 2021), a qual define as características de consistência do estado fresco do CVV. Em relação ao estado fresco do CAA, são empregados uma série de ensaios que determinam diversas propriedades, como consistência, habilidade passante e resistência à segregação. É importante ressaltar que tanto os ensaios quanto a classificação das faixas de utilização são referenciados pela NBR 15823 (ABNT, 2017).

2.2.1 Capacidade de Fluxo

O ensaio de capacidade de fluxo do CAA serve para avaliar se o concreto tem consistência em sua mistura e se realmente é capaz de preencher os espaços em virtude de seu peso próprio, a mistura deve ser capaz de preencher a fôrma e passar por embutidos sem quaisquer que sejam as barreiras NBR 15823 (ABNT, 2017).

A capacidade de preencher as formas ou a capacidade de fluxo é comandada pela alta fluidez e alta coesão da mistura. A capacidade de fluidez esta relacionada a viscosidade da pasta, propriedades dos agregados e tamanha máximo.

Okamura e Ouchi (2003), relatam a tensão de cisalhamento da argamassa depende da relação de água/aglomerante, tendo em vista uma relação ótima para a menor tensão. Com isso, aumentando a relação água/aglomerante, aumenta fluidez, mas, ao mesmo tempo diminui a viscosidade.

2.2.1.1 Slump Flow

O Slump Flow conhecido por espalhamento, mede qual o diâmetro e espalhamento que o CAA atinge após a retirada do tronco-cônico, conforme Figura 1. O ensaio consiste em preencher o cone até sua borda superior com CAA, após isso é levantado o cone deixando que o concreto flua e obtenha o espalhamento. Esse espalhamento pode ser classificado de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2017), onde estabelece três classes e suas aplicações, conforme Tabela 1.

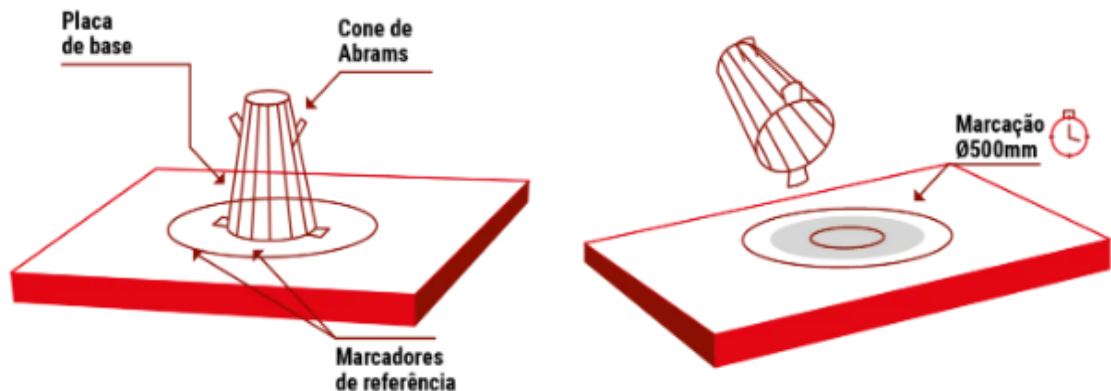


Figura 1: Ensaio de *Slump Flow*.
Fonte: Pré-fabricar (2022).

Tabela 1 - Classificação e aplicação CAA conforme resultado de *Slump Flow*.

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

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

O valor de espalhamento pelo ensaio de *Slump Flow* tem influência pelo consumo de água, tipos de aditivos empregados, distribuição dos agregados constituintes além do volume de finos empregados na mistura (EFNARC, 2005).

No mesmo ensaio é possível determinar o T500, que nada mais é do que o tempo para que o concreto flua sobre a base até que chegue à marcação de 500 mm. O T500 está relacionado com a viscosidade do concreto, é apresentado sua classificação na Tabela 3 no item 2.2.1.2, pois leva-se em consideração o ensaio de Funil V.

Após a execução do ensaio é possível analisar pelo índice de estabilidade visual se o CAA apresenta separação dos agregados graúdos da pasta, ocasionando segregação do concreto, isso pode ser analisado e evidenciado conforme Tabela 2.

Nessa análise visual é possível determinar toda a dispersão granulométrica, elencando a possibilidade de segregação no CAA.

Tabela 2 - Classes de índice visual.

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

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

2.2.1.2 Funil V

A execução do ensaio do Funil V inicia com o enchimento do próprio Funil até sua borda, posterior é aberto em sua base e medido o tempo para escoamento de todo o concreto, tal característica e medida está relacionado a viscosidade do CAA. Conforme classificação da NBR 15823 (ABNT, 2017), na Tabela 3, é apresentado a classificação em relação aos ensaios de T500 e Funil V, onde é possível avaliar a viscosidade aparente do concreto.

Tabela 3 - Classificação do concreto quanto a viscosidade aparente.

Classe de viscosidade de plástica aparente	T500 (s)	Funil V (s)	Aplicação	Exemplo
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação. Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente
VS2/VF2	> 2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, lajes e outras.

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

2.2.2 Habilidade Passante

A habilidade passante simula a capacidade que o CAA tem para fluir através de barras de aço, onde se tenha aberturas estreitas, sem que apresente qualquer tipo de segregação ou bloqueio (EFNARC, 2005). Com a análise da habilidade passante é possível determinar se a segregação está ocorrendo ou não no CAA. Dentre os ensaios para avaliar tal propriedade se tem a caixa L, anel J e caixa U.

A habilidade passante está diretamente relacionada a composição granulométrica e a fluidez do CAA, fatores importantes para obtenção dos parâmetros de estado fresco.

2.2.2.1 Caixa L

No ensaio da caixa L, é possível determinar como que o concreto vai se comportar quando tiver a presença de armaduras, simulando um elemento estrutural. A Figura 2 evidencia o equipamento empregado na realização do ensaio. O concreto é colocado até a borda da câmara vertical com a comporta fechada. Na frente da comporta estão posicionadas barras de aço devidamente espaçadas conforme as normativas, que tem por função simular as armaduras presentes em um elemento estrutural. Quando a comporta é aberta o concreto flui pela grade responsável por simular a passagem do concreto dentre espaços menores. Ao final do ensaio, é medido a altura nas extremidades da caixa, determinando assim a habilidade passante (HP) que é a razão entre H_2/H_1 , sendo H_2 altura final do concreto na borda da comporta, e H_1 a altura final adjunta a câmara vertical, as duas leituras são realizadas após ter aberto a comporta e o concreto fluir e se estabilizar.

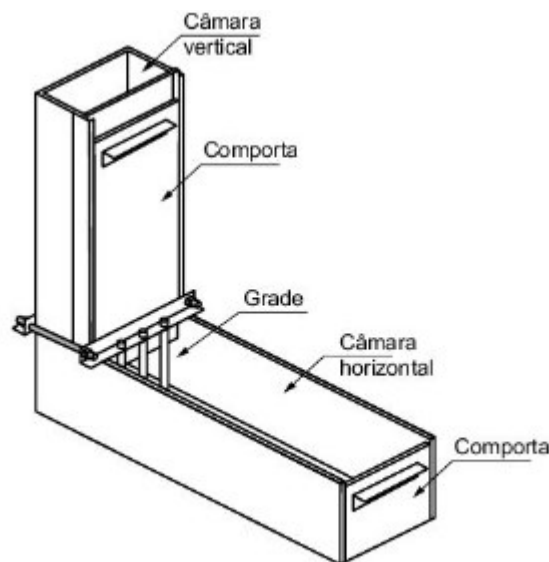


Figura 2 - Caixa L.
Fonte: ABNT NBR 15823-4 (2017).

Após a realização do ensaio, é obtido o resultado da relação entre as alturas finais da caixa L. Esta relação está diretamente ligada a classificação, e tende a ser $\geq 0,80$ para validação no ensaio. Na Tabela 4 é analisado a classificação sobre o fluxo confinado.

Tabela 4 - Classe de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado).

Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
PL1	$\geq 0,80$, com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-4
PL2	$\geq 0,80$, com três barras de aço	

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

2.2.2.2 Anel J

No ensaio de Anel J, também é possível determinar da habilidade passante. Em relação a diferença ente os ensaios, a caixa L é a pressão que o concreto está submetido para que escoe entre as barras, já o anel J consiste na colocação de um anel com barras de aço devidamente espaçadas, onde se utiliza o cone invertido o qual avalia após a retirada do mesmo a capacidade do concreto passar pelas barras de aço. A habilidade passante é medida pela redução de diâmetro de espalhamento do concreto em relação ao ensaio de *Slump Flow* (espalhamento). A Figura 3 evidencia o equipamento empregado para execução do ensaio. Já na tabela 5 se tem a classificação de acordo com os ensaios de caixa L e anel J.

Segundo Daczko (2012), o ensaio avalia a resistência de bloqueio da mistura, indicando se o tipo e a quantidade de agregados graúdos utilizados estão corretos. Pode-se avaliar a dificuldade de escoamento bem como a possibilidade de falhas da concretagem, essas evidências são levantadas com análise visual e final do ensaio.

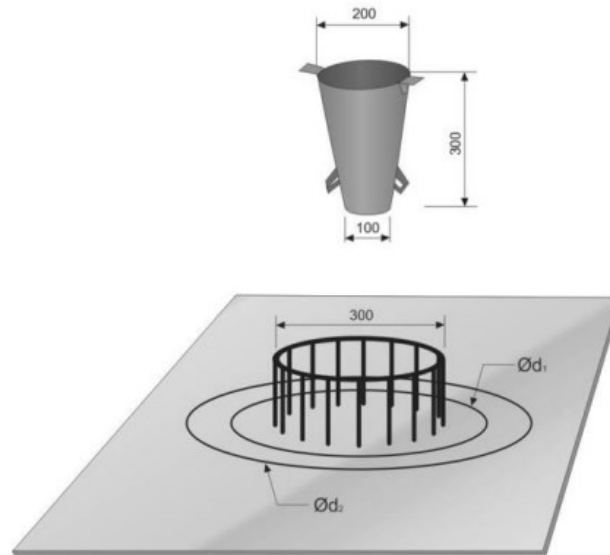


Figura 3: Equipamento e simulação de execução do ensaio de anel J.
Fonte: Adaptada NBR 15823-3 (ABNT, 2017).

Tabela 5 - Classificação da habilidade passante em relação a sua aplicação.

Classe de habilidade passante	Anel J (mm)	Caixa L (H2/H1)	Caixa U (H2-H1)	Aplicação	Exemplo
PL1/PJ2	25 mm a 50 mm com 16 barras de aço	$\geq 0,80$, com duas barras de aço	Não aplicável	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armaduras de 80 mm a 100 mm	Lajes, painéis, elementos de fundação
PL2/PJ1	0 a 25 mm com 16 barras de aço	$\geq 0,80$, com três barras de aço	Até 30 mm	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm	Vigas, pilares, trantes, indústria de pré-fabricados

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

2.2.2.3 Caixa U

O ensaio de caixa U é utilizado para avaliar a capacidade de enchimento do CAA e fornece indicativos de viscosidade. O equipamento basicamente tem dois

compartimentos, com vergalhões devidamente espaçados, no decorrer da execução do ensaio após o enchimento é permitido a passagem do concreto de um lado para o outro. Após a passagem mede-se a altura do concreto nas duas seções e analisa a diferença entre as medidas. Quanto menor for a medida obtida, melhor é a capacidade de fluxo do concreto.

Nas normativas vigentes da NBR 15823 (ABNT, 2017) não é citado uma classificação quanto aos resultados do ensaio de caixa U, apenas cita na Tabela 5, que deve ser até 30 mm. Na Figura 4 pode-se avaliar o equipamento caixa U para execução do ensaio.

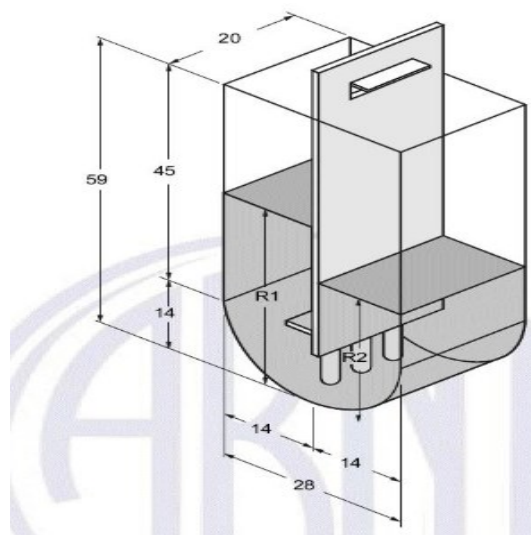


Figura 4 - Caixa U.
Fonte: NBR 15823 (ABNT, 2017).

2.2.3 Resistência à segregação

A resistência à segregação é primordial na composição do CAA, uma vez que segundo segundo Tutikian e Dal Molin (2008), no CAA destacam-se três propriedades fundamentais, capacidade de preenchimento, coesão ou habilidade passante e resistência à segregação. Se uma ou mais dessas propriedades não forem alcançadas o CAA apresentará problemas em seu estado fresco.

A capacidade do concreto permanecer homogêneo no estado fresco se chama resistência à segregação, essa por sua vez, segundo EFNARC (2005) pode ocorrer durante ou após a moldagem do CAA.

Dentre as formas de ocorrência da segregação temos a separação das partículas (agregados) da pasta do CAA, tendem a sedimentar com maior facilidade comparadas aos agregados e partículas menores. Tem-se também como forma de segregação a exsudação da água no CAA, ou seja, ascensão da água de mistura, que por sua vez dificulta a aderência dos agregados a argamassa do concreto, ocasionando a segregação. A ascensão de água na mistura proporciona vazios, que são orientados para uma mesma direção, assim a permeabilidade do concreto por ser aumentada em relação a um plano horizontal (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Dentre os ensaios para análise da segregação do CAA, temos a coluna de segregação a qual é regido pela NBR 15823-6 (ABNT, 2017). Também é possível analisar em relação ao ensaio de *slump flow*, onde é possível determinar por análise visual o índice de estabilidade e correlacionar com a segregação.

2.2.3.1 Coluna de Segregação

No ensaio é possível determinar se está ocorrendo segregação do CAA ensaiado. O equipamento para execução do ensaio é ilustrado na Figura 5.

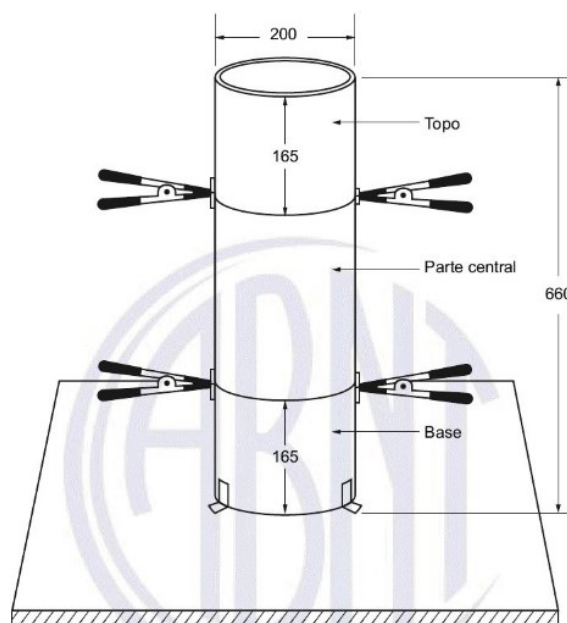


Figura 5 - Coluna de segregação.
Fonte: NBR 15823-6 (ABNT, 2017).

O ensaio de coluna de segregação realizado pelo enchimento do equipamento de forma uniforme sem interrupção, em um tempo inferior a 5 minutos após a coleta do material. Após decorridos aproximadamente 20 minutos devem ser retiradas às porções de concreto do topo e da base da coluna. Após a retirada cada amostra deve ser lavada individualmente sobre uma peneira de malha 5 mm, removendo toda a argamassa dos agregados graúdos. Os agregados devem estar secos para posterior aferir a sua massa para obtenção da massa de agregado obtido da base da coluna (mB) e da massa do agregado obtido do topo da coluna (mT).

A resistência à segregação, é determinada pela diferença do percentual entre o topo e a base da coluna, conforme Equação 1.

$$SR = \frac{2x(mB - mT)}{mB + mT} \times 100 \quad (1)$$

Onde,

SR: resistência à segregação do concreto em (%);

mB: massa de agregado obtido da base da coluna, em gramas (g);

mT: massa do agregado obtido do topo da coluna, em gramas (g);

Obs: Caso mT for maior ou igual a mB, então a segregação é nula.

A resistência à segregação é fator importante para a qualidade do CAA, pois está relacionado com a homogeneidade da mistura. As classes de resistência à segregação em função de sua aplicação são definidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Classes de resistência à segregação do CAA, em função da sua aplicação.

Classe de resistência à segregação (a)	Coluna de segregação (%)	Distância a ser percorrida (m)	Espaçamentos entre armaduras Mm	Exemplo
SR1	≤ 20	< 5	> 80	Lajes de pequena espessura. Estruturas convencionais de pouca complexidade
SR2	≤ 15	> 5	> 80	Elementos de fundações profundas. Pilares, paredes e elementos estruturais complexos
		< 5	< 80	Elementos pré-fabricados

(a) Quando a distância a ser percorrida pelo concreto for maior que 5 m e o espaçamento entre barras inferior a 80 mm, deve ser especificado um valor de SR menor que 10%

NOTA SR 2 ou um valor-limite mais rigoroso onde pode ser especificado, se a resistência ou a qualidade da superfície for particularmente crítica.

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

2.3 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, as propriedades mecânicas do CAA em comparação com CVV tendem a ser semelhantes, porém alguns estudos citam que podem ocorrer diferenças significativas. Segundo Vilanova et.al. (2011) podem ocorrer diferenças no estado endurecido, uma vez que se tem modificações na composição da pasta, melhora de microestrutura além da ausência de vibração.

Nos tópicos a seguir serão explanadas de forma individual algumas das características do estado endurecido do CAA.

2.3.1 Resistência à compressão e tração

A resistência à compressão é a principal propriedade do estado endurecido, é solicitada e testada rotineiramente na aplicação de concretos. Embora o comportamento da resistência à compressão do CAA seja similar à do CVV, é notável que quando se tem uma mesma relação água/cimento e mesmo teor de vazios, a resistência do CAA é ligeiramente superior ao CVV, isso ocorre segundo EFNARC (2005) pois a falta de vibração melhora a ligação entre pasta e agregados, trazendo benefícios a zona interfacial.

Isso pode ser comprovado por Druta, Wang e Lane (2014), que relatam que em relações água/cimento entre 0,40 e 0,60 a resistência à compressão do CAA será maior comparado ao CVV, desde que, sejam dosados com mesma relação. Tal fato, é comprovado por meio da microscopia eletrônica de varredura, onde demonstram que os CAAs apresentam fissuras menores entre a pasta e os agregados. Segundo Marques (2011), outro fator é a grande quantidade de finos presentes na mistura, que apresentam leve aumento na resistência do CAA.

Embora a relação água/cimento seja o principal fator na resistência à compressão, o emprego de adições minerais, alto teor de finos, melhoram o empacotamento reduzindo assim a porosidade do concreto, esses fatores aumentam a resistência mecânica (UYSAL, YILMAZ, 2011).

Em resistência a tração, tende a ser maiores do que CVVs de uma mesma resistência a compressão. Segundo Druta, Wang e Lane (2014), a resistência à tração do CAA tende a ser maior, com valores em até 40% maiores em relação ao concreto convencional.

2.3.2 Módulo de Elasticidade

Uma propriedade importante do concreto é o módulo de elasticidade, que tem por finalidade representar as tensões e esforços sofridos pelo concreto que geram deformações no material. O valor de módulo depende da composição e do emprego

de cada porcentagem de materiais constituintes do traço, uma vez que, segundo Uysal (2012) e Mehta e Monteiro (2014) a composição e o tipo de agregado tem ação expressiva quanto aos valores de módulo. Fazendo referência a NBR 6118 (ABNT, 2014) prescreve e apresenta equações para determinação do módulo, onde considera os tipos de rochas empregados na mistura.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) como o CAA possui maior volume de pasta e menor quantidade de agregados, em relação ao CVV, e elencando que o módulo de elasticidade está diretamente ligado aos agregados, o CVV apresentará módulo condizente com os agregados empregados, porém no CAA o módulo será inferior devido a menor quantidade de agregados na composição em relação ao volume de pasta ser superior.

Tais fatos também são evidenciados por Leemann e Hoffmann (2005), que afirmam que o módulo de elasticidade do CAA é cerca de 16% menor em comparação ao CVV em relação a uma mesma resistência mecânica. Em outros estudos como o de Damone (2007) o módulo pode apresentar valores de até 40% menores em relação ao CVV, quando dosados em resistências mecânicas inferiores, já para resistências maiores a redução do valor de módulo é de cerca de 5% inferiores, isso está correlacionado as variações das misturas e o emprego do quantitativo de agregados graúdos na composição do CAA. As variações dos valores de módulo em função dos componentes do traço afetam a capacidade de carga, rigidez e a deformação das estruturas, uma vez que um módulo de elasticidade alto indica um concreto mais rígido, capaz de suportar grandes cargas sem deformações excessivas. Por sua vez concretos rígidos com menor deformação podem acarretar rupturas com colapso da estrutura sem aviso prévio.

2.4 MÉTODO DE DOSAGEM

Dentre os métodos de dosagem disponíveis, a maioria foi produzidos há muitos anos e tabelados de acordo com suas características, tendo variação de agregados dentre outros fatores. Assim, independentemente do método utilizado é

comum que se façam a adaptações durante a dosagem, baseados em testes práticos, até que se atinja parâmetros aceitáveis de autoadensabilidade.

Basicamente, todos os métodos de dosagem estabelecem um volume e composição de pasta, além de buscar a melhor composição dos agregados, diminuindo os vazios. Na Tabela 7 se tem os valores típicos empregados nas dosagens do CAA.

Tabela 7 - Valores típicos de proporção do CAA.

Materiais Constituintes	Faixa típica em massa (kg/m ³)	Faixa típica em Volume (litros/m ³)
Finos (< 0,125 mm)	380-600	-
Pasta	-	300 – 380
Água	150 - 210	150 – 210
Agregado graúdo	750 - 1000	270 – 360
Agregado miúdo	Teor depende do volume dos outros constituintes, tipicamente 48-55% do peso total do agregado	
Água/finos (em volume)	-	0,85 - 1,10

Fonte: EFNARC (2005).

Dentre os inúmeros métodos de dosagem empregados na confecção do CAA temos Gomes (2002), Okamura e Ouchi (2003), Repette e Melo (2005), EFNARC (2005) e Tutikian e Dal Molin (2008), como exemplos de métodos usados no decorrer do histórico do CAA. Para o presente estudo será utilizado o método de Gomes (2002), que indica a obtenção da pasta e do esqueleto granular separadamente em duas fases distintas, o modelo sugere que a viscosidade e a fluidez governem o comportamento do fluxo do concreto.

O método de Gomes (2002) é voltado para o CAA de alta resistência (CADAR) o qual o procedimento de dosagem é ilustrado na Figura 6. O método consiste em separar a dosagem em duas fases, sendo uma a pasta e outra o esqueleto granular, essas fases são obtidas separadamente buscando o melhor emprego e composição de materiais em cada uma das fases.

A pasta deve ser fluida mantendo a coesão da mistura, para tanto a dosagem dos aditivos e dos finos é feita através de testes específicos. Pode-se encontrar o ponto de saturação do aditivo por meio do teste cone de Marsh em conjunto com o

mini *slump*. A relação água/cimento é relacionado com a resistência requerida ficando na faixa de 0,35 a 0,40.

Em relação ao esqueleto granular, se busca um melhor empacotamento dos agregados graúdos uma vez que quanto menor as partículas, melhores serão a interações entre eles. Outro fator importante é a melhor integração entre os agregados, seja miúdo ou graúdos, buscando a diminuição dos vazios

Com as fases de pasta e esqueleto finalizadas, próxima etapa é avaliação do CAA em relação aos parâmetros de estado fresco.

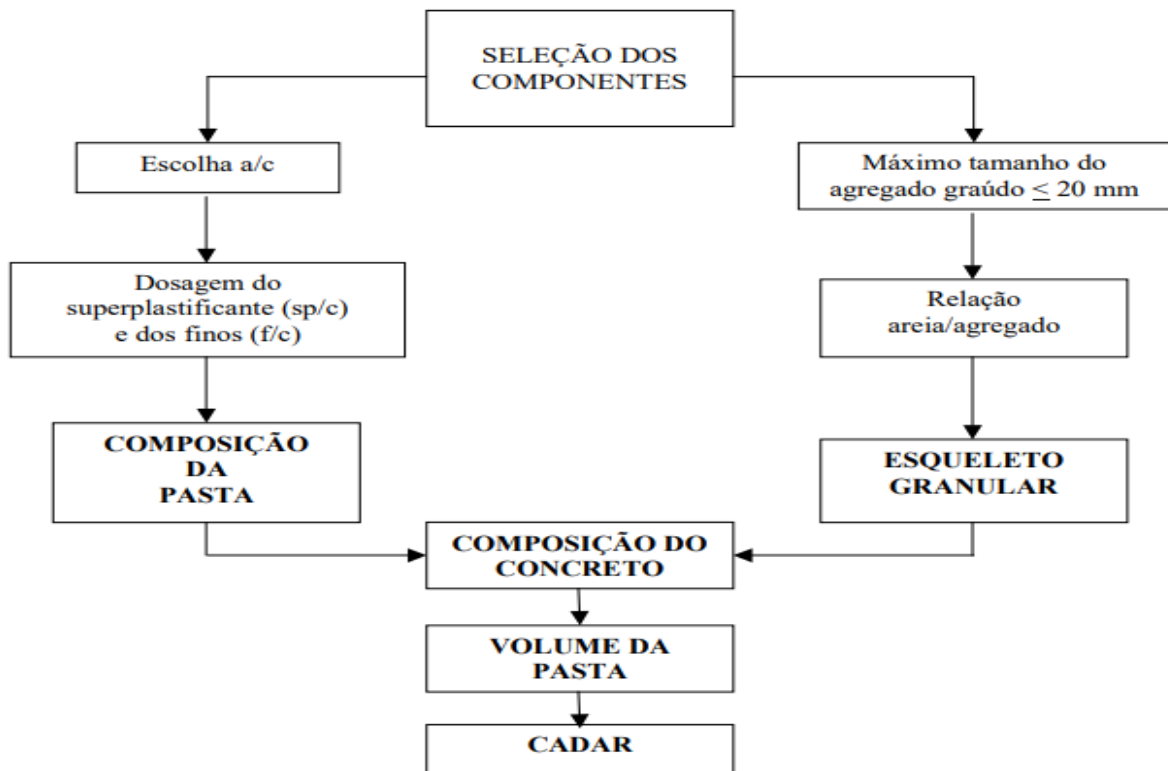


Figura 6 - Fluxograma da metodologia de dosagem de acordo com Gomes (2002).

Fonte: Gomes, (2002).

O método tem por características obter as seguintes propriedades:

- a) Relação água/aglomerante inferior a 0,40;
- b) Otimizar a relação de aditivo superplastificante/cimento (sp/c) e finos/cimento (f/c) obtendo fluidez e coesão;
- c) Determinação do esqueleto granular com o mínimo de vazios possível;
- d) Determinar pasta com autoadensabilidade no estado fresco, juntamente com a resistência a compressão.
- e)

2.5 FÍLER DE BRITAGEM

2.5.1 Origem

Os resíduos industriais oriundos dos processos de britagem atuais não possuem uma destinação que consuma todo o resíduo gerado. No processo de britagem e produção de areia industrial, os britadores retiram parte do pó presente, porém não utilizam totalmente.

Os processos de britagem, podem ser feitos de duas maneiras diferentes, por via úmida e via seca. Segundo Mehta e Monteiro, (2008) o processo por via úmida é mais eficiente do que por via seca, uma vez que o primeiro retira mais material pulverulento. Isso está atrelado a maior segurança em reter o material pulverulento no processo de via úmida, enquanto no processo de via seca pode se ter perda de parte do material devido às intempéries, como o vento.

O processo de via úmida consiste em uma roda d'água com caçambas vazadas com peneiras de diâmetros pequenos ao fundo, que por sua vez com o giro separa parte do material fino pulverulento que fica suspenso na água e, em seguida, é destinado as bacias de decantação conforme Figura 7. O processo de via seca é realizado por exaustores e ciclones, que possuem a função de recolher o material pulverulento, conforme Figura 8. No sistema de via seca também é comumente utilizado o sistema de peneiramento, no qual o pó de pedra passa por uma peneira com abertura de 0,40 mm.



Figura 7 - Processo via úmida com roda d' água e bacias de decantação.
Fonte: Schankoski (2017).



Figura 8 - Processo por via seca.
Fonte: Schankoski (2017).

O setor de produção de agregados com britadores registra globalmente cerca de 35 milhões de toneladas de material extraído anualmente (BIANCO e BLENGINI, 2019). Desse material extraído partículas finas menores que 75 mm representam de 10 a 15 % na produção em escala gradual (GELATAKIS e SOULTANA, 2016). Em relação ao cenário nacional o processo de britagem uma pedreira localizada na região

de Florianópolis a cada 50 toneladas produzida, 1 tonelada se enquadra como pó (SCHANKOSKI et al. 2017).

Com a necessária crescente da extração de britagem, juntamente com a grande quantidade de pó retido nos processos, é crucial a busca em empregar tal resíduo, ele permanece depositado em aterros não controlados a céu aberto, evidenciando um problema ambiental, em virtude da poluição.

O fíler de britagem foi considerado um problema para os concretos convencionais, pois sua natureza extremamente fina ocasiona o consumo excessivo de água na mistura, prejudicando as propriedades do concreto. Já no CAA como o material fino é de suma importância, fica evidente que sua utilização pode ser estudada como adição ao concreto.

2.5.2 Utilização do fíler basáltico em concretos

Nos últimos anos houve um aumento de pesquisas voltadas à utilização de resíduos de processos de britagem, sendo prontamente utilizado na substituição do cimento. Schankoski et. al. (2017) e (2019), avaliaram a produção de pastas e concreto autoadensável substituindo o cimento por resíduos de pedreiras de gnaiss (G), diabásio (D) e calcário (L), com 3 diferentes diâmetros máximos $15 \pm 1 \mu\text{m}$, $25 \pm 1 \mu\text{m}$ e diâmetros máximos in natura de $33 \mu\text{m}$, com substituição de diabásio e gnaiss, no estado fresco. Seus resultados indicaram que o CAA produzido com pó residuais são estáveis tendo bom desempenho das propriedades autadensáveis, conforme apresentado na Tabela 8. No estado endurecido (compressão, tração e módulo de elasticidade) foram observados valores maiores em comparação a concretos com calcário, conforme Figuras 9, 10 e 11. Também se observou que o uso de pó de pedra diminui o índice de cimento (kg de cimento/m³ de concreto para atingir 1 MPa) em até 35% em comparação ao CAA de referência. Além disso, Schankoski et al. (2020) avaliaram a qualidade final das peças produzidas com concreto autoadensável produzido com as substituições propostas, evidenciado que o aspecto da superfície das peças foi similar.

Tabela 8 - Resultados de estado fresco.

Traço CAA	Slump Flow (mm)	Funil V (s)	Anel J (mm)*	IEV**	Teor de SP***
C0 Padrão	650	6,1	41	0	0,40
L0 33 \pm μ m	710	5,0	60	1	0,44
L1 25 \pm μ m	690	6,9	10	1	0,41
L2 15 \pm μ m	667	6,0	32	0	0,52
D0 33 \pm μ m	559	5,0	45	1	0,37
D1 25 \pm μ m	692	8,0	46	1	0,61
D2 15 \pm μ m	651	4,3	48	0	0,62
G0 33 \pm μ m	654	6,2	51	0	0,58
G1 25 \pm μ m	651	5,3	44	0	0,67
G2 15 \pm μ m	689	5,5	25	0	0,63

Fonte: Adaptado de Schankoski et al. (2019).

Traços: C – referência, L – Calcário, D – Diabásio, G – Gneisse.

*Diferença entre o Slump Flow (mm) em relação ao resultado do Anel J (mm).

**Índice de estabilidade visual.

***Teor de superplastificante em relação ao consumo de cimento.

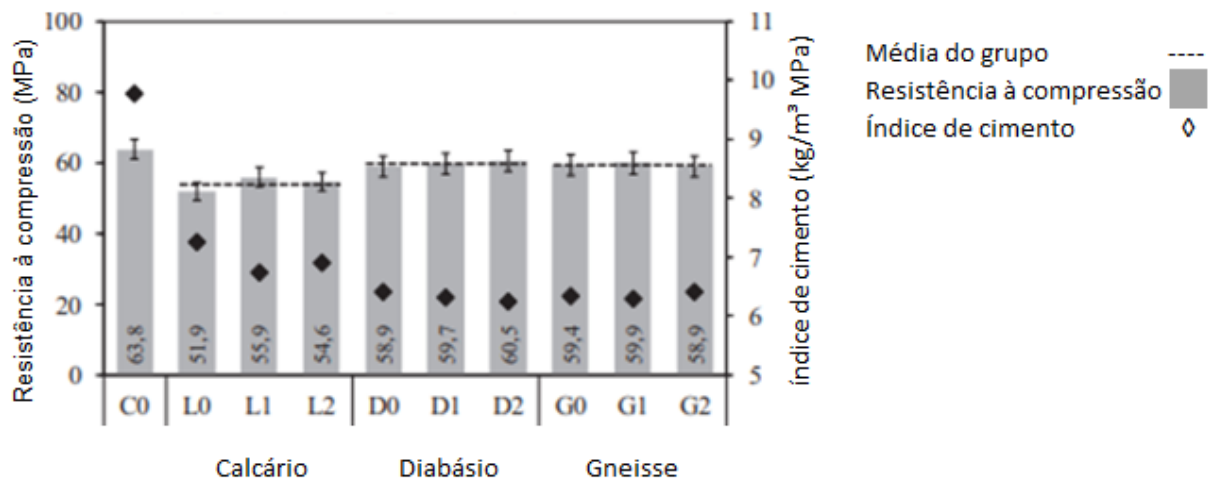


Figura 9 - Resistência à compressão aos 28 dias.

Fonte: Adaptado de Schankoski et al. (2019).

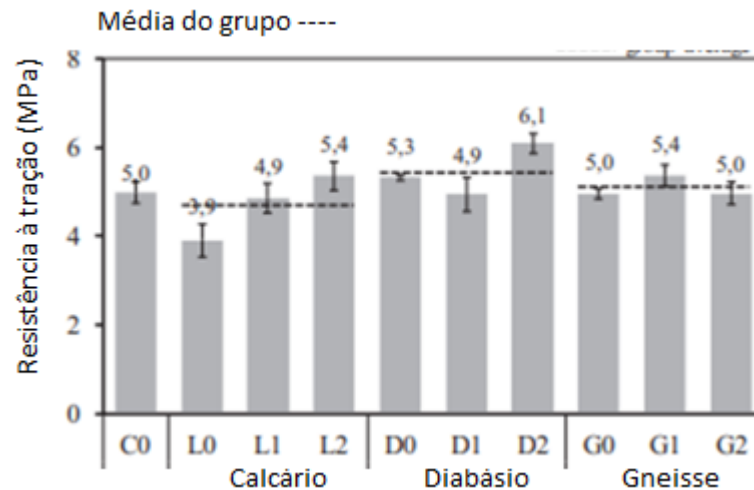


Figura 10 - Resistência à tração aos 28 dias.

Fonte: Adaptado de Schankoski et al. (2019).

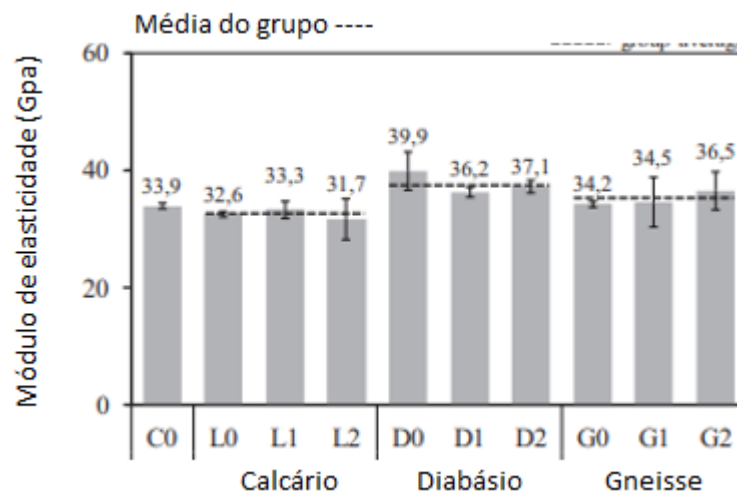


Figura 11: Módulo de elasticidade aos 28 dias.

Fonte: Adaptado de Schankoski et al. (2019).

Dobiszewska et al. (2018) avaliaram a zona interfacial e as propriedades mecânicas de um concreto autoadensável com a incorporação de subproduto de origem basáltica de pedreiras. Os autores substituíram a areia natural por até 30% de resíduo de basalto com diâmetro das partículas médias de 20 μm . Os autores observaram melhora tanto na resistência à compressão e à flexão com teores de até 30% de substituição, e atrelam isso ao melhor empacotamento das partículas com o uso do pó de basalto, com isso a porosidade é reduzida devido ao preenchimento do pó de basalto no concreto, aumentando a densidade da mistura conforme Figuras 12 e 13. O pó de origem basáltica melhorou a interface da zona de transição, conforme Figura 14, que mostra cristais de portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, os quais não foram

encontrados quando utilizado pó de basalto. Na Figura 14 é apresentado a microestrutura do concreto com 20% de adição de pó de basalto. No ponto 1 é apresentado um grão de areia, já nos pontos 2 e 3 são as fases de C-S-H e partículas de pó de basalto. O C-S-H adere a superfície do agregado, preenchendo o basalto por fases de C-S-H, melhorando assim a qualidade da zona de transição.

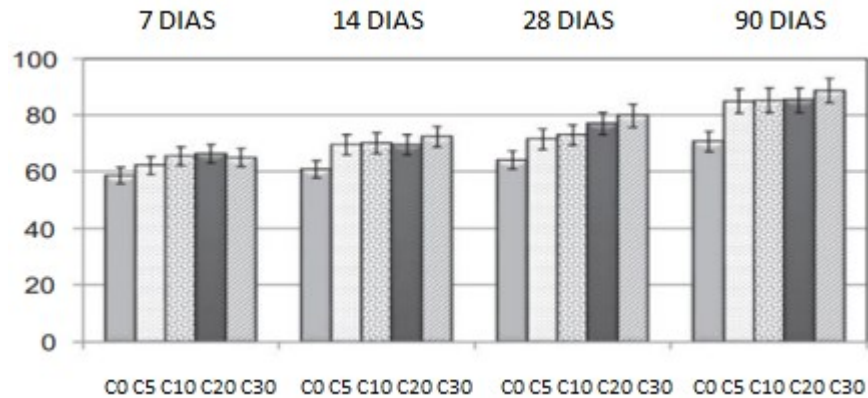


Figura 12 - Resistência à compressão.
Fonte: Adaptado de Dobiszewska et al. (2018).

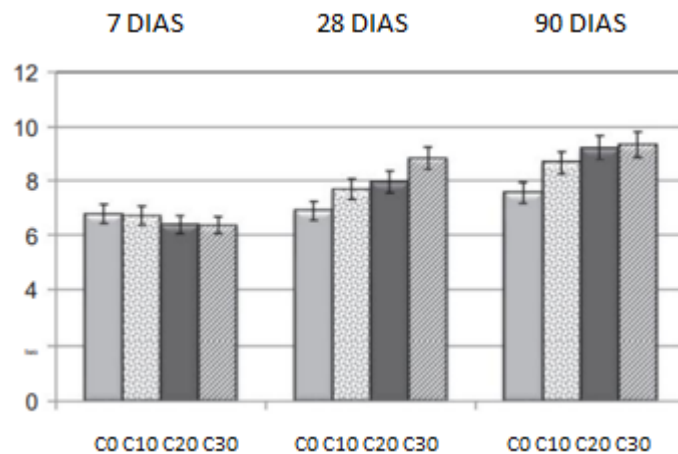


Figura 13 - Resistência à tração.
Fonte: Adaptado de Dobiszewska et al. (2018).

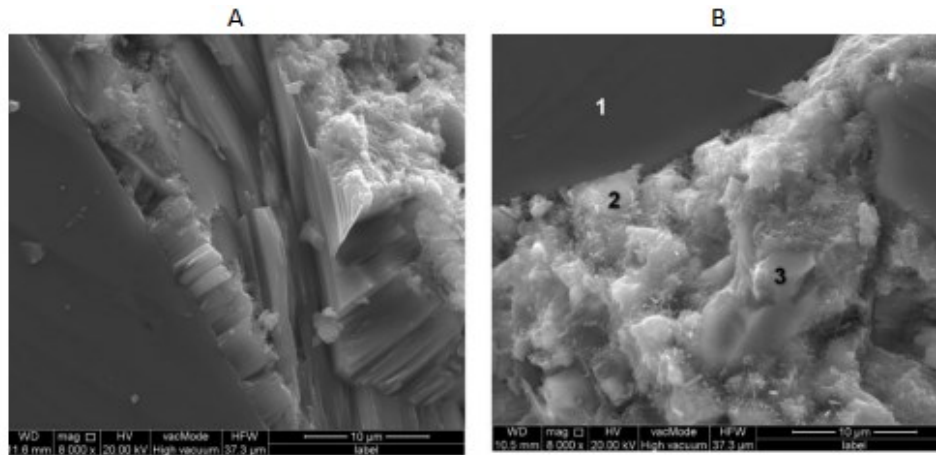


Figura 14 - Microestrutura dos concretos sem adição (A) e com pó de basalto (B).
Fonte: Adaptado de Dobiszewska et al. (2018).

Dobiszewska et al. (2018) relatam que o concreto com a adição do pó de basalto é mais denso, e relacionam isso ao papel de micro carga causada pela substituição, que leva à densificação física da matriz de cimento ao redor das partículas de agregados. Também é evidenciado heteronucleação da fase C-S-H na superfície do pó de basalto localizado na zona de interfacial, além de indicarem que reações químicas entre o pó de basalto e os poros são possíveis, transformando gradualmente os minerais da superfície, aprimorando assim a zona interfacial.

Matos et al. (2020) investigaram a viabilidade da produção de pasta de cimento de ultra alto desempenho com resíduos de pedreiras de diabásio, granito e o basalto como adições em substituição ao quartzo e calcário. Os autores utilizaram os resíduos com diâmetro de partículas de $100 \pm 0,05 \mu\text{m}$, equivalente ao pó de quartzo. As cargas contendo granito e diabásio aumentaram a tensão de escoamento em cerca de 1,6 vezes, enquanto a utilização de basalto aumentou em 9 vezes a tensão de escoamento da mistura, isso está relacionado a irregularidade das partículas, diminuindo a fluidez e aumentando viscosidade e a tensão de escoamento. A incorporação desses resíduos não trouxe perdas de resistência a mistura, conforme evidenciado na Figura 15.

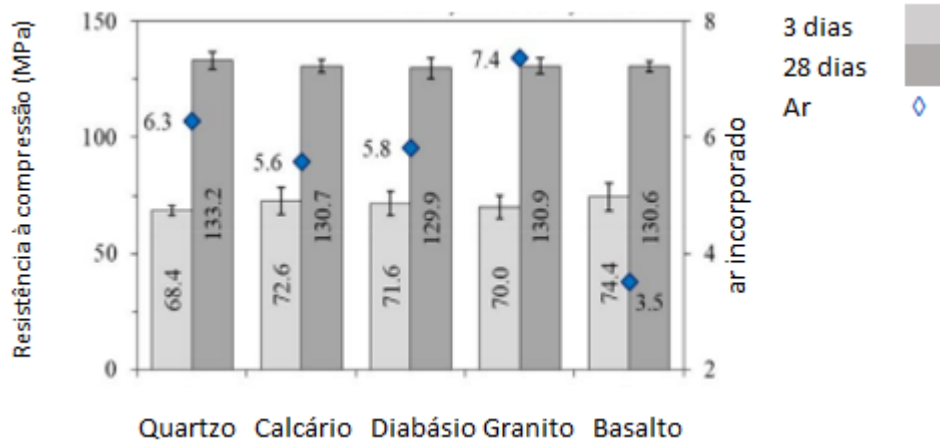


Figura 15 - Resistência à compressão aos 3 e 28 dias de hidratação e teor das pastas.
 Fonte: Adaptado de Matos et al. (2020).

Abdalqader et al. (2022) analisaram a influência da utilização de resíduos de pedreiras dolomítica, na composição de argamassas de cimento visando uma substituição na composição de CAAs. O resíduo foi coletado em uma pilha acumulada na pedreira, secado a $105 \pm 5 \text{ C}^\circ$. A fração passante na peneira $125 \mu\text{m}$ foi empregado em substituição ao cimento. Os autores indicaram que a substituição pode trazer melhoria a trabalhabilidade, a fluidez e a coesão. Embora tenha apresentado uma queda de resistência mecânica, isso foi compensado, porque segundo os autores o efeito de preenchimento da mistura pode compensar o efeito de diluição ocorrido nas idades precoces.

A Tabela 9 mostra a utilização do FB em trabalhos recentes, quais os tamanhos máximos de partículas empregadas, além dos resultados obtidos.

Tabela 9 - Utilização do filer de basalto.

UTILIZAÇÃO DO FÍLER BASÁLTICO			
Autores	Utilização	Tamanho máximo de partículas	Resultados
Schankoski et al. (2017), (2019) e (2020).	Em substituição ao cimento Portland	$15 \pm 1 \mu\text{m}$, $25 \pm 1 \mu\text{m}$ e $33 \pm 1 \mu\text{m}$.	Resultados em estado endurecido maiores, qualidade final das peças equivalente, não apresentado perdas.
Dobiszewska et al. (2018).	Em substituição ao agregado miúdo.	médias de $20 \mu\text{m}$.	Resultados em estado endurecido maiores tanto na flexão quanto na compressão, além de melhora na qualidade da zona de transição.
Matos et al. (2020).	Em substituição a adição/cimento	$100 \pm 0,05 \mu\text{m}$.	Evidenciaram aumento na tensão de escoamento com utilização do filer basáltico. Não evidenciara perdas de resistências nas misturas.
Abdalqader et al. (2022).	Em substituição ao cimento Portland	menor que $125 \mu\text{m}$.	Indicaram melhoras na fluidez, trabalhabilidade e coesão. Queda de resistência nas idades iniciais, fato compensado nas idades tardias evidenciando resultados equivalentes.

Fonte: Autoria própria (2023).

Com a crescente dos estudos voltados a utilização do filer de origem basáltica na composição de CAA, é evidenciado que ainda existe lacunas a serem sanadas, principalmente voltadas a teores de substituição que atrelam no menor consumo de cimento, buscando um menor custo por m^3 ao CAA.

Ainda se tem fatores a se esclarecer, seja pelo tipo de substituição, proporção, redução de cimento, atrelando pontos positivos e negativos em relação a utilização do FB, destacando a importância do estudo proposto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo da pesquisa foi avaliar o potencial da utilização do fíler de origem de britagem em substituição parcial do cimento na produção do CAA, através do controle das propriedades do estado fresco, e do estado endurecido. O estudo baseou-se inicialmente na caracterização dos materiais graúdos e miúdos, bem como em relação a adições ao CAA, que devem ser tão finas quanto o cimento CP V-ARI, utilizado na confecção do CAA. Com a caracterização dos materiais foi calculado o traço padrão utilizando o método de Gomes (2002). Com o traço estabelecido seguiu-se para confecção de cada traço com a eventual porcentagem de adição para assim analisar o comportamento no estado fresco, como fluidez, coesão e resistência a segregação.

Posterior a análise das propriedades no estado fresco, avaliou-se os resultados no estado endurecido por meio de ensaios de resistências à compressão, tração, módulo de elasticidade e absorção, bem como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) que buscou avaliar os produtos formados pela hidratação ao longo do tempo.

3.1 MATERIAIS

As etapas de projeto dessa pesquisa, que incluem caracterização dos materiais, procedimentos de preparo e classificação estão apresentadas conforme fluxograma apresentado na Figura 16.

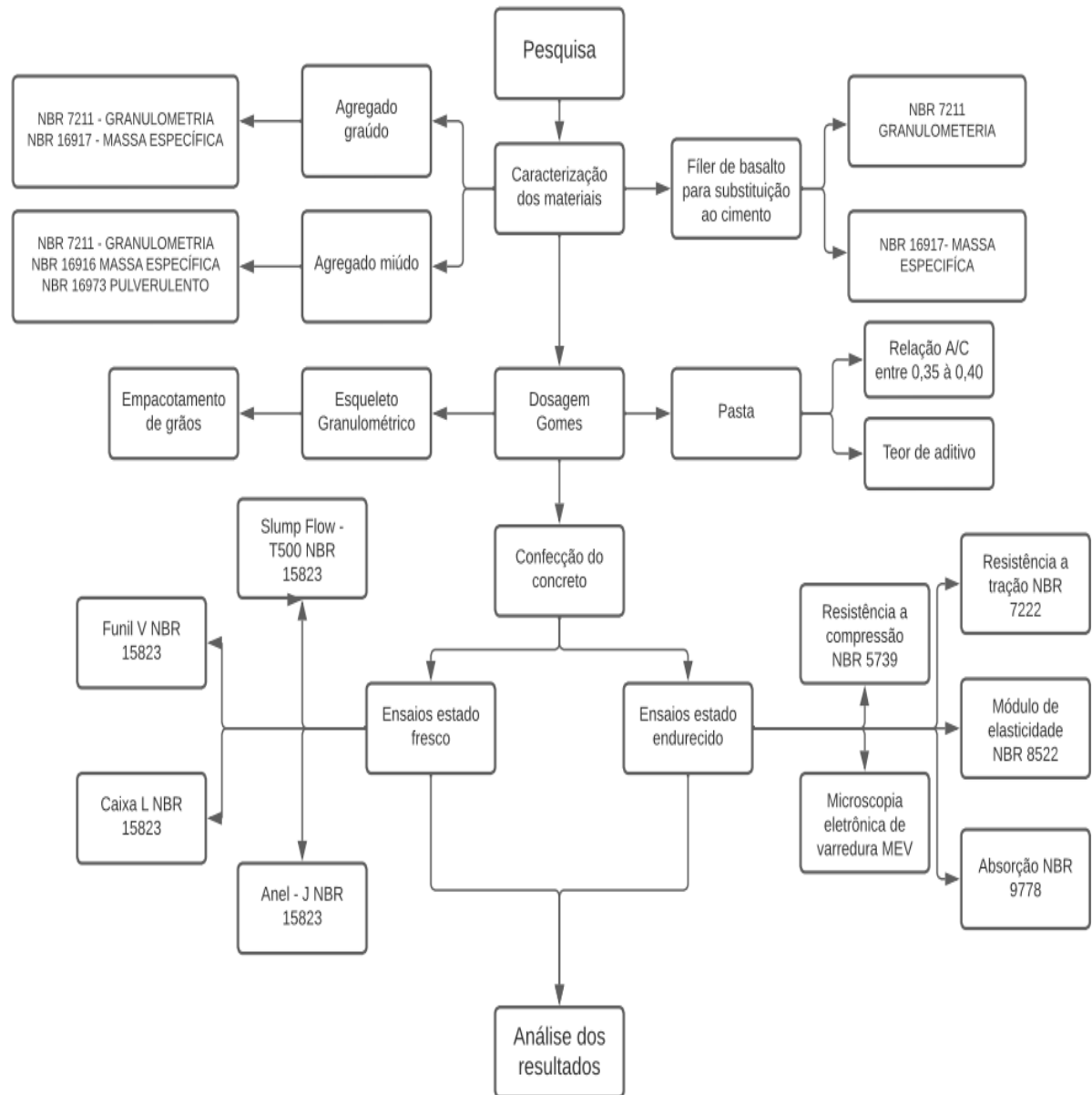


Figura 16 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.

Fonte: Autoria própria (2023).

3.1.1 Cimento

Para desenvolvimento do CAA proposto na pesquisa, optou-se pela utilização do cimento CP-V ARI, por ser um cimento com menor teor de adição. A caracterização física do cimento foi obtida no site do fabricante, seus requisitos seguiram a NBR 16697 (ABNT, 2018) e pode ser analisado na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 - Ficha técnica Cimento CP-V ARI (análise mecânica e física).

ENSAIOS MECÂNICOS			ABNT NBR 16697
IDADE	Resistência à compressão		
1 dia	MPa	22,5	≥ 14
3 dias	MPa	37,3	≥ 24
7 dias	MPa	42,1	≥ 34
28 dias	MPa	-	-

ENSAIOS FÍSICOS			ABNT NBR 16697
Massa específica (g/cm ³)		3,12	
Resíduo de peneiração (%)	90 μ m	NA	-
	75 μ m	-	$\leq 6,0$
	45 μ m	-	-
	32 μ m	6,93	-
Sup. Específica de Blaine (cm ² /g)		-	≥ 3000
Água na pasta normal (%)		28,58	-
Tempo de Pega (min)	Início	246	≥ 60
	Fim	310	≤ 600
Expansabilidade		-	$\leq 5,0$

Fonte: Disponibilizado pelo fabricante.

A fim de validar as informações mecânicas apresentadas pelo fabricante foi ensaiado uma amostra de cimento seguindo a normativa da NBR 7215 (ABNT 2019), e a classificação da NBR 16697 (ABNT 2018).

O traço utilizado para a validação é constituído de cimento CP V ARI, areia padrão e água, conforme pré-estabelecido na NBR 7215 (ABNT 2019) e apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Quantitativo de materiais - argamassa de cimento.
Parâmetros ABNT NBR 7215/2019

Material	Material para mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Fração grossa areia	468 ± 0,3
Fração média grossa areia	468 ± 0,3
Fração média fina areia	468 ± 0,3
Fração fina areia	468 ± 0,3

Fonte: NBR 7215 (ABNT, 2019).

A norma NBR 16697 (ABNT 2018) apresenta uma classificação mínima de resistência mecânica conforme Tabela 12, baseado ao tipo de cimento e a idade de verificação. No presente estudo o cimento é enquadrado como CPV ARI, cimento de alta resistência inicial o qual deve alcançar um limite inferior de resistência mecânica de 34 MPa aos 7 dias de análise, conforme os critérios de conformidade para classe de resistências mecânicas da referida norma.

Tabela 12 - Critérios de conformidade para classe de resistência.

Tipo de cimento	Classe de resistência	Resistência à compressão MPa		
		Limite inferior aos 7 dias	Limite inferior aos 28 dias	Limite superior aos 28 dias
CPI CPI-S	25	-	25	42
CP II-E CP II-F CP II-Z	32	-	32	49
CP III CP IV CPB Estrutural	40	-	40	-
CP V	ARI	34	-	-

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

Seguindo os parâmetros estabelecidos para avaliação e reprodução da argamassa, foi evidenciado que o cimento do presente estudo não alcançou os critérios de conformidade, pois teve sua resistência mecânica inferior aos 7 dias de análise, isso é apresentado na Figura 17.

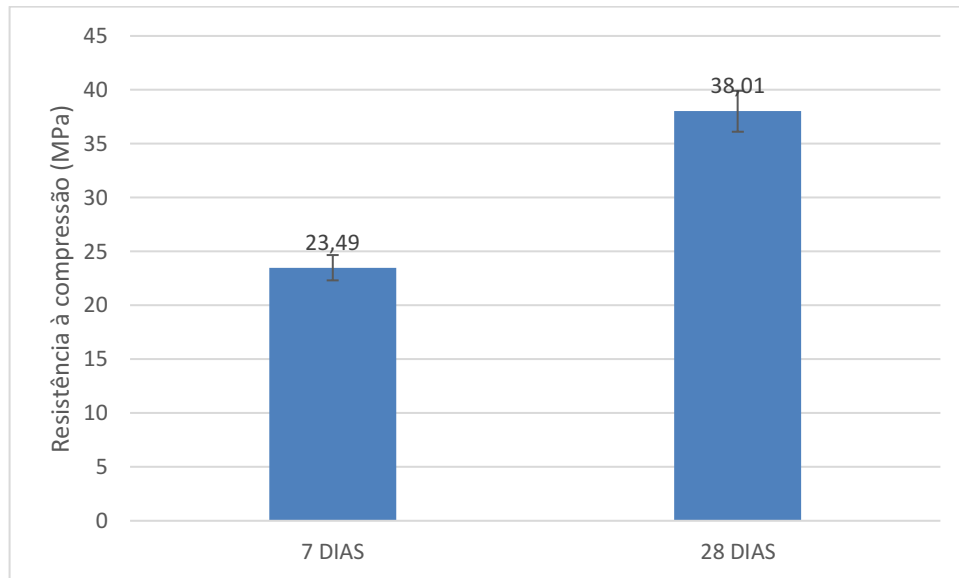


Figura 17 - Resistência à compressão em argamassa de cimento.
Fonte: Autoria própria (2023).

Como a análise dos resultados de 7 dias não atenderam os parâmetros mínimos para validação, foi ensaiado as amostras também aos 28 dias, a fim de evidenciar o ganho de resistência, a qual atingiu um valor superior a 34,0 Mpa, estabelecidos pela normativa como sendo critério mínimo.

Além disso, foi evidenciado que o cimento do estudo não teve o ganho de resistência inicial esperado, porém aos 28 dias ele compensou com o aumento de resistência apresentado ser superior ao mínimo estabelecido pela normativa. Desta maneira prosseguiu-se com o estudo e a utilização do cimento.

3.1.2 Agregados

Neste trabalho, para agregados miúdos foi utilizado apenas areia natural por possuir forma mais arredondada e textura mais lisa, aumentando a fluidez da mistura devido ao baixo atrito entre as partículas.

Em relação aos agregados graúdos se estabelece como diâmetro máximo de 19mm a fim de garantir a passagem do CAA por todos os obstáculos impostos garantindo a homogeneização e reduzindo a tendência de segregação. Os agregados empregados devem ser forma regular e evitando agregados lamelares. Para o presente estudo optou-se pela utilização de brita 0, com o intuito de diminuir o índice de vazios e melhorar o empacotamento entre as partículas, melhorando o esqueleto granular do CAA.

Os agregados foram caracterizados através da análise granulométrica e ensaio de massa específica. O ensaio de granulometria dos agregados graúdos e miúdos (areia natural e brita) realiza-se de acordo com a NBR 7211 (ABNT 2009), com este ensaio foi possível definir módulo de finura, dimensão máxima característica e gerar a curva granulométrica.

Já a determinação da densidade, para os agregados graúdos efetuou-se de acordo com ABNT NBR 16917 (2021) através da balança hidrostática, e para os agregados miúdos executa-se pelo ensaio do ABNT NBR 16916 (2021) por meio do picnômetro. Ainda para os agregados miúdos foi necessário realizar o ensaio do pulverulento conforme NBR 16973 (ABNT 2021).

As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 18, e a caracterização física dos agregados na Tabela 13.

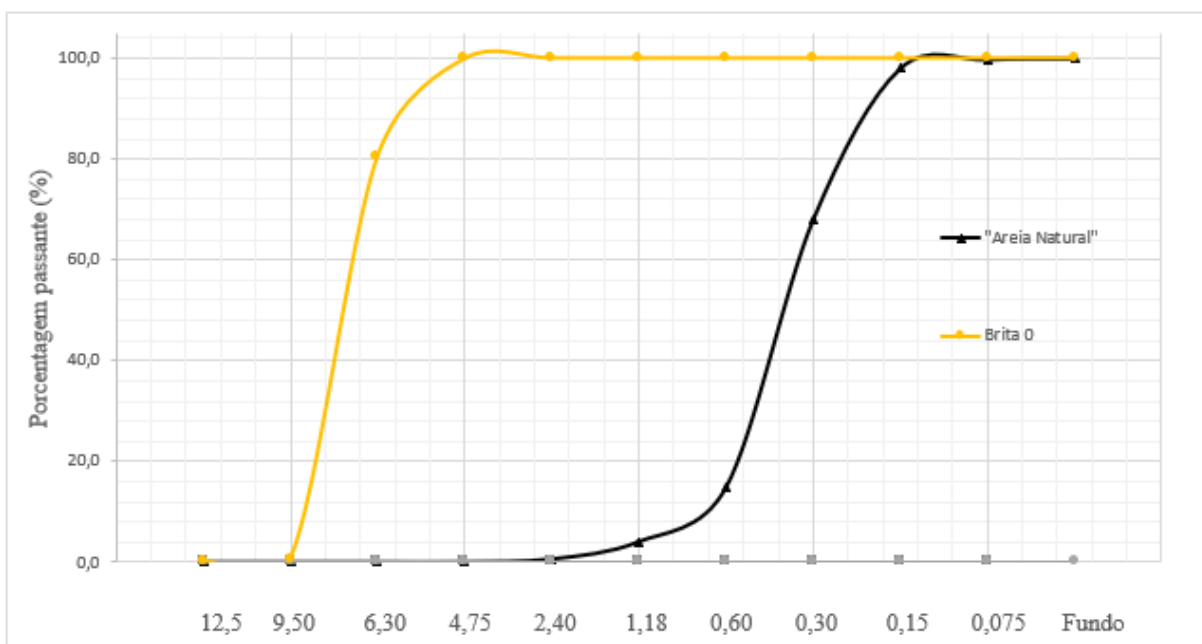


Figura 18 - Distribuição granulométrica dos agregados.
Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 13 - Caracterização física dos agregados.

Materiais	d (g/cm³)	Módulo de finura	Pulverulento (%)	D máx (mm)
Areia natural	2,62	1,85	1,42	2,4
Brita 0	2,88	5,8	0,41	12,5

Fonte: Aatoria própria (2023).

3.1.3 Aditivos

No presente estudo foi utilizado para composição do CAA o aditivo Tec Flow 7030 que é um superplastificante para concreto com alto poder de redução de água e com aplicações múltiplas e isento de cloretos.

O produto é um material líquido de cor alaranjada com massa específica entre 1,04 – 1,08 g/cm³. A dosagem recomendada está entre 0,6 à 2,0% em relação ao cimento, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Especificação do aditivo.

Categoria	Aditivo	Sigla	Dosagem recomendada	Massa específica g/cm³ ABNT NBR 10908
Superplastificante	Tec Flow 7030	SP	0,6 - 2,0 %	1,040 - 1,080

Fonte: Adaptado do fabricante (2022).

3.1.4 Adições - Fílers

Na busca pela redução da quantidade de cimento foi utilizado o fíler de origem basáltica em substituição ao cimento, esse é originado do processo de britagem em pedreiras, assim foram coletados para caracterização e não passaram por nenhum processo de beneficiamento (moagem ou peneiramento).

O fíler utilizado na composição do CAA, foi obtido do processo de britagem de um britador do estado do Rio Grande do Sul, cuja distribuição granulométrica é

apresentada na Figura 19. No Apêndice A apresenta a distribuição granulométrica e a porcentagem de material passante na peneira 0,075 mm do FB.

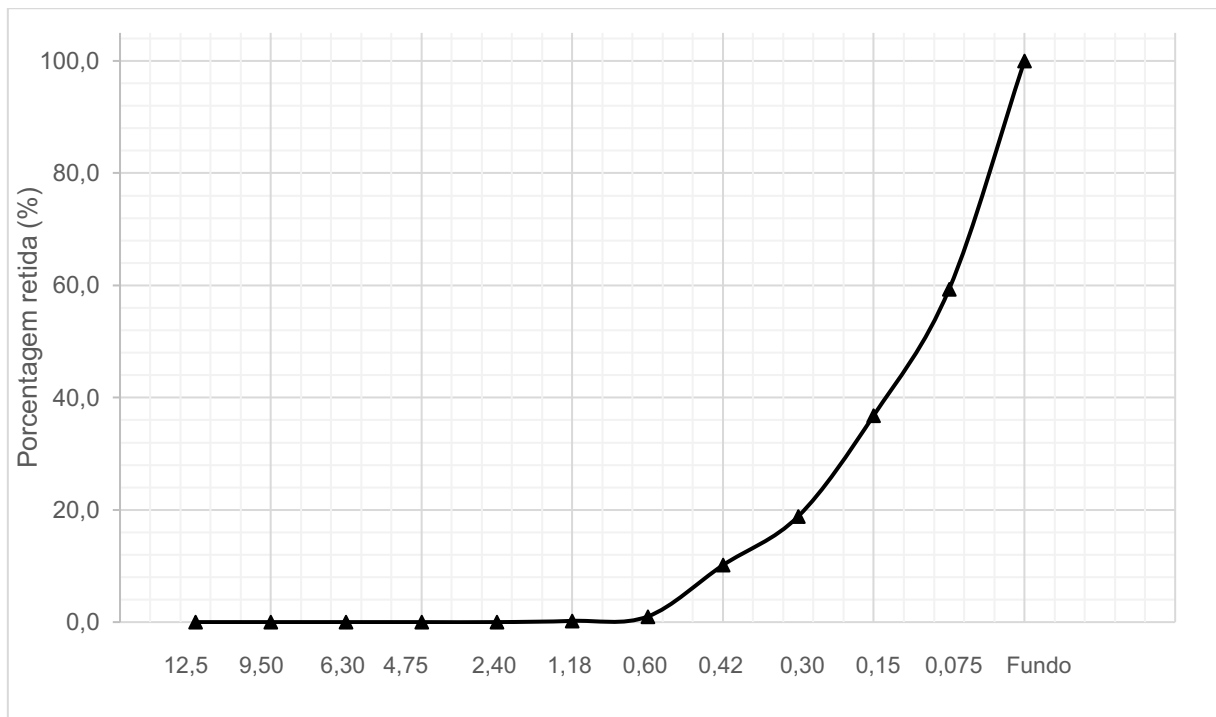


Figura 19 - Distribuição granulométrica filer basalto in natura.

Fonte: Autoria própria (2023).

Verifica-se que mais de 40% do material é passante na peneira 200 (0,075 mm) na composição in natura obtido diretamente do britador, essa característica é importante, pois grande parte do material encontra-se com distribuição granulométrica fina. Foi utilizado todo o material passante na peneira 200, para isso utilizará o método de peneiramento para obtenção do material. Importante ressaltar que se buscou-se material fino, pois esse tem a função de substituição ao cimento Portland, o qual tem por função compensar o volume de material fino empregado na produção do traço piloto.

Com o intuito de avaliar a distribuição granulométrica do material abaixo da peneira 0,075 mm, foi feita a análise de granulometria a laser conforme ISO 13320 (2009), que foi realizado na UTFPR/Campus Curitiba.

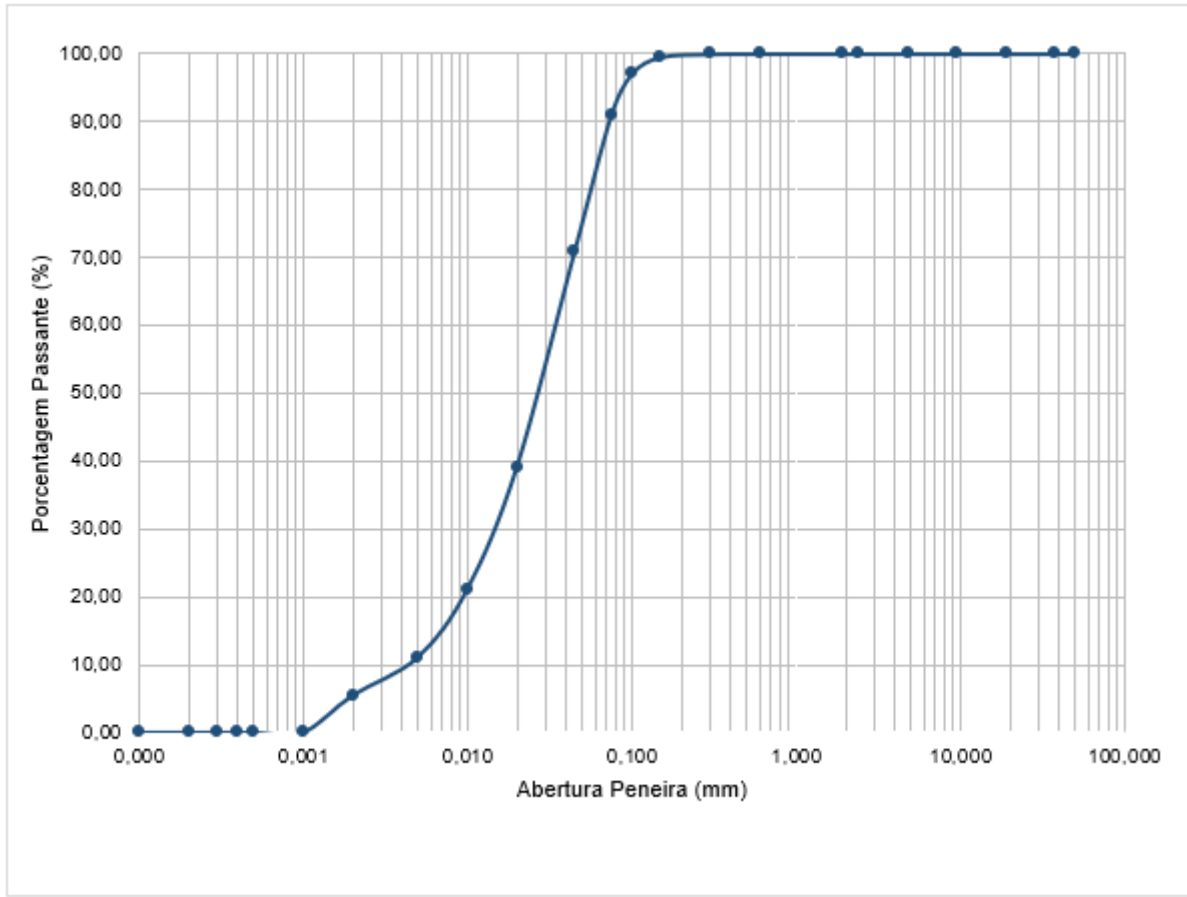


Figura 20 - Granulometria a laser do fíler de basalto passante na peneira 0,075mm.
 Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme análise granulométrica da Figura 20 em conjunto com a diâmetro médio das partículas, esse apresentado na Tabela 15, tem-se que o diâmetro médio denominado D50 do FB usado para substituição ao cimento foi de 26,71 μ m, além de que D10 e D90 são de 4,469 μ m e 72,87 μ m respectivamente.

Tabela 15 - Diâmetro médio das partículas D10, D50 e D90

Valores de tamanho de partícula para cada percentual acumulado				
D03 = 0.789 μ m	D06 = 2.356 μ m	D10 = 4.469μm	D16 = 7.394 μ m	D25 = 12.11 μ m
D50 = 26.71μm	D75 = 49.51 μ m	D84 = 61.72 μ m	D90 = 72.87μm	D97 = 99.82 μ m

Fonte: Autoria própria (2023).

Para obter os parâmetros quanto a forma do grão de FB foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura para determinação da forma da partícula. O ensaio foi realizado com o material que foi utilizado em substituição ao cimento nas

variações do traço. Na figura 21 é possível verificar a irregularidade das partículas de FB.

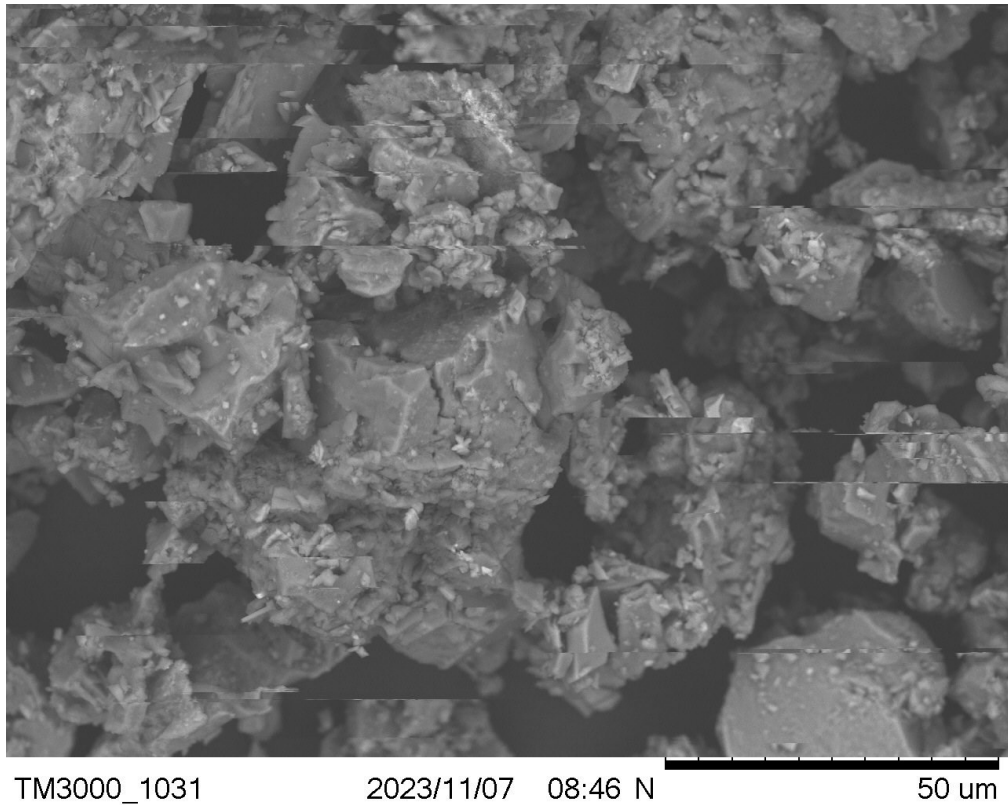


Figura 21: Imagem de microscopia eletrônica de varredura para determinação da forma das partículas de FB
Fonte: Autoria própria (2023).

Fica evidente a angularidade e a textura das partículas de FB, que apresentam uma aspereza grande em função de pequenas alterações na superfície em intervalos muito pequenos. A forma da partícula é muito diferente de partículas de cimento que costumam ser mais arredondadas e não ter aspereza alta. Com isso a capacidade de preenchimento pode ser reduzida.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Definição dos parâmetros para compor o CAA segundo método de Gomes (2002).

A dosagem do concreto seguiu o método de Gomes (2002), em conjunto ao que é apresentado por Gomes e Barros (2009). Segundo Gomes e Barros (2009) o modelo de dosagem sugere que a viscosidade e a fluidez da pasta governem o comportamento de fluxo do concreto.

O processo seguiu na separação das duas fases, sendo uma a pasta e outra o esqueleto granular, essas fases são obtidas separadamente buscando o melhor emprego e composição de materiais em cada uma das fases.

Na fase para obtenção da pasta, a qual deve-se manter coesa e fluida, evidenciando os teores corretos de finos e aditivos empregados na mistura. Nesta etapa são definidos a relação a/c , ponto de saturação do aditivo e teor de adição empregado.

Inicialmente foi escolhida uma relação a/c em função das propriedades desejadas no CAA, esta relação segundo Gomes e Barros (2009) deve ficar entre 0,35 e 0,40. Para o presente estudo optou-se por iniciar a composição da pasta com a/c 0,40 afim de garantir as propriedades de estado fresco e endurecido.

Para determinação do teor máximo de aditivo utilizou-se o cone de Marsh, o qual são pré-definidos os teores de cimento e água obedecendo o parâmetro de a/c 0,40 definido anteriormente. O método consistiu em introduzir um litro de pasta no cone e medir o tempo de escoamento necessário para que 500 ml de pasta flua pela abertura inferior do cone, esse tempo é um parâmetro inverso a fluidez da pasta. Desta maneira foram realizadas diversas pastas, cada uma com um teor diferente de aditivo, sendo acrescido aditivo a cada nova pasta, afim de definir o ponto de saturação, esse por sua vez é encontrado quando o incremento de aditivo superplastificante não proporciona nenhuma melhora no tempo de fluidez da pasta pelo método do cone de Marsh.

Para verificação da fluidez necessária para produção do CAA, é empregado o ensaio de mini-slump proposto por Kantro, que mede o diâmetro de espalhamento da

pasta em função do tempo. A pasta adequada deve apresentar diâmetro de extensão final de 180 ± 10 mm e um tempo T115 no intervalo de 2 s a 3,5 s. Na Figura 22 é possível avaliar a execução dos ensaios e a pasta produzida.



Figura 22 - Ensaio de Cone Marsh e Mini Slump.
Fonte: Autoria própria (2023).

Com a análise dos resultados em conjunto chegou-se a um teor de aditivo de 0,6 em relação ao cimento empregado na pasta.

A segunda fase foi relacionada ao emprego do esqueleto granular, buscando uma melhor interação entre as partículas diminuindo os vazios. A melhor composição leva em consideração a densidade da mistura, fundamentando que o menor teor de vazios leva ao menor consumo de pasta.

Basicamente foram misturados os agregados graúdos e miúdos manualmente sem nenhum tipo de compactação em proporções variáveis, a fim de obter o menor índice de vazios conforme Figura 23.



Figura 23 - Composição do esqueleto granular.
Fonte: Autoria própria (2023).

As proporções de mistura entre agregado miúdo e graúdo e o teor de vazios de cada mistura é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Definição do esqueleto granular.

ÍNDICE DE VAZIOS								
Agregado graúdo (%)	Agregado miúdo (%)	Peso (g)	Volume	Massa unit. g/cm ³	densidad e agregado miúdo (d) (g/cm ³)	densidad e agregado graúdo (d) (g/cm ³)	Pdm (g/cm ³)	teor de vazios (%)
100,00	0,00	1538,50	989,06	1,56	2,62	2,88	2,88	45,99
90,00	10,00	1646,90	989,06	1,67	2,62	2,88	2,85	41,66
80,00	20,00	1786,10	989,06	1,81	2,62	2,88	2,83	36,14
70,00	30,00	1816,60	989,06	1,84	2,62	2,88	2,80	34,45
60,00	40,00	1893,40	989,06	1,91	2,62	2,88	2,78	31,04
50,00	50,00	1954,60	989,06	1,98	2,62	2,88	2,75	28,14
40,00	60,00	1883,50	989,06	1,90	2,62	2,88	2,72	30,09
30,00	70,00	1809,90	989,06	1,83	2,62	2,88	2,70	32,17
20,00	80,00	1717,90	989,06	1,74	2,62	2,88	2,67	35,00
10,00	90,00	1610,10	989,06	1,63	2,62	2,88	2,65	38,48
0,00	100,00	1547,70	989,06	1,56	2,62	2,88	2,62	40,27

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme destacado na Tabela 16, a melhor proporção da composição do esqueleto granular é 50% de agregado miúdo com 50% agregado graúdo, determinados pelo índice de vazios de 28,14 %.

Com os parâmetros de pasta e esqueleto granular definidos, definiu-se a utilização de M elevado, a fim de proporcionar controle de segregação e redução no consumo de cimento. A seguir é apresentado o traço definido como padrão, uma vez que inicialmente foi definido teor de aditivo de 0,6% em relação ao consumo de cimento, porém ele não atendeu parâmetros de trabalhabilidade no estado fresco, o qual foi definido aumentar o teor de aditivo para 1% em relação ao peso do cimento, definindo o traço unitário de 1: 2: 2 : 0,4 : 0,01(cimento : agregado miúdo : agregado graúdo : água: aditivo superplastificante) como piloto, conforme Tabela 17.

Tabela 17 - Traço unitário (padrão).

CIMENTO	AGREGADO GRAÚDO	AGREGADO MIÚDO	ÁGUA	ADITIVO SUPERPL.
1	2	2	0,4	0,01

Fonte: Autoria própria (2023).

3.2.2 Definição dos traços de CAA com uso de FB

Com o traço piloto ajustado pelo método de Gomes, sendo a referência com o emprego total de finos por parte do cimento, sem a utilização de qualquer adição, foram efetuadas as substituições de FB em relação ao cimento de 5% 10%, 15%, 20%, 25% e 30% conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Quantidade de material empregado nos traços kg/m³

TRAÇOS kg/m ³						
Traço	Cimento	Fíler basalto	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	Teor de aditivo
PADRÃO	446,20	0,00	892,40	892,40	182,55	4,46
5%	423,89	22,31	892,40	892,40	182,55	4,46
10%	401,58	44,62	892,40	892,40	182,55	4,46
15%	379,27	66,93	892,40	892,40	182,55	4,46
20%	356,96	89,24	892,40	892,40	182,55	4,46
25%	334,65	111,55	892,40	892,40	182,55	4,46
30%	312,34	133,86	892,40	892,40	182,55	5,35

Fonte: Autoria própria (2023).

O emprego de 6 proporções diferentes buscou elencar o teor ótimo de substituição evidenciado os melhores resultados de estado fresco, endurecido e diminuição do custo relacionado ao menor consumo de cimento Portland.

3.2.3 Propriedades do estado fresco

No estado fresco, foram realizados os ensaios de espalhamento e T500 pelo método de cone de Abrams, e pelo método do Anel *j-ring* (J), além de funil V, e caixa L de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2017).

Os ensaios citados buscaram evidenciar e mensurar as propriedades do estado fresco do CAA, analisando se as substituições propostas mantiveram fluidez adequada, habilidade passante e resistência à segregação, fatores primordiais para o bom funcionamento do CAA.

Por meio dos ensaios é evidente mensurar a análise visual dos parâmetros mínimos de autoadensabilidade de acordo com os parâmetros estabelecidos das classes de índice visual conforme Tabela 2.

3.2.4 Propriedades do estado endurecido

Após a produção dos concretos e análise no estado fresco foi necessário moldá-lo em formas metálicas 10x20 cm, e depois deixá-los em cura úmida até a idade para ensaios no estado endurecido, tais procedimentos são normatizados pela NBR 5738 (ABNT, 2016).

Os corpos de prova foram acondicionados nas primeiras 24 horas em superfície horizontal rígida, livre de vibrações e ações que pudessem perturbar o concreto, as amostras foram cobertas com material não reativo para evitar a perda de água para o ambiente. Após as 24 horas iniciais as amostras foram desmoldadas, identificadas e permaneceram em câmara úmida à temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ e uma umidade relativa do ar superior a 95 %, conforme procedimentos prescritos na NBR 5738 (ABNT, 2016).

Passado o período de cura, foi realizado ensaios no estado endurecido, sendo os ensaios de compressão e tração por compressão diametral, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7222 (ABNT, 2011), respectivamente. Para o ensaio de absorção a NBR 9778 (ABNT, 2005) e para o ensaio do módulo de elasticidade foi seguido conforme a norma NBR 8522 (ABNT, 2021), além de realizar a análise da microestrutura eletrônica de varredura (MEV) aos 28 dias de idade a fim de avaliar a zona interfacial dos concretos. A Tabela 19 a seguir exemplifica os ensaios realizados e o quantitativo de amostras para determinação dos parâmetros.

Tabela 19 - Quantitativo de ensaios para determinação dos parâmetros.

Ensaio	Idade de análise			
	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
Ensaio de resistência à compressão axial	2 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras
Ensaio de tração por compressão diametral	X	2 amostras	2 amostras	2 amostras
Ensaio de absorção	X	3 amostras	3 amostras	3 amostras
Ensaio de determinação do Módulo de Elasticidade	X	X	5 amostras	X
Ensaio de MEV	X	X	1 amostra	X

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme evidenciado na Tabela 19, para a determinação dos parâmetros de resistência à compressão axial na idade principal de 28 dias foram alocadas 5 amostras para avaliação em conjunto da resistência à compressão e módulo de elasticidade. Para as demais idades secundárias foram alocadas duas amostras, e determinado o potencial de resistência à compressão seguindo os parâmetros prescritivos na ABNT NBR 12655/2022 onde apresenta que para cada idade de análise a amostragem deve ser constituída de dois corpos de prova, tornando como resistência final o exemplar de maior resultado entre as duas amostras.

Desta maneira, seguiu-se para o ensaio de tração por compressão diametral, sendo alocada 2 amostras por idade de avaliação. Para o ensaio de absorção foram alocadas 3 amostras para determinação do parâmetro. As amostras foram obtidas seguindo os mesmos parâmetros de moldagem e cura já estabelecidos para as amostras de resistência à compressão.

Para o ensaio de MEV, foi aproveitado a mesma amostra do ensaio de compressão axial, onde retirou-se parte do material já ensaiado e fragmentando, para realização da análise microestrutural.

Importante mencionar, que tais metodologias de ensaios e quantidade de amostras foram realizadas em virtude de o quantitativo de insumos para ensaio serem reduzidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nos concretos, sendo divididos em estado fresco e estado endurecido realizados para uma melhor análise das propriedades de cada mistura.

4.1 ESTUDO EM CONCRETO FRESCO

Nesta etapa serão apresentados os resultados de Slump Flow, T500, índice de estabilidade visual, anel J, funil V e caixa L.

4.1.1 Ensaio de espalhamento e T500.

Na Figura 24 são apresentados os resultados do diâmetro espalhamento de cada traço pelo ensaio de Slump Flow Test.

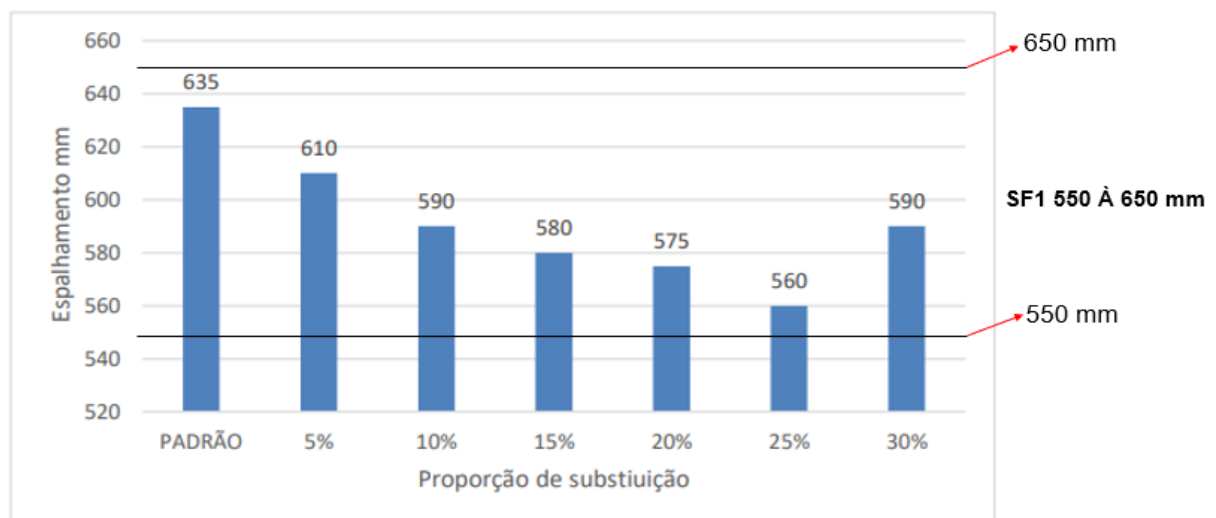


Figura 24 - Resultados de espalhamento Slump Flow Test do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme evidenciado na Figura 2, o traço referência e os demais traços se enquadram na classificação SF1 com diâmetro de espalhamento de 550 a 650 mm,

esses têm por finalidade aplicação em estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizado do ponto mais alto, com deslocamento livre, como por exemplo lajes, estacas e fundações profundas conforme NBR 15823 (ABNT, 2017).

Foi evidenciado que conforme o aumento de substituição do cimento por FB, se tem uma redução no diâmetro de espalhamento no ensaio de Slump Flow, isso está relacionado a irregularidade do grão e a granulometria de FB em relação ao cimento.

Durante a execução do ensaio de espalhamento foi realizado o ensaio de T500, que consiste em medir o tempo de o concreto fluir até atingir 500 mm, a fim de avaliar a viscosidade plástica aparente. Na Figura 25 são apresentados os resultados de ensaio de T500, o qual pode ser classificado conforme Tabela 3.

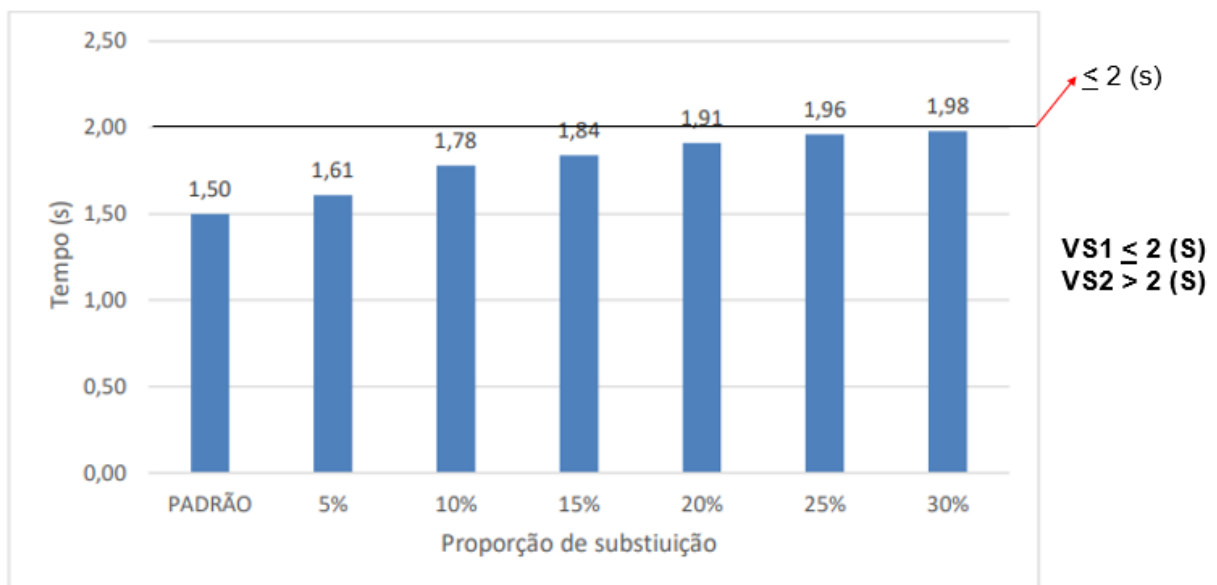


Figura 25 – Resultados do Ensaio T500 do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

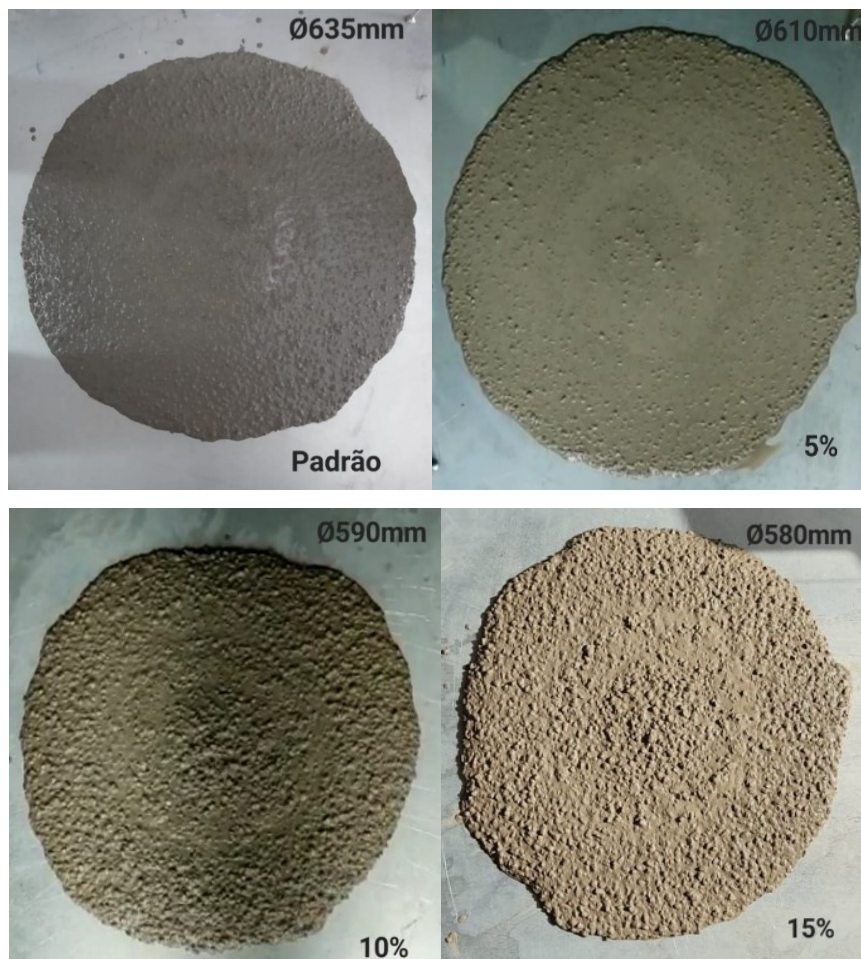
Conforme apresentado na Figura 24, todos os concretos se enquadraram como sendo VS1, ou seja, pode ser aplicado em elementos estruturas com alta densidade de armadura e embutidos, como paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.

Também é evidenciado que conforme se aumenta o teor de substituição se tem um aumento no tempo de escoamento do CAA no ensaio de T500, isso é relacionado

a irregularidade das partículas de FB que criam uma dificuldade de escoamento no ensaio, evidenciando uma maior viscosidade plástica do concreto.

4.1.2 Índice de estabilidade visual.

No ensaio de espalhamento é possível determinar o índice de estabilidade visual no CAA, conforme Figura 26.



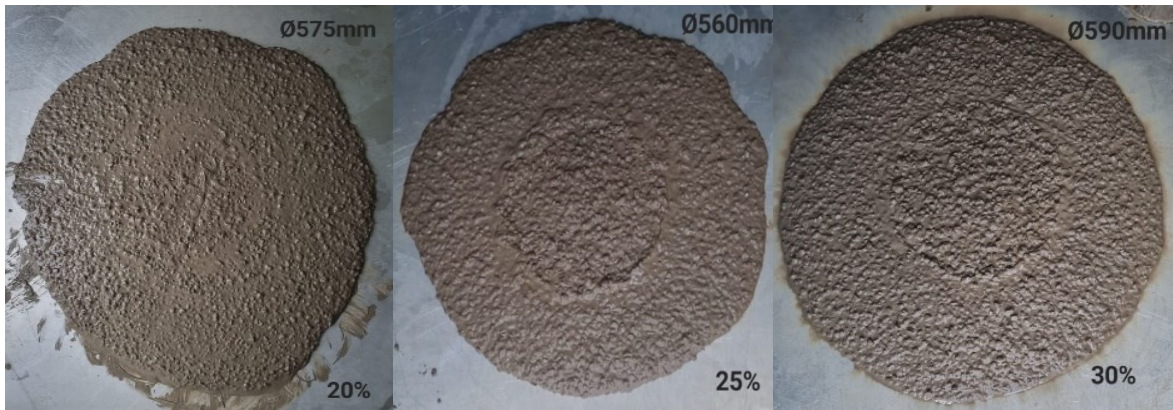


Figura 26 - Análise visual do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

É possível avaliar que nenhum concreto apresentou segregação e exsudação sendo classificados como IEV0 sem evidência de segregação ou exsudação, com exceção do traço 5%, que apresentou uma leve exsudação, porém sem evidência de segregação, sendo classificado como IEV1, conforme NBR 15823-1.

A substituição de FB por cimento não apresentou perdas quando a estabilidade visual do concreto, apresentando-se altamente estáveis de acordo com as variações de substituição.

4.1.3 Anel J

O ensaio de anel J tem por finalidade medir a habilidade passante do concreto CAA, na Figura 27 é apresentado o comportamento do concreto mediante a simulação da presença de armaduras na execução do ensaio.

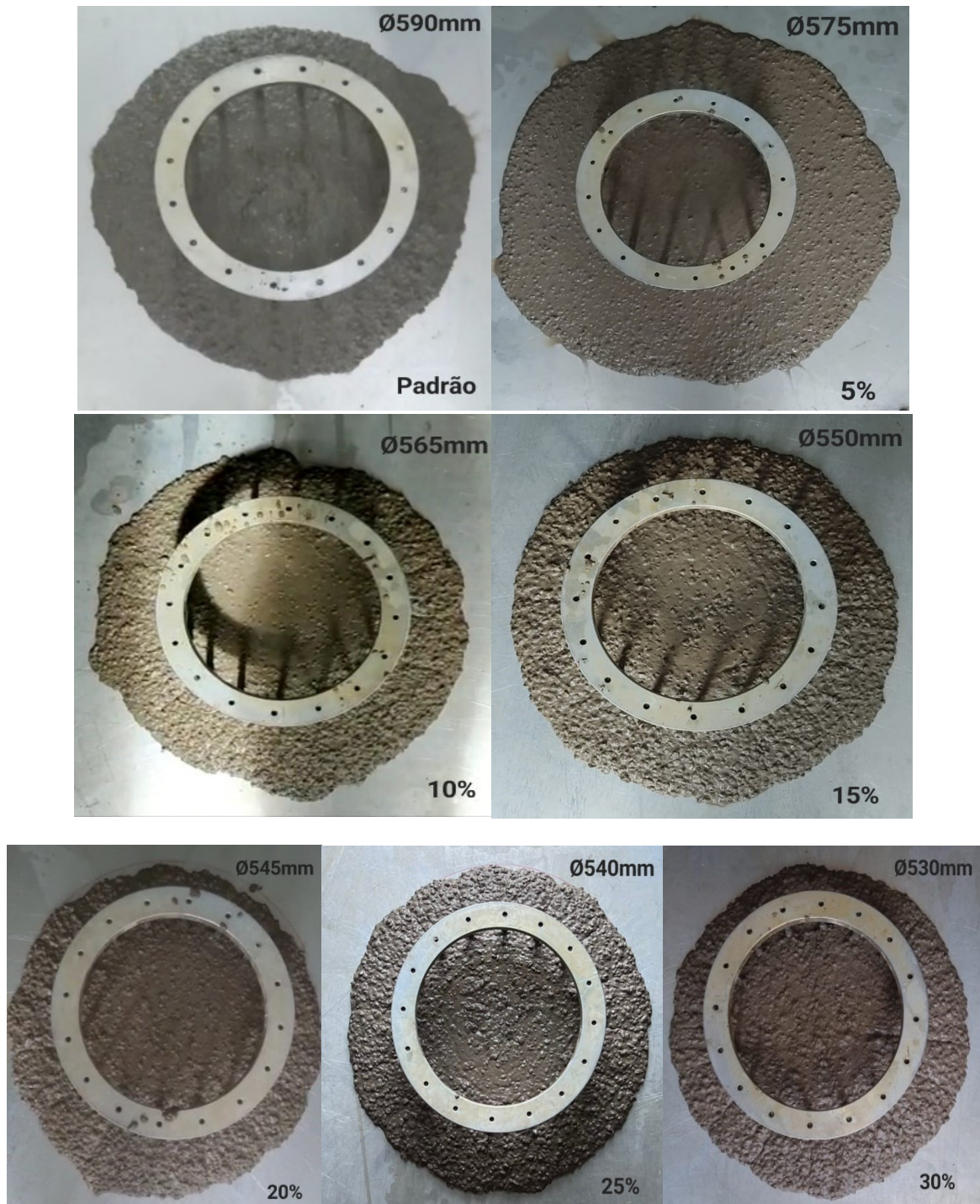


Figura 27 - Ensaio de Anel J do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.
Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 28 apresenta o resultado do teste do anel J.

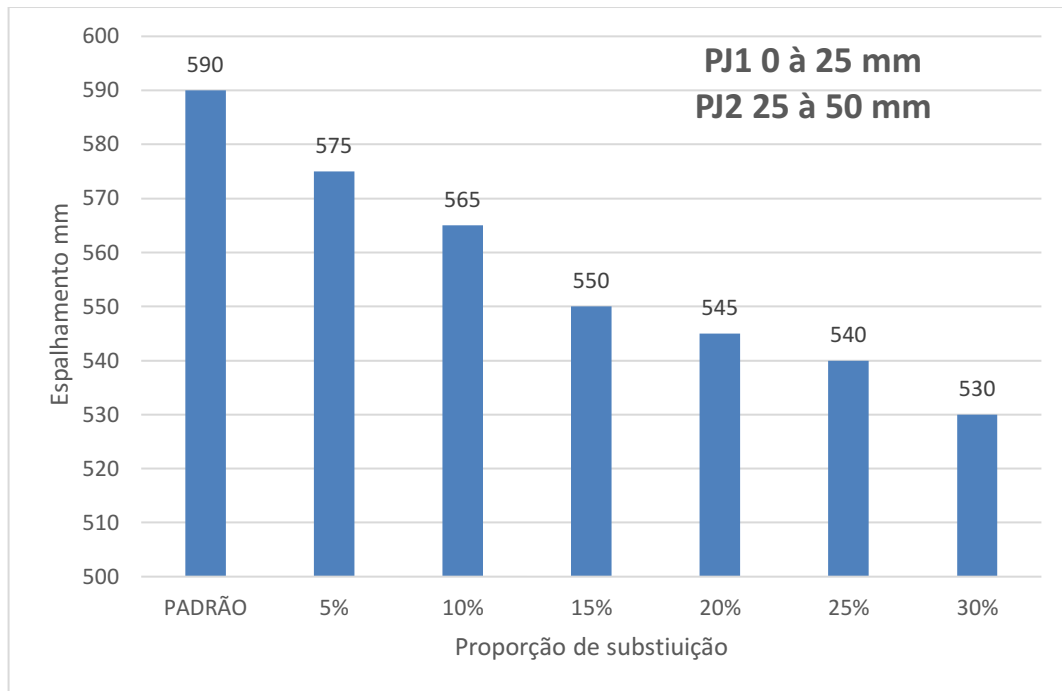


Figura 28 - Ensaio de anel J do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

Neste teste, verifica-se a diferença nos valores do Slump Flow com fluxo livre e com o anel J, que simula da presença de armaduras, sendo 50 mm o limite máximo da diferença entre as leituras. Então, avaliando estes valores em relação ao fluxo livre apresentado na Figura 23, pode-se verificar que todas as misturas atendem ao limite da norma NBR 15823 com exceção do traço 30%. Neste caso, o traço 30% não obteve parâmetros de estado fresco sendo aumentado o teor aditivo superplastificante para 1,2% obtendo um espalhamento de 590 mm de flow, enquanto no anel J apresentou 530 mm, diferença essa maior que os 50 mm, sendo assim mesmo com o aumento do teor de aditivo não obteve os parâmetros de estado fresco.

O ensaio apresentou a capacidade de fluxo do concreto entre a simulação da armação, conforme se aumentou o teor de substituição de FB em relação ao cimento foi evidenciado que substituições maiores que 25% diminuem a capacidade de fluxo entre meio a armação, não apresentando parâmetros de estado fresco. A utilização de 30% de FB em relação ao cimento causou dificuldade de fluidez quando submetido a presença de armações.

4.1.4 Funil V

O ensaio de funil V tem por finalidade avaliar a viscosidade do CAA medindo o tempo de fluxo para que o concreto flua. Na Figura 29 é apresentado os tempos no ensaio de funil V.

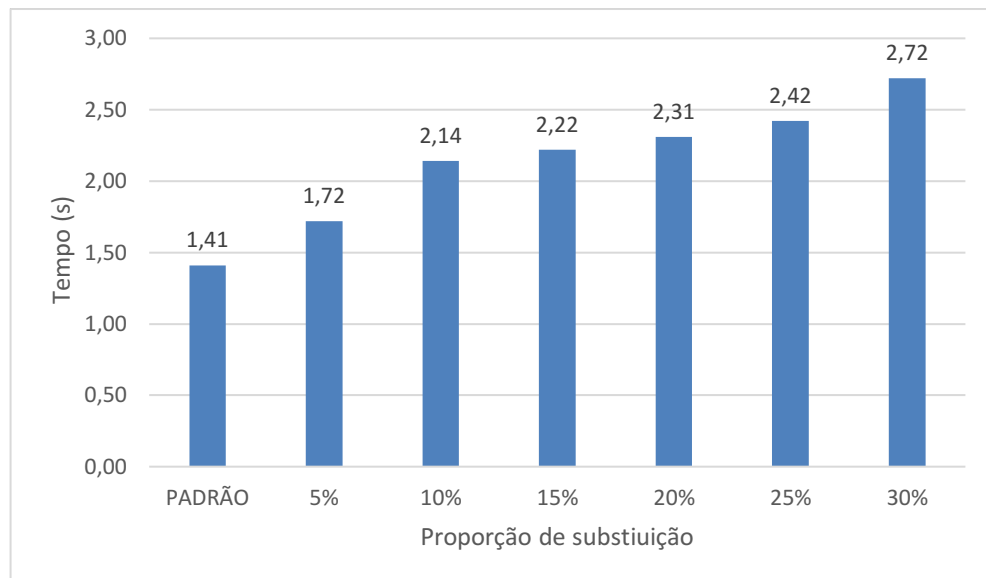


Figura 29 - Ensaio de funil V do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

Todos os traços se enquadraram como VF1, pois demoraram menos de 8s para fluir. De acordo com a NBR 15823 tais parâmetros são adequados para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação. Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.

No ensaio foi evidenciado um aumento da viscosidade conforme se teve o aumento de substituição de FB por cimento, relacionado a diferença de granulometria e forma do grão do fíler de basalto.

4.1.5 Caixa L

No ensaio de caixa L, simula a passagem do CAA entre as armaduras medindo a habilidade passante e capacidade de preenchimento. Na Figura 30 é apresentado os resultados do ensaio de caixa L, onde todos os traços apresentaram desempenho dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR 15823 e classificaram-se como PL2.

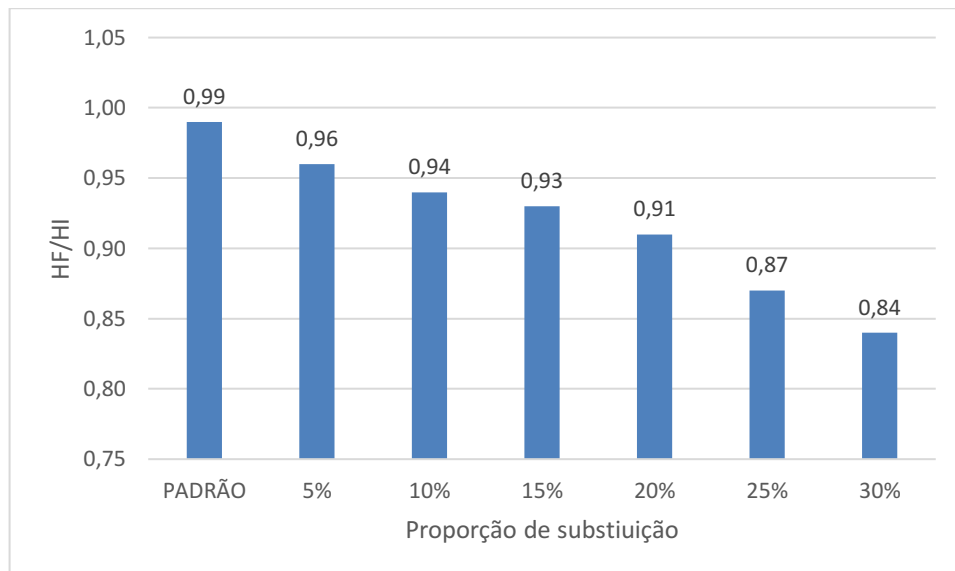


Figura 30 - Ensaio de Caixa L do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

No ensaio foi evidenciado a habilidade passante e a capacidade de preenchimento, essas propriedades foram prejudicadas conforme se aumentou o teor de substituição, uma vez que a relação HF/Hi diminuiu conforme se realizou as substituições. A habilidade passante é reduzida conforme se acrescenta o FB no concreto, desta maneira a capacidade do CAA de preencher os espaços também é menor.

4.1.6 Classificação estado fresco

Realizado os ensaios de estado fresco e avaliação de acordo com as ABNT NBR 15823 foi possível realizar a classificação dos traços conforme apresentação da Tabela 20.

Tabela 20 - Classificação do CAA CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de acordo com a NBR 15823.

Traços	Slump Flow (Espalhamento)	T500	IEV	ANEL J	FUNIL V	CAIXA L
Padrão	SF1	VS1	IEV0	PJ2	VF1	PL2
5%	SF1	VS1	IEV1	PJ2	VF1	PL2
10%	SF1	VS1	IEV0	PJ1	VF1	PL2
15%	SF1	VS1	IEV0	PJ2	VF1	PL2
20%	SF1	VS1	IEV0	PJ2	VF1	PL2
25%	SF1	VS1	IEV0	PJ1	VF1	PL2
30%	SF1	VS1	IEV0	-	VF1	PL2

Fonte: Autoral (2023).

Todos os concretos atenderam à NBR 15823 no estado fresco, com exceção do traço 30% que não passou no ensaio de anel J, que reflete a baixa habilidade passante na presença de armaduras.

Em contexto geral, a substituição de FB no CAA, apresentou resultados semelhantes aos autores Schankoski et al. (2017), (2019) e (2020), que não evidenciaram perdas no estado fresco das substituições. No presente estudo as substituições mostram que até certo percentual não temos perda das características do estado fresco, somente após mais de 25% de substituição perdemos algumas características de habilidade passante.

4.2 ESTUDO EM CONCRETO ENDURECIDO

Serão apresentados os resultados do estado endurecido: resistência à compressão e à tração, absorção, módulo de elasticidade do concreto conforme apêndice B e microscopia eletrônica de varredura a fim de avaliar a zona de transição.

4.2.1 Resistência à compressão

Foram realizados ensaios de resistência à compressão no traço padrão e nas proporções proposta da substituição do cimento por FB. Os ensaios foram realizados nas idades e 3, 7, 28 e 90 dias. A Figura 31 apresenta os resultados de resistência mecânica à compressão para cada idade estudada para o traço padrão e suas seis variáveis de substituição.

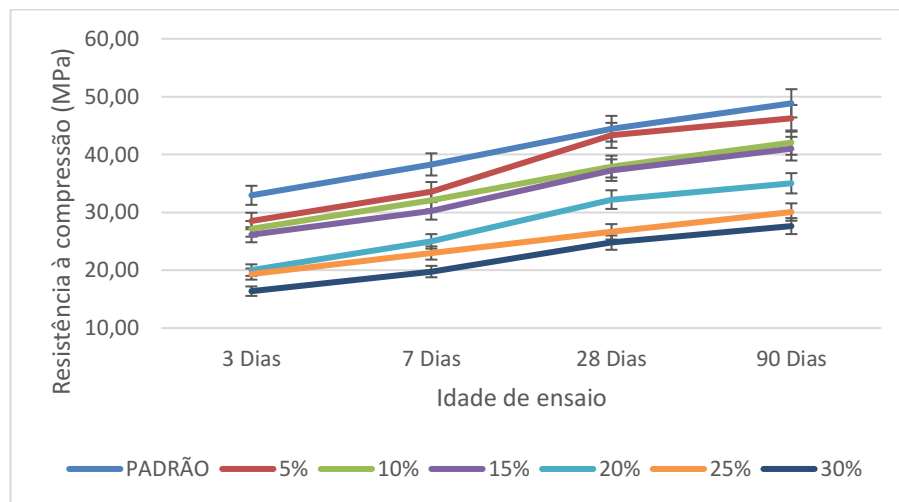


Figura 31 - Resistência à compressão do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.
Fonte: Autoria própria (2023).

Através da análise dos resultados, pode-se observar que o traço referência obteve o melhor desempenho em relação a resistência mecânica, e que conforme o aumento da substituição proposta houve uma queda de resistência a compressão, associada pela redução do consumo de cimento empregado na mistura.

Os autores Schankoski et al. (2017), (2019) e (2020), Dobiszewska et al. (2018), Matos et al. (2020), Abdalqader et al. (2022), apresentaram resistências à compressão semelhantes não evidenciando perdas, com tudo no presente estudo foi evidenciado perda de resistência à compressão em virtude da diminuição do consumo de cimento.

É importante ressaltar que conforme o aumento de substituição de FB em relação ao cimento, temos um menor emprego de cimento para formulação do traço e consequentemente uma redução na emissão de CO₂ associado a produção do

cimento, uma vez que se a indústria consome menos cimento, a produção para suprir a demanda será menor.

Na Figura 32 é possível analisar o consumo de cimento (kg) para obtenção de 1 MPa em resistência mecânica.

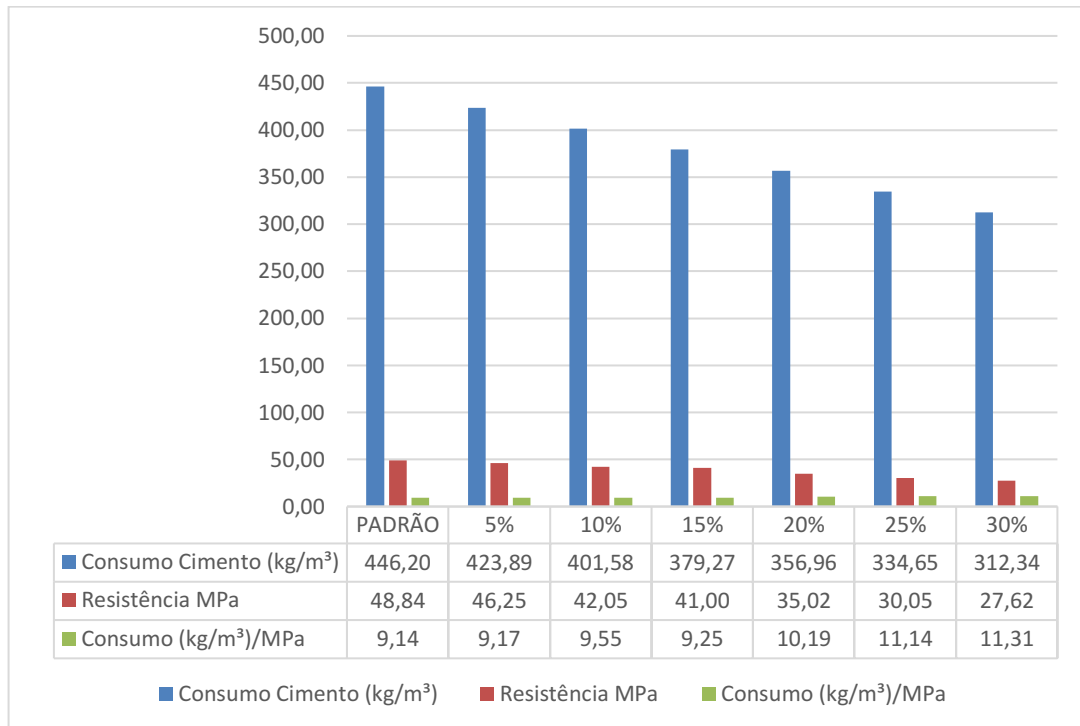


Figura 32 - Consumo de cimento para obtenção de 1 MPa em relação a resistência obtida do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

Pode-se analisar que temos uma redução do consumo de cimento por metro cúbico do traço padrão para os demais, nos traços 5% 10%, 15%, 20%, 25% e 30% a variação de consumo de cimento para obtenção de 1 MPa é de 0,3%, 4,4%, 1,2%, 11,14%, 21,88% e 23,74% essas diferenças são menores que a proporção de cimento reduzida, elencando que o FB apresenta benefícios quanto a resistência final do CAA, evidenciando um teor ótimo de substituição de até 15%, porém é possível prosseguir com a substituição até 25% com resultados satisfatórios de estado fresco e endurecido.

O traço com substituição de 15% de FB em relação ao cimento apresenta uma redução de 446,20 kg/m³ de cimento para 379,27 kg/m³, obtendo 48,84 MPa e 41,00 MPa respectivamente. A relação entre consumo de cimento para obtenção de 1 MPa é de 9,14 para o traço referência e 9,25 para o traço com 15% de substituição, assim o percentual de perda de eficiência entre os traços é de 1,2%, sendo o teor ótimo de

substituição de FB por cimento, em relação aos fatores de estado endurecido e estado fresco.

Os traços 5% 10% 15% 20% e 25% apresentaram resistência mecânica superior aos 30 MPa aos 90 dias sendo classificados pela NBR 8953 (2015) como concreto C30, podendo ser utilizado em diversas aplicações da construção civil

4.2.2 Resistência à tração

O Ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos foram realizados nas idades de 7, 28 e 90 dias para obtenção de evidências quanta a característica ensaiada. Na Figura 33 é apresentado os resultados de resistência à tração.

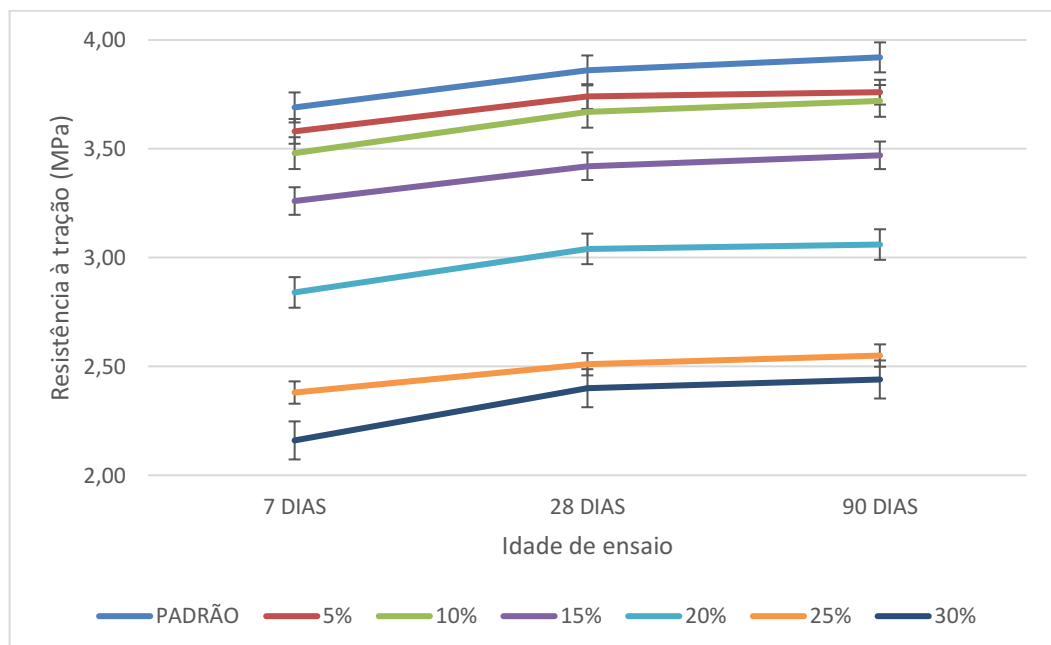


Figura 33 - Resistência à tração por compressão diametral do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme resultado do ensaio de tração por compressão diametral é evidenciado que conforme se aumenta os teores de substituição do cimento por FB se tem uma diminuição da resistência à tração chegando a 39% no traço de

substituição de 30%, portanto é notório que conforme se aumenta o teor de FB a resistência à tração tende a diminuir.

Posterior ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, com as amostras residuais do ensaio foi possível por análise visual avaliar a distribuição granulométrica dos agregados em cada traço e avaliando a possibilidade de segregação e distribuição homogênea dos agregados graúdos, conforme Figura 34 a distribuição dos agregados foi uniforme evidenciando a ausência de segregação em todos os traços, condizendo com os ensaios de estado fresco.

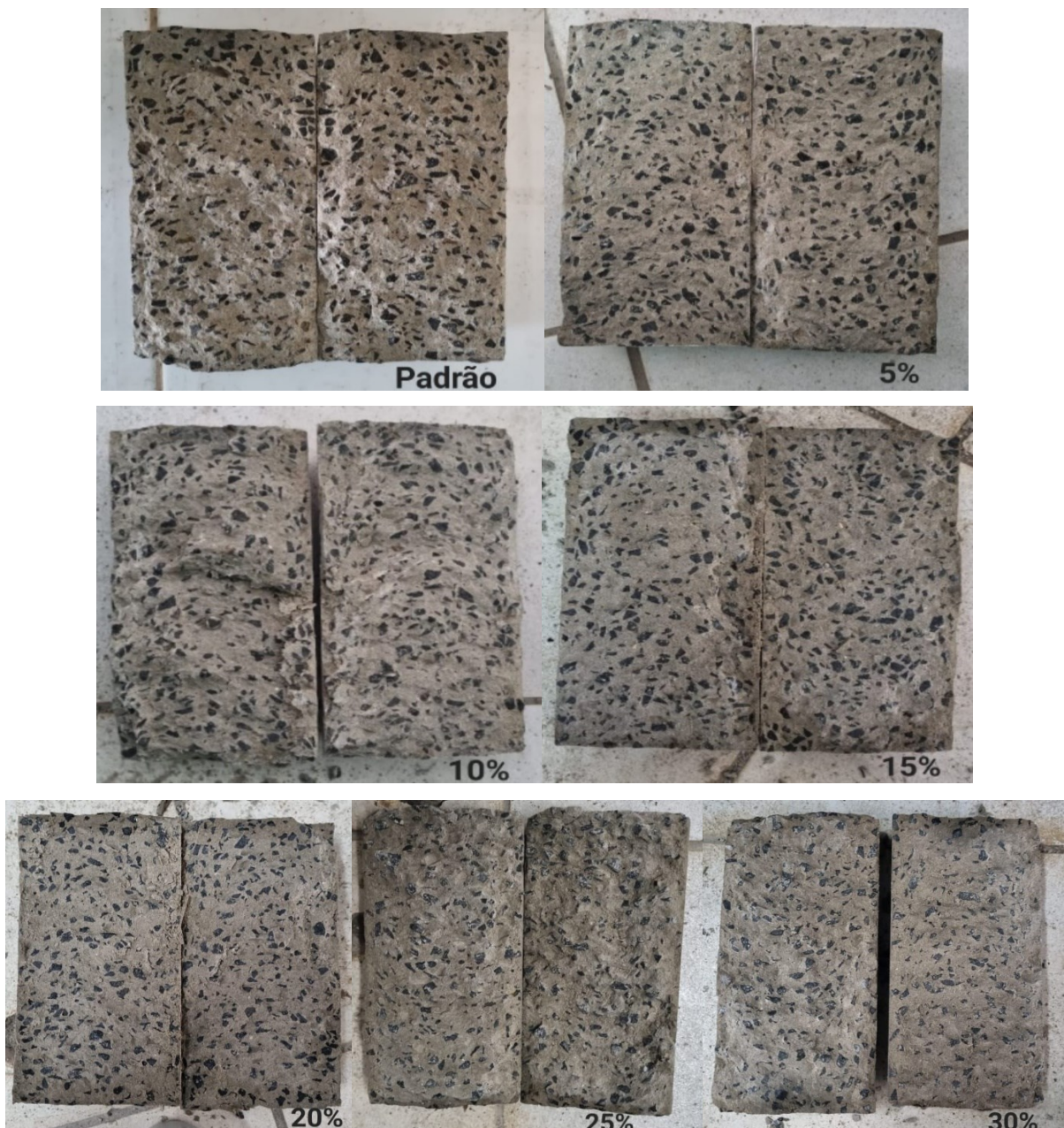


Figura 34 – Distribuição granulométrica do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

4.2.3 Absorção

O ensaio de absorção foi realizado nas idades de 7, 28 e 90 dias a fim de identificar o índice de vazios presente em cada traço, uma vez que a substituição do cimento por FB pode elevar a quantidade do índice de vazios. Na Figura 35 é possível avaliar a porcentagem de índice de vazios em cada traço.

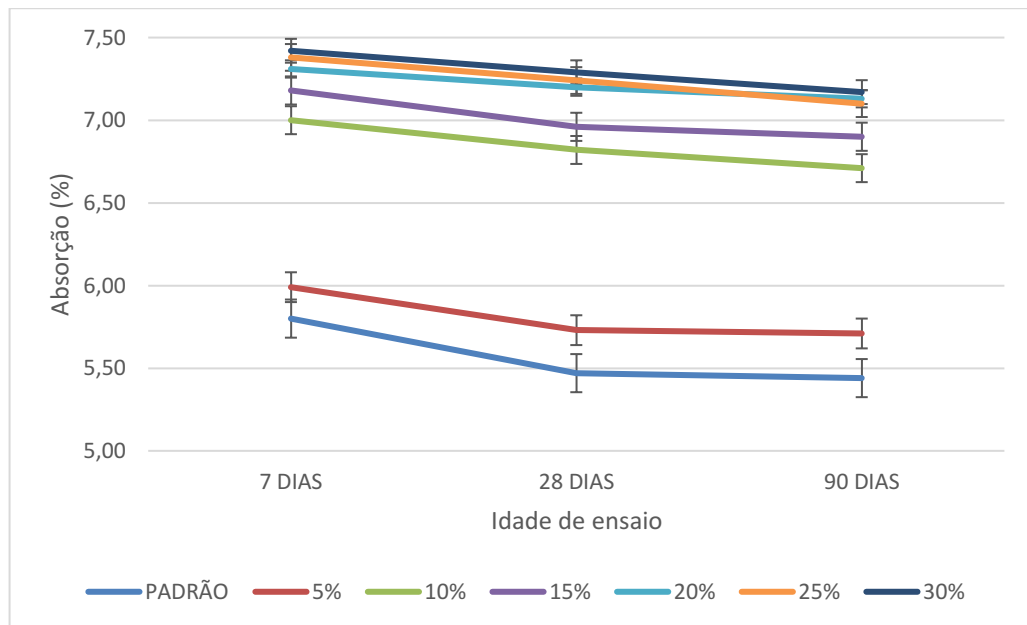


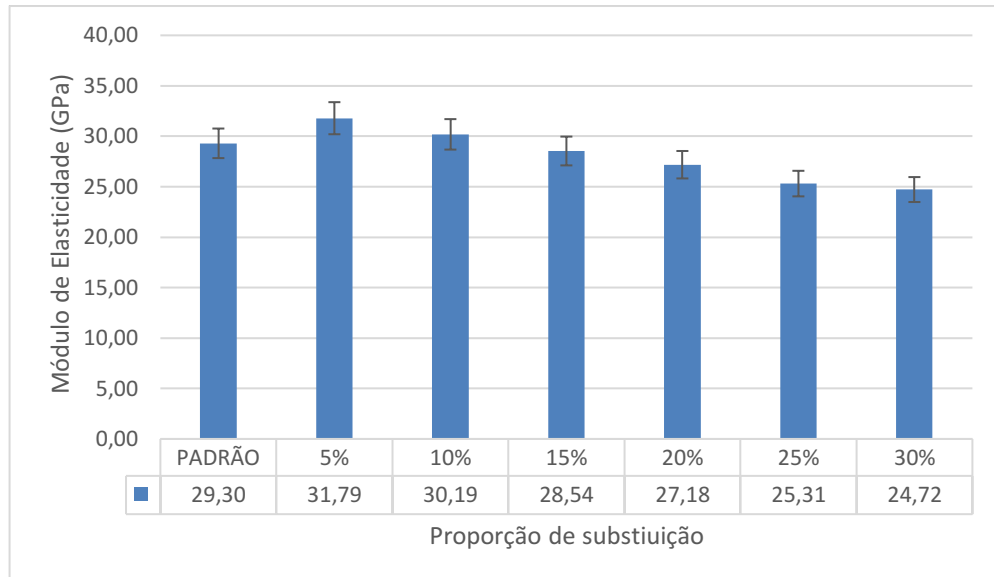
Figura 35 - Ensaio de absorção do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme evidenciado na Figura 35 quanto maior o teor de substituição de FB por cimento maior será o índice de vazios, o aumento da porosidade ocorre juntamente com a diminuição da resistência a compressão já evidenciado. Assim, quanto maior a porcentagem de substituição maior será o índice de vazios do traço, em função da forma do grão de FB ser irregular conforme imagem de MEV, em comparação a forma do grão do cimento, assim o preenchimento é reduzido, aumentando o índice de vazios.

4.2.4 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi avaliado na idade de 28 dias de hidratação para o traço padrão e as demais variações. Na Figura 36 é apresentado os resultados do ensaio.



**Figura 36 - Ensaio de Módulo de Elasticidade do CAA com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.
Fonte: Autoria própria (2023).**

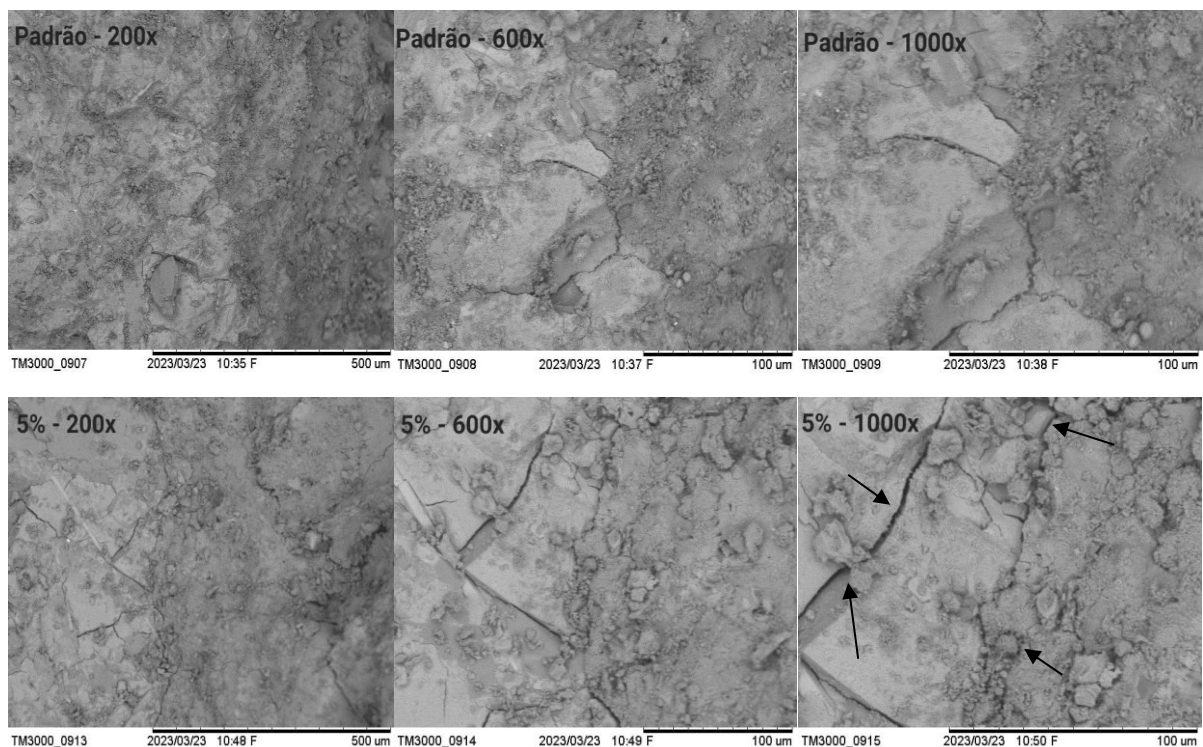
Pode-se analisar os resultados da Figura 36 que o módulo de elasticidade dos traços 5% e 10% são maiores em relação ao traço padrão, evidenciado que até 10% em substituição de FB por cimento temos resultados de módulo superiores em virtude da substituição de FB por cimento, e conseqüentemente o aumento da proporção de agregados no traço, uma vez que FB é gerado pelo processo de britagem do basalto utilizado como agregado graúdo. Nos traços com a proporção de substituição de 15% 20% 25% e 30% é apresentado resultados de módulo de elasticidade menores em comparação ao traço referência, uma vez que a perda de resistência à compressão é maior, evidenciando que mesmo com maior proporção de agregados, temos uma menor volume de pasta na mistura, e conseqüentemente resultados de módulo menores.

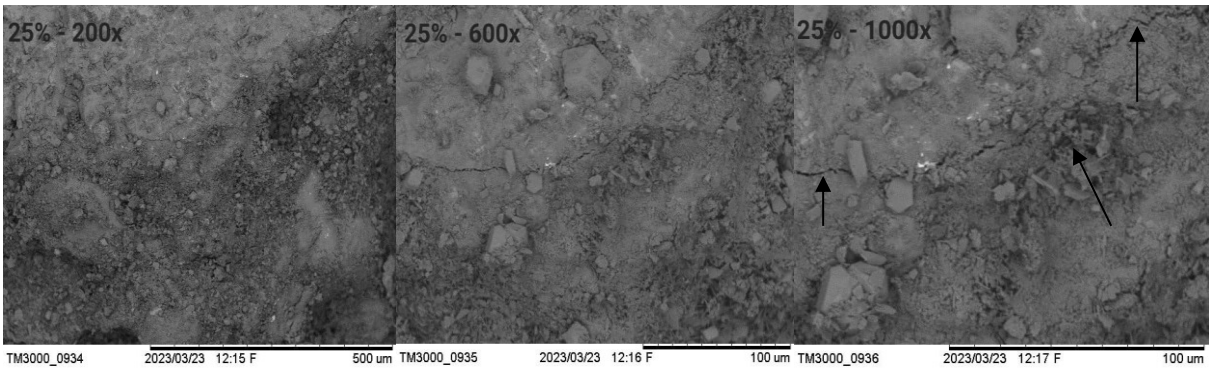
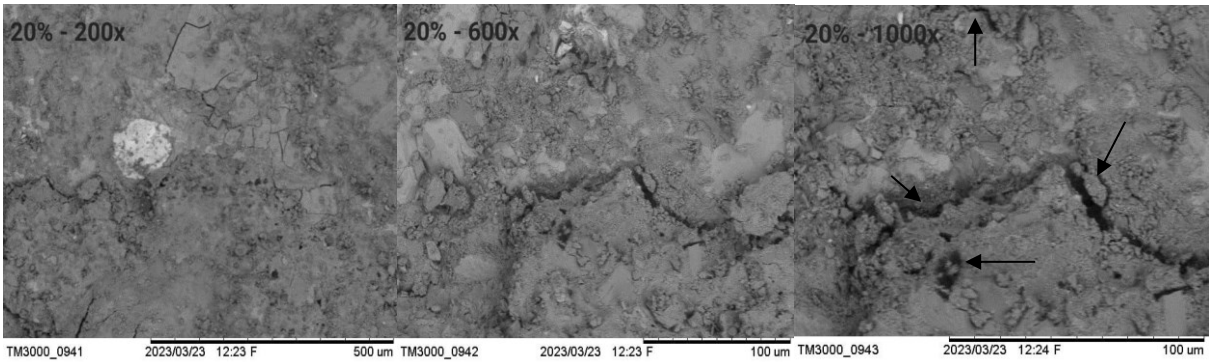
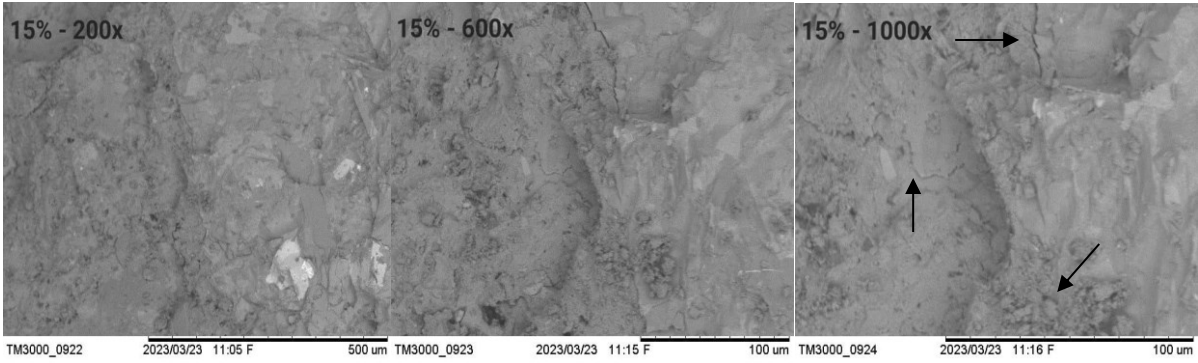
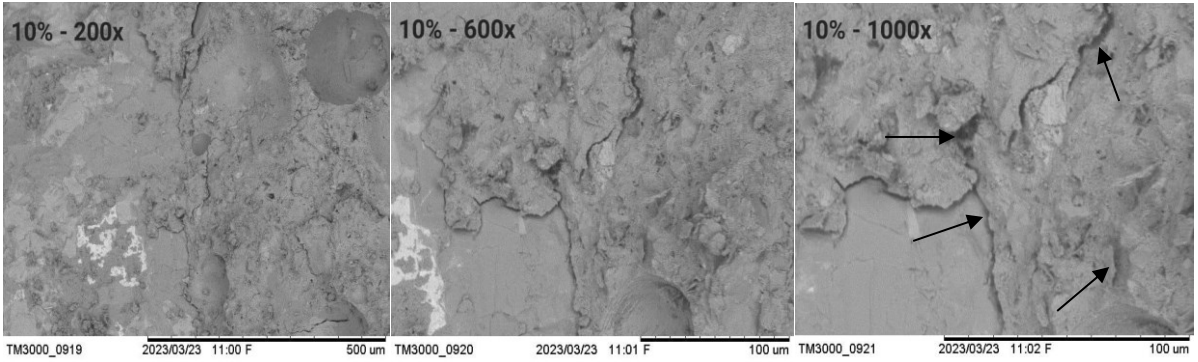
4.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 37 apresenta as imagens de MEV para a idade de 28 dias de hidratação para todos os concretos nas aproximações de 200, 600 e 1000x. É possível evidenciar que o traço padrão apresenta uma zona de transição mais bem definida comparado com os demais. Também é possível avaliar que conforme se aumenta os teores de substituição do FB, o concreto apresenta estas zonas com a presença de fissuras e com poros maiores e conseqüentemente uma interface pasta agregado com maior porosidade.

Nas proporções de substituição 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% é evidenciado a presença de fissuras, que podem estar relacionadas a avaliação do estado endurecido, uma vez que foram utilizados os fragmentos dos ensaios. Todavia conforme se aumenta o teor de substituição essas fissuras são maiores evidenciando uma interface pasta agregado com maior porosidade.

Nas substituições de 20%, 25% e 30% foi possível evidenciar uma porosidade maior em função de que o grão de FB não foi capaz de preencher e formar uma estrutura densa, conseqüentemente se tem perda de resistência à compressão e maior índice de vazios e porosidade.





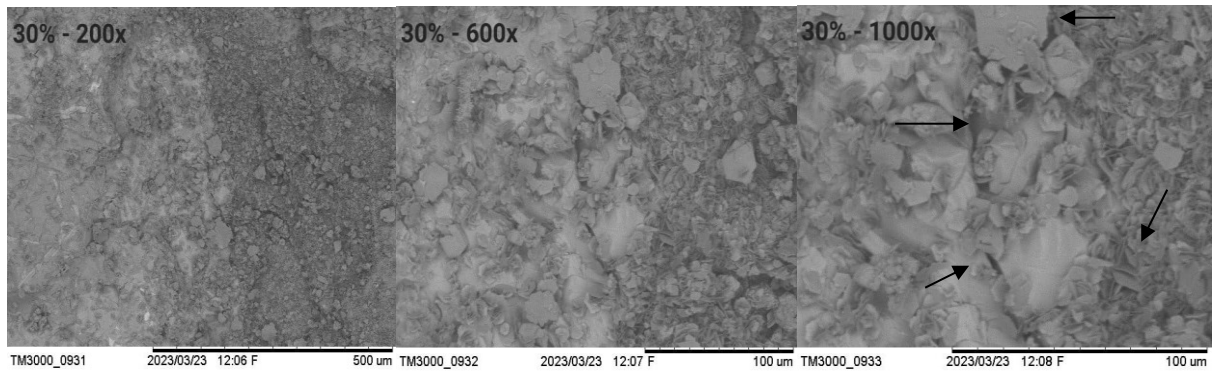


Figura 37 - Imagens de MEV de CAA's com FB nas proporções padrão 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% com 28 dias de hidratação.
Fonte: Central de análises (UTFPR)

Ainda na Figura 37 é possível avaliar o MEV do traço 30% com aproximação de 1000x é evidenciado uma interface pasta agregado com maior presença de poros, esses por sua vez já evidenciados pelo ensaio de absorção de água, que conforme se aumenta teor de substituição maior a porosidade do concreto.

5 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido apresentou o objetivo de avaliar o comportamento da substituição de FB em relação ao cimento em um traço padrão de CAA. Para tanto, foi realizada a análise das propriedades do CAA no estado fresco e endurecido, a fim de avaliar o comportamento da substituição do cimento por FB, avaliando o desenvolvimento da resistência à compressão axial, resistência a tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, além de avaliar a absorção de água dos compostos e a zona interfacial por meio da microscopia eletrônica de varredura.

Nos ensaios de estado fresco do CAA foi possível avaliar as propriedades do concreto, evidenciado que as substituições propostas causam pouca interferência quanto a fluidez e coesão do concreto, elencando que a diminuição dos finos do CAA com a saída do componente cimento foi suprida pelo acréscimo de FB nas mesmas proporções de mistura. No estado endurecido os resultados de resistência mecânica apresentam que conforme o aumento do teor de substituição do cimento por FB temos uma redução da resistência à compressão e tração, situação esperada já que o emprego de cimento é reduzido na mistura. No ensaio de absorção foi possível avaliar a porosidade, o aumento de FB e a diminuição do cimento ocasionou o aumento da porosidade em até 31,8% no traço de substituição de 30%, isso está relacionado a irregularidade das partículas de FB, bem como sua distribuição granulométrica em relação ao cimento, que proporciona perda do efeito de preenchimento e estruturas menos densas com maior índice de vazios. No ensaio de MEV é possível avaliar que conforme se aumenta os teores de substituição do FB, o concreto apresenta zonas interfaciais com a presença de fissuras e com poros com maior dimensão e conseqüentemente uma interface pasta agregado com maior porosidade, evidenciado os resultados obtidos no ensaio de absorção.

O traço com substituição de 15% de FB em relação ao cimento apresenta uma redução de 446,20 kg/m^3 de cimento para 379,27 kg/m^3 , obtendo 48,84 MPa e 41,00 MPa respectivamente. A relação entre consumo de cimento para obtenção de 1 MPa é de 9,14 para o traço referência e 9,25 para o traço com 15% de substituição, assim o percentual de perda de eficiência entre os traços é de 1,2%, sendo o teor ótimo de substituição de FB por cimento, em relação aos fatores de estado endurecido e estado fresco. Foi possível evidenciar a redução do consumo de aglomerante ser perdas efetivas no CAA.

De acordo com a NBR 15823 (2017) o traço referência se enquadrrou como SF1 quanto ao ensaio de *Slump Flow*, além de validar nos ensaios de T500, anel J, caixa L e funil V. Para as substituições de 5% 10% 15% 20% e 25% todos os traços apresentaram bom desempenho e se enquadraram como CAA. O traço de 30% não obteve parâmetros de validação no ensaio de anel J, mesmo com o aumento do teor de aditivo superplastificante o traço teve desempenho insatisfatório na habilidade passante. Os traços 5% 10% 15% 20% e 25% apresentaram resistência mecânica superior a 30 MPa aos 90 dias sendo classificados pela NBR 8953 (2015) como concreto C30, podendo ser utilizado em diversas aplicações da construção civil, conforme NBR 6118 (2014).

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUTOS

- Avaliar a durabilidade dos CAA dosado com fíler de britagem, tendo em vista os valores de absorção de água superiores em relação ao traço padrão.
- Avaliar o CAA dosado com fíler de britagem quanto à penetração de cloretos e reação álcali-agregado.
- Estudar a qualidade superficial do CAA com fíler de britagem em diferentes formas, desmoldantes, formas de enchimento, pensando em uma aplicação em indústrias de pré-fabricados

REFERÊNCIAS

ABDALQADER AHMED, SONEBI MOHAMMED, THORNTON NEIL, TAYLOR SU, 2022. **Factorial design modelling of cement grout containing dolomitic quarry dust powder**. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.011>.

ALI, MB, SAIDUR, R., HOSSAIN, MS, 2011. Uma revisão sobre análise de emissões em indústrias de cimento. **Renovar. Sustentar. Energia Rev.** **15**, 2252e2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>.

ASHISH,DK, 2019. **Concreto feito com pó de mármore residual e suplementar material cimentício para o desenvolvimento sustentável**. J. Limpo. Prod. 211, 716e729. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.1.245>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 20f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 9f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-3**: Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 8f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 11f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 8f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-6**: Concreto autoadensável – Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 10f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018. 16f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020. 9f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. 11f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16917:** Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. 10f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16973:** Determinação de material fino que passa pela peneira 75um por lavagem. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. 7f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro [S.l.: s.n.], 2016. 9f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto — Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018. 13f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118:** Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. 256f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009. 11f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011. 5f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522:** Concreto - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1 – Módulos estáticos a compressão. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. 30f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005. 4f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento
Rio de Janeiro: [s.n.], 2022. 28f.

BASTOS, S.S. Controle Municipal dos Processos Administrativos da Gestão de Resíduos da Construção Civil em Salvador-Ba. Salvador: **UFPB**, 2016. 168f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Gestão Social).

BIANCO, I., BLENGINI, GA, 2019. Inventário do ciclo de vida das técnicas de pedra, corte e acabamento: contribuição para preencher lacunas de dados. J. Limpo. Prod. 225, 684e696. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.309>.

Concreto na Construção Civil: Controle de Qualidade. Pré Fabricar, 2022. Disponível em: <https://prefabricar.com.br/concreto-na-construcao-civil-controle-de-qualidade/>. Acesso em 30/07/2023.

DACZKO, J.A. **Self-consolidating concrete: applying what we know**. CRC Press. NW, 2012.

DE AZEVEDO, ARG, MARVILA, MT, BARROSO, L. DA S., ZANELATO, EB, ALEXANDRE, J., XAVIER, G. DE C., MONTEIRO, SN, 2019. Efeito da incorporação de resíduos de granito no comportamento das argamassas. **Materiais (Basileia)** **12**. <https://doi.org/10.3390/ma12091449>.

DE MATOS, PAULO RICARDO; SAKATA, RAFAEL DORS; GLEIZE, PHILIPPE JEAN PAUL; DE BRITO, JORGE; REPETTE, WELLINGTON LONGUINI; 2020. Eco-friendly ultra-high performance cement pastes produced with quarry wastes as alternative fillers. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122308>

DE MATOS, PR, FOIATO, M., PRUDENCIO JR., LR, 2019a. Propriedades ecológicas, de estado fresco e mecânicas de longo prazo do concreto autocompactável de alto desempenho volantes de alto de cinzas volume. **Construir. Construir. Mater.** **203**, 282e293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.074>.

DOBISZEWSKA, M., SCHINDLER, AK, PICHOR, W., 2018. Propriedades mecânicas e microestrutura da zona de transição interfacial do concreto com adição de pó de basalto residual. **Construir. Construir. Mater.** **177**, 222e229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.133>.

DOMONE, P.L. A review of the hardened mechanical properties of selfcompacting concrete, **Cement and Concrete Composites**, Volume 29, Issue 1, Pg 1-12, 2007.

DRUTA, C; WANG, L; LANE, D.S. Tensile strength and paste– aggregate bonding characteristics of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 55, March 2014, Pages 89–96

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

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). Specification and guidelines for self-compacting concrete. In: **EFNARC**. 2002.

FELEKOGLU, B. Effects of PSD and surface morphology of microaggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete, **Cement and Concrete COMPOSITES**, VOLUME 29, ISSUE 6, 2007, PG 481-489.

GALETAKIS, M., SOULTANA, A., 2016. Uma revisão sobre a utilização de subprodutos finos da indústria de pedreiras e pedras ornamentais no setor da construção. **Construir. Construir. Mater.** **102**, 769e781. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204>.

GOMES, P. C. C. (2002) **Optimization and Characterization of HighStrength Self - Compacting Concrete**. Tese (Doutorado em Engenharia 277 Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

GOMES, PAULO C. C.; BARROS, ALEXANDRE R. **Métodos de dosagem de concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2009.

HOLSCHEMACHER, K. Hardened Material Properties of Self-Compacting Concrete. **Journal of Civil Engineering and Management**, 2004. 261-266.

LEEMANN, A.; HOFFMANN, C. Properties of self-compacting and conventional concrete – differences and similarities. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland. **Magazine of Concrete Research**, 2005, 57, No. 6, pg 315–319, 2005.

MANUEL, P. J. M. **Estudo da influência do teor de armassa no desempenho de concreto auto-adensáveis**. Porto Alegre - RS: Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2005.

MARQUES, A. C. **Concreto auto-adensável: caracterização da evolução das propriedades mecânicas e estudo da sua deformabilidade por solicitação mecânica, retração e fluência**. São Paulo: Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

MEDINA, G., SAEZ DEL BOSQUE, IF, FRÍAS, M., SANCHEZ DE ROJAS, MI, MEDINA, C., 2017. Resíduos de pedra de granito como um futuro material cimentício complementar ecoeficiente (SCM): Considerações científicas e técnicas. J. Limpo. **Prod.** **148**, 467e476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.048>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. São Paulo. **Pini**, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: **IBRACON**, 2014. p. 782.

MEIRELES, DINAH et al. **Avaliação das propriedades do concreto auto-adensável contendo aditivos modificadores de viscosidade no estado fresco**. Curitiba: Congresso Brasileiro do Concreto, 2009.

MODLER, L. E.; RUPP, R. F.; PREDIGER, P. W.; BOEIRA, F. D. Concreto bombeável com adição de finos basálticos – Análise das características físicas. In: **Congresso Brasileiro do Concreto - CBC**, 49. Bento Gonçalves, 2007. Anais. São Paulo: IBRACON, 2007.

MORAES, K. A. M. Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – **UFPE**. Recife, 2010.

NAGARATNAM, B. H. et al. Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agro-industrial waste. **Journal of Cleaner Production**, 2016. 882-894.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Editora Bookman, 2ª Edição. 2013. New Zealand Standard. NZS 3

NUNES, SANDRA C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades**. 2001. Dissertação – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2001.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting. 2003. Japão. **Journal of Advanced, Concrete Technology** Vol. 1, No. 1, 5-15.

PORTO, M.C; SILVA, S.V. Reaproveitamento dos entulhos de concreto na construção de casas. In: **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 28, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro, 2008.

PR de Matos, M. Foiato, LR Prudêncio Jr, Propriedades ecológicas, no estado fresco e mecânicas de longo prazo do concreto autocompactável de alto desempenho de cinzas volantes, **Constr. Construir. Mater.** **203** (2019) 282–293, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.074>.

SCHANKOSKI, RA, PILAR, R., DE MATOS, PR, PRUDENCIO, LR, FERRON, RD, 2019. Propriedades frescas e endurecidas de concretos autoadensáveis produzidos com diábase e pós de subprodutos de pedra de gnaiss como cargas alternativas. **Construir. Construir. Mater.** **224**, 659e670. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.056>.

SCHANKOSKI, RA, PILAR, R., PRUDENCIO, LR, FERRON, RD, 2017. Avaliação de pastas de cimento fresco contendo pós de subprodutos de pedra. **Construir. Construir. Mater.** **133**, 234e242. <https://doi.org/10.1016/l.conbuildmat.2016.12.056>.

SCHANKOSKI, RA; DE MATOS, PR; PILAR, R; PRUDENCIO, LR, FERRON, RD. 2020. Propriedades reológicas e qualidade de acabamento superficial de concretos autoadensáveis ecologicamente corretos contendo pós de resíduo de pedra. J. limpo. **Prod.** **257**, 120508. <https://doi.org/10.1016/j.jcleprp.2020.120508>

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**, 2020. Rio de Janeiro: SNIC, 2020.

THAPA, VB; WALDMANN, D; SIMON, C; 2019. Lama de lavagem de cascalho, um material residual de pedra como material cimentício suplementar (SCM). **Cimento Concr. Res.** **124**, 105833. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105833>

TOUBAL SEGHIR, N., MELLAS, M., SADOWSKI, Y., ZAK, A., 2018. Efeitos do pó de mármore sobre as propriedades da pasta de cimento mista curada ao ar. J. Limpo. **Prod.** **183**, 858e868. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.267>

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. 2ª Edição ed. São Paulo: **Editora Pini**, 2015.

TUTIKIAN, B.F.; DAL MOLIN, D.. **Concreto Autoadensável**. 1ª Edição. Sao Paulo – SP. **Editora PINI**, 2008.

UYSAL, M. Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures, **Construction and Building Materials**, Volume 26, Issue 1, pg 701-706, 2012.

UYSAL, M; YILMAZ, K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, Volume 33, Issue 7, August 2011, Pages 771–776.

VILANOVA, A.; GOMEZ, J. F.; LANDSBERGER, G.A. Evaluation of the mechanical properties of self-compacting concrete using current estimating models: Estimating the modulus of elasticity, tensile strength, and modulus of rupture of self-compacting concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 25, Issue 8, pg 3417-3426, 2011.

APÊNDICE A

O APÊNDICE A apresenta os valores do ensaio de granulometria realizado no fíler de basalto in-natura, evidenciado que 40% material é passante na peneira 0,075 mm.

Peneira (mm)	Massa retida	% ret simples	% ret acumulado
12,50	0,00	0,00	0,00
9,50	0,00	0,00	0,00
6,30	0,00	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	0,00
2,40	0,00	0,00	0,00
1,18	1,20	0,20	0,22
0,60	4,20	0,80	0,99
0,42	49,90	9,20	10,15
0,30	47,50	8,70	18,87
0,15	97,90	18,00	36,83
0,07	122,40	22,50	59,30
fundo	221,80	40,70	100,00

APÊNDICE B

O APÊNDICE B apresenta os resultados de resistência à compressão, tração por compressão diametral, absorção de água e módulo de elasticidade.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				
	3	7	28	90
	DIAS	DIAS	DIAS	DIAS
PADRÃO	32,94	38,28	44,45	48,84
5%	28,50	33,56	43,30	46,25
10%	27,15	32,11	37,91	42,05
15%	26,13	30,25	37,29	41,00
20%	20,01	24,98	32,20	35,02
25%	19,33	22,97	26,63	30,05
30%	16,37	19,76	24,76	27,62

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)			
	7	28	90
	DIAS	DIAS	DIAS
PADRÃO	3,69	3,86	3,92
5%	3,58	3,74	3,76
10%	3,48	3,67	3,72
15%	3,26	3,42	3,47
20%	2,84	3,04	3,06
25%	2,38	2,51	2,55
30%	2,16	2,40	2,44

ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)			
	7	28	90
	DIAS	DIAS	DIAS
PADRÃO	5,80	5,47	5,44
5%	5,99	5,73	5,71
10%	7,00	6,82	6,71
15%	7,18	6,96	6,90
20%	7,31	7,20	7,13
25%	7,38	7,24	7,10
30%	7,42	7,29	7,17

MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	
28 DIAS	
PADRÃO	29,30
5%	31,79
10%	30,19
15%	28,54
20%	27,18
25%	25,31
30%	24,72