



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM VIDRO MOÍDO**

Kátia Karine Korthuis

Lajeado, novembro de 2020



Kátia Karine Korthuis

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM VIDRO MOÍDO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo

Lajeado, novembro de 2020

Kátia Karine Korthuis

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM VIDRO MOÍDO**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Civil:

Prof. Me. Rafael Mascolo – orientador
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Dra. Emanuele Amanda Gauer
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Ma. Helena Batista Leon
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, 16 de novembro de 2020

RESUMO

A preocupação ambiental, o esgotamento de recursos naturais, e a situação dos aterros sanitários, despertam a busca por novos meios de reciclagem e reutilização dos materiais que seriam classificados como lixo e teriam como destino o aterro sanitário. Contribuindo ao reaproveitamento de resíduos, esta monografia busca a substituição de agregado miúdo natural, fonte não renovável, por vidro moído oriundo de garrafas *long neck* de cor verde, em concreto autoadensável. O objetivo é avaliar a viabilidade, quanto suas propriedades físicas e mecânicas, do concreto autoadensável com substituição do agregado fino natural por agregado reciclado. A metodologia deste estudo quantitativo envolveu a moagem do vidro, dosagem, análise granulométrica e caracterização deste, bem como, dos demais materiais constituintes do concreto autoadensável. Os teores de substituição utilizados foram de 10, 20 e 30% de vidro em substituição em massa de agregado miúdo. Os ensaios em estado fresco realizados foram de espalhamento, pelo método do Cone de Abrams, e caixa L, comprovando as propriedades requeridas do concreto autoadensável tanto para o concreto referência, quanto para os concretos com substituição. Em estado endurecido foram executados os ensaios de resistência à compressão, absorção por capilaridade, absorção média, índice de vazios, massa específica e módulo de elasticidade, que revelaram uma variação entre propriedades físicas e mecânicas. O concreto com 10% de substituição apresenta resistência à compressão e módulo de elasticidade maior, quando comparado aos outros teores, enquanto que o teor de 20% se mostrou mais vantajoso em suas características físicas, pois apresentou menor média de índice de vazios e absorção. A conclusão do estudo é de que é viável, tendo em vista as propriedades analisadas, produzir concreto autoadensável com vidro moído oriundo de garrafas *long neck* de cor verde em substituição de agregado miúdo, sendo o concreto com 20% de substituição o que apresenta melhores características em estado fresco e o concreto com 10% de substituição o que apresenta os melhores resultados de suas propriedades em estado endurecido.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Vidro moído. Propriedades mecânicas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Problema de pesquisa	6
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo geral	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 Justificativa da pesquisa	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Concreto Autoadensável	8
2.2 Método de dosagem Tutikian	12
2.3 Vidro	14
2.4 Concreto com adição de vidro moído	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Materiais	18
3.1.1 Areia	18
3.1.2 Brita	18
3.1.3 Cimento	19
3.1.4 Sílica Ativa	19
3.1.5 Água	19
3.1.6 Aditivos	19
3.2 Métodos	19
3.2.1 Preparação do vidro	20
3.2.2 Caracterização dos materiais	23
3.2.2.1 Análise granulométrica	24
3.2.2.2 Massa unitária	29
3.2.2.3 Massa específica	31
3.2.3 Dosagem	32
3.2.4 Concretagem e ensaios em estado fresco	35
3.2.5 Ensaio em estado endurecido do concreto	37
3.2.5.1 Ensaio de compressão	37
3.2.5.2 Ensaio do módulo de elasticidade	37
3.2.5.3 Ensaio de capilaridade	38
3.2.5.4 Ensaio de absorção e índice de vazios	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Dosagem e propriedades em estado fresco	39
4.2 Resistência à compressão	42
4.3 Capilaridade	47
4.4 Absorção média, índice de vazios e massa específica	52

4.5 Módulo de Elasticidade	55
5 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável (CAA), conforme descrito por Neville (2016), é aquele que possui fluidez e habilidade passante para expelir o ar, sem vibração, e a capacidade de fluir por obstáculos para preencher a fôrma. O CAA foi desenvolvido na década de 80 e entre suas vantagens, conforme Cavalcanti (2006), está o aumento da produtividade, a melhora do ambiente construtivo e a sustentabilidade deste concreto que pode ser obtido com altos volumes de resíduos industriais.

Para ser classificado como tal, a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) determina que deve-se comprovar a fluidez, a viscosidade plástica aparente e estabilidade visual, por meio dos ensaios de espalhamento, t500 e índice de estabilidade visual e, ainda, deverá ser verificada a habilidade passante por meio do ensaio utilizando o anel J, a caixa em L e/ou o método do funil V.

Tendo em vista a necessidade de maior quantidade de finos, possibilidade de ganho ambiental com a adição de resíduos no CAA e visando a diminuição dos impactos ambientais causados pelo concreto, mostra-se um potencial vantajoso a substituição de agregado miúdo por vidro moído oriundo de garrafas *long neck*.

As garrafas do tipo *long neck*, conforme Silveira (2016), tiveram sua composição modificada para aumentar a concorrência com as latas de alumínio, mas isso impossibilitou a realização de segundo envase, assim, este tipo de embalagem está sendo descartado no lixo comum e sofre baixa taxa de reciclagem.

O estudo da substituição de agregado miúdo por vidro moído ou da adição de vidro moído no concreto vem sendo classificado como promissor por autores como Bartholomei

(2013) que elaborou pesquisa sobre CAA com substituição de 5% de agregado miúdo por vidro, oriundo da indústria de televisor, moído (passante na peneira 200) e constatou aumento da resistência à compressão axial e da viscosidade deste concreto.

Com este intuito, o presente trabalho busca a substituição de 10, 20 e 30% de agregado miúdo por vidro moído, oriundo de garrafas do tipo *long neck* de cor verde, no concreto autoadensável, buscando analisar as propriedades físicas e mecânicas, por meio dos ensaios de: espalhamento, t500, caixa L, índice de estabilidade visual, compressão axial, absorção de água e índice de vazios, absorção de água por capilaridade e módulo de elasticidade.

1.1 Problema de pesquisa

É viável a execução de um concreto autoadensável com substituição de agregado miúdo por vidro moído oriundo de garrafas *long neck*, quanto às propriedades físicas e mecânicas no estado fresco e endurecido?

1.2 Objetivos

Nos itens a seguir são apresentados os objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade, quanto às propriedades físicas e mecânicas, da substituição do agregado fino natural por vidro moído em concreto autoadensável.

1.2.2 Objetivos específicos

São designados como objetivos específicos:

- a) analisar as propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido;
- b) avaliar o efeito, em relação às propriedades físicas e mecânicas, da incorporação de diferentes porcentagens de vidro em substituição em massa de agregado miúdo;
- c) caracterizar o CAA quanto às propriedades físicas no estado fresco;
- d) definir o traço cuja composição resulte em um concreto autoadensável, com vidro moído em substituição do agregado fino;

e) determinar a porcentagem de substituição mais adequada para este concreto tendo em vista as reações causadas pela substituição de agregado miúdo por vidro moído e as características esperadas de um concreto autoadensável.

1.3 Justificativa da pesquisa

A composição e a forma do agregado fino é significativa na determinação da reologia do concreto autoadensável, pois, conforme descrito por Neville e Brooks (2013), é indicado o uso de mais finos neste tipo de concreto, menores de 600 μ m, para evitar a segregação. Tutikian e Dal Molin (2008) complementam que os agregados finos devem ser compostos por partículas arredondadas e lisas, o que causa um aumento da fluidez da mistura, requisito primordial para este tipo de concreto, concomitantemente, o vidro moído apresenta estas características.

Além das características da partícula de vidro, outro fator relevante para sua utilização é o fato das embalagens de vidro representarem um problema ambiental, pois CEMPRE (2019) descreve que o Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, destas, cerca de 47% foram recicladas no ano de 2011, resultando em, aproximadamente, 519 mil toneladas de vidro nos aterros. Estas embalagens de vidro são principalmente garrafas, potes e frascos.

Como alternativa para reciclagem das embalagens de vidro se tornar mais vantajosa e recorrente, está a utilização de vidro moído proveniente de garrafas *long neck* no concreto autoadensável complementando suas propriedades. Entretanto, é necessário verificar o traço de substituição que permita a execução de um CAA com propriedades físicas e mecânicas nos padrões definidos por norma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica com abordagem dos conteúdos que fundamentam o tema escolhido para o trabalho.

2.1 Concreto Autoadensável

O concreto autoadensável (CAA) é considerado um concreto novo, pois foi desenvolvido em meados dos anos 80, mas que desde a criação vem ganhando espaço, pois foi desenvolvido com o objetivo de resolver problemas de concretagem em estruturas com formas complexas e com altas taxas de armadura, conforme descrito por Coutinho (2011), situações comuns em edificações que buscam a melhor relação custo e benefício.

O CAA é uma mistura capaz de expelir o ar, sem vibração, e flui por obstáculos para preencher a fôrma, conforme descrito por Neville (2016). Para ser classificado como tal, o CAA deve apresentar três requisitos básicos em estado fresco que são: ter fluidez, passar por obstáculos e resistir a segregação. Assim a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) determina que para aceitação do CAA deve-se comprovar a fluidez, a viscosidade plástica aparente e a estabilidade visual, por meio dos ensaios de espalhamento, t500 e índice de estabilidade visual e, ainda, deverá ser verificada a habilidade passante por meio de ensaio utilizando o anel J, a caixa em L e/ou o método do funil V.

É relevante destacar a importância destes ensaios para a caracterização do CAA, pois eles relacionam os requisitos com o concreto preparado. Por meio dos referidos ensaios, é possível simular a passagem do CAA pela armadura, a qual é representada pelos diferentes

obstáculos criados em cada um destes testes (anel J, caixa L e caixa em U), conforme regulamentado na NBR 15823 (ABNT, 2017). Já o ensaio do funil V simula a passagem por pequenos espaços, conforme descrito na NBR 15823-5 (ABNT, 2017). O Cone de Abrams, utilizado nos ensaios de espalhamento, t 500 e índice de estabilidade visual, realizados conforme NBR 15823-2 (ABNT, 2017), auxiliam na análise do espalhamento, que é a capacidade de deslocamento do concreto, e ainda, após término do escoamento permitem verificar a ocorrência de exsudação.

Quanto aos materiais constituintes, Tutikian e Dal Molin (2008) descrevem que o CAA apresenta em sua composição os mesmos materiais que o concreto convencional, porém com maior quantidade de finos e com aditivos plastificantes, superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade. A dosagem pode ser definida por diversos métodos que tem por objetivo garantir o atendimento das propriedades do CAA, sendo assim, são analisados a habilidade de fluir e a estabilidade da mistura conforme o traço vai sendo alterado.

Conforme descrito por Gomes e De Barros (2009), o cimento constituinte do CAA deve ser escolhido conforme as características que se deseja obter do concreto, como resistência e durabilidade. Tutikian e Dal Molin (2008) acrescentam que quanto maior a superfície específica do cimento, menor a tensão de escoamento e maior a viscosidade da mistura. Assim, é benéfico ao CAA um cimento de alta superfície específica. E ainda, conforme descrito por Gomes e De Barros (2009), o cimento com alta concentração de C3A (Aluminato Tricálcico) pode causar baixa trabalhabilidade.

Segundo Neville e Brooks (2013) o cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CP V- ARI - RS) apresenta baixo teor de C3A e também é composto por baixo teor de adições, o que permite verificar o comportamento do resíduo adicionado a composição do concreto sem maiores interferências. Conforme Tutikian e Dal Molin (2008), o CAA é amplamente utilizado na indústria de pré-moldados o que incentiva ainda mais a utilização do cimento CP V-ARI que, segundo Recena (2017), apresenta elevadas resistências iniciais, permitindo rápida desforma.

Já sobre os agregados, Neville (2016) descreve que o uso de agregado graúdo no CAA é menor que no concreto convencional. Utiliza-se menos de 50% do volume total de sólidos, com tamanhos usualmente compreendidos entre 12,5 e 19 mm, com boa forma e textura (equidimensional e áspera).

O uso de agregado fino é maior que do convencional, pois conforme descrito por Tutikian e Dal Molin (2008), o uso de agregado miúdo de baixo módulo de finura leva a um CAA de elevada coesão, já o módulo de finura elevado (maior que 3) pode levar a segregação. Coutinho (2011) acrescenta que concretos autoadensáveis que precisam se movimentar por maiores distâncias horizontais necessitam de maior teor de finos, 30% a mais que os concretos vibrados e até aproximadamente 600 kg/m^3 . Já os CAA's que não apresentam essa necessidade podem ter apenas 10% a mais de finos que o concreto convencional. Ainda quanto a granulometria, o agregado que passa pela peneira 0,125 mm deve ser considerado como adicional de fíler na dosagem.

Quanto aos aditivos, Mehta e Monteiro (2014) descrevem que os mais utilizados no CAA são os superplastificantes, que aumentam a fluidez do CAA sem aumentar a relação água/cimento (a/c), e os modificadores de viscosidade, que conferem coesão ao CAA. Os autores destacam, também, que o uso de grandes teores de finos ou o uso de aditivos químicos modificadores de viscosidade são práticas comuns.

Gomes e De Barros (2009) citam como vantajosa a utilização dos modificadores de viscosidade caso os agregados sejam mal graduados e/ou não haja adição de minerais, que são fatores propícios a segregação e exsudação. Assim, podemos ter concretos com relações a/agl menores e com maior fluidez sem que ocorra segregação. Tutikian e Dal Molin (2008) destacam que o uso dos modificadores de viscosidade aliados aos superplastificantes de última geração resultam em uma mistura de alta fluidez e estabilidade, mas que devem ser feitos estudos prévios para verificação da compatibilidade dos aditivos, garantindo que não haja retardo de pega, coesão excessiva, aumento da retração por secagem e alteração da resistência nas primeiras idades.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), os superplastificantes são conhecidos como aditivos redutores de água de alta eficiência, pois reduzem de três a quatro vezes mais água quando comparados aos aditivos redutores de água normais. E, em estado endurecido, proporcionam ao CAA propriedades mecânicas superiores já nas idades iniciais.

Dentre os superplastificantes, Tutikian e Dal Molin (2008) destacam que os mais aconselhados para o CAA são os policarboxilatos (PC) por terem alta eficiência, agindo de forma a desflocular e dispersar as partículas de cimento e permitindo a redução de 40% da água, mantendo a mesma trabalhabilidade. Os autores destacam, ainda, que a máxima

trabalhabilidade é alcançada de 10 a 15 min após a incorporação do aditivo, mas é seguida por uma rápida perda do espalhamento, assim, é aconselhada a incorporação do aditivo superplastificante apenas no momento anterior ao seu lançamento.

Conforme Coutinho (2011), as adições são materiais finamente moídos, as quais podem ser classificadas como reativas, tais como a sílica ativa, o metacaulim, a cinza de casca de arroz, a cinza volante e a escória de alto forno, e inertes ou semi inertes, que são os fíleres de agregados, tal como o de calcário, e os pigmentos. Tais materiais são incorporados ao CAA com o objetivo de diminuir o volume de vazios e, ainda, de obter efeito químico de produção de silicato de cálcio hidratado, caso sejam adições reativas. No estado fresco conferem ao CAA menor tendência à exsudação e à segregação, sendo que a cinza volante e escória de alto forno diminuem o calor de hidratação, enquanto a sílica ativa aumenta as resistências iniciais e finais. A cinza volante diminui a resistência em idades baixas, assim como a escória de alto forno, mas esta aumenta a resistência em idades avançadas. O metacaulim causa melhoria notável na resistência à compressão e da durabilidade. Gomes e De Barros (2009) destacam que as adições reativas aumentam, também, a durabilidade do concreto.

A água utilizada para o amassamento do CAA segue os mesmos requisitos da utilizada para o concreto convencional, conforme NBR 15900-1 (ABNT, 2009), esta pode ser de abastecimento público, assim não precisa ser ensaiada pois já atende aos requisitos solicitados em norma. Conforme Gomes e De Barros (2009) a relação a/c para concretos de alto desempenho está na faixa de 0,35, enquanto que para concretos convencionais está na faixa de 0,50. Percebe-se que uma baixa relação a/c e o uso de superplastificante produzem concretos de alta viscosidade.

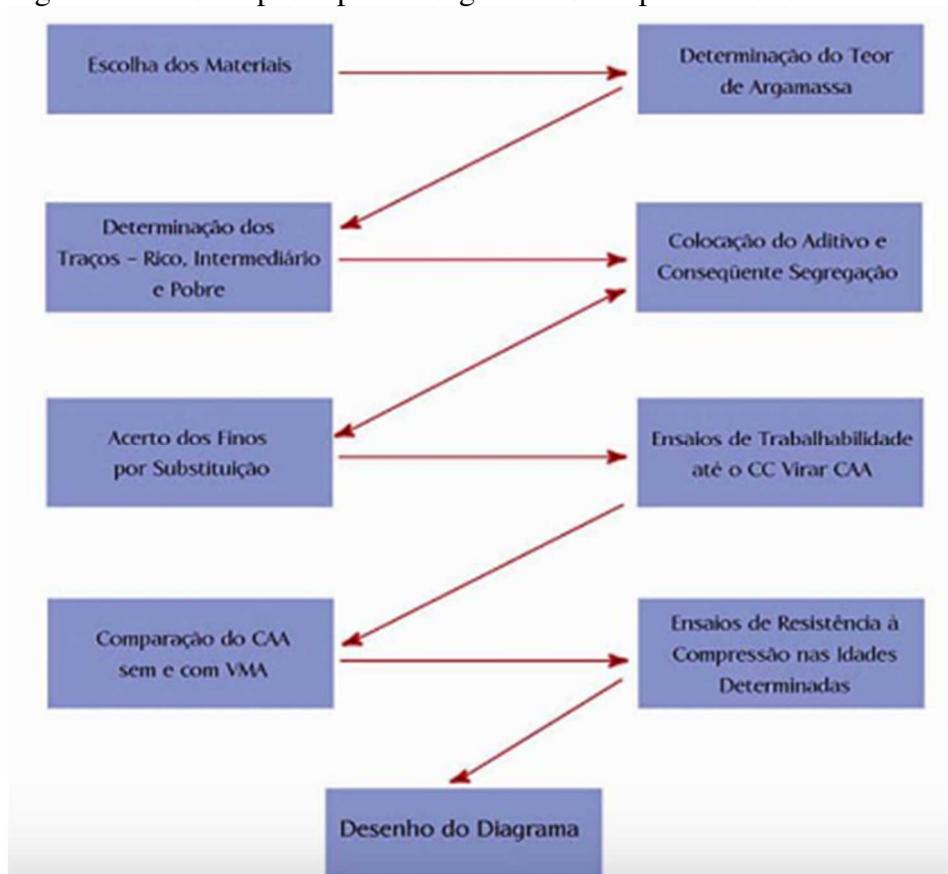
Tutikian e Dal Molin (2008) descrevem que o CAA apresenta as mesmas propriedades em estado endurecido do concreto convencional e que suas propriedades dependerão da forma como foi dosado. Neville e Brooks (2013) acrescentam que, para verificar se o concreto atende as especificações, é necessário realizar o ensaio de compressão, regido pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Além deste, conforme descrito por Mehta e Monteiro (2014), faz-se pertinente a realização dos ensaios de absorção de água e índice de vazios, pois ocorre uma relação inversa entre porosidade e resistência dos sólidos, além dos vazios serem grandes facilitadores de patologias no concreto. Os referidos ensaios são realizados conforme NBR 9779 (ABNT, 2012) e NBR 9778 (ABNT, 2005), respectivamente.

Conforme Helene e Neto (2002), para um cálculo estrutural mais realista é importante o conhecimento das propriedades da deformação do concreto, tal como o módulo de elasticidade, que tem seu ensaio normatizado pela NBR 8522 (ABNT, 2017). Essa propriedade é definida por Mehta e Monteiro (2014) como sendo a razão entre a tensão e a deformação reversível, podendo variar entre 14 e 40 GPa. Os autores destacam, ainda, que o módulo de elasticidade representa a máxima tensão que o concreto pode receber antes de sofrer deformações permanentes, assim, este valor influencia na rigidez do projeto.

2.2 Método de dosagem Tutikian

Dentre os métodos de dosagem para CAA está o método de dosagem Tutikian que conforme descrito por Gomes e De Barros (2009), consiste em seis passos, partindo de um concreto convencional dosado conforme o método IPT/EPUSP, desenvolvido por Helene e Terzian. Os passos do método Tutikian são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Passo-a-passo para dosagem do CAA pelo método Tutikian

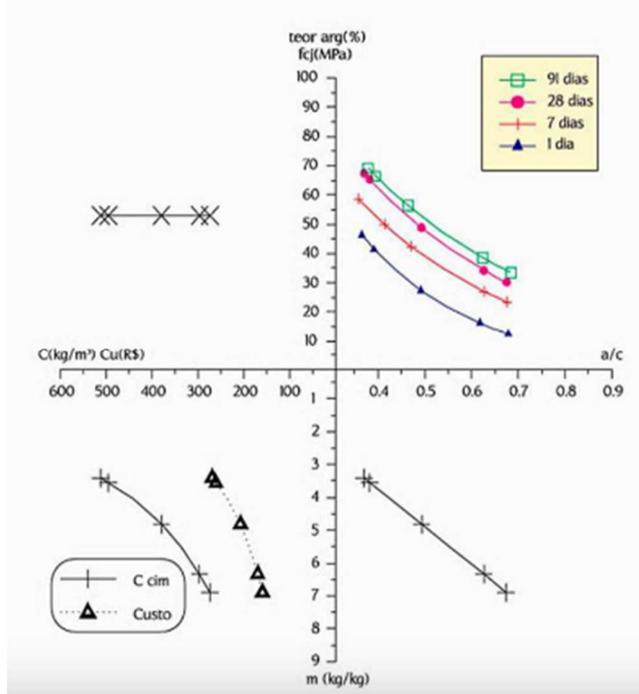


Fonte: Tutikian (2004).

Conforme descrito por Tutikian e Dal Molin (2008) neste caso os materiais já foram escolhidos, partindo da definição do teor de argamassa, determinada por meio de fórmulas que podem considerar ou não a massa específica dos materiais constituintes. Então, deve-se escolher três traços (rico, intermediário e pobre), até este ponto o método é exatamente igual ao IPT/EPUSP. Conforme Gomes e De Barros (2009) o próximo passo, primeiro do método Tutikian, é iniciar a adição de aditivo em relação a massa de cimento na ordem de 0,30% e aumentar até a consistência ideal, simultaneamente a adição dos finos (segundo passo), e, para verificação da trabalhabilidade, realiza-se o terceiro passo que são os ensaios em estado fresco. O quarto passo não é obrigatório, pois o traço já está definido e o aditivo modificador de viscosidade (VMA) é utilizado apenas para melhorar este traço em condições específicas de utilização.

Por fim, Tutikian e Dal Molin (2008) descrevem que, realiza-se moldagem dos corpos de prova (CP's) para futuros ensaios (quinto passo) e, como sugestão, o desenho do diagrama (sexto passo) que considera a resistência à compressão (MPa), relação a/agl (água/aglomerante), o traço “m”, o espalhamento do concreto no slump flow test e o consumo de cimento por metro cúbico (kg/m^3). O diagrama de dosagem, que está representado na Figura 2, deve ser utilizado no sentido horário a partir da resistência a compressão, ou no sentido oposto a partir do consumo de cimento, sendo a curva de custo não obrigatória.

Figura 2 – Diagrama de dosagem CAA dosado por Tutikian



Fonte: Tutikian (2004).

2.3 Vidro

O consumo de vidro tem se mostrado crescente com o passar dos anos, fato que Pinheiro (2016) delega as características de inalterabilidade, dureza e resistência e as propriedades térmicas, óticas e acústicas que o vidro apresenta.

Conforme descrito por Maximo (2016), o vidro utilizado em garrafas é o sodo-cálcico. Este vidro, segundo Bauer (2019), é constituído de 70% de SiO₂, 15% de óxido de sódio (Na₂O), 10% de óxido de cálcio (CaO) e com aproximadamente 5% de outros óxidos que são incorporados com a finalidade de alterar a cor do vidro ou de alterar suas propriedades, que são 2% de AlO₃, 1% de K₂O e 1,5% de MgO, de modo que ao final da reação temos óxidos de sódio e de cálcio, ligados à rede de sílica.

Conforme descrito por Pinheiro (2016), a matéria prima para a confecção de vidro é a barrilha, o feldspato, o calcário e a areia, todos recursos não renováveis. Mas o vidro, em forma final, representa um material reciclável e reutilizável. Dentre as vantagens da reutilização e reciclagem do vidro, Adams (2014) destaca que a reciclagem garante uma maior eficiência energética em seu processo de fabricação, pois é retirada menor quantidade de matéria prima do meio ambiente, grande quantidade de material deixa de ir para aterros sanitários e a quantidade de transporte é reduzida, reduzindo a emissão de CO₂.

Apesar de ser 100% reciclável, CEMPRE (2019) apresenta que apenas 47% das embalagens de vidro foram recicladas em 2011 no Brasil. Para fins de comparação entre as taxas de reciclagem, no ano de 2010 foram recicladas de 87% das embalagens de vidro na Alemanha, 98% na Suíça e 40% nos EUA, o que nos mostra o potencial de reciclagem deste material que ainda pode ser explorado e potencializado no Brasil. Dentre os resíduos de vidro, os principais são garrafas, potes e frascos. Quanto às garrafas, pode-se citar as do tipo *long neck* ou *one way*, garrafas de 355 mililitros, que não são passíveis de segundo envase e que, segundo Silveira (2016), em 2012, representaram 1,4 bilhões de embalagens produzidas no Brasil, ainda que representem apenas 3% das embalagens de cerveja. Silveira (2016) destaca, também, que estas embalagens foram modificadas, tendo em vista a competitividade com outras embalagens, o que as tornaram mais frágeis e impossibilitou o seu reuso, assim, as *long neck* são descartadas como lixo comum.

Concomitantemente aos descartes irregulares, têm-se os aterros sanitários chegando ao seu limite, como por exemplo, o aterro sanitário de Lajeado-RS que no mês de setembro de 2019, conforme SEMA (2019), recebeu 1.593.650 quilogramas de lixo orgânico e 69.050 quilogramas de lixo seco. Tendo em vista a grande produção de lixo da cidade, a notícia jornalística Aterro Sanitário de Lajeado tem Área Ampliada (2018) anunciou em maio de 2018 que o aterro teve sua área atual esgotada, gerando a necessidade de compra de área de 2,7 hectares para ampliação do aterro sanitário atual.

2.4 Concreto com adição de vidro moído

Visando a minimização da degradação do meio ambiente diversos estudos vêm trabalhando com a incorporação de resíduos no concreto, entre estes está o vidro moído. Gomes e Pelisser (2011) realizaram a adição de diferentes teores de pó de vidro (oriundo de retalhos de vidraçaria) em relação a massa de cimento, e constataram como vantagens a reciclagem do vidro e diminuição dos custos do concreto. Entretanto, nos testes realizados por estes autores não foram constatadas alterações nas resistências do concreto. Este resultado pode estar associado a granulometria do pó de vidro (passante na peneira 0,50mm) que não apresentou propriedades aglomerantes.

Já Vian (2018) realizou a substituição de agregado miúdo por vidro moído oriundo de garrafas *long neck*, nas porcentagens de 0%, 10%, 20% e 30%, no concreto convencional, no qual analisou o comportamento mecânico e a durabilidade. Ficou constatado que no traço de 30% de vidro moído houve melhor resultado médio nos ensaios, evidenciando que a resistência a compressão é maior para maiores teores de vidro e que o aumento de resistência pode ocorrer em idades mais altas (70 dias), tendo em vista as atividades pozolânicas. Quanto a durabilidade, Vian (2018) concluiu que quanto maior a adição de vidro moído (foi analisado até 30%) menor é a penetração de cloretos, a absorção de água por capilaridade, o índice de vazios e a absorção de água da amostra. O autor também notou durante a dosagem a necessidade de maior adição de água e superplastificante à medida que se aumentava o teor de vidro moído.

Rodrigues (2018) enfatiza que o uso do vidro moído no concreto altera as propriedades, sendo o tamanho das partículas e a quantidade de adição determinantes nestas alterações. Na pesquisa bibliográfica realizada por este autor não houve consenso quanto ao aumento ou diminuição da resistência (compressão e tração) e da trabalhabilidade, enfatizando a necessidade de mais estudos sobre este tema. O autor enfatiza também que, para teores mais

elevados de adição, foram encontradas expansões mais aceleradas no concreto devido às reações álcali-agregado e que percebe-se que o slump tende a diminuir de acordo com o aumento da substituição.

Por outro lado, Tinoco e Silva Júnior (2018) concluíram, por meio de pesquisa bibliográfica, que a substituição de agregado miúdo por vidro moído leva a um aumento de consistência em estado fresco e de resistência mecânica quando endurecido, além de diminuir o índice de vazios e permeabilidade. Os autores destacam também a importância da similaridade das curvas granulométricas do vidro moído e do agregado miúdo, para que se mantenha as características do mesmo e, ainda, a indiscutível contribuição ambiental deste reaproveitamento do vidro moído.

Righi et al. (2012) realizaram a substituição de areia por vidro moído em diferentes teores e então simularam situações de incêndio. Com o estudo foi possível concluir que concretos com 100% de substituição sofrem *spalling* (lascamento de camadas ou pedaços de concreto da superfície de um elemento estrutural) e que a dosagem que se equiparou ao concreto sem substituição foi a de 20%. Shao et al. apud Righi et al. (2012) destaca que quando adicionado pó de vidro com partículas menores de 75 μ m, há um aumento da resistência à compressão e uma menor expansão quando comparado ao concreto convencional. O autor descreve que teores até 15% de substituição, causam redução na resistência enquanto que a substituição de 100% causa ao concreto um aumento de resistência em relação ao concreto referência e uma diminuição da trabalhabilidade. Isso ocorreu, possivelmente, devido ao aumento de finos, pois o vidro utilizado era o passante na peneira 4,8 mm. Por fim, os autores enfatizam a possibilidade de reação entre a sílica do vidro e os álcalis de cimento, que em presença de umidade podem gerar um gel expansivo prejudicial ao concreto, destacando a importância de pesquisas sobre a reação álcali-sílica (RAS).

López, Azevedo e Barbosa Neto (2005) realizaram tanto adição quanto substituição de agregado fino por vidro moído e obtiveram resultados de que substituição de 5% do agregado fino por vidro moído (granulometria entre 150-300 μ m) causou o maior aumento na resistência à compressão, embora as outras granulometrias também tenham causado incrementos na resistência, só que menores. Para adições acima de 5% do peso de vidro sobre o peso de areia houve uma diminuição da resistência à compressão do concreto, o que pode ter sido causado pelo aumento da quantidade de materiais secos.

Bartholomei (2013) elaborou pesquisa sobre CAA com substituição de 5% de agregado miúdo por vidro, oriundo da indústria de televisor, moído (passante na peneira #200) e constatou que o concreto com a substituição não só se tornou autoadensável, como também superou a resistência à compressão axial do concreto sem a substituição em todas as idades ensaiadas (3, 7 e 28 dias), possivelmente devido ao maior preenchimento dos vazios. O autor constatou também, assim como já destacado, que a substituição resultou em um maior consumo de aditivo superplastificante devido ao aumento da viscosidade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e o programa experimental utilizados pela autora almejando alcançar os objetivos citados.

3.1 Materiais

O concreto foi executado com cimento, areia média, brita zero, vidro moído, água, superplastificante, plastificante e sílica ativa. Os materiais foram fornecidos pelo LATEC, com exceção do vidro moído que é proveniente de coleta em casas e restaurantes da cidade de Lajeado-RS.

3.1.1 Areia

A areia média teve a massa específica definida conforme NBR NM 52 (ABNT,2009) com valor de $2,60 \text{ g/cm}^3$ e conforme NBR 9776 (ABNT, 1987), com valor de $2,59 \text{ g/cm}^3$. E, ainda, a massa unitária, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), com o valor de $1,492 \text{ g/cm}^3$.

3.1.2 Brita

A brita de origem basáltica número zero teve massa específica, massa específica aparente e absorção de água definidas conforme NBR NM 53 (ABNT,2009) com valor de $2,94 \text{ g/cm}^3$ para massa específica, $2,70 \text{ g/cm}^3$ para massa específica aparente e $3,2\%$ para absorção. E ainda, a massa unitária foi definida conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), com o valor de $1,511 \text{ g/cm}^3$.

3.1.3 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V ARI-RS da marca Intercement com massa específica de 2,99 g/cm³ determinada conforme NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.1.4 Sílica Ativa

A sílica ativa teve massa específica obtida conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017) e apresentou o valor de 2,14 g/cm³.

3.1.5 Água

A água utilizada foi a potável do abastecimento público, distribuída pela CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), conforme especificado pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

3.1.6 Aditivos

O aditivo superplastificante (SP) utilizado é da marca GCP Applied Technologies, do tipo TecFlow 8000 e está de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2011), sendo classificado no tipo SP II / N/A/R. Conforme GCP Applied Technologies (2020), a dosagem recomendada é de 0,3 à 2,0% de SP em relação a massa de aglomerante e, sua massa específica, determinada conforme NBR 10908 (ABNT, 2008), varia entre 1,080 - 1,120 g/cm³.

O plastificante (P) utilizado também foi da fabricante GCP Applied Technologies, do tipo MIRA SET 29 está de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2011) e pode ser classificado no tipo PR/PA/PN. Conforme GCP Applied Technologies (2020), a dosagem recomendada é de 0,6 à 1,0% de P em relação a massa de aglomerante e, sua massa específica, determinada conforme NBR 10908 (ABNT, 2008), varia entre 1,140 - 1,200 g/cm³.

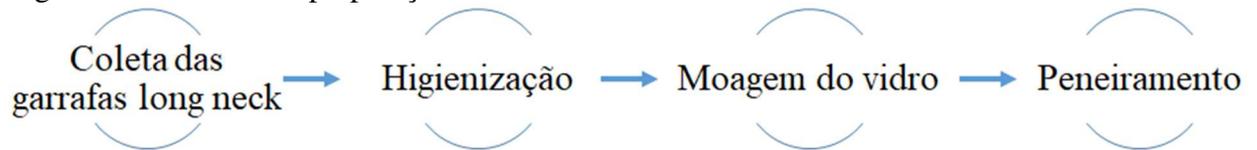
3.2 Métodos

Os métodos consistiram em cinco etapas: a preparação do vidro, a caracterização dos materiais, a dosagem, a concretagem e os ensaios em estado fresco e os ensaios em estado endurecido do concreto.

3.2.1 Preparação do vidro

Para utilização do vidro oriundo das garrafas estas tiveram que passar por processos preparatórios conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Processo de preparação do vidro



Fonte: Da Autora (2020)

Inicialmente as garrafas do tipo *long neck* de cor verde foram coletadas em restaurantes e residências da cidade de Lajeado - RS. Então, passaram por higienização, processo que englobou a retirada dos rótulos, que, se plásticos, necessitavam de solvente para retirada da cola sobre a garrafa, e por lavagem com detergente neutro. Por fim, as garrafas foram dispostas com o bocal para baixo para secagem natural. Após a higienização, foi obtido o resultado apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Garrafa *long neck* após higienização



Fonte: Da Autora (2020)

As garrafas foram quebradas manualmente com o auxílio de uma marreta e então passadas por um britador de mandíbula para que se obtivesse o material apresentado na Figura 5. Este processo foi realizado para que o material apresentasse dimensões menores ao ser levado ao moinho de bolas, causando a redução do tempo de moagem.

Figura 5 – Vidro previamente quebrado



Fonte: Da Autora (2020)

O material apresentado na Figura 5 foi levado ao moinho mecânico de bolas, sendo que de modo empírico utilizou-se aproximadamente um quilograma (kg) de vidro, com 66 esferas de aço de 112 g de massa cada, este foi submetido a diferentes velocidades (em rotações por minuto (rpm) e número de rotações, conforme apresentado no Quadro 1. Estas variantes foram ajustadas até que na tentativa 06 obteve-se um resultado considerado adequado para a pesquisa.

Quadro 1 – Análise da moagem

Tentativa	Número de voltas	Velocidade (rpm)	Análise visual
01	500	90	Material moído de forma grosseira
02	1.000	90	Material com dimensão maior que 4,75 mm
03	primeiramente 1.000 voltas e após 500	primeiramente 90 rpm e após 45 rpm	Material com granulometria bem variável. Passível de peneiramento
04	primeiramente 500 voltas e após 500	primeiramente 45 rpm e após 35 rpm	Material com granulometria mais uniforme. Passível de peneiramento
05	500	30	Material com quantidade considerável de finos, mas com algumas partículas maiores de 4,75 mm
06	750	40	Material com quantidade considerável de finos e com menor quantidade de partículas maiores de 4,75 mm

Fonte: Da Autora (2020)

A tentativa de número 06 foi a que resultou em uma granulometria próxima da desejável, conforme apresentado na Figura 6, então este material foi submetido ao peneiramento.

Figura 6 – Vidro moído



Fonte: Da Autora (2020)

No peneiramento foram utilizadas as peneiras da série normal, iniciando pela malha de 9,5 milímetros (mm), sendo o material retido nesta peneira encaminhado novamente para o moinho de bolas por 500 voltas a 40 rpm. O valor de $2/3$ das rotações da tentativa 06, foi definido pois o material já apresentava dimensões menores que as iniciais, sendo que, de forma empírica, como anteriormente, foi o que resultou em partículas de dimensões mais uniformes. O peneiramento prosseguiu com as peneiras de abertura 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm .

Para definir a quantidade necessária de material de cada granulometria foi utilizada a NBR 7211 (ABNT, 2009) que estabelece os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo, destes foi adotada a zona ótima do limite inferior e a quantidade retida em cada peneira foi definida tendo como base a necessidade de, aproximadamente, 20 kg de vidro na distribuição granulométrica desejada conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Granulometria e quantidades

Peneira	Retida (%)	Retida acumulada (%) conforme NBR 7211 (ABNT, 2009)	Massa retida no peneiramento (g)
4,75 mm	0	0	0
2,36 mm	10	10	2.000
1,18 mm	10	20	2.000
600 µm	15	35	3.000
300 µm	30	65	6.000
150 µm	25	90	5.000
fundo	10	100	2.000

Fonte: Da Autora (2020)

Após peneiramento, até atingir a quantidade definida na Tabela 1, o material foi misturado, obtendo a composição da Figura 7. Com a granulometria apropriada para uma areia, então os ensaios de caracterização do vidro foram iniciados.

Figura 7 – Vidro moído na granulometria desejada



Fonte: Da Autora (2020)

3.2.2 Caracterização dos materiais

Para caracterização do vidro moído do volume total de 20 kg realizou-se a separação conforme NM 27 (ABNT, 2001) Método “A”, em que a amostra é submetida ao separador mecânico até que se obtenha a quantidade de material necessária, que neste caso foram quatro

amostras de aproximadamente 500 gramas (g) cada. As amostras foram secas em estufa a 105 (± 5)°C e resfriadas em temperatura ambiente.

3.2.2.1 Análise granulométrica

Após a moagem foi definida a granulometria pela NBR NM 248 (ABNT, 2007), pois como o vidro teve que passar por diversos peneiramentos, sua granulometria poderia ser afetada. Assim, foi definida a massa da amostra, m1, a qual foi colocada sobre a peneira de 9,5 mm, seguida da peneira de abertura de malha 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm e o fundo, este conjunto foi submetido ao agitador mecânico por 15 minutos, conforme Figura 8.

Figura 8 – Conjunto de peneiras no agitador mecânico



Fonte: Da Autora (2020)

Após a agitação mecânica cada peneira foi agitada manualmente de forma individual com a tampa e o fundo. O material retido era separado, a peneira limpa e a massa do material registrada enquanto o passante retornava para a peneira seguinte, na qual o processo era repetido até atingir o fundo do conjunto de peneiras, na Figura 9 o material retido em cada peneira está separado e pode ser visualizado.

Figura 9 – Material retido em cada peneira



Fonte: Da Autora (2020)

O mesmo processo foi realizado com a segunda amostra, m2. Com os dados de massa coletados, foi elaborada a Tabela 2.

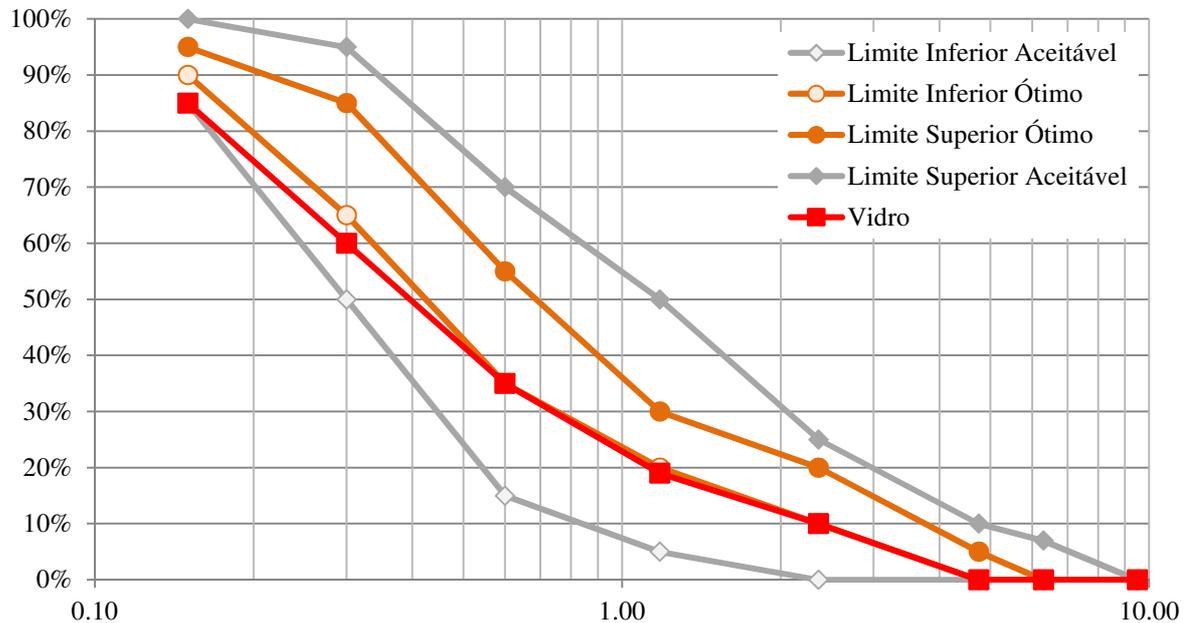
Tabela 2 – Granulometria e quantidades

Peneira	Amostra 01		Amostra 02		Retida Variações (%)	Média Retida (%)	Média retida acumulada (%)
	Massa retida (g)	Retida (%)	Massa retida (g)	Retida (%)			
4,75 mm	0	0,0	0	0,0	0	0	0
2,36 mm	69,7	10,1	53,9	9,4	0,7	10	10
1,18 mm	67,8	9,8	48,8	8,5	1,3	9	19
600 μ m	103,3	14,9	105,3	18,3	3,4	17	35
300 μ m	168	24,3	145,7	25,3	1	25	60
150 μ m	174,9	25,3	134	23,3	2	24	85
fundo	107	15,5	86,6	15	0,4	15	100

Fonte: Da Autora (2020)

A dimensão máxima característica (DMC) é de 4,75 mm e o módulo de finura 2,09. A curva granulométrica do vidro comparada aos limites aceitáveis e ótimos, inferiores e superiores definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para areia estão expressas no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Curva granulométrica do vidro comparada aos limites



Fonte: Da Autora (2020)

A granulometria do vidro está entre a zona ótima e aceitável do limite inferior estipulado pela NBR 7211 (ABNT, 2009), atingindo a granulometria desejada para este ensaio.

A areia utilizada também teve sua composição granulométrica ensaiada conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2007), os resultados são apresentados na Tabela 3.

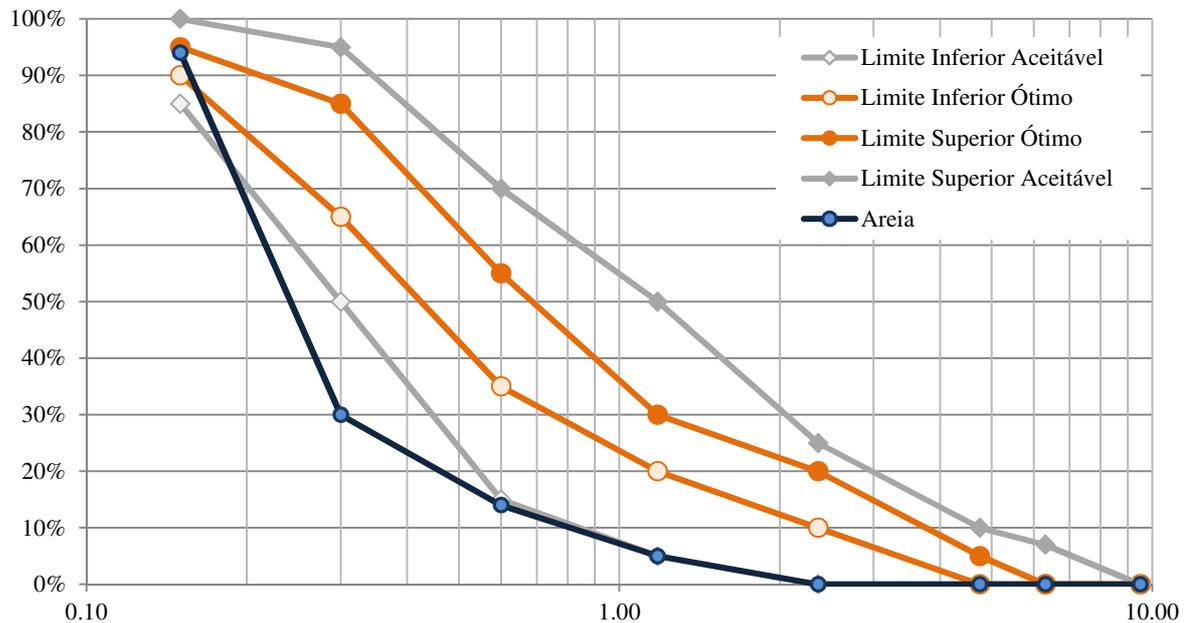
Tabela 3 – Granulometria da areia

Peneira	Retida (%)	Retida acumulada (%)
4,75 mm	0	0
2,36 mm	0	0
1,18 mm	5	5
600 µm	9	14
300 µm	16	30
150 µm	64	94
fundo	6	100

Fonte: Da Autora (2020)

Por meio da Tabela 3 foi possível definir o DMC como 2,36 mm e o módulo de finura como 1,42. E ainda, elaborar o Gráfico 2 que apresenta a comparação da curva granulométrica da areia utilizada com os limites aceitáveis e ótimos, inferiores e superiores definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para areia.

Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia comparada aos limites

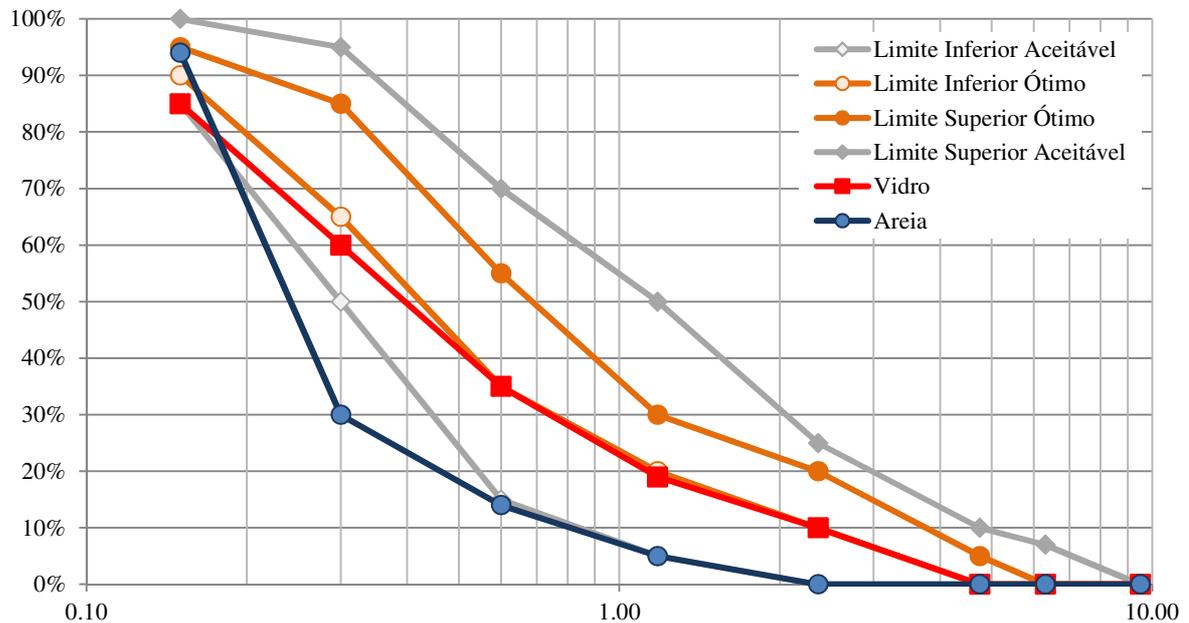


Fonte: Da Autora (2020)

A curva granulométrica da areia utilizada está abaixo da curva granulométrica do limite inferior aceitável por norma, mas, entre as areias disponíveis para utilização, a areia média era a que estava mais próxima do ideal, tendo em vista que essa areia era a areia com maior DMC disponibilizada pelo laboratório.

No Gráfico 3 é possível visualizar a granulometria da areia e do vidro moído em um mesmo gráfico, no qual o vidro apresenta uma curva granulométrica mais próxima do limite inferior ótimo que a curva da areia.

Gráfico 3 – Curva granulométrica da areia e do vidro comparada aos limites



Fonte: Da Autora (2020)

O Gráfico 3 demonstra que a areia utilizada apresenta maior teor de finos que o vidro moído tendo em vista o deslocamento da curva granulométrica da areia para a esquerda.

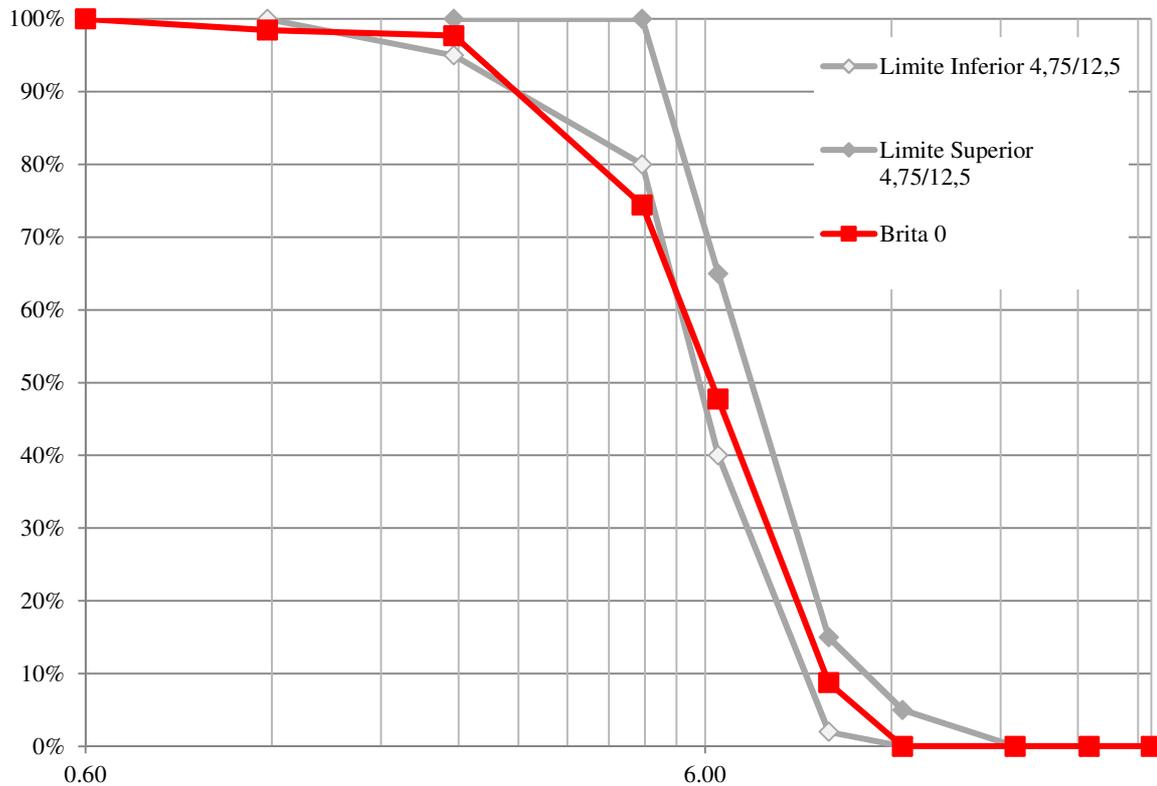
A brita teve a granulometria foi definida conforme NM 248 (ABNT, 2007) e seus resultados são apresentados na Tabela 4, bem como no Gráfico 4 que apresenta a granulometria da brita comparada à zona granulométrica 4,75/12,5.

Tabela 4 – Granulometria da brita

Peneira	Brita 0	
	Retida (%)	Retida acumulada (%)
12,50 mm	0	0
9,50 mm	9	9
6,30 mm	39	48
4,75 mm	27	75
2,36 mm	23	98
1,18 mm	1	99
600 µm	0	99
300 µm	0	99
150 µm	0	99
fundo	1	100

Fonte: Da Autora (2020)

Gráfico 4 – Curva granulométrica da brita 0 comparada à zona granulométrica 4,75/12,5



Fonte: Da Autora (2020)

A curva granulométrica apresentada no Gráfico 4 indica que a brita 0 utilizada apresenta maior percentual de finos que a zona granulométrica de menor dimensão de agregado graúdo da NBR 7211 (ABNT, 2009) e apresenta módulo de finura de 5,78.

3.2.2.2 Massa unitária

A massa unitária do vidro foi definida por meio da NBR NM 45 (ABNT, 2006), entretanto o recipiente teve que ser adaptado, tendo em vista que o volume total do material não preenchia o recipiente de 10 dm³ e a amostra tomada para execução desse ensaio deve ser constituída de aproximadamente 150% da quantidade de material requerida para encher o recipiente. Assim foi adotado um recipiente cilíndrico de 3,23 dm³, com 152 mm de diâmetro interior e 178 mm de altura interior (molde cilíndrico de Proctor), os demais passos seguiram as definições da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

As três amostras de vidro eram constituídas cada uma de 150% do material requerido para encher o recipiente, foram secas em estufa a 105°C (com variação de 5°C) até constância da massa. O ensaio seguiu o “método C”, no qual a massa do recipiente vazio foi registrada e após o material foi despejado a 50 mm acima da borda superior do recipiente com o auxílio de

uma concha até o transbordamento do material, então a face superior foi nivelada e o entorno limpo, para que o conjunto fosse encaminhado a balança, o mesmo processo foi realizado com a segunda e terceira amostras. Na Figura 10 o recipiente preenchido com o vidro moído pode ser observado.

Figura 10 – Recipiente preenchido com vidro moído



Fonte: Da Autora (2020)

A Equação 1 foi aplicada nos dados de massa e volume coletados para encontrar a massa unitária do vidro moído.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (1)$$

Sendo:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (kg/m^3);

m_{ar} = massa do conjunto recipiente + agregado (kg);

m_r = massa do recipiente vazio (kg);

V = Volume do recipiente (m^3).

Com isso foi possível elaborar a Tabela 5 que apresenta as massas e volumes utilizados assim como o valor de massa unitária média de 1.436 kg/m^3 ou $1,425 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 5 – Massa unitária do vidro

Dados	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03
Massa do recipiente vazio (m_r) (Kg)	7,80	7,80	7,80
Massa do recipiente com vidro moído (m_{ar}) (Kg)	12,44	12,46	12,44
Volume do recipiente (V) (dm^3)	3,23	3,23	3,23
Massa unitária (ρ_{ap}) (Kg/m^3)	1.438,78	1.444,82	1.436,09
Massa unitária média (ρ_{ap}) (Kg/m^3)	1.425		

Fonte: Da Autora (2020)

3.2.2.3 Massa específica

E ainda, foi definida a massa específica do vidro conforme a NBR 9776 (ABNT, 1987), neste ensaio foi adicionado água ao frasco Chapman até atingir a marca de 200 cm^3 . Após o período de repouso, foram adicionados ao frasco 500 g do vidro moído seco. O frasco foi agitado para eliminação das bolhas de ar e a leitura do volume em cm^3 foi aferida no frasco. O ensaio foi reproduzido novamente conforme determinado em norma. Os valores estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 – Massa específica do vidro

Dados	Ensaio 01	Ensaio 02
Massa do vidro (g)	500	500
Volume de água (cm^3)	200	200
Volume ocupado pelo conjunto água e vidro moído (L) (cm^3)	396	397
Massa específica (γ) (g/cm^3)	2,551	2,538
Massa específica média (γ) (g/cm^3)	2,545	

Fonte: Da Autora (2020)

Portanto, foi obtido o valor de massa específica de $2,545 \text{ g/cm}^3$ para o vidro moído. A escolha pela utilização do ensaio da NBR 9776 (ABNT, 1987) frente à norma vigente NBR NM 52 (ABNT, 2009) levou em consideração que a NM 52, foi elaborada especificamente para o material natural, pois leva em consideração um comportamento deste perante uma condição específica de saturação, dificilmente visualizada em outro material.

3.2.3 Dosagem

Para dosagem do concreto autoadensável foi utilizado o método Tutikian, assim a dosagem iniciou com a elaboração do diagrama de dosagem de um concreto convencional elaborada segundo o método IPT/EPUSP.

Inicialmente selecionou-se os materiais que foram os descritos na caracterização, então o teor de argamassa foi definido utilizando a Equação 2.

$$\alpha (\%) = \frac{(I+\square)}{(I+\square)}.100 \quad (2)$$

Sendo:

\square = teor de argamassa (%);

$m = a + p$

a = relação agregado miúdo seco/aglomerantes em massa (kg/kg);

p = relação agregado graúdo seco/aglomerantes em massa (kg/kg);

m = relação agregado secos/aglomerantes em massa (kg/kg).

O valor definido para o teor de argamassa foi de 51% e os traços (pobre, intermediário e rico) estão expressos na Tabela 7.

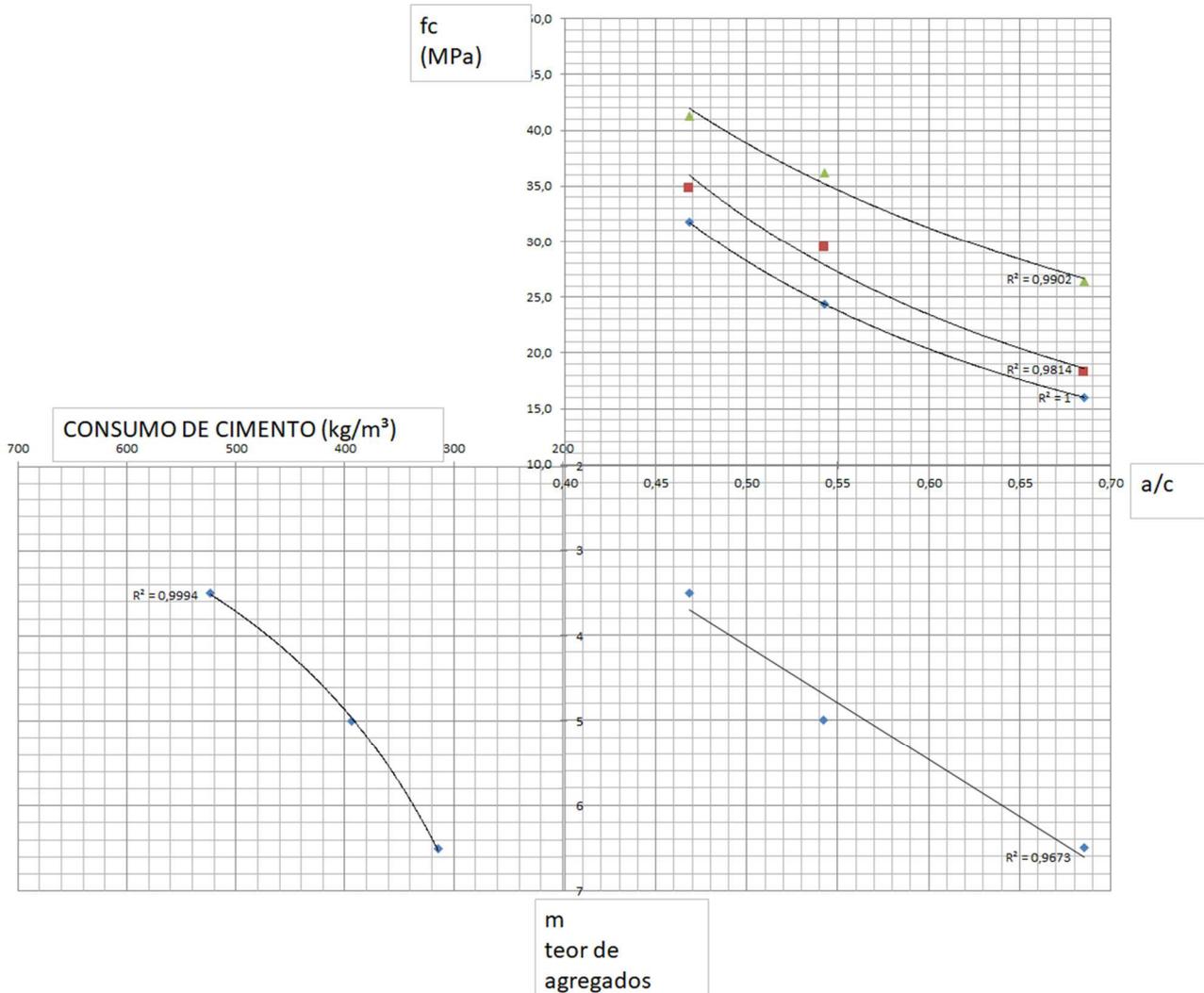
Tabela 7 – Traço pobre, intermediário e rico

Traço	Cimento	Areia (a)	Brita (p)	m (a+p)	a/c
I	1	2,83	2,21	6,5	0,69
II	1	2,06	2,94	5,0	0,54
III	1	1,30	2,21	3,5	0,47

Fonte: Da Autora (2020)

Por fim, para dosagem do concreto convencional foi elaborado o diagrama de dosagem conforme apresentado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Curvas de dosagens



Fonte: Da Autora (2020).

Entre os três traços definidos o escolhido para dosagem Tutikian foi o traço rico que apresenta 41,3 MPa aos 28 dias, pois é o que apresenta maior quantidade de finos tendo em vista o maior consumo de cimento, fator importante para o CAA, o traço rico convertido em concreto pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 – Concreto com traço referência rico



Fonte: Da Autora (2020)

No quarto passo foi adicionado superplastificante (SP) ao traço referência na ordem de 0,18% em relação a massa de cimento, sendo a primeira adição de 25 g, na qual não se obteve um concreto com aspecto fluído. A segunda adição, somando 40 g de superplastificante apresentou, na análise visual, leve segregação, assim, optou-se por partir ao quinto passo. No quinto passo foi adicionado sílica ativa na proporção de 5% em relação à massa inicial de cimento. Os passos quatro e cinco foram realizados simultaneamente conforme descrito no Quadro 2. A medida que se obtivesse uma classificação visual adequada ao CAA se realizava o ensaio de espalhamento do concreto no *slump flow test*. Se o resultado do ensaio fosse adequado, os demais ensaios de trabalhabilidade eram executados.

Quadro 2 – Dosagem pelo método Tutikian

Tentativa	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo (g)	Sílica Ativa (kg)	Análise visual/ espalhamento
01	13,56	17,560	29,9	6,35	25 (SP)	0	Consistência semelhante ao referência
02	13,56	17,560	29,9	6,35	40 (SP)	0	Leve segregação

(Continua)

(Conclusão)

Tentativa	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo (g)	Sílica Ativa (kg)	Análise visual/ espalhamento
03	13,56	18,438	31,395	6,6675	40 (SP)	0,678	Ensaio de espalhamento pelo <i>slump flow test</i> e o concreto não atingiu o espalhamento de 500 mm de diâmetro
04	13,56	18,438	31,395	6,6675	60 (SP)	0,678	Ocorreu segregação
05	13,56	19,316	32,89	6,985	60 (SP)	1,356	Ensaio de espalhamento pelo <i>slump flow test</i> e o concreto não atingiu o espalhamento desejado
06	13,56	20,194	34,385	7,3025	75 (SP)	2,034	Ensaio de espalhamento pelo <i>slump flow test</i> e o concreto não atingiu o espalhamento desejado
07	13,56	20,194	34,385	7,3025	80 (SP)	2,034	Ensaio de espalhamento pelo <i>slump flow test</i> e o concreto não atingiu o espalhamento desejado
08	13,56	20,194	34,385	7,3025	90 (SP) + 15 (P)	2,034	Ensaio de espalhamento pelo <i>slump flow test</i> , o concreto atingiu o espalhamento desejado, realizados os demais ensaios

Fonte: Da Autora (2020)

Na tentativa de número oito obteve-se um espalhamento maior que 550 mm, assim foram realizados os demais ensaios para comprovação das propriedades do CAA.

3.2.4 Concretagem e ensaios em estado fresco

As propriedades do CAA que devem ser comprovadas por meio de ensaios são a fluidez, viscosidade plástica, estabilidade visual e a habilidade passante, por meio dos ensaios, de espalhamento, t 500 e índice de estabilidade visual, conforme NBR 15823-2 (ABNT, 2017) e pelo método da caixa L, conforme NBR 15823-4 (ABNT, 2017). Na Figura 12 pode-se observar o concreto após o término do escoamento, no momento em que foi aferido o índice de estabilidade visual (IEV).

Figura 12 – CAA referência após término do escoamento



Fonte: Da Autora (2020).

Os resultados obtidos para o traço referência estão apresentados no Quadro 3, em que visualizamos que todos os ensaios realizados apresentaram resultados classificados pela NBR 15823 (ABNT, 2017), conforme apresentado na terceira coluna.

Quadro 3 – Ensaio estado fresco CAA referência

Ensaio	Resultado	Classificação
t500	1.5 s	VS 1
Espalhamento	578 mm	SF 1
Caixa L	0,81	PL 1
IEV	Sem evidência de segregação ou exsudação	IEV 0

Fonte: Da Autora (2020)

Ficou definida a relação a/c de 0,54 e a/agl (água/aglomerante) de 0,47. Com o traço do CAA referência definido foi possível calcular a quantidade de material para os demais traços com substituição de agregado miúdo por vidro moído em massa para execução dos CP's de ensaio necessários. A quantidade de material requerida para moldar 15 CP's (10 x 20) de cada traço, acrescida de 10 % de perda, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Quantidade de material

Traço	Cimento (kg)	Sílica Ativa (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Vidro (kg)	Superplastificante (g)	Plastificante (g)
Referência	13,56	2,03	20,19	34,38	7,31	0	90	15
10%	13,56	2,03	18,17	34,38	7,31	2,02	90	15
20 %	13,56	2,03	16,15	34,38	7,31	4,04	87,5	15
30 %	13,56	2,03	14,14	34,38	7,31	6,06	85	15

Fonte: Da Autora (2020)

Na quantidade de superplastificante requerida, foi ajustado o valor conforme consistência durante a concretagem, pois o valor foi diminuindo com o aumento da substituição de areia por vidro moído, tendo em vista os resultados dos ensaios apresentados na sequência.

Para cada traço foram realizados os ensaios para comprovação das propriedades do CAA conforme NBR 15823-2 (ABNT, 2017) e NBR 15823-4 (ABNT, 2017).

Foram moldados 15 CP's cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, conforme NBR 5738 (ABNT, 2016), para cada traço. Os CP's foram desenformados após 24 horas, identificados e permaneceram em câmara úmida, com temperatura ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) e umidade controlada ($\geq 95\%$), até os ensaios de estado endurecido conforme idades requeridas.

3.2.5 Ensaio em estado endurecido do concreto

Para execução dos ensaios do concreto em estado endurecido foram utilizadas as idades de 3, 7 e 28 dias, conforme requerido em cada ensaio.

3.2.5.1 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi executado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) com CP's moldados para idades de 3, 7 e 28 dias, utilizando a prensa de compressão Emic SSH300 classe I. O tipo de preparação das bases empregada aos CP's foi retífica.

3.2.5.2 Ensaio do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi definido conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017) metodologia "A". O ensaio foi realizado aos 28 dias do concreto. Os corpos de prova foram retificados para uniformidade das faces. A prensa utilizada é de classe I, do tipo servo-

hidráulica, O extensômetro é do tipo eletrônico, com resolução de 0,0001 mm, modelo EE08, marca INSTRON.

3.2.5.3 Ensaio de capilaridade

O ensaio de capilaridade foi executado conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012) com CP's cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com idade de 28 dias.

3.2.5.4 Ensaio de absorção e índice de vazios

A determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica foi realizada conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009) com CP's cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com idade de 28 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as discussões dos ensaios realizados com o concreto referência e com substituição de agregado miúdo por vidro moído nos diferentes teores propostos.

4.1 Dosagem e propriedades em estado fresco

O traço de concreto autoadensável definido como referência para as substituições de agregado fino por vidro moído foi de 1:1,3:2,21, com relação a/agl 0,47 e consumo de 0,66% de superplastificante e 0,11% de plastificante em massa em relação ao consumo de cimento. Sendo que 15 % do aglomerante utilizado foi sílica ativa.

Os resultados obtidos nos ensaios descritos na NBR 15823-2 (ABNT, 2017) e NBR 15823-4 (ABNT, 2017) são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Ensaio estado fresco CAA com substituição

Ensaio	10%		20%		30%	
	Resultado	Classificação	Resultado	Classificação	Resultado	Classificação
t500	1.8 s	VS 1	2.6 s	VS 2	2.11 s	VS 2
Espalhamento	955 mm	-	773 mm	SF 3	725 mm	SF 2
Caixa L	0,93	PL 1	0,91	PL 1	0,94	PL 1
IEV	Com evidência de segregação e auréola de argamassa > 10mm	IEV 3	Sem evidência de segregação ou exsudação	IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação	IEV 0

Fonte: Da Autora (2020)

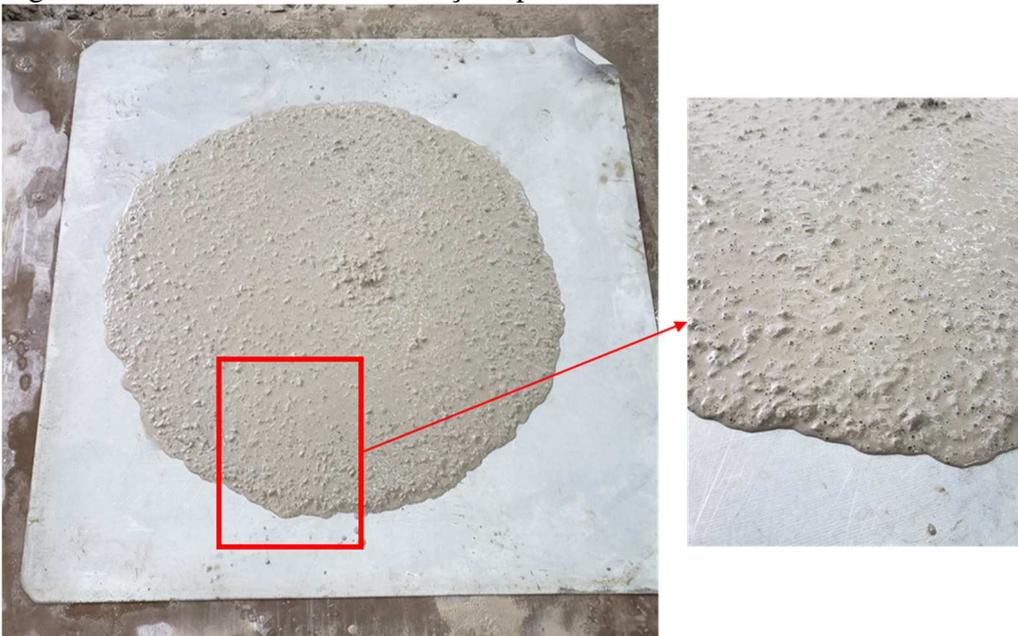
Para definição do IEV foi realizado o registro fotográfico do concreto após o término do escoamento. Conforme apresentado na Figura 13 para o concreto com 10% de substituição há evidência de segregação e auréola de argamassa maior 10mm. Na Figura 14 para o concreto com 20% de substituição e na Figura 15 para o concreto com 30% de substituição não há evidência de segregação nem exsudação, conforme será discutido na sequência.

Figura 13 – CAA 10% de substituição após término do escoamento



Fonte: Da Autora (2020).

Figura 14 – CAA 20% de substituição após término do escoamento



Fonte: Da Autora (2020).

Figura 15 – CAA 30% de substituição após término do escoamento



Fonte: Da Autora (2020).

Os resultados dos ensaios em estado fresco do CAA referência foram de 1,5 segundos para ensaio t500, classificação VS1; 578 mm para ensaio de espalhamento, classificação SF 1; 0,81 para ensaio da caixa L, classificação PL1; e IEV 0 para o índice de estabilidade visual pois não houve evidência de segregação ou exsudação. Por meio da análise dos resultados dos ensaios em conjunto com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) é possível concluir que o CAA referência apresenta as propriedades inerentes a este tipo de concreto e por meio de sua classificação (VS 1) apresenta viscosidade ideal para paredes-diafragma, pilares parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente, conforme seu espalhamento (SF 1) é ideal para lajes, estacas e certas fundações profundas e conforme sua habilidade passante (PL 1), ideal para lajes, painéis e elementos de fundação.

Assim como o CAA referência, o concreto com 10% de substituição também pode ser classificado como VS1, já o CAA com 20% e o com 30% de substituição são classificados como VS2 o que representa um aumento no tempo de espalhamento e assim da viscosidade plástica aparente, isto diminui a pressão sobre as fôrmas e melhora a resistência à segregação, enquanto que piora o acabamento e o preenchimento de cantos.

Quanto a habilidade passante, todos os traços foram classificados como PL1, assim são adequados para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm.

Além do concreto referência, o CAA com 20% e o com 30% de substituição, também foram classificados como IEV 0, enquanto que o concreto com 10% de substituição foi classificado como IEV 3, pois apresentou segregação e, ainda, apresentou espalhamento com diâmetro maior do que o classificado por norma. Essa discrepância pode ter ocorrido porque o agregado miúdo utilizado apresentava granulometria inferior a granulometria do vidro e neste primeiro traço a adição do aditivo não sofreu decréscimo. Ainda assim, conforme NBR 15823-1 (ABNT, 2017) em casos especiais pode ser especificado um limite maior que 850 mm para espalhamento, contanto que o agregado graúdo tenha DMC menor que 12,5 mm como ocorreu neste ensaio.

Com os resultados obtidos para a primeira substituição, o valor de aditivo foi reduzido com o aumento da substituição de agregado miúdo por vidro moído, mas ainda assim a classe de espalhamento variou entre os traços, resultando em SF 3 para o 20% e SF 2 para o 30%, o que demonstra uma variação na fluidez e da habilidade de preenchimento em fluxo livre do CAA, sendo estas propriedades crescentes com o aumento da numeração de classificação. Portanto, o 20% apresenta maior fluidez e habilidade de preenchimento em fluxo livre quando comparado aos demais traços.

4.2 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão são apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, conforme a idade de ensaio.

Tabela 9 – Ensaio de compressão aos 3 dias

Amostra	01					02				
	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Força máxima (kgf)	Resistência à compressão (MPa)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Força máxima (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
Ref. (MPa)	196	102	8171,28	29980,07	35,98	194	102	8171,28	28699,75	34,44
10% (MPa)	195	102	8171,28	28287,30	33,95	196	102	8171,28	30306,60	36,37
20% (MPa)	195	102	8171,28	28287,30	33,95	200	102	8171,28	25073,62	30,09
30% (MPa)	196	102	8171,28	28407,60	34,09	197	102	8171,28	27479,59	32,98

Fonte: Da Autora (2020)

Tabela 10 – Ensaio de compressão aos 7 dias

Amostra	01					02				
	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Força máxima (kgf)	Resistência à compressão (MPa)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Força máxima (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
Ref. (MPa)	194	102	8171,28	39311,79	47,18	192	102	8171,28	37558,87	45,08
10% (MPa)	195	102	8171,28	32918,79	39,51	195	102	8171,28	34688,89	41,63
20% (MPa)	193	102	8171,28	32695,38	39,24	193	102	8171,28	32050,92	38,47
30% (MPa)	193	102	8171,28	33382,80	40,06	195	102	8171,28	34955,27	41,95

Fonte: Da Autora (2020)

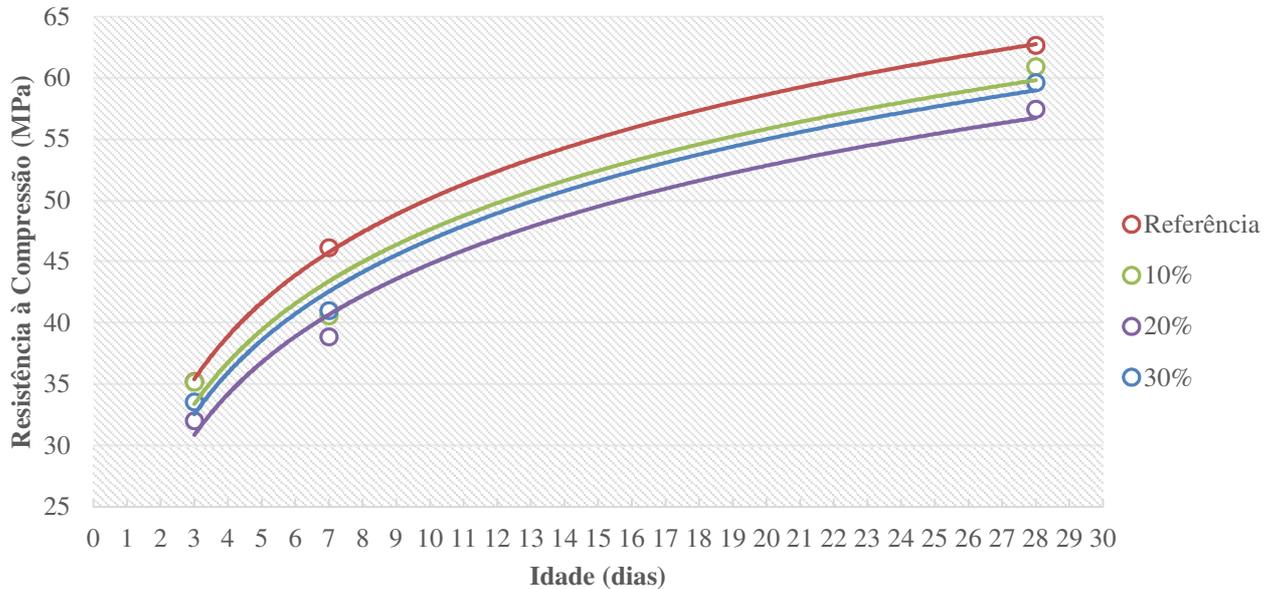
Tabela 11 – Ensaio de compressão aos 28 dias

Amostra	01					02				
	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Força máxima (kgf)	Resistência à compressão (MPa)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Força máxima (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
Ref. (MPa)	197	102	8171,28	53017,21	63,63	195	102	8171,28	51376	61,66
10% (MPa)	196	100	7853,98	46564,06	58,14	196	102	8171,28	53060,18	63,68
20% (MPa)	190	102	8171,28	47311,63	56,78	195	102	8171,28	48420,11	58,11
30% (MPa)	194	102	8171,28	49709,01	59,66	196	102	8171,28	49605,89	59,53

Fonte: Da Autora (2020)

A resistência à compressão apresentou menor valor médio para o teor de 20% de substituição para as idades de 3, 7 e 28 dias, ou seja, para todas as idades ensaiadas. Já o valor máximo entre as médias foi obtido para o traço referência para as idades de 3, 7 e 28 dias, conforme apresentado no Gráfico 6, em que as curvas são tendências logarítmicas.

Gráfico 6 – Resistência à compressão média com a idade.



Fonte: Da Autora (2020).

As maiores variações são observadas entre o concreto referência e o com 20% de substituição. É definido que aos 3 dias, a resistência do concreto com 20% de substituição é 9% menor que o concreto referência, aos 7 dias é 16% menor e aos 28 dias é 8% menor.

As curvas do Gráfico 6 apresentam as equações e valores de R^2 apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Equações e R^2 da resistência a compressão

Concreto	Equação	R^2
Referência	$y = 12,247\ln(x) + 21,964$	0,9995
10%	$y = 11,836\ln(x) + 20,387$	0,9663
20%	$y = 11,582\ln(x) + 18,156$	0,9851
30%	$y = 11,838\ln(x) + 19,549$	0,9894

Fonte: Da Autora (2020)

As variações de resistência entre os concretos aos 3 dias e aos 28 dias de idade não se mostraram significativas, conforme análise de variância (ANOVA). Já para os concretos com 7 dias de idade houve variação significativa entre as resistências à compressão conforme os diferentes teores de substituição de areia por vidro moído, conforme apresentado na Tabela 13.

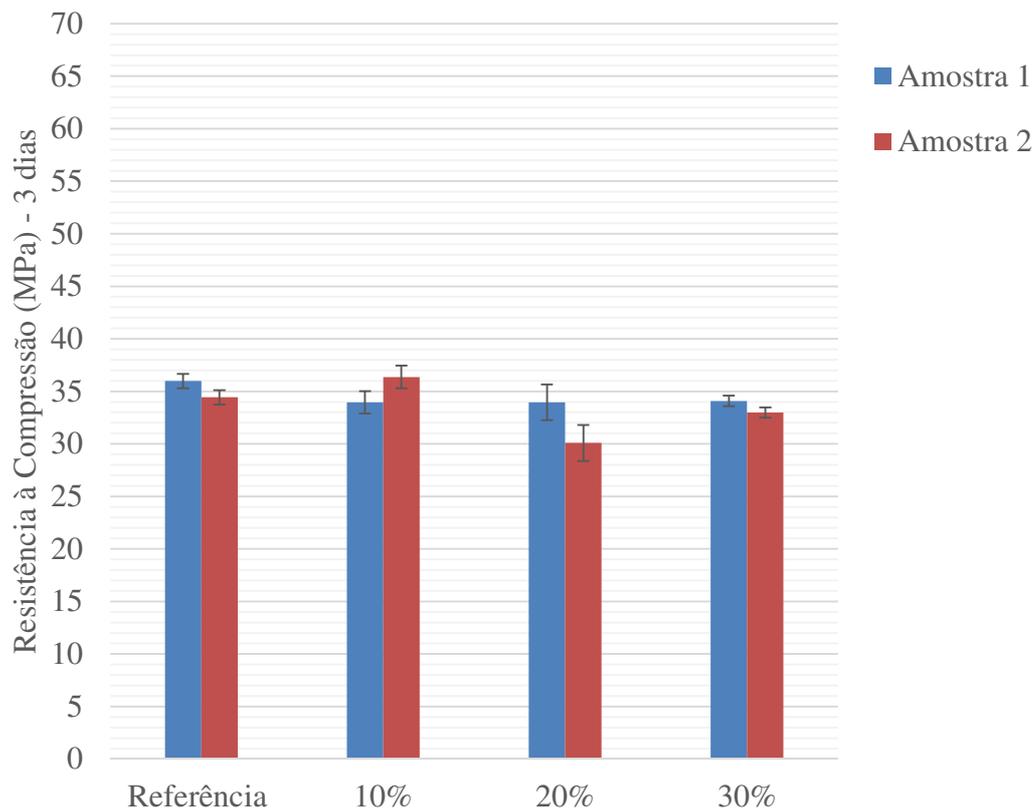
Tabela 13 – Análise de variância das resistências à compressão aos 7 dias de idade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	58,9289	3	19,6429667	12,02379	0,018049	6,591382
Dentro dos grupos	6,5347	4	1,633675			
Total	65,4636	7				

Fonte: Da Autora (2020)

Assim foi realizado o Teste Tukey, com o auxílio do software *Past*, constatando que os concretos com teor de 10 e 20% de substituição apresentaram diminuição significativa da resistência à compressão aos 7 dias de idade, enquanto que o concreto 30% não apresenta variação significativa. No Gráfico 7 são apresentados os resultados de resistência à compressão aos 3 dias e o desvio padrão calculado conforme NBR 5739 (ABNT, 2018).

Gráfico 7 – Resistência à compressão aos 3 dias

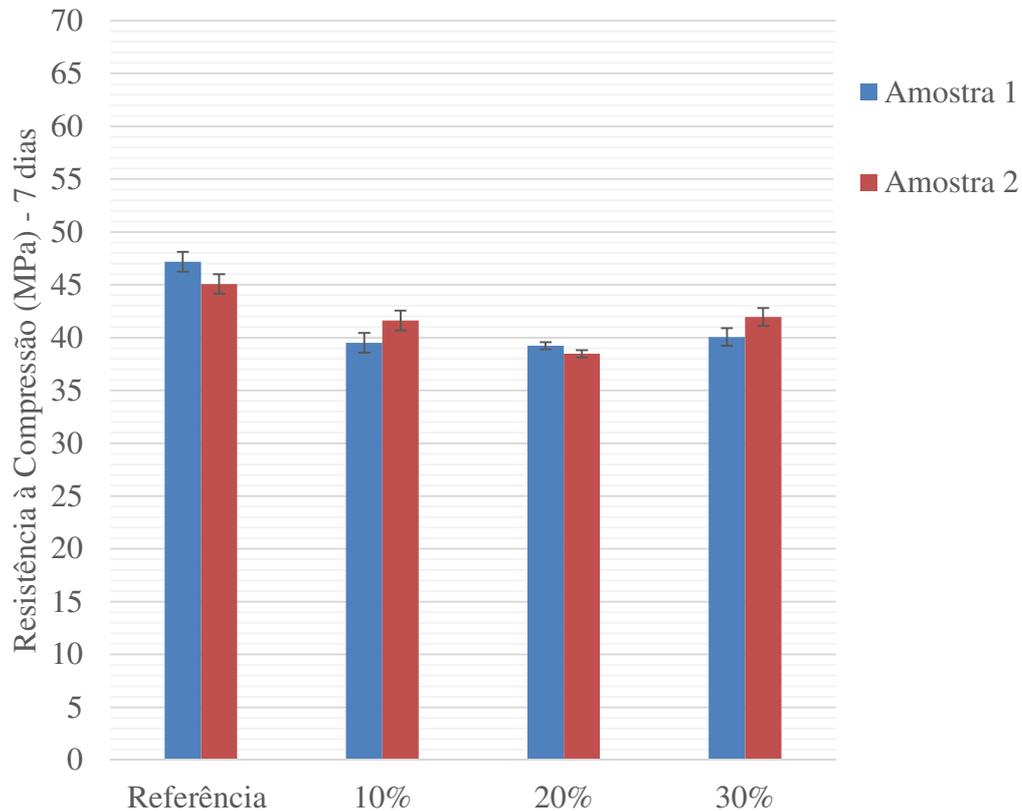


Fonte: Da Autora (2020).

Por meio do Gráfico 7 e do cálculo de variância, amplitude e coeficiente de variação é possível perceber que o traço de 20% foi o que apresentou maior variação entre os resultados das amostras 1 e 2, mas ainda assim apresentou coeficiente de variação razoável (nível 4), quando classificado conforme Anexo B da NBR 5739 (ABNT, 2018).

O CAA referência e o 10% de substituição apresentam resistências próximas na idade de 3 dias. Já para a idade de 7 dias, percebe-se que o traço referência apresenta a maior resistência conforme apresentado no Gráfico 8.

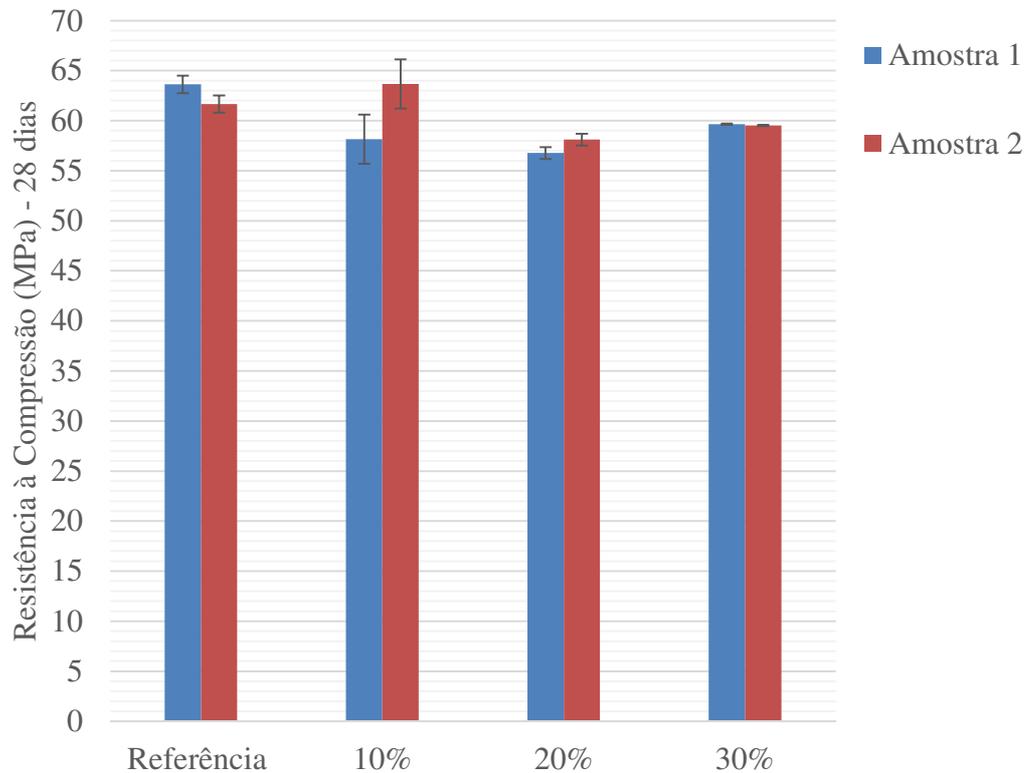
Gráfico 8 – Resistência à compressão aos 7 dias



Fonte: Da Autora (2020).

Por fim, para idade de 28 dias o concreto referência apresentou maior resistência à compressão conforme apresentado no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Da Autora (2020).

Por meio do Gráfico 9 e do cálculo de variância, amplitude e coeficiente de variação é possível perceber que o traço de 10% foi o que apresentou maior variação entre os resultados das amostras 1 e 2, ainda assim, a avaliação da eficiência das operações de ensaio por meio do coeficiente de variação, conforme Anexo B da NBR 5739 (ABNT, 2018), revelou um resultado bom (nível 3).

4.3 Capilaridade

Os resultados do ensaio de capilaridade são apresentados na Tabela 14.

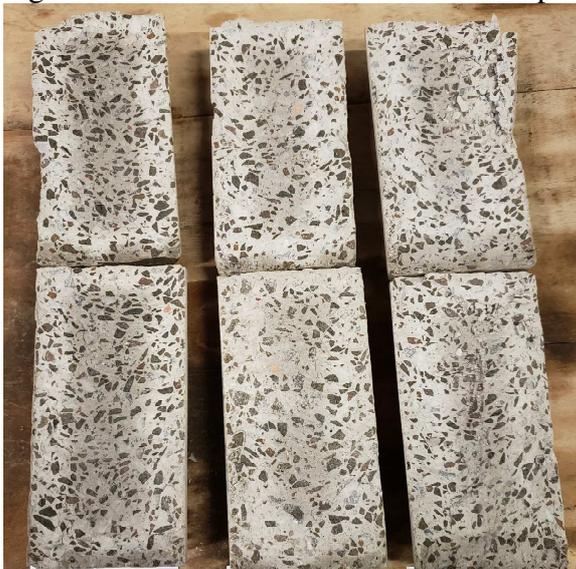
Tabela 14 – Ensaio de absorção por capilaridade

Amostra	Absorção de água por capilaridade após 3h (g/cm ²)	Absorção de água por capilaridade após 6h (g/cm ²)	Absorção de água por capilaridade após 24h (g/cm ²)	Absorção de água por capilaridade após 48h (g/cm ²)	Absorção de água por capilaridade após 72h (g/cm ²)	Altura da ascensão capilar máxima (cm)
Referência (MPa)	0,2445	0,5220	0,9015	1,1332	1,2860	3,200
	0,0637	0,2674	0,4533	0,5781	0,6825	1,400
	0,1732	0,4202	0,6952	0,8658	0,9957	1,900
10% (MPa)	0,1350	0,3769	0,6825	0,8633	1,0084	2,640
	0,0688	0,2546	0,4176	0,5348	0,6341	1,300
	0,4635	0,8072	1,2860	1,5152	1,6297	3,060
20% (MPa)	0,1171	0,3387	0,6188	0,7589	0,8658	1,160
	0,1120	0,3361	0,5908	0,7487	0,8683	1,500
	0,0713	0,2674	0,4609	0,6035	0,7181	1,095
30% (MPa)	0,1171	0,3285	0,6264	0,7970	0,9193	2,140
	0,1553	0,4100	0,7487	0,9371	1,0593	1,990
	0,1248	0,3540	0,6392	0,8149	0,9498	1,635

Fonte: Da Autora (2020).

Na Figura 16 está representada a distribuição interna da água absorvida pelos CP's referências após o ensaio de capilaridade, assim como, a Figura 17, representa os com 10% de substituição, a Figura 18, demonstra os com 20% de substituição, e a Figura 19, apresenta os CP's com 30% de substituição.

Figura 16 – Interior dos CP's referência após ensaios de capilaridade



Fonte: Da Autora (2020).

Ao comparar a Figura 17 com as Figuras 18 e 19 é possível perceber que no concreto 10% a água teve maior altura de ascensão, pois, a parte escura do concreto (úmida) é maior na parte que esteve em contato com a água.

Figura 17 – Interior dos CP's 10% de substituição após ensaios de capilaridade



Fonte: Da Autora (2020).

Figura 18 – Interior dos CP's com 20% de substituição após ensaios de capilaridade



Fonte: Da Autora (2020).

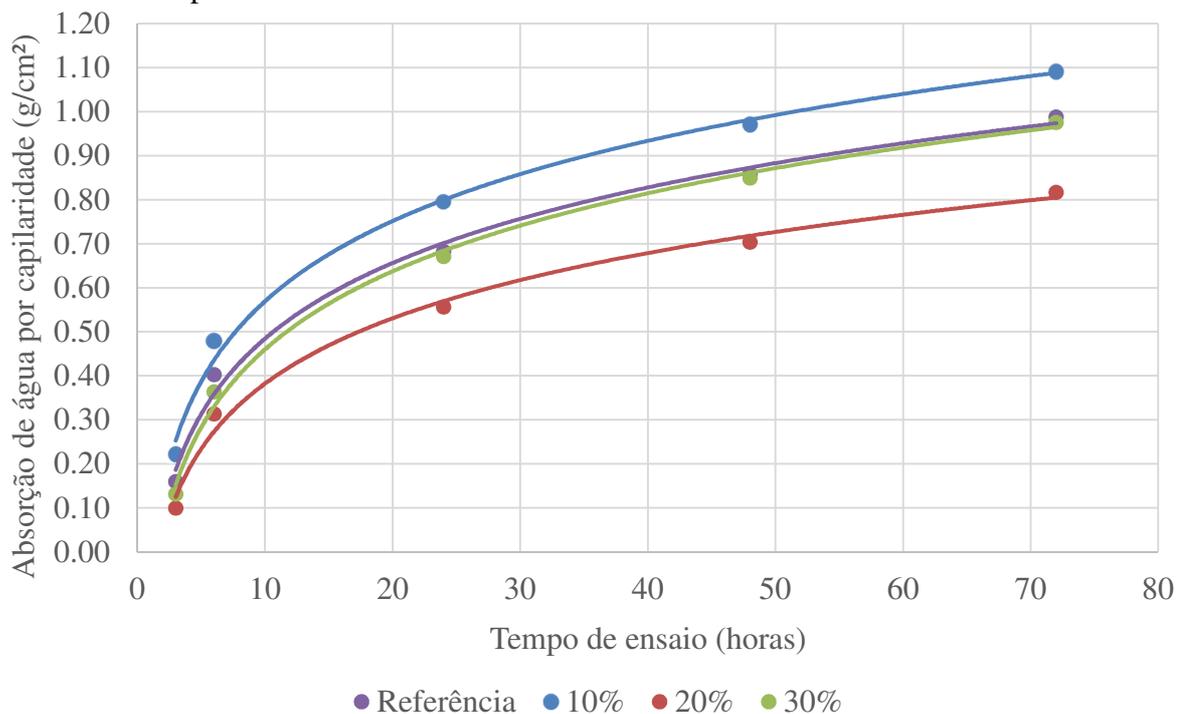
Figura 19 – Interior dos CP's com 30% de substituição após ensaios de capilaridade



Fonte: Da Autora (2020).

Os resultados da absorção por capilaridade mostraram que o CAA 10% é o que apresenta maior absorção por capilaridade, seguido do CAA referência e do traço com 30% de substituição, sendo o CAA com 20% de absorção o que apresentou menor absorção por capilaridade, estes dados podem ser observados no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Capilaridade aos 28 dias



Fonte: Da Autora (2020).

O ajuste das curvas do Gráfico 10 foi realizado por meio de função logarítmica, cujas fórmulas e valores de R^2 são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Equações e R^2 da absorção por capilaridade

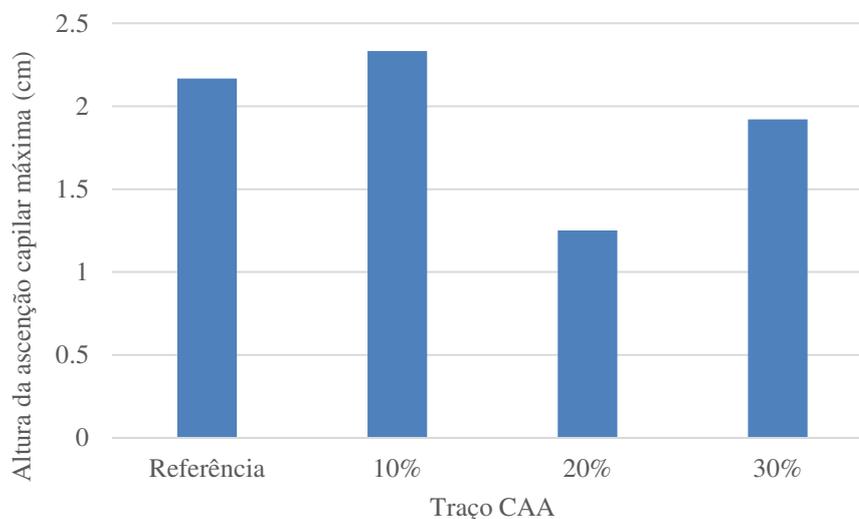
Concreto	Equação	R^2
Referência	$y = 0,2474\ln(x) - 0,0847$	0,9924
10%	$y = 0,2625\ln(x) - 0,0346$	0,994
20%	$y = 0,2138\ln(x) - 0,1095$	0,9917
30%	$y = 0,2555\ln(x) - 0,1276$	0,9958

Fonte: Da Autora (2020)

Por meio da análise das médias de absorção por capilaridade, nos diferentes intervalos de tempo aferidos durante o ensaio, é possível perceber que o valor máximo da absorção sempre foi encontrado para o CAA com 10 % de substituição e o mínimo para o concreto com 20% de substituição. Após realizar a análise de variância (ANOVA) é possível definir que a variação de absorção entre o CAA referência e os com substituição não se mostrou significativa.

A altura de ascensão capilar média máxima foi observada no concreto com 10% de substituição, com valor médio de 2,33 cm, enquanto que a altura de ascensão média mínima foi observada no concreto de 20%, com valor médio de 1,25 cm, conforme pode ser observado no Gráfico 11.

Gráfico 11 – Altura de ascensão capilar máxima



Fonte: Da Autora (2020).

A absorção interna de água se distribuiu por todo o CP no concreto referência, sendo evidente a coloração mais escura no centro, onde teve maior concentração de água, conforme Figura 20.

Figura 20 – Interior do CP referência após ensaios de capilaridade



Fonte: Da Autora (2020).

Nos demais concretos a água se concentrou na parte inferior conforme representado na Figura 21, em que os CP's com 10, 20 e 30% de substituição de agregado miúdo por vidro moído são apresentados concomitantemente.

Figura 21 – Interior dos CP's 10, 20 e 30% após ensaios de capilaridade



Fonte: Da Autora (2020).

4.4 Absorção média, índice de vazios e massa específica

Os dados obtidos para absorção média, índice de vazios e massa específica seca são apresentados na Tabela 16.

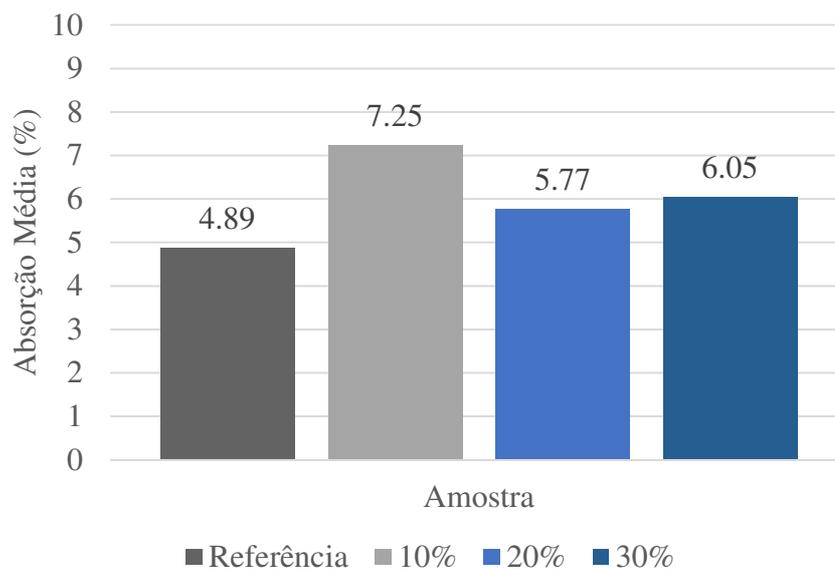
Tabela 16 – Resultados absorção e índice de vazios

Amostra	Massa Seca em Estufa - ms (g)	Massa aferida em balança hidrostática após ebulição - mi (g)	Massa com superfície seca após ebulição - m sat (g)	Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)
Referência (MPa)	3773,6	2301,5	3969,2	5,2	11,7
	3752,5	2302,9	3962,3	5,6	12,6
	3754,3	2247,8	3900,4	3,9	8,8
10% (MPa)	3645,2	2234,9	4026,0	10,4	21,3
	3722,4	2298,4	3941,6	5,9	13,3
	3652,5	2373,9	3850,1	5,4	13,4
20% (MPa)	3479,3	2062,7	3624,6	4,2	9,3
	3683,7	2283,8	3961,9	7,6	16,6
	3604,9	2189,9	3805,8	5,6	12,4
30% (MPa)	3679,1	2252,5	3909,3	6,3	13,9
	3752,7	2307,1	3982,4	6,1	13,7
	3842,2	2361,4	4064,4	5,8	13,0

Fonte: Da Autora (2020)

O CAA com 10% de substituição apresentou a maior absorção de água, com absorção média de 7,25%. Já o concreto referência apresentou a menor absorção média com 4,89%. Os resultados de absorção estão apresentados no Gráfico 12.

Gráfico 12 – Absorção média

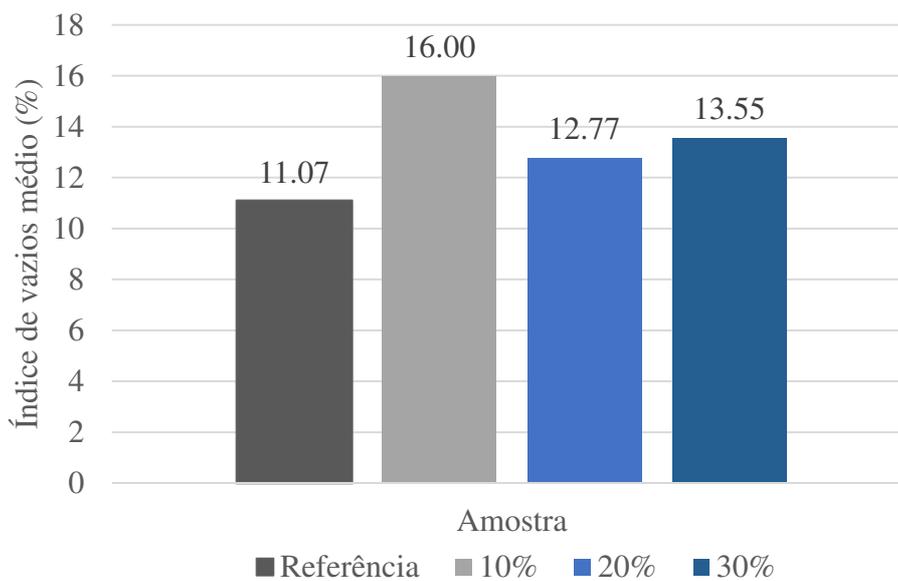


Fonte: Da Autora (2020).

A variação da absorção média entre os concretos analisados não se mostrou significativa, conforme análise de variância (ANOVA).

Assim como a absorção de água, o maior valor médio de índice de vazios foi observado para o CAA 10%, enquanto que o menor foi do concreto referência, conforme representado no Gráfico 13.

Gráfico 13 – Índice de vazios



Fonte: Da Autora (2020).

Após realizar a análise de variância (ANOVA) é possível definir que a variação de índice de vazios entre os concretos analisados não se mostrou significativa.

Para os valores de massa específica foram encontrados os valores da Tabela 17 como resultado, em que o concreto referência apresenta o maior valor, como era esperado, tendo em vista o menor índice de vazios médio.

Tabela 17 – Massa específica

Amostra	Identificação	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Massa específica da amostra seca média (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada média (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica real média (g/cm ³)
Referência (MPa)	A	2,26	2,2653	2,38	2,3760	2,56	2,5480
	B	2,26		2,39		2,59	
	C	2,27		2,36		2,49	

(Continua)

(Conclusão)

Amostra	Identificação	Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	Massa específica da amostra seca média (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada média (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica real média (g/cm ³)
10% (MPa)	A	2,04	2,2583	2,25	2,4182	2,58	2,6851
	B	2,27		2,4		2,61	
	C	2,47		2,61		2,86	
20% (MPa)	A	2,23	2,2179	2,32	2,3456	2,46	2,5450
	B	2,20		2,36		2,63	
	C	2,23		2,36		2,55	
30% (MPa)	A	2,22	2,2389	2,36	2,3744	2,58	2,5899
	B	2,24		2,38		2,60	
	C	2,26		2,39		2,59	

Fonte: Da Autora (2020)

4.5 Módulo de Elasticidade

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade à compressão dos concretos analisados estão apresentados na Tabela 18.

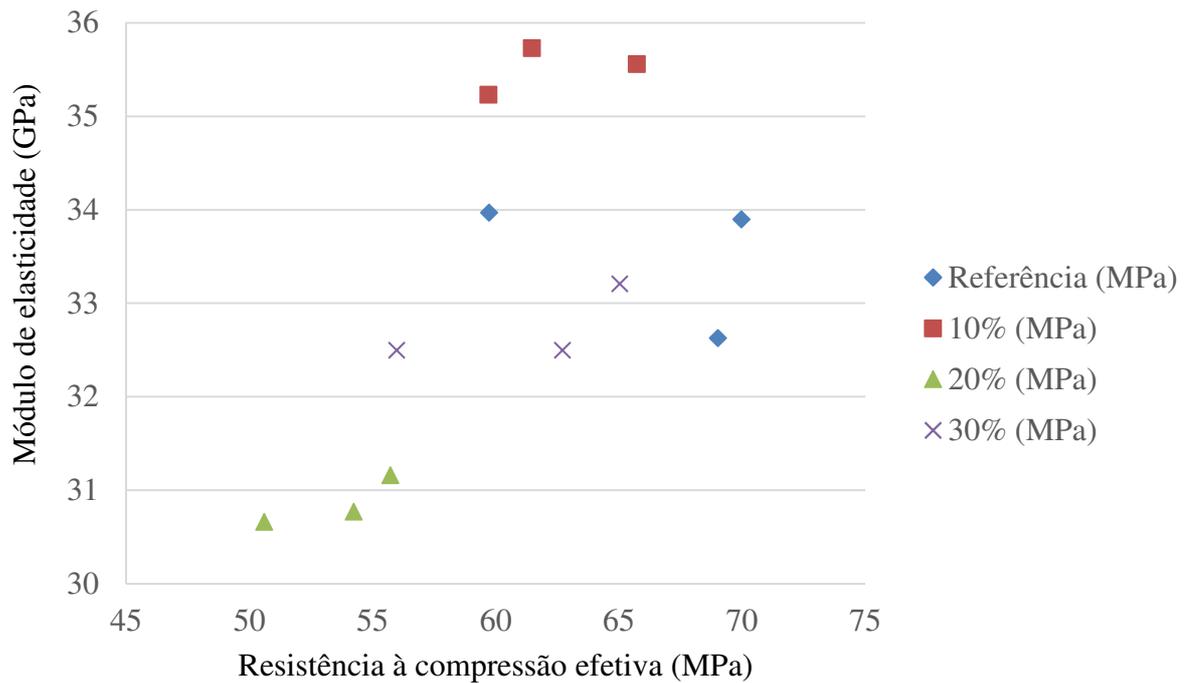
Tabela 18 – Módulo de elasticidade à compressão

Amostra	Ruptura prevista (kgf)	Área (mm ²)	Resistência compressão (MPa)	Resistência efetiva (MPa)	Tensão em 30% da Ruptura Prevista (MPa)	Deformação em 30% da Ruptura Prevista (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Referência (MPa)	52200	8171,28	62,65	69,02	18,79	0,06	32,63
	52200	8171,28	62,65	59,72	18,79	0,05	33,97
	52200	8171,28	62,65	69,97	18,79	0,06	33,90
10% (MPa)	49810	8171,28	59,78	61,46	17,93	0,05	35,73
	49810	8171,28	59,78	65,73	17,93	0,05	35,56
	49810	8171,28	59,78	59,70	17,93	0,05	35,23
20% (MPa)	47870	8171,28	57,45	54,22	17,24	0,06	30,77
	47870	8171,28	57,45	50,59	17,24	0,05	30,66
	47870	8171,28	57,45	55,71	17,24	0,06	31,16
30% (MPa)	49660	8171,28	59,60	65,03	17,88	0,05	33,21
	49660	8171,28	59,60	62,71	17,88	0,05	32,58
	49660	8171,28	59,60	55,98	17,88	0,06	32,50

Fonte: Da Autora (2020)

O CAA que apresentou maior módulo de elasticidade médio foi o com 10% de substituição, seguido do referência, 30% e com menor valor médio de módulo de elasticidade está o traço com 20% de substituição. Ao analisar o módulo de elasticidade em conjunto com a resistência à compressão efetiva aos 28 dias, o resultado superior do traço de 10% se destaca, conforme apresentado no Gráfico 14.

Gráfico 14 – Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade



Fonte: Da Autora (2020).

Após realizar a análise de variância (ANOVA) é possível definir que a variação de módulo de elasticidade entre os concretos analisados se mostrou significativa, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Análise de variância do módulo de elasticidade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	33,22817	3	11,07606	50,8893	1,48E-05	4,066181
Dentro dos grupos	1,7412	8	0,21765			
Total	34,96937	11				

Fonte: Da Autora (2020)

Portanto foi aplicado o Teste Tukey, com o auxílio do software *Past*, constatando que no CAA com teor de 10% de substituição houve aumento significativo do módulo de elasticidade, enquanto que, os concretos com 20 e 30% de substituição sofreram diminuição significativa.

5 CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados em conjunto com o referencial teórico foi possível concluir que é viável produzir concreto autoadensável com substituição parcial do agregado miúdo natural por vidro moído oriundo de garrafas *long neck* na cor verde, quando analisadas as propriedades físicas e mecânicas em estado fresco e endurecido.

Por meio do emprego do método de dosagem Tutikian foi possível elaborar um traço referência para as substituições, de areia por vidro moído, que mantivesse as características de autoadensabilidade, definido como 1:1,3:2,21, com relação a/agl 0,47 e consumo de 0,66% de superplastificante e 0,11% de plastificante em massa em relação ao consumo de cimento. Sendo que 15 % do aglomerante utilizado foi sílica ativa.

Ao analisar os trabalhos anteriores foi determinado o teor de substituição de 10, 20 e 30% em massa de agregado miúdo natural por vidro moído, tendo em vista os resultados de trabalhabilidade em estado fresco e as propriedades em estado endurecido do concreto.

Em estado fresco foi possível observar que o CAA com substituição de agregado natural por vidro moído apresentou as propriedades requeridas para o concreto autoadensável conforme NBR 15823-1 (ABNT, 2017), sendo que com o aumento da substituição de agregado natural por vidro moído foi necessário diminuir o percentual de superplastificante, possivelmente devido à granulometria da areia ser inferior a granulometria do vidro moído.

O teor de 20% de substituição foi o CAA que apresentou melhor classificação geral das propriedades em estado fresco, pois, apresentou maior espalhamento quando comparado ao teor

de 30%, e melhor índice de estabilidade visual quando comparado ao 10%, o que representa maior fluidez e habilidade de preenchimento em fluxo livre, quando comparado aos demais traços.

Quanto às propriedades físicas no estado endurecido, conclui-se que nenhuma variação de resultado de absorção média, absorção por capilaridade, altura de ascensão da água e índice de vazios se mostrou significativa, assim os resultados podem ser considerados equivalentes entre o concreto referência e os concretos com substituição.

E ainda, analisando as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade, foi possível concluir que a resistência à compressão apresentou menor valor médio para o teor de 20% de substituição para todas as idades ensaiadas e o valor mais elevado, entre as média, para o traço com 10% de substituição na idade de 3 dias, e no traço de referência para as idades de 7 e 28 dias.

As variações de resistência à compressão, para os concretos, aos 3 dias e aos 28 dias de idade, não são significativas, já para os concretos com 7 dias de idade houve variação significativa entre as resistências à compressão conforme os diferentes teores de substituição de areia por vidro moído, assim pode-se concluir que aos 7 dias de idade o concreto referência apresenta maior resistência à compressão que os concretos com teor de 10 e 20% de substituição, já o referência e o concreto com 30% de substituição, são equivalentes quando analisada a resistência à compressão aos 7 dias.

Já para o módulo de elasticidade o concreto com 10% de substituição apresentou resultado mais elevados frente ao concreto referência. Com o menor valor médio de módulo de elasticidade está o traço com 20% de substituição. Como ocorreu aumento significativo do módulo de elasticidade com 10% de substituição, enquanto que, os concretos com 20 e 30% de substituição apresentam módulo de elasticidade inferiores, conclui-se que, há uma redução dos valores com aumentos dos percentuais de substituição, o que pode limitar a aplicação do CAA com substituição, acima de 10%, em estruturas.

Assim, tendo em vista os teores de substituição empregados, é indicado o teor de substituição de 10%, pois apresenta maiores valores para resistência à compressão média e módulo de elasticidade média, enquanto que os valores de absorção e índice de vazios são iguais

aos demais concretos analisados. Para esse concreto recomenda-se maior cuidado com a desforma, tendo em vista a baixa resistência à compressão aos 7 dias.

Vale ressaltar, ainda, que o concreto com substituição proposto acarreta na reutilização de um resíduo que causaria um dano ambiental, se descartado de forma irregular, e evita a utilização de um recurso natural esgotável.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros a realização dos mesmos ensaios e mesmos teores de substituição, mas agora com agregado miúdo com granulometria de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), para verificar a variação das propriedades em estado fresco do concreto autoadensável. Outro estudo proposto, é a análise das reações álcali-sílica e pozolânicas, da incorporação de diferentes teores de adições de vidro moído oriundo de garrafas *long neck* em substituição da sílica ativa em concreto autoadensável.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Guilherme. **Obtenção e caracterização de vidro expandido a partir de vidro de para-brisa de carro**. 2014. 53 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto: Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

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, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10908**: Aditivos para argamassa e concreto: Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-1**: Concreto autoadensável : parte 1 : classificação, controle e recebimento no estado fresco. 2. ed. Rio de Janeiro, 2017.

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. 2. ed. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-3**: Concreto autoadensável : parte 3 : determinação da habilidade passante : método do anel de J. 2. ed. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-4**: Concreto autoadensável : parte 4 : determinação da habilidade passante : métodos da caixa L e da caixa U. 2. ed. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-5**: Concreto autoadensável : parte 5 : determinação da viscosidade : método do funil V. 2. ed. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto: parte 1: requisitos. 1. ed. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 27**: Agregados: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 52**: Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 53**: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2007.

ATERRO Sanitário de Lajeado tem área ampliada. **O Informativo do Vale**, Lajeado, 04 maio 2018. Disponível em: <<https://www.informativo.com.br/geral/aterro-sanitario-de-lajeado-tem-area-ampliada,273355.jhtml>>. Acesso em: 14 out. 2019.

BARTHOLOMEI, Márcio Bento. **Estudo de concreto auto-adensável com a utilização de materiais da região de manaus e resíduo de vidro como modificador de viscosidade**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção** - Vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2019. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636618/>>. Acesso em: 10 out. 2019.

CAVALCANTI, Diogo Jatobá de Holanda. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Estrutural, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CEMPRE (2019). Compromisso Empresarial Para Reciclagem. **Vidro**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>. Acesso em: 10 set. 2019.

COUTINHO, Bianca Serra. **Propriedades e comportamento estrutural do concreto auto-adensável**. 2011. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

HELENE, Paulo R. L.; NETO, Antonio A. M. **Módulo de elasticidade**: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. São Paulo: IBRACON, 2002.

GCP APPLIED TECHNOLOGIES. **Tec flow**. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132005000400003&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 26 out. 2020.

GOMES, Paulo César Correia; DE BARROS, Alexandre Rodrigues. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: PINI, 2009.

GOMES, Carlos Cabreira; PELISSER, Fernando. **Propriedades Mecânicas do Concreto Com Adição de Vidro Reciclado**. 2011. 14 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.

LÓPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P. de; BARBOSA NETO, E.. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 320, p.318-324, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132005000400003&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 11 out. 2019.

MAXIMO, Oneida Heiderick. **Desempenho térmico de compostos cimentícios produzidos com adição de micropartículas de resíduo de vidro**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais de Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J., **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. **Materiais de Construção** - 2 ed. São Paulo: Erica, 2016. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518749/cfi/0!/4/4@0.00:54.3>>. Acesso em: 08 out. 2019.

RIGHI, Débora; KÖHLER, Lucas; TABARELLI, Aline; KIRCHHOF, Larissa; LIMA, Rogério. **Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas**. 2012. Artigo apresentado na XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Disponível em: < <http://docplayer.com.br/26947425-Analise-de-concretos-produzidos-com-vidro-moido-quando-submetidos-a-elevadas-temperaturas.html>>. Acesso em: 8 set. 2017.

RECENA, Fernando A. Piazza. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 4. ed. Porto Alegre: EdiPucrs, 2017.

RODRIGUES, Luísa Araújo. **Estudo da utilização de resíduos de vidro em substituição de agregados no concreto: breve revisão bibliográfica**. 2018. 70 f. Monografia (Especialização) - Curso de Produção e Gestão do Ambiente Construído, Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE - SEMA. **Acompanhe o volume de resíduos recolhidos em nossa cidade**, 2019. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1jeUOKeHx1e3vTZ2wArkr1U-PVJJpQ6Sr/view>>. Acesso em: 14 out. 2019.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. apud RIGHI, Débora; KÖHLER, Lucas; TABARELLI, Aline; KIRCHHOF, Larissa; LIMA, Rogério. **Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas**. 2012. Artigo apresentado na XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Disponível em: < <http://docplayer.com.br/26947425-Analise-de-concretos-produzidos-com-vidro-moido-quando-submetidos-a-elevadas-temperaturas.html>>. Acesso em: 8 set. 2017.

SILVEIRA, Nathália Cristina Gomes. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro na produção de argamassa**. 2016. 41 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

TINOCO, Vinícius Navarro Varela; SILVA JÚNIOR, Francisco Alves da. **Revisão literária do uso de vidro moído como substituto do agregado miúdo no concreto**. 2018. 9 f. Monografia (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Rio Grande do Norte, 2018.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VIAN, Daniel. **Análise do comportamento mecânico e durabilidade de concretos produzidos com vidro moído**. 2018. 97 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2018.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09