

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

VINÍCIUS RAMON KRAUSE

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Joinville

2021

VINÍCIUS RAMON KRAUSE

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Civil de
Infraestrutura do Centro Tecnológico de
Joinville da Universidade Federal de Santa
Catarina.

Orientador: Dr. Luciano Senff

Joinville
2021

VINÍCIUS RAMON KRAUSE

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 06 de maio de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Senff
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Daniel Hastenpflug
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Helena Ravache Samy Pereira
Centro Universitário Católica de Santa Catarina

Profa. Me. Talita Flores Dias
Universidade do Estado de Santa Catarina

Profa. Me. Vanessa Brusamarello
Universidade Anhanguera

Dedico este trabalho a Deus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser bondoso e misericordioso comigo todos os dias de minha caminhada.

À toda minha família, em especial meus pais Vildomir e Beatrís, e meu irmão Bernardo por sempre me incentivar, e dar o apoio necessário durante toda a minha vida acadêmica. Da mesma forma, aos meus avós Ursula e Adilson pelo apoio, carinho e pelos ensinamentos repassados.

A minha namorada Meise, por ter me auxiliado nos ensaios laboratoriais e no decorrer de toda minha graduação, pelo companheirismo e paciência comigo.

Ao professor orientador Luciano, que não apenas me auxiliou e incentivou nesse trabalho, mas em todos os momentos marcantes de minha graduação, atuando não apenas como professor, mas também como amigo.

Aos amigos que conheci durante minha passagem pela UFSC. Cito aqui aqueles que estiveram no dia a dia do laboratório comigo, Eduarda S., Maria Augusta M.C., Monique F.O., Murilo André R.S. e Victor Hugo D.A e o professor e amigo Daniel H. Agradeço a equipe de competição Infratec pela oportunidade de participar e poder contribuir com o crescimento da equipe e também o meu próprio desenvolvimento. Também a todos os companheiros da equipe pela amizade durante o tempo que estivemos juntos.

Aos colegas de profissão, Alak D.P., Maurício A.P. e Vando A. por me auxiliarem no dia a dia da fábrica e na execução desse trabalho. Em especial, ao Engenheiro Marco Antônio K., meu supervisor de estágio que incentivou meu crescimento profissional e pessoal.

Agradeço à empresa Perville Engenharia por ceder materiais e estrutura para o desenvolvimento desse trabalho.

À Mineração Infrasul por gentilmente ceder agregados para a execução dos traços experimentais.

Ao Paulo e o André da empresa Liga Química por disponibilizar aditivos indispensável para execução do concreto autoadensável.

Ao Marcio da empresa MM Fibras pelo fornecimento de fibras de aço.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo. Melhorias contínuas são necessárias a fim de otimizar, tanto a qualidade do material, quanto os processos envolvidos na produção. É nesse cenário que surge o concreto autoadensável, que por sua vez possui propriedades interessantes (alta fluidez e adensamento pelo peso próprio) para o setor produtivo, surgindo como uma alternativa quando produzido em ambientes controlados, como a indústria de pré-fabricados de concreto. Da mesma forma que os concretos convencionais, também esse possui ótimo desempenho quando submetidos à compressão, porém, baixa resistência mecânica a tração. Assim, o uso de macro fibras surge como alternativa para essa deficiência. Este trabalho apresenta os resultados das propriedades (espalhamento, viscosidade plástica aparente, habilidade passante pelo método do anel J e índices físicos no estado fresco e endurecido) de concretos autoadensáveis reforçados com fibras nos estados fresco e endurecido, para aplicação em indústria de pré-fabricados de concreto. Busca-se otimizar a resistência mecânica à tração na flexão minimizando o efeito às propriedades do estado fresco do concreto por meio de avaliações experimentais realizadas em laboratório até os 28 dias de idade. A presença das fibras no concreto não resultou em ganhos significativos na resistência à compressão. Apesar disso, apresentou acréscimo de 42 a 78% (formulações B10 e A40 respectivamente) de resistência na flexão. A massa específica do concreto apresentou baixa variação, enquanto o índice de vazios no estado endurecido apresentou redução de até 18% (formulação B40) quando comparado à amostra referência.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Fibras. Espalhamento. Resistência à tração na flexão.

ABSTRACT

Concrete is the most widely used building material in the world. Continuous improvements are necessary in order to optimize both the quality of the material and the processes involved in production. It is in this scenario that the self-compacting concrete appears, which in turn has interesting properties (high fluidity and densification by own weight) for the productive sector, emerging as an alternative when produced in controlled environments, such as the precast concrete industry. In the same way as conventional concretes, this one also has excellent performance when subjected to compression, however, with low mechanical tensile strength. Thus, the use of macro fibers appears as an alternative to this deficiency. This work presents the results of the properties (scattering, apparent plastic viscosity, passing ability by the J ring method and physical indices in the fresh and hardened state) of self-compacting concrete reinforced with fibers in the fresh and hardened states, for application in the prefabricated industry of concrete. Is sought to optimize the mechanical tensile strength in flexion, minimizing the effect on the properties of the fresh state of the concrete by means of experimental evaluations carried out in the laboratory until 28 days of age. The presence of fibers in concrete did not result in significant gains in compressive strength. Despite this, it showed an increase of 42% to 78% (formulations B10 and A40 respectively) of tensile strength in flexion. The specific gravity of the concrete presented a low variation, while the voids index in the hardened state showed a decrease of up to 18% (formulation B40) when compared to the reference sample.

Keywords: Self-compact concrete. Fibers. Scatering. Flexural tensile strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zona de transição do concreto.....	20
Figura 2 – Fibras de aço mais comuns utilizadas em CRF.....	24
Figura 3 – Concentrações de tensões em concretos sem reforço de fibras.....	26
Figura 4 – Concentração de tensões para um concreto simples (a) e com reforço de fibras (b)	27
Figura 5 – Influência do volume de fibras na matriz cimentícia.....	28
Figura 6 – Metodologia de pesquisa.....	29
Figura 7 - Materiais: (a) Cimento; (b) Filer; (c) Areia; (d) Brita 0	30
Figura 8– Relatório de ensaio do cimento CP V Itambé	31
Figura 9 – Certificado de análise do aditivo Liga Flow 47 P	32
Figura 10 – Conjunto de peneiras para determinação da distribuição granulométrica	33
Figura 11 – Determinação da massa específica do agregado miúdo pelo picnômetro.....	36
Figura 12 – Fibras a) MM 40 e b) MQ 58	39
Figura 13 – Mistura do concreto autoadensável com diferentes tipos e teores de fibras	41
Figura 14 – Moldagem dos corpos de prova	42
Figura 15 – Cura dos corpos de prova.....	43
Figura 16 – Determinação do espalhamento do concreto autoadensável com diferentes teores de adição de fibras de aço e polipropileno	44
Figura 17– Classes de espalhamento do concreto autoadensável.....	44
Figura 18 – Classes de índice de estabilidade visual sob fluxo livre	45
Figura 19– Classes de viscosidade plástica aparente sob fluxo livre	46
Figura 20 – Anel J para avaliação da habilidade passante	46
Figura 21 – Classes de habilidade passante pelo anel J sob fluxo livre	47
Figura 22 – Determinação de propriedades físicas do concreto autoadensável com diferentes teores de adição de fibras de aço e polipropileno pelo método gravimétrico.....	49
Figura 23 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão	50
Figura 24 – Ensaio de tração na flexão em corpos de prova prismáticos de concreto	51
Figura 25 – Espalhamento do concreto autoadensável variando a concentração de fibras de aço e poliméricas.....	58
Figura 26 – Estabilidade visual do concreto estável (a) instável (b) e altamente instável (c)..	61

Figura 27 – Verificação da habilidade passante pelo método do anel J do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e polipropileno	63
Figura 28 – Seção de corpo de prova rompido à compressão das formulações REF, A40 e B40	73
Figura 29 – Corpos de prova ensaiados a tração na flexão a) sem adição de fibras b) com adição de fibras	76
Figura 30 – Seção transversal REF.....	77
Figura 31 – Seção transversal da formulação A20.....	78
Figura 32 - Seção transversal da formulação A40.....	78
Figura 33 – Seção transversal da formulação B20	79
Figura 34 - Seção transversal da formulação B40.....	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo	54
Gráfico 2 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos	55
Gráfico 3 – Resultados dos espalhamentos do concreto autoadensável com diferentes teores de fibras de aço.....	59
Gráfico 4 – Resultados dos espalhamentos do concreto autoadensável com diferentes teores de fibras de polipropileno.....	60
Gráfico 5 – Resultados de viscosidade plástica aparente do concreto REF e com adição de fibras de aço em diferentes teores.....	62
Gráfico 6 – Resultados de viscosidade plástica aparente do concreto REF e com adição de fibras de polipropileno em diferentes teores.....	62
Gráfico 7 – Habilidade passante pelo método do anel J do concreto autoadensável com adição de fibras de aço em diferentes teores	64
Gráfico 8 - Habilidade passante pelo método do anel J do concreto autoadensável com adição de fibras de polipropileno em diferentes teores	64
Gráfico 9 – Massa específica aparente do concreto com fibras de aço em diferentes concentrações.....	66
Gráfico 10 - Massa específica aparente do concreto com fibras de polipropileno em diferentes concentrações.....	66
Gráfico 11 – Teor de ar incorporado ao concreto autoadensável com adição de fibras de aço em diferentes concentrações.....	67
Gráfico 12 - Teor de ar incorporado ao concreto autoadensável com adição de fibras de polipropileno em diferentes concentrações	67
Gráfico 13 – Relação entre massa específica aparente e teor de ar incorporado ao concreto autoadensável com fibras.....	68
Gráfico 14 – Absorção de água de concretos autoadensáveis com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações	69
Gráfico 15 – Índice de vazios de concretos autoadensáveis com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações	70
Gráfico 16 – Massa específica do concreto autoadensável nas condições seco e saturado com adição de fibras de aço ou polipropileno em diferentes teores.....	70

Gráfico 17 - Relação entre massa específica e índice de vazios em concretos autoadensáveis com adição de fibras em diferentes teores	71
Gráfico 18 – Resistência à compressão do concreto autoadensável com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações as 18 horas, 7 dias e 28 dias de cura	72
Gráfico 19 – Relação entre resistência à compressão e índice de vazios em concretos autoadensáveis com adição de fibras em diferentes teores.....	74
Gráfico 20 - Resistência mecânica a tração na flexão do concreto autoadensável com diferentes teores de fibra de aço	75
Gráfico 21 - Resistência mecânica a tração na flexão do concreto autoadensável com diferentes teores de fibra de polipropileno	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas da fibra MM 40.....	38
Tabela 2 – Propriedade físicas da fibra Barchip MQ 58	38
Tabela 3 – Dosagem de concreto referência.....	40
Tabela 4 – Formulações produzidas com diferentes teores de fibras de aço e de polipropileno	41
Tabela 5 – Módulo de finura e dimensão máxima característica do agregado graúdo	53
Tabela 6 - Módulo de finura, dimensão máxima característica e porcentagem de material pulverulento do agregado miúdo	54
Tabela 7 – Massa específica dos agregados miúdos (g/cm^3).....	56
Tabela 8 – Massa específica e absorção de água do agregado graúdo (g/cm^3)	57
Tabela 9 – Massa unitária dos agregados (g/cm^3)	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAA – Concreto autoadensável

CP V – Cimento Portland Classe 5 ARI de alta resistência inicial

CRF – Concreto reforçado com fibras

CAARF – Concreto autoadensável reforçado com fibras

REF – Concreto experimental de referência

t500 – tempo de escoamento do concreto até a marca de 500 mm

NBR – Norma Brasileira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. OBJETIVOS.....	19
1.1.1. Objetivo Geral.....	19
1.1.2. Objetivos Específicos.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1. CONCRETO.....	20
2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	21
2.3. FIBRAS.....	23
2.3.1. Fibras de aço.....	24
2.3.2. Fibras poliméricas.....	25
2.4. CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS.....	25
3. METODOLOGIA.....	29
3.1. ASPECTOS ANALISADOS.....	29
3.2. MATERIAIS.....	30
3.2.1. Cimento.....	31
3.2.2. Água.....	31
3.2.3. Aditivo.....	31
3.2.4. Agregados.....	32
3.2.4.1. Distribuição granulométrica.....	32
3.2.4.2. Massa específica do agregado miúdo.....	34
3.2.4.3. Massa específica do agregado graúdo.....	36
3.2.4.4. Massa unitária.....	37
3.2.5. Fibras.....	38
3.3. DOSAGEM DO CONCRETO.....	39
3.3.1. Mistura dos componentes.....	41
3.3.2. Moldagem e cura dos corpos de prova.....	42
3.4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	43
3.4.1. Espalhamento e índice de estabilidade visual.....	43
3.4.2. Tempo de escoamento.....	45
3.4.3. Habilidade passante.....	46

3.4.4. Determinação da massa específica aparente e do teor de ar do concreto no estado fresco	47
3.5. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	49
3.5.1. Resistência à compressão	49
3.5.2. Resistência a tração na flexão.....	50
3.6. ÍNDICES FÍSICOS DO CONCRETO ENDURECIDO	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	53
4.1.1. Distribuição granulométrica dos agregados	53
4.1.2. Determinação da massa específica do agregado miúdo	56
4.1.3. Massa específica do agregado graúdo.....	56
4.1.4. Massa unitária dos agregados	57
4.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS	57
4.2.1. Espalhamento, classe de estabilidade e classe de viscosidade plástica aparente	57
4.2.2. Habilidade passante pelo método do anel J do concreto autoadensável reforçado com fibras	63
4.2.3. Ensaio físicos no estado fresco	65
4.2.4. Índices físicos das amostras de concreto autoadensável aos 28 dias de cura	69
4.2.5. Propriedades mecânicas.....	71
4.2.5.1 Resistência à compressão axial.....	71
4.2.5.2. Resistência à tração na flexão.....	74
4.2.6. Dispersão das fibras na matriz do concreto	77
5. CONCLUSÃO	81
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos principais materiais aplicados em estruturas e é amplamente utilizado em todo o mundo. Uma solução para a obtenção de estruturas de concreto duráveis, independentemente da qualidade da construção, é o emprego de concreto autoadensável, que pode ser compactado em todos os cantos de uma fôrma, puramente por meio de seu próprio peso e sem a necessidade de compactação vibratória (AYDIN, 2007). É usado para facilitar e garantir o preenchimento adequado e bom desempenho estrutural de membros estruturais reforçados com grande taxa de armadura (UYSAL; YILMAZ, 2011).

No entanto, a estrutura heterogênea do concreto resulta em alguns efeitos indesejáveis, sendo uma desvantagem a estrutura complexa que resulta em muitas zonas de concentração de tensões internas (AYDIN, 2007). Nesse sentido, o conceito de usar fibras para melhorar o comportamento dos materiais de construção é antigo e intuitivo. Os exemplos incluem adicionar fibras de palha a tijolos de barro secos ao sol, feitos principalmente de argila, crina de cavalo em argilas e fibras de amianto em cerâmica, criando compostos com melhor desempenho (NAAMAN, 2018).

A utilização de fibras como adição no concreto tem como principal objetivo reduzir o surgimento de fissuras e diminuir suas aberturas, conseqüentemente aumentando a resistência à tração do compósito. Esse tipo de reforço ganhou muito interesse na indústria da construção e por parte de pesquisadores a partir da década de 60 (AMARAL; SILVA; MORAVIA, 2017). A trabalhabilidade do concreto recém-misturado é uma medida de sua capacidade de ser misturado, manuseado, transportado e consolidado, com uma perda mínima de homogeneidade e mínimo ar aprisionado (ACI 544.2R-89). Porém, a incorporação de fibras resulta em perda de fluidez, uma vez que as fibras se comportam como agregados lamelares, contendo elevada área superficial (ONGHERO, 2017).

Com base nisso, a otimização do percentual de adição de fibras que não altere as propriedades do estado fresco do concreto autoadensável e que potencialize as propriedades do estado endurecido é um valor que deve ser avaliado de forma experimental. O sucesso dos experimentos de espalhamento e habilidade passante, porém, depende da estabilidade do concreto e manutenção da fluidez com relação à referência. Sendo assim, a fluidez do concreto autoadensável não deve apresentar grandes variações, mesmo frente a adição de fibras, as quais causam diminuição do espalhamento.

A avaliação experimental do concreto autoadensável depende de uma metodologia de trabalho muito bem definida. Dessa forma, através do conhecimento das características físicas dos agregados é possível determinar uma composição que permita o adensamento adequado. Igualmente, as propriedades dispersantes do aditivo superplastificante devem ser avaliadas previamente, de forma a possibilitar uma fluidez adequada ao concreto, sem a ocorrência de exsudação ou segregação no compósito. Por fim, a produção dos corpos de prova de concreto autoadensável tem como finalidade o conhecimento das resistências mecânicas do concreto endurecido. A partir dessa metodologia de trabalho busca-se determinar valores de adição otimizados de fibras que possibilitem aumento da resistência mecânica do concreto autoadensável, sem grandes prejuízos ao espalhamento, índice de estabilidade, viscosidade e habilidade passante no estado fresco verificados no concreto de referência

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é a avaliação da influência das fibras no desempenho de concretos autoadensáveis reforçados com fibras, em relação à fluidez e resistência mecânica à compressão e tração na flexão.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar, de forma técnica, adições adequadas de fibras de aço e polipropileno como reforço, de forma a tornar a produção de concreto autoadensável classe SF3;
- Analisar valores de resistência mecânica a compressão e tração na flexão obtidos por experimentos, visando atender os requisitos da indústria de pré-fabricados de concreto;
- Distinguir propriedades do estado fresco (espalhamento, viscosidade plástica aparente e habilidade passante pelo método do anel J) que, quando combinadas, melhorem as propriedades do estado endurecido;
- Compor adições adequadas de fibras buscando potencializar o desempenho mecânico do concreto autoadensável às 18 horas, 7 dias e 28 dias de cura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

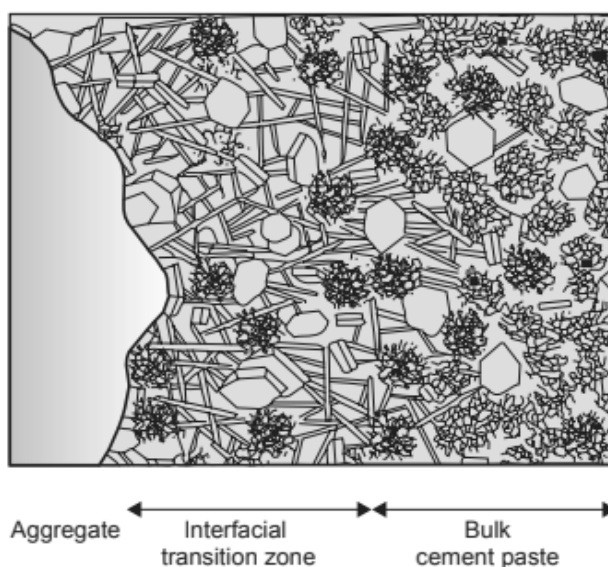
Neste capítulo serão abordadas informações a respeito do concreto autoadensável, bem como os materiais constituintes para sua produção. Também, serão apresentadas considerações a respeito de fibras de aço e o concreto reforçado com fibras.

2.1. CONCRETO

Inicialmente, o concreto era produzido somente com a mistura de cimento, agregados e água. Com o passar do tempo, com o objetivo de melhorar algumas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, quantidades muito pequenas de produtos químicos foram adicionadas às misturas. (NEVILLE, 2016).

O concreto como material, se caracteriza pela presença de três fases, os agregados graúdos e miúdos, uma matriz porosa que envolve os agregados e de uma região de transição (interface) entre as outras duas. Por apresentar maior quantidade de poros e formação de cristais maiores e direcionados no processo de hidratação, a interface torna-se uma região menos resistente e favorável ao surgimento e à propagação de fissuras (PAULON; KIRCHHEIM, 2011). A Figura 1 demonstra a região frágil do concreto.

Figura 1 – Zona de transição do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2005, p. 43).

As propriedades do concreto (como resistência, estabilidade dimensional e durabilidade) estão diretamente relacionadas à relação entre a microestrutura do compósito e a hidratação da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A partir do processo de hidratação do cimento, os produtos sólidos formados na microestrutura influenciam as propriedades mecânicas do compósito, uma vez que constituem uma região heterogênea e mais fraca. Pode-se notar que as várias fases não são nem uniformemente distribuídas nem uniformes no tamanho e na morfologia. Dessa forma, a baixa capacidade de resistência à tração do concreto está relacionada à facilidade que o material possui de permitir a propagação de fissuras quando exposto a este tipo de solicitação, principalmente na zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As matrizes cimentícias, apesar de apresentarem elevada capacidade de resistirem a esforços de compressão, não possuem essa mesma característica quando submetidas à esforços de tração, sendo essa cerca de 10% da resistência à compressão (RESENDE, 2003).

Assim, a resistência característica dos sólidos da pasta de cimento se deve principalmente às forças de van der Waals que geram atração, e consequente aderência entre os produtos sólidos. A distribuição dos vazios interfere no desempenho mecânico do material, diminuindo a resistência. A concentração de tensões e a subsequente ruptura, quando da aplicação de carga, começam nos grandes vazios capilares e nas microfissuras invariavelmente presentes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A resistência à compressão do concreto é, normalmente, a propriedade considerada no dimensionamento estrutural, mas, para alguns fins, a resistência à tração pode ser o objeto de interesse. A partir das discussões sobre a natureza da resistência do concreto, é de esperar que os dois tipos de resistência estejam intimamente relacionados. Isso realmente é verdade, mas não há uma proporcionalidade direta, já que a relação entre as duas resistências depende do nível geral de resistência do concreto. Em outras palavras, conforme a resistência à compressão aumenta, a resistência à tração também aumenta, embora a uma taxa decrescente (NEVILLE, 1997).

2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL

A norma brasileira NBR 15823-1:2017 define o concreto autoadensável como um concreto capaz de fluir, se autoadensar pelo peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutido (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de

segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento. De acordo com Vilanova, Gomez e Landsberger (2011), comparado com o concreto convencional, as misturas de concreto autoadensável (CAA) em geral tem maior teor de material pulverulento, menor relação entre água de dosagem e cimento, menor teor de agregado graúdo, menor dimensão do agregado graúdo e maior volume de pasta. Essas composições da mistura afetam o comportamento no estado fresco e também no estado endurecido.

Estudos para o desenvolvimento do concreto autoadensável, incluindo um estudo fundamental da funcionalidade do concreto, foram realizados por Maekawa e Ozawa na Universidade de Tóquio (MAEKAWA, 1999; OZAWA, 1989; OKAMURA, 1993). O método para alcançar o adensamento envolve não apenas alta deformabilidade da pasta ou argamassa, mas também resistência a segregação entre os agregados graúdos e a argamassa quando o concreto flui em uma área confinada de barras de aço (OKAMURA, 2003).

Ainda conforme Okamura (1993), uma alta viscosidade da pasta também é requerida para evitar o travamento dos agregados graúdos quando o concreto flui entre obstáculos. A alta deformabilidade pode ser alcançada apenas com o emprego de aditivos superplastificantes, mantendo a água de dosagem em um valor muito baixo. Devido aos seus requisitos reológicos, as adições de fíler (reativas e inertes) são comumente utilizadas na CAA para melhorar e manter a trabalhabilidade, bem como regular o teor de cimento e reduzir o calor de hidratação. Parte desse conteúdo de pó pode ser efetivamente substituído por adições minerais como cinzas volantes, escória de alto forno granulada moída, sílica ativa (NAGAMI; RAGHAVAN; SUKUMAR, 2008).

O adequado comportamento do CAA exige misturas com alta fluidez e suficiente viscosidade e coesão entre os componentes, a fim de garantir um fluxo contínuo e uniforme de toda a mistura, preenchendo toda a fôrma, sem exibir segregação e sem que se produza bloqueio entre as armaduras ou ao passar por algum obstáculo. Essas características definem as principais propriedades de auto adensabilidade do CAA, são elas: habilidade de preenchimento, habilidade de passar entre obstáculos e resistência à segregação; obviamente, esses parâmetros são diferentes dos utilizados nas caracterizações convencionais do concreto fresco (GOMES e BARROS, 2009)

Uma forma alternativa de avaliação da fluidez do concreto autoadensável, utilizando o princípio do ensaio de slump, é mensurar o diâmetro final do material espalhado de forma a estimar as forças de cisalhamento do escoamento. (GAO; FOURIE, 2015). O ensaio de espalhamento foi padronizado no Japão em 1990, e consiste em verificar se o concreto sob

determinada força, provocada pelo seu próprio peso, é capaz de se espalhar até atingir determinada dimensão em determinado tempo e uma dimensão limite (GOMES e BARROS, 2009).

É geralmente considerado que as propriedades mecânicas do CAA e CC são semelhantes. No entanto, a melhoria na microestrutura do CAA, que pode ser atribuído as características da pasta e da baixa porosidade na zona de transição entre agregado e pasta, além da menor proporção entre água e materiais secos, necessária frente ao uso de aditivos superplastificantes, favorece um sistema mais compacto e zona de transição homogênea, que por sua vez melhora a característica mecânica do concreto. Além disso, visto que não há necessidade de compactação externa em CAA, os problemas que podem resultar desse processo, tais como segregação ou formação de vazios, são evitados (VILANOVA et al, 2011). A qualidade das estruturas acabadas está diretamente ligada ao concreto no estado fresco, pois se determinam falhas neste estado (HELENE e TERZIAN, 1993)

2.3. FIBRAS

As fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a seção transversal. Nesse sentido, as fibras utilizadas como elementos de reforço são classificadas como macrofibras, enquanto as microfibras se configuram como elementos de matriz (FIGUEIREDO, 2011). O grande avanço que se observou nos concretos reforçados com fibras foi a possibilidade do material absorver energia até sua fratura, aumentando suas possibilidades de aproveitamento como material estrutural (CARNIO, 2009).

Ainda conforme Carnio (2009), vários tipos de fibras têm sido utilizadas, cada uma com suas características, as quais se diferem umas das outras pelo seu processo de fabricação, composição química e física, características mecânicas, resistência a meios agressivos e forma. Em geral, as propriedades de interesse das fibras são: concentração, geometria, orientação e distribuição. (AYDIN, 2007).

De acordo com Cáceres et al. (2015), dentre as características geométricas das fibras que afetam o desempenho do concreto reforçado, tem-se o diâmetro, o comprimento, e consequentemente o fator forma (função do diâmetro e comprimento da fibra). O fator forma é o resultado da razão entre o comprimento da fibra e seu diâmetro equivalente de seção transversal. Assim, o comprimento da fibra influencia principalmente na resistência do compósito. Apesar de adiarem a formação das fissuras, as fibras não impedem sua formação,

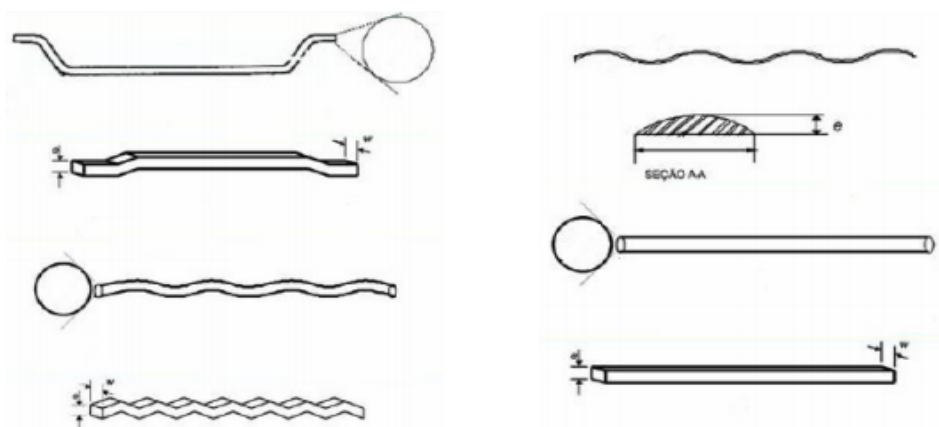
uma vez que a fissuração decorre das propriedades do compósito como característica praticamente inevitável (VASCONCELOS, 2012). Assim, quanto maior o fator forma das fibras utilizadas, melhor será o desempenho mecânico e o comportamento pós-fissuração do concreto (CARCERES et al.,2015).

O comprimento crítico de uma fibra pode ser definido como aquele que, quando da ocorrência de uma fissuração perpendicular à fibra e posicionada na região média do seu comprimento, proporciona uma tensão no seu centro igual à sua tensão de ruptura. Quando a fibra tem um comprimento menor que o crítico, a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento embutido na matriz não é suficiente para produzir uma tensão que supere a resistência da fibra (FIGUEIREDO, 2000).

2.3.1. Fibras de aço

As fibras de aço são elementos descontínuos produzidos com uma variada gama de formatos, dimensões e mesmo de tipos de aço (FIGUEIREDO, 2000). Conforme Carnio (2009), pode-se dizer que a maioria das fibras de aço propicia algum tipo de reforço ao concreto. As fibras de aço para uso em concreto têm comprimentos que variam entre 30 e 60 mm e diferentes formas de seção transversal, dependendo do processo de fabricação. Geralmente, essas fibras possuem conformações ao longo de todo o seu comprimento (fibras onduladas) ou somente nas extremidades (Figura 2).

Figura 2 – Fibras de aço mais comuns utilizadas em CRF



Fonte: Carnio (2009, p. 13).

A fibra de aço corrugada é produzida a partir do fio chato que sobra da produção da lã de aço. Esse é cortado no comprimento desejado, o qual varia de 25mm, a 50mm, e conformado longitudinalmente para se obter o formato corrugado. Isto tem por objetivo melhorar a aderência da fibra com a matriz (FIGUEIREDO, 2000).

2.3.2. Fibras poliméricas

As fibras poliméricas, quanto a sua geometria são divididas em microfibras e macrofibras. O uso de microfibras de polipropileno (diâmetro equivalente micrométrico e esbeltez próxima da unidade) já é comum no Brasil para ajudar a reduzir a fissuração por retração e controle de exsudação, entretanto, essas microfibras não têm função estrutural. Enquanto que as macrofibras de polipropileno (diâmetro equivalente milimétrico e esbeltez variando entre 20 e 100) são definidas como fibras estruturais e competem com as fibras aço. No Brasil o uso de fibras de polipropileno com função estrutural ainda é incipiente e a comercialização dessas fibras no Brasil ainda é pequena. Nos Estados Unidos e Europa o uso dessas fibras já é bastante difundido (MEDEIROS, 2012).

As fibras poliméricas podem ser divididas em sintéticas e naturais. As poliméricas sintéticas, ou simplesmente sintéticas, mais utilizadas são as fibras de polipropileno, poliéster, polietileno e poliamida. As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico denominado termoplástico (CARNIO, 2009).

Conforme Amaral, Silva e Moravia (2017), a adição de fibras de polipropileno melhora significativamente propriedades mecânicas do concreto, entre elas resistência à tração, tenacidade e resistência à abrasão. A resistência à compressão apresenta pouca ou nenhuma variação com adição de fibras poliméricas.

2.4. CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS

Os concretos especiais podem ser definidos como materiais de características específicas devido ao aprimoramento da tecnologia, que melhorou as deficiências do concreto tradicional ou incorporou propriedades não inerentes a este material, além de atender particularidades de cada obra, com produtos para serem empregados em locais/condições em que o concreto convencional não pode ser aplicado (FIGUEIREDO et al., 2004). Segundo Góis (2010) uma grande limitação do concreto convencional é a baixa resistência à tração, que é de

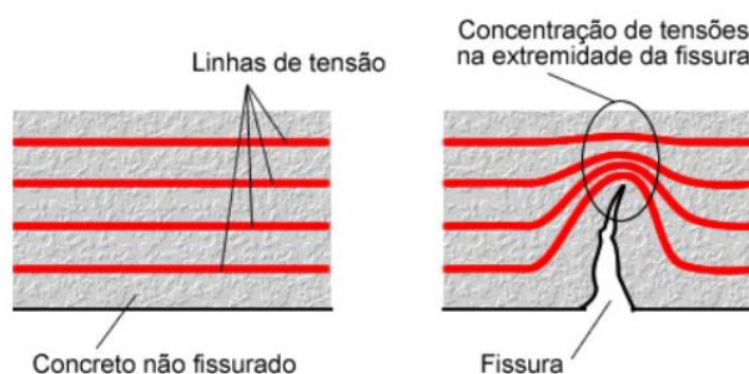
apenas 7 a 10% de sua resistência à compressão, sendo que o concreto reforçado com fibras (CRF) é uma das alternativas mais utilizadas para melhorar o desempenho à tração.

O concreto com adição de fibras se caracteriza como um compósito, sendo composto por elementos de matriz ou de reforço. Os elementos de matriz auxiliam no preenchimento dos vazios, estruturando o conjunto e restringindo a movimentação dos demais materiais, enquanto os elementos de reforço ressaltam as características mecânicas do concreto (LUCENA, 2017). Aumentar a fração de volume da fibra e usar uma matriz de alto desempenho pode melhorar drasticamente o desempenho do concreto reforçado com fibra, entretanto, é difícil obter maiores frações de volume com proporções convencionais de mistura de concreto. Assim, quando são necessárias frações de fibra de alto volume, as técnicas de mistura de CAA podem resultar em um concreto mais trabalhável (AYDIN, 2007).

Na dosagem de uma matriz de concreto para confecção de um compósito com fibras, deve-se ter atenção com a fluidez da mistura, uma vez que a introdução das fibras causa uma considerável perda de fluidez. O reforço com fibras descontínuas e aleatoriamente distribuídas na matriz cimentícia tem como expectativa o controle da abertura e da propagação de fissuras no concreto, alterando o seu comportamento mecânico após a ruptura da matriz, melhorando consideravelmente a capacidade de absorção de energia do concreto, diminuindo o nível de fragilidade do material (CARNIO, 2009).

Nesse sentido, Barros (2009) defende que a partir do surgimento de fissuras as linhas de tensões desviam sua trajetória para a localidade mais próxima que permita a propagação, ocasionando uma concentração de tensões na extremidade da fissura. Essa condição se mantém até que as tensões ultrapassem a resistência do concreto. A Figura 3 apresenta esse comportamento.

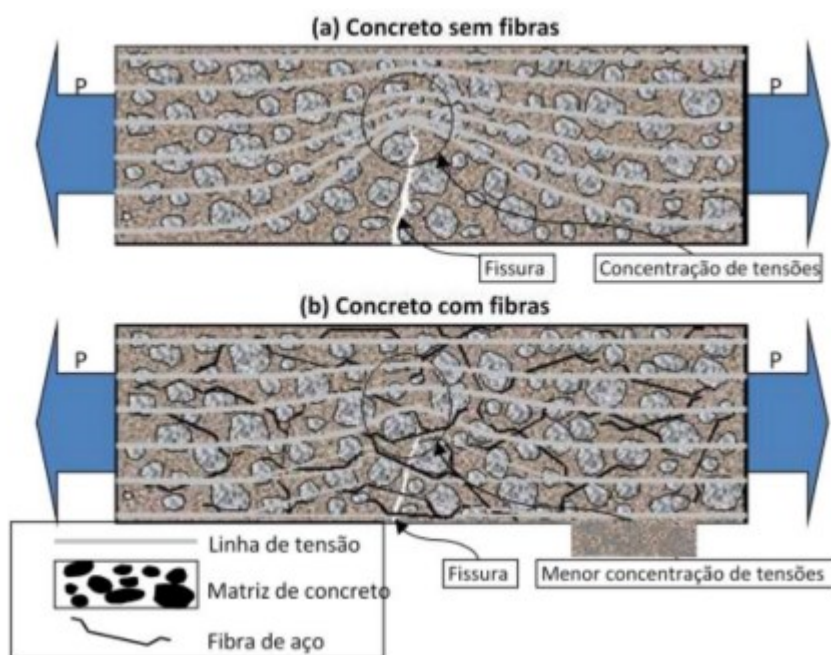
Figura 3 – Concentrações de tensões em concretos sem reforço de fibras



Fonte: Barros (2009).

No caso de compósitos cimentícios reforçados com fibras, o papel principal das fibras se dá após a fissuração da matriz, onde as fibras atuam como ponte de transferência de tensão entre duas partes da matriz separada pela fissura (FIGUEIREDO, 2000). A utilização das fibras aumenta consideravelmente a ductilidade e a capacidade de absorção de energia dos concretos. Porém, aumentos significativos de resistência só são conseguidos à custa de elevados percentuais de fibras, o que torna não usual a aplicação desses materiais compósitos na maior parte das estruturas (CARNIO, 2009). As fibras são adicionadas não para melhorar a resistência a tração em si, mas principalmente para controlar a fissuração, evitar a coalescência das fissuras e para alterar o comportamento do material através da resistência das fibras na matriz cimentícia (AYDIN, 2007). A Figura 4 apresenta a atuação das fibras na matriz de concreto como ponte de transferência de tensões.

Figura 4 – Concentração de tensões para um concreto simples (a) e com reforço de fibras (b)

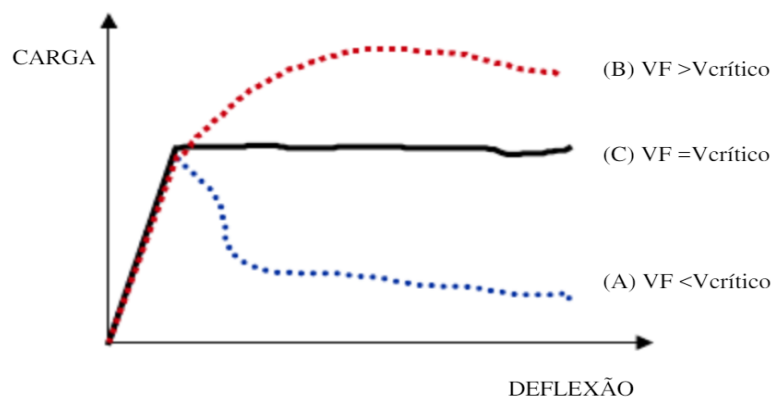


Fonte: Figueiredo (2000, p.14).

A definição conceitual de volume crítico é a de que ele corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Ou seja, abaixo do volume crítico no momento em que houver a ruptura da matriz ocorre, necessariamente uma queda na carga que o material tem capacidade de suportar. Acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamentos crescentes mesmo

após a ruptura da matriz (FIGUEIREDO, 2000). Esse comportamento descrito por Figueiredo é demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Influência do volume de fibras na matriz cimentícia



Fonte: Figueiredo (2000, p. 14).

Equipamentos e procedimentos de resistência à compressão usados para concreto convencional podem ser usados para CRF, porém, a vibração externa é preferida, uma vez que o vibrador interno pode influenciar de forma adversa a distribuição e alinhamento aleatório das fibras (ACI 544.2R – 89).

As principais aplicações do concreto reforçado com fibra de aço (CRFA) são em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas e concentradas potencialmente danosas, como exemplo em pavimentos de aeroportos, pisos industriais, revestimentos e revestimentos de canais, onde testes de laboratório e aplicações de campo mostraram que o CRFA é mais durável do que concreto simples sujeito a fluxo de água de alta velocidade (AYDIN, 2007).

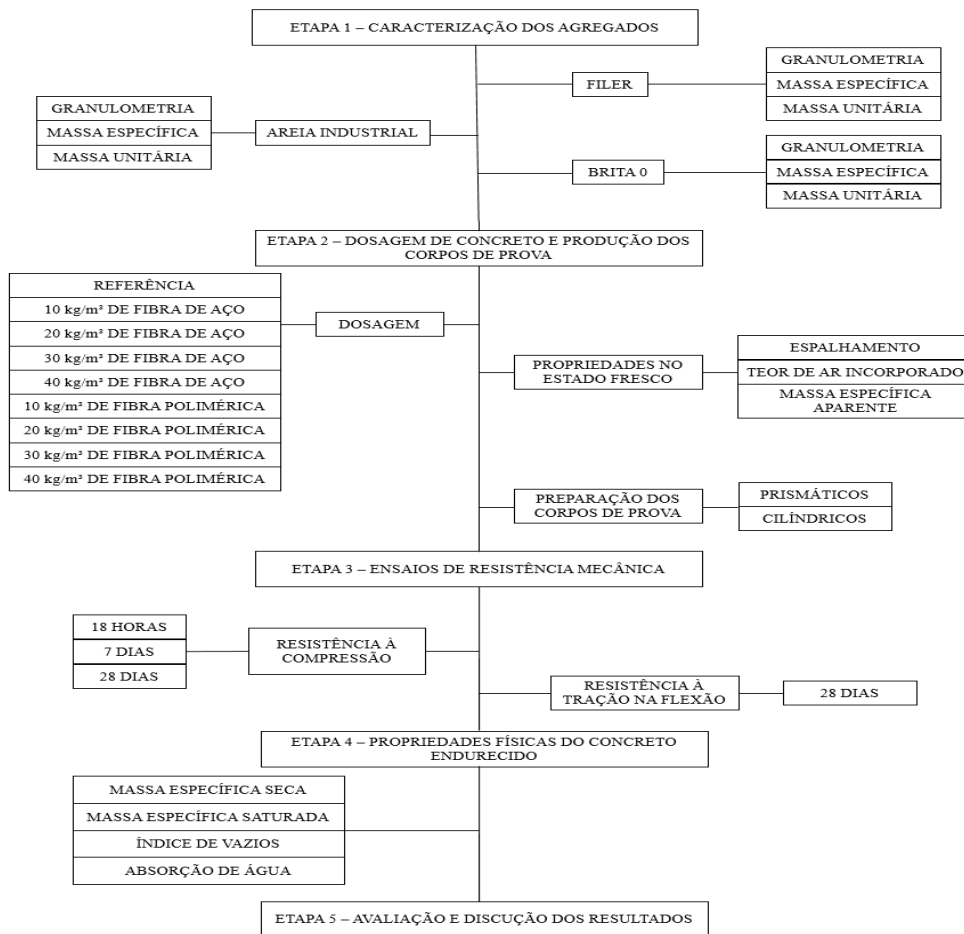
3. METODOLOGIA

Nesse capítulo serão apresentados os materiais e métodos que serão utilizados para a avaliação experimental do tema de estudo desse trabalho. Vale salientar que o objetivo do trabalho é avaliar a influência da adição de fibras no desempenho mecânico do concreto reforçado com fibras, o qual será empregado em indústria de pré-fabricados de concreto.

3.1. ASPECTOS ANALISADOS

A caracterização dos materiais foi realizada pelo próprio autor, sendo os ensaios de granulometria realizados no laboratório da empresa Perville e os demais ensaios no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável do Centro Tecnológico de Joinville. A Figura 6 apresenta a metodologia adotada para a realização da pesquisa referente a esse trabalho.

Figura 6 – Metodologia de pesquisa



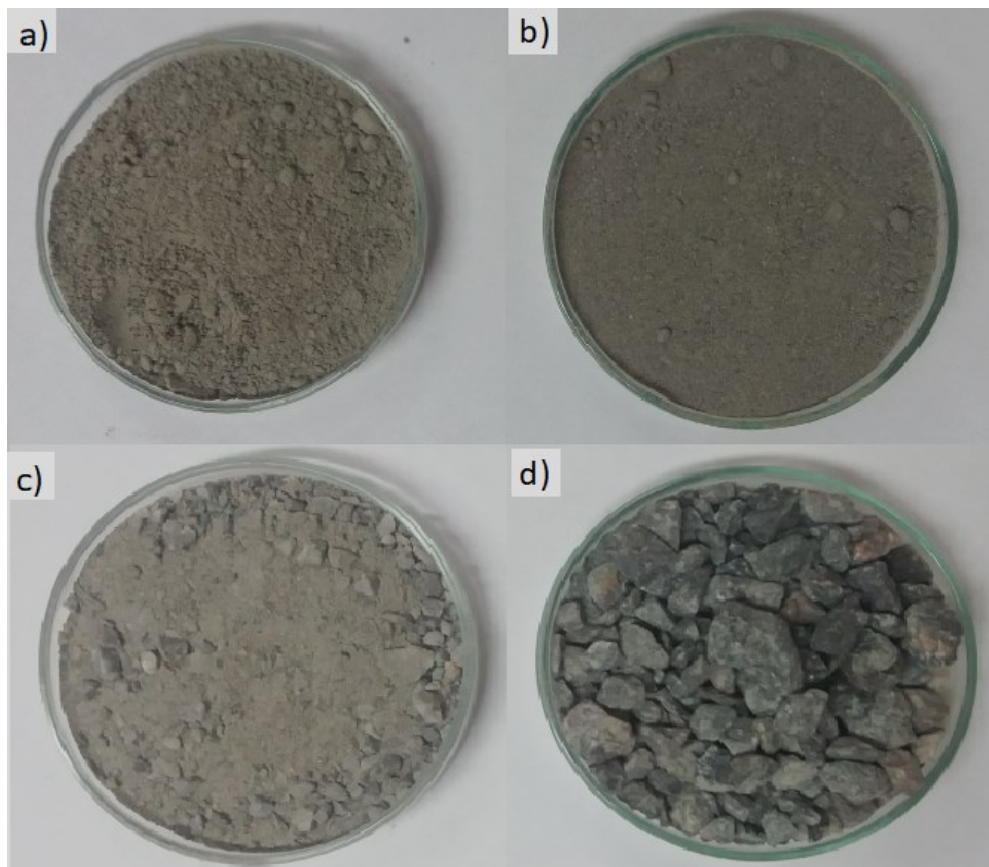
Fonte: O Autor (2021).

3.2. MATERIAIS

Vilanova et al. (2011), afirmam que o concreto autoadensável possui maior teor de material pulverulento, além de menor teor de agregado graúdo e menor dimensão do agregado graúdo. O traço usual adotado pela empresa Perville é composto por agregados do tipo brita 0, areia industrial e fíler. O cimento utilizado é do tipo CP V ARI, conferindo alta resistência ao concreto. Também será utilizado aditivo de terceira geração a base de policarboxilato, denominado Liga Flow 47 P.

As fibras utilizadas são de dois tipos distintos: de aço e poliméricas, porém ambas macrofibras. As fibras de aço utilizadas são do tipo corrugada denominada MM 40 e as fibras poliméricas são chamadas de MQ 58, produzidas a base de polipropileno modificado. Os materiais constituintes do concreto autoadensável de referência citados anteriormente são ilustrados na Figura 7

Figura 7 - Materiais: (a) Cimento; (b) Fíler; (c) Areia; (d) Brita 0



Fonte: O Autor, 2021

3.2.1. Cimento

O cimento CPV produzido pela empresa Itambé foi utilizado para a produção do concreto autoadensável. Segundo a empresa produtora, a massa específica desse aglomerante é de 3,12 g/cm³. O relatório de ensaio de qualidade do cimento do ano de 2015 é apresentado na Figura 8.

Figura 8– Relatório de ensaio do cimento CP V Itambé

Data	Químicos									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,35	18,91	2,69	60,59	4,74	2,86	2,89	0,94	0,72	0,62
Sd	0,06	0,22	0,11	0,31	0,32	0,04	0,14	0,14	0,05	0,02
Min	4,25	18,61	2,57	60,10	4,22	2,76	2,69	0,75	0,64	0,60
Max	4,47	19,24	2,98	61,24	5,35	2,91	3,08	1,19	0,80	0,67

Exp. Quente	Físicos									
	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	Início	Fim	%	cm ³ /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
mm	h : min	h : min	%	cm ³ /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
0,25	02:37	03:14	28,4	4.078	0,46	3,07	22,4	37,7	43,0	51,2
0,17	00:10	00:10	0,4	57,50	0,08	0,32	0,9	1,0	0,5	0,5
0,08	02:24	03:03	27,9	3.996	0,32	2,45	21,3	36,4	42,1	50,1
0,65	02:57	03:35	29,0	4.202	0,61	3,58	23,8	39,4	43,8	52,1

Fonte: Itambé (2018).

O cimento CP V – ARI possui partículas menores devido ao grau de moagem com adição de até 10% de filer calcário e sem adição pozolânica, configurando ao concreto alta resistência inicial (ITAMBÉ, 2018).

3.2.2. Água

A água utilizada foi proveniente da rede de distribuição pública da cidade de Joinville/SC.

3.2.3. Aditivo

O aditivo utilizado no ensaio foi um superplastificante de terceira geração, a base de policarboxilatos, denominado Liga Flow 47. Foi definida uma dosagem da ordem de 0,85% em relação a massa de cimento. A Figura 9 apresenta o certificado de análise do aditivo utilizado nas misturas.

Figura 9 – Certificado de análise do aditivo Liga Flow 47 P

PARAMETROS ANALISADOS			
ENSAIO	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Aparência	-	Líquido	Conforme
Cor	-	Caramelo Claro	Conforme
Densidade (25° C)	g/cm ³	1,05 – 1,09	1,083
pH (a 25° C)	-	4,5 – 6,5	5,52

Fonte: Adaptado de Liga Química (2020).

Conforme informações do fabricante (LIGA QUÍMICA), o aditivo é recomendado para concretos que necessitem de aumento de fluidez com baixo consumo de água, além de ser recomendado para abertura de slump em concretos usinados e para indústria de pré-fabricados de concreto.

3.2.4. Agregados

3.2.4.1. Distribuição granulométrica

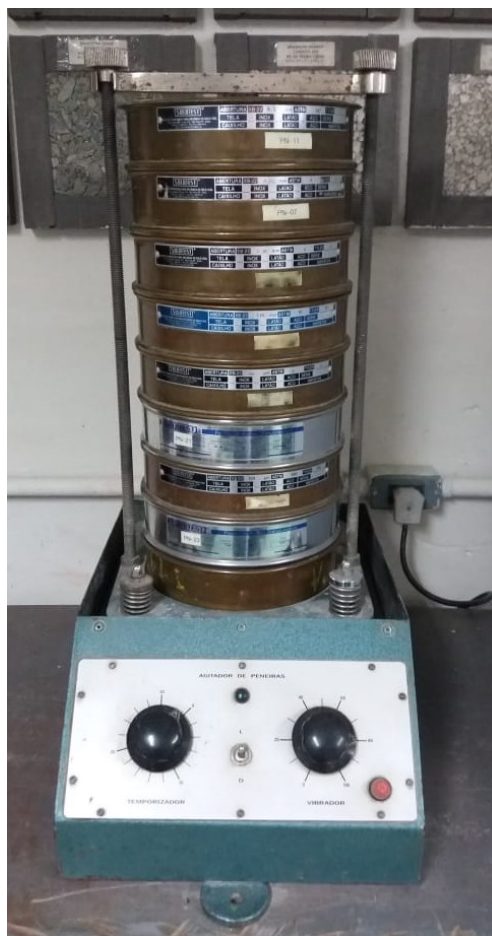
A distribuição granulométrica dos agregados pode ser descrita como a porcentagem de material que permanece retido nas diversas peneiras com diferentes aberturas. A partir desse ensaio é possível determinar o módulo de finura e a dimensão máxima característica do agregado. Conforme a norma ABNT NBR 15823-1:2017 para concretos autoadensáveis, os agregados constituintes devem ser ensaiados e atender aos requisitos da ABNT NBR NM 248:2003.

Para a realização do ensaio, as amostras de cada agregado foram submetidas a secagem em estufa em temperatura de 105°C por um período de 24h. Após, foram separadas duas amostras de 500 g de cada agregado. Dessa forma, foram realizados dois ensaios para cada agregado, sendo que a distribuição granulométrica pôde ser obtida pela média aritmética dos ensaios.

As peneiras para ensaio do agregado graúdo foram dispostas na ordem de 19mm; 12,5mm; 9,5mm; 6,3mm; 4,75mm, 2,36mm; 1,18mm, 0,6mm, enquanto que as peneiras para ensaio de agregado miúdo foram dispostas na ordem 6,3mm; 4,75mm, 2,36mm; 1,18mm, 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm, 0,075mm formando um único conjunto provido de tampa e fundo. A

amostra foi submetida ao agitador mecânico de peneiras, por um período de 5 minutos para cada ensaio. Após, cada peneira foi pesada individualmente, sendo esses valores utilizados para traçar a curva de distribuição granulométrica. A Figura 10 apresenta o conjunto de peneiras e o agitador mecânico utilizado.

Figura 10 – Conjunto de peneiras para determinação da distribuição granulométrica



Fonte: O Autor, 2021.

O módulo de finura e dimensão máxima característica dos agregados foram calculados conforme o disposto pela ABNT NBR NM 248:2003. O módulo de finura é definido pela soma das porcentagens acumuladas de agregados nas peneiras da série normal divididas por 100, enquanto que a dimensão máxima característica é definida como a abertura de peneira na qual ficou retida uma porcentagem acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%. Além disso, foi definido a porcentagem de material pulverulento presente no agregado miúdo, que pode ser obtido pela porcentagem passante de material pela peneira de abertura 0,075 mm.

3.2.4.2. Massa específica do agregado miúdo

O ensaio para determinação da massa específica dos agregados miúdos seguiu o disposto pela ABNT NBR NM 52: 2009, sendo obtidos valores de massa específica seca, massa específica saturada superfície seca e a massa específica absoluta do agregado miúdo.

O método de ensaio consistiu na preparação de uma amostra de 500g de agregado seco em estufa em temperatura de 105°C por 24h. Para a realização do ensaio, foi utilizado o picnômetro. Inicialmente, a amostra foi depositada no frasco de 500ml e aferida a massa do conjunto. Após, o frasco foi preenchido por água até o nível de 500ml, e deixado em repouso em água a temperatura ambiente por 1h, quando então o nível de água foi acertado em 500ml. Essa massa foi novamente determinada. Em seguida, o agregado foi retirado do frasco e levado novamente a estufa, e após 24h, foi determinada sua massa. A determinação da massa específica aparente seca foi realizada através da Equação 1.

Para determinação da massa específica saturada superfície seca, foi utilizado o mesmo método descrito anteriormente, porém, o agregado inicialmente estava úmido, sendo admitido como saturado superfície seca. Essa, foi determinada pela Equação 2.

(Eq. 1)

$$d1 = \frac{m}{V - \frac{m2 - m1}{\rho a}}$$

Onde,

d1 = massa específica aparente do agregado seco (g/cm³);

m = massa da amostra seca em estufa (g);

m1 = massa do frasco + agregado (g);

m2 = massa do frasco + agregado + água (g);

V = volume do frasco (cm³);

ρa = densidade da água (g/cm³).

(Eq. 2)

$$d2 = \frac{m_{sss}}{V - \frac{m2 - m1}{\rho a}}$$

Onde,

d_2 = massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3);

m_{sss} = massa da amostra seca em estufa (g);

m_1 = massa do frasco + agregado (g);

m_2 = massa do frasco + agregado + água (g);

V = volume do frasco (cm^3);

ρ_a = densidade da água (g/cm^3).

Por fim, para determinação da massa específica do agregado miúdo foi utilizada a Equação 3.

(Eq. 3)

$$d_3 = \frac{m}{\left(V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}\right) - \frac{m_{sss} - m}{\rho_a}}$$

Onde,

d_3 = massa específica do agregado (g/cm^3);

m = massa da amostra seca em estufa (g);

m_{sss} = massa da amostra seca em estufa (g);

m_1 = massa do frasco + agregado (g);

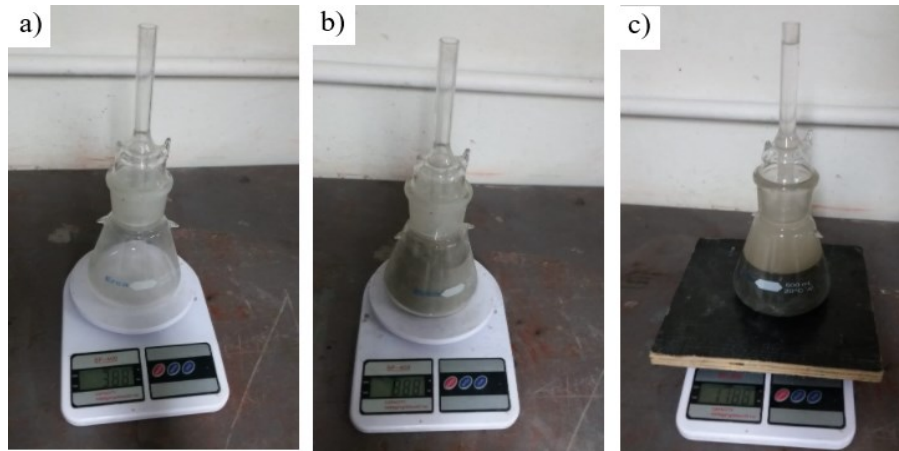
m_2 = massa do frasco + agregado + água (g);

V = volume do frasco (cm^3);

ρ_a = densidade da água (g/cm^3).

A Figura 11 apresenta a realização do ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo através do picnômetro.

Figura 11 – Determinação da massa específica do agregado miúdo pelo picnômetro



Fonte: O Autor (2021).

3.2.4.3. Massa específica do agregado graúdo

O ensaio de determinação do agregado graúdo foi realizado conforme disposto na ABNT NBR NM 53: 2009. Inicialmente, foi separada uma amostra de 2 kg de brita, a qual foi mantida submersa em água por um período de 24h em temperatura ambiente. Após esse período, o agregado foi retirado da água e envolto em um pano absorvente, sendo essa massa registrada como massa saturada superfície seca (m_s). Em seguida, o mesmo material foi depositado em uma cesta suspensa por um barbante conectado a uma balança de precisão. O conjunto cesta e brita foram submersos em água, e determinada sua massa, sendo essa a massa hidrostática (m_a). O material utilizado nas etapas anteriores foi então despejado em uma forma metálica e levado a estufa a temperatura de 105°C por um período de 24h. Após, sua massa foi determinada e denominada massa seca (m).

Com os valores obtidos foi possível definir a massa específica do agregado seco (Eq. 4), a massa específica na condição saturada superfície seca (Eq. 5), a massa específica aparente (Eq. 6) e a absorção de água pelo agregado graúdo (Eq. 7).

(Eq. 4)

$$d = \frac{m}{m_s - m_a}$$

(Eq. 5)

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a}$$

(Eq. 6)

$$da = \frac{m}{m - ma}$$

(Eq. 7)

$$A = \frac{ms - m}{m}$$

Onde,

d = massa específica do agregado seco (g/cm³);

ds = massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm³);

da = massa específica aparente (g/cm³);

A = absorção de água (%);

m = massa seca da amostra (g);

ms = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

ma = massa em água da amostra saturada (g);

3.2.4.4. Massa unitária

Massa unitária ou massa aparente pode ser definida como a relação em massa e volume ocupados por grãos do agregado, considerando os vazios existentes entre os grãos. O ensaio foi realizado de acordo com as instruções da ABNT NBR NM 45:2006, sendo que o mesmo ensaio pode ser utilizado para agregados graúdos e miúdos. Para sua determinação foi utilizado um recipiente cilíndrico de volume conhecido e determinada sua massa. Após, esse foi preenchido com o respectivo material, sem promover nenhum tipo de compactação. Dessa forma, a massa unitária pode ser definida pela Equação 8.

(Eq. 8)

$$Mu = \frac{m1 - m2}{V}$$

Onde,

Mu = massa unitária (kg/m³);

m1 = massa do recipiente com o material (kg);

m2 = massa do recipiente (kg);

V = volume do cilindro (m³).

3.2.5. Fibras

As fibras utilizadas nesse estudo são fabricadas com dois materiais distintos, aço e polipropileno, porém possuem dimensões muito próximas, fato que possibilita a comparação dessas quanto a aplicação.

A fibra metálica é denominada MM 40. As propriedades físicas dessa, fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 1. Por se tratar do material aço, a massa específica dessa pode ser considerada de 7860 kg/m^3 , conforme proposto pela norma ASTM A820:2016.

A fibra polimérica denominada Barchip MQ 58 é constituída de filamentos de polipropileno. Conforme divulgado pela fabricante (EPC do Brasil), as fibras possuem variações quanto as dimensões. As propriedades dessa são apresentadas na Tabela 2. Ainda conforme a fabricante, a densidade dessa deve ser adotada como 920 kg/m^3 . A Figura 12 apresenta o aspecto visual das fibras descritas.

Tabela 1 – Propriedades físicas da fibra MM 40

Comprimento	40 mm
Largura	2 mm
Altura	2 mm
Resistência a tração	800 MPa por fio
Quantidade de fibras	4620 fibras por kg
Material	Aço carbono Tipo 1 ASTM A 820
Modelo	Arame de aço corrugado

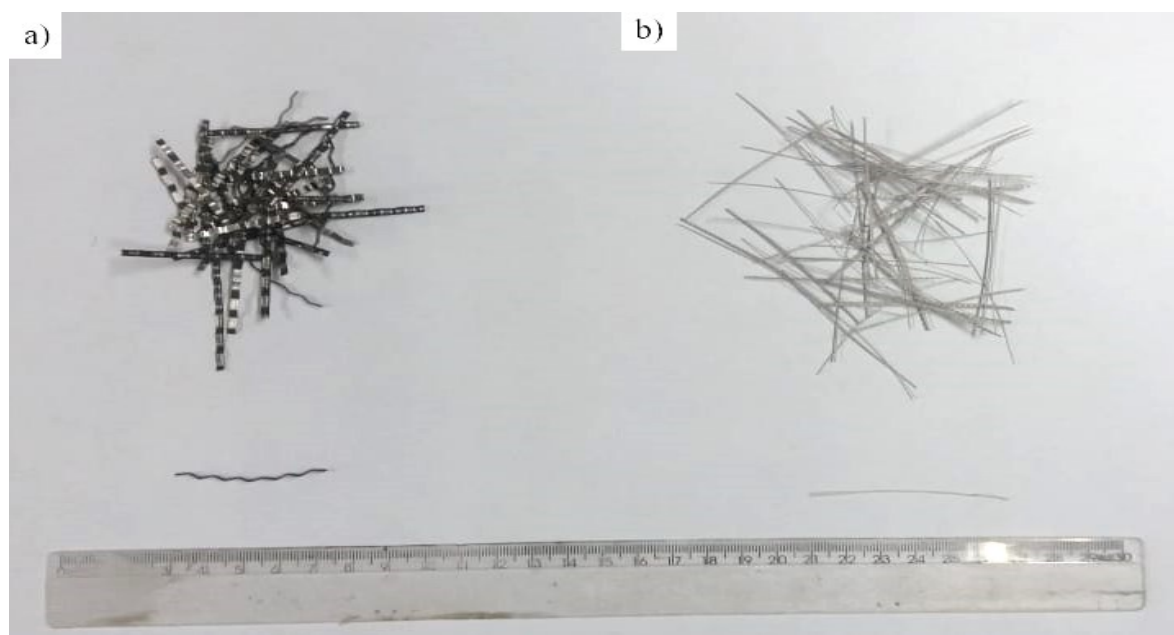
Fonte: Adaptado de MM Fibras (2014).

Tabela 2 – Propriedade físicas da fibra Barchip MQ 58

Comprimento	58 mm
Resistência a tração	640 MPa
Textura superficial	Nervurado contínuo
Quantidade de fibras	235000 fibras/kg
Densidade específica	0,9 a 0,92 kg/cm^3
Módulo de elasticidade	10 GPa
Matéria prima	Polipropileno modificado

Fonte: Adaptado de EPC do Brasil (2015).

Figura 12 – Fibras a) MM 40 e b) MQ 58



Fonte: O Autor (2021).

Vale salientar que será comparada a influência das fibras de aço e de polipropileno nas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável. De forma a possibilitar tal comparação, serão realizadas formulações com volume de fibras idênticos. As dosagens em massa não são confiáveis, uma vez que as fibras apresentam massas específicas muito distintas.

3.3. DOSAGEM DO CONCRETO

O concreto de referência é um traço de concreto produzido pela empresa Perville em fábrica de pré-fabricados de concreto. Sua característica de resistência mecânica a compressão é de 40 MPa e espalhamento de 750 mm, caracterizando assim um concreto autoadensável de classe SF 3. Além disso, atinge resistência mínima de 15 MPa com 18 horas de cura, o que possibilita uma rápida desforma das peças de concreto.

Os agregados utilizados nos traços experimentais foram submetidos a secagem em estufa a temperatura de 105°C por um período de 24 h. A sequência de preparo do concreto adotada foi de pesagem dos materiais, mistura dos componentes, verificação do espalhamento, determinação das propriedades no concreto fresco, moldagem e cura dos corpos de prova.

As propriedades de todos os concretos foram avaliadas no estado fresco e endurecido. É importante ressaltar que para possibilitar a comparação entre os concretos com adição de fibra de aço e de polipropileno, foram necessários volumes equivalentes de adição. Dessa forma,

foram realizadas misturas com fibras distintas, porém com mesmos volumes de adição. As fibras de aço regiram a concentração de fibras em valores de massa por volume de concreto, sendo que seu volume foi definido através da massa específica das fibras de aço. Esse valor de volume foi utilizado para se determinar a massa de fibras de polipropileno que se assemelham em volume, através da massa específica das fibras de polipropileno.

O concreto autoadensável de referência no estudo foi produzido com as quantidades de material descrito na Tabela 3. As demais formulações utilizaram do mesmo traço, apenas variando a concentração e tipo de fibras adicionadas.

Tabela 3 – Dosagem de concreto referência

Material	Tipo	Quantidade por m³ (kg)	Quantidade teste (58 litros) (kg)
Brita 0	Industrial	750	43,5
Areia	Industrial	610	35,38
Filler	Industrial	400	23,2
Cimento	CP V	400	23,2
Água		200	11,6
Aditivo	LigaFlow 47P	3,4	197,2

Fonte: O Autor (2021).

As dosagens foram nomeadas conforme apresentado na Tabela 4, de acordo com o tipo e concentração de fibra adicionada à mistura. Vale ressaltar que as dosagens com adição de fibras de aço são comparáveis às formulações com adição de fibras de polipropileno pois seguem uma relação de volume constante. As formulações A10 e B10 são similares em volume de fibras adicionadas, da mesma forma que A20 e B20, A30 e B30, A40 e B40.

Tabela 4 – Formulações produzidas com diferentes teores de fibras de aço e de polipropileno

Formulação	Tipo de fibra	Quantidade de fibras (kg / m ³)	Volume de fibras (litros / m ³)
REF	-	0	0,00
A10	Aço	10,00	1,27
A20	Aço	20,00	2,54
A30	Aço	30,00	3,82
A40	Aço	40,00	5,09
B10	Polimérica	1,17	1,27
B20	Polimérica	2,34	2,54
B30	Polimérica	3,51	3,82
B40	Polimérica	4,68	5,09

Fonte: O Autor (2021).

3.3.1. Mistura dos componentes

A mistura do concreto autoadensável de referência foi realizada em betoneira e os materiais foram adicionados em duas etapas. Inicialmente, foi adicionada sequencialmente a brita 0, água, areia industrial, filer e cimento. Essa mistura foi homogeneizada por 2 minutos. Em seguida, foi adicionado o aditivo e homogeneizada a mistura por 10 minutos. Foi requerido tempo relativamente grande para permitir a total dispersão do aditivo.

O concreto com adição de fibras seguiu o mesmo método de mistura do concreto de referência, e em seguida as fibras foram acrescentadas em tempo total de 2 minutos. Foi produzido um total de 55 litros de concreto autoadensável para cada formulação. A Figura 13 apresenta o método de mistura do concreto.

Figura 13 – Mistura do concreto autoadensável com diferentes tipos e teores de fibras



Fonte: O Autor (2021).

3.3.2. Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados e submetidos a cura conforme NBR 5738:2016. Foi definida a moldagem de 3 corpos de prova para avaliação da resistência mecânica em cada idade, objetivando a confiabilidade dos resultados.

Para avaliação da resistência mecânica a compressão, foram moldados corpos de prova cilíndricos de altura 20 cm e diâmetro de 10 cm. A resistência a compressão desses foi verificada com 18 horas, 7 dias e 28 dias de idade. De características similares, foram moldados 3 corpos de prova para execução dos ensaios físicos aos 28 dias de idade. A avaliação da resistência mecânica a flexão foi realizada em corpos de prova prismáticos de dimensões 15 cm x 15 cm x 50 cm, apenas aos 28 dias de idade.

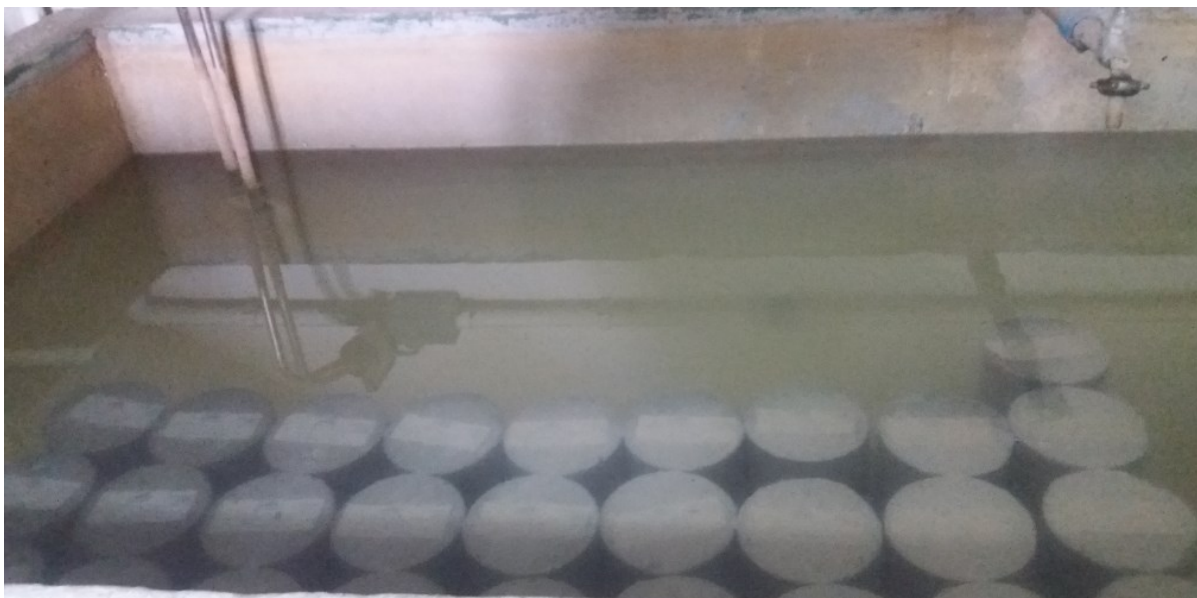
A desforma dos corpos de prova foi realizada com 18 horas de idade, sendo esses imediatamente submetidos a cura úmida, com temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. A Figura 14 apresenta a moldagem dos corpos de prova, e a Figura 15 demonstra o método de cura.

Figura 14 – Moldagem dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2021).

Figura 15 – Cura dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2021).

3.4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Para a indústria de pré-fabricados de concreto, a aceitação do CAA no estado fresco deve ser baseada no mínimo na comprovação das propriedades de fluidez, viscosidade plástica aparente e estabilidade visual (avaliadas pelo ensaio de espalhamento, t500 e índice de estabilidade visual, previstos na ABNT NBR 15823-2) e, habilidade passante – avaliada pelo ensaio utilizando o anel J, conforme a ABNT NBR 15823-3 (ABNT NBR 15823-1:2017).

3.4.1. Espalhamento e índice de estabilidade visual

A verificação do espalhamento foi realizada logo após o término da mistura do concreto, conforme diretrizes da NBR ABNT 15823-2:2017. Foi utilizada uma chapa de compensado plastificado de dimensões 90 cm X 90 cm, isenta de imperfeições e posicionada em nível, com marcação circular de diâmetro 500 mm. Também, foi utilizado o cone de Abrahms em posição invertida. A Figura 16 apresenta o conjunto placa base e cone utilizados no ensaio.

O cone foi posicionado no centro da chapa e preenchido de concreto com auxílio de um balde, e posteriormente erguido verticalmente. O espalhamento foi determinado pela média de dois diâmetros perpendiculares medidos após o concreto atingir o repouso. O mesmo procedimento foi utilizado para o concreto de referência e com adições de fibras.

Figura 16 – Determinação do espalhamento do concreto autoadensável com diferentes teores de adição de fibras de aço e polipropileno



Fonte: O Autor (2021).

O concreto autoadensável pode ser classificado de acordo com seu espalhamento, conforme a Figura 17. Além disso, foi avaliada visualmente a estabilidade do concreto de referência e com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações. Esses, podem ser classificados conforme a Figura 18.

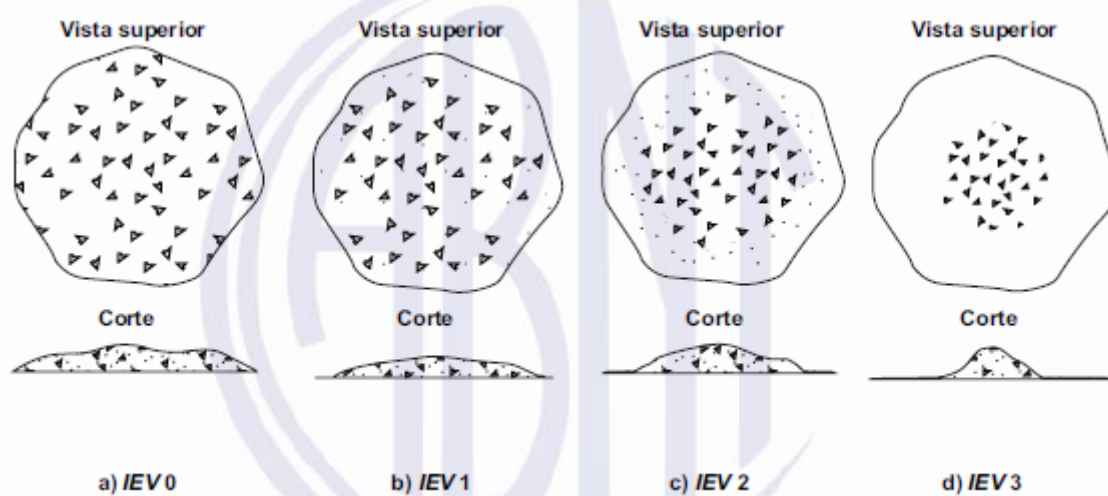
Figura 17– Classes de espalhamento do concreto autoadensável

Classe	Espalhamento mm
SF 1	550 a 650
SF 2	660 a 750
SF 3	760 a 850

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15823-1 (2017).

Figura 18 – Classes de índice de estabilidade visual sob fluxo livre

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: ABNT NBR 15823-1 (2017).

3.4.2. Tempo de escoamento

A determinação do tempo de escoamento (t_{500}) é especificado pela ABNT NBR 15823-2:2017. O procedimento foi realizado juntamente a avaliação do espalhamento do concreto. O cronômetro foi iniciado no momento que o cone perdeu contato com a placa base, e determinado o intervalo de tempo necessário para o concreto atingir a marcação de 500 mm na placa base. O mesmo procedimento foi utilizado para o concreto de referência e com adições de fibras. O concreto autoadensável pode ser classificado em classes de viscosidade plástica aparente conforme a Figura 19.

Figura 19 – Classes de viscosidade plástica aparente sob fluxo livre

Classe	t_{500} s
VS 1	≤ 2
VS 2	> 2

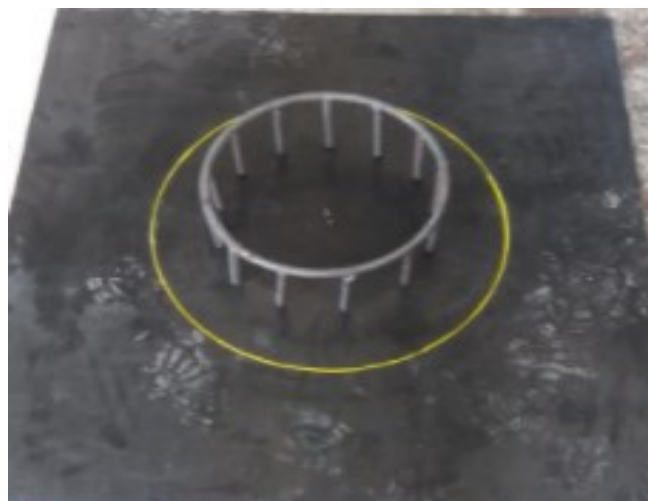
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15823-1 (2017).

3.4.3. Habilidade passante

A habilidade passante do concreto autoadensável pode ser avaliada pelo método do anel J, conforme descrito na ABNT NBR 15823-3:2017. Foi utilizado um anel metálico, produzido com vergalhões de aço de diâmetro 16 mm, espaçados igualmente a 6 cm, posicionados perpendicularmente a um anel de 30 cm de diâmetro produzido com o mesmo material. O cone de Abrahms foi posicionado no centro do anel J e preenchido conforme descrito em 3.3.2. Após o cone ser erguido e o concreto atingir a condição de repouso foi determinado seu espalhamento através da média de duas medições perpendiculares de diâmetro. A habilidade passante pôde ser obtida pela diferença entre o espalhamento verificado apenas com o cone de Abrahms e o verificado pelo método do anel J.

A Figura 20 apresenta o anel descrito posicionado sobre a placa base. O mesmo procedimento foi utilizado para o concreto de referência e com adições de fibras. A Figura 21 apresenta a classificação do concreto autoadensável de acordo com sua habilidade passante.

Figura 20 – Anel J para avaliação da habilidade passante



Fonte: O Autor (2021).

Figura 21 – Classes de habilidade passante pelo anel J sob fluxo livre

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15823-1 (2017).

3.4.4. Determinação da massa específica aparente e do teor de ar do concreto no estado fresco

A norma ABNT NBR 9833: 2009 descreve os métodos empregados na determinação da massa específica aparente e do teor de ar incorporado do concreto fresco pelo método gravimétrico. Foi utilizado um cilindro metálico de volume e massa conhecidos. Esse, foi preenchido por concreto em estado fresco, sem nenhum adensamento. A superfície do recipiente foi arrasada e a massa do conjunto foi determinada (Figura 22). O mesmo procedimento foi utilizado para o concreto de referência e com adições de fibras. A Equação 9 pode ser utilizada para o cálculo da massa específica aparente e a Equação 10 para determinação do teor de ar incorporado. As Equações 11, 12 e 13 são utilizadas para definir termos utilizáveis na Equação 10.

Eq. 9

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} * 1000$$

Onde,

ρ_{ap} = massa específica aparente (kg/m³);

m = massa de concreto no recipiente (kg);

V = volume do recipiente (litros);

Eq. 10

$$A = \left(1 - \frac{1}{I_a}\right) * 100$$

Onde,

A = teor de ar incorporado ao concreto (%);

I_a = índice de ar;

Eq. 11

$$R = \frac{mc + ma + mf + mb + mag + mad}{\rho_{ap}}$$

Eq. 12

$$Vt = \frac{mc}{\rho_c} + \frac{ma}{\rho_a} + \frac{mf}{\rho_f} + \frac{mb}{\rho_b} + \frac{mag}{\rho_{ag}} + \frac{mad}{\rho_{ad}}$$

Eq. 13

$$Ia = \frac{R}{Vt}$$

Onde,

R = rendimento (m³);

Vt = volume total dos componentes da betonada (m³);

Mc = massa de cimento (kg);

Ma = massa de areia (kg);

Mf = massa de filer (kg);

Mb = massa de brita (kg);

Mag = massa de água (kg);

Mad = massa de aditivo (kg);

ρ_c = massa específica do cimento (kg/m³);

ρ_a = massa específica da areia (kg/m³);

ρ_f = massa específica do filer (kg/m³);

ρ_b = massa específica da brita (kg/m³);

ρ_{ag} = massa específica da água (kg/m³);

ρ_{ad} = massa específica de aditivo (kg/m³);

Ia = índice de ar;

Figura 22 – Determinação de propriedades físicas do concreto autoadensável com diferentes teores de adição de fibras de aço e polipropileno pelo método gravimétrico



Fonte: O Autor (2021).

3.5. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

3.5.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto foi determinada conforme o disposto pela norma ABNT NBR 5739:2018. Foi utilizada uma prensa classe 2, com capacidade máxima de carga de 100 tf, conforme apresentado na Figura 23. O ensaio de compressão foi realizado com 18h, 7 dias e 28 dias de cura.

Figura 23 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão



Fonte: O Autor (2021).

A máquina fornece os valores de carga aplicada sobre o corpo de prova, sendo necessário converter esse valor para a unidade de pressão comumente utilizada para concretos (MPa). A Equação 14 apresenta essa conversão.

(Eq. 14)

$$f_c = \frac{4 * C * 1000 * 9,81}{\pi * D^2}$$

Onde,

f_c = resistência a compressão (MPa);

C = carga aplicada (tf);

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

3.5.2. Resistência a tração na flexão

A norma ABNT NBR 12142:2010 define os métodos para definição da resistência a tração na flexão de concretos. Foram utilizados os corpos de prova prismáticos biapoiados em dois roletes com distanciamento de 45 cm. A carga foi aplicada no centro do corpo de prova, através de dois roletes com espaçamento de 15 cm. A Figura 24 apresenta o ensaio sendo realizado. A prensa hidráulica utilizada no ensaio de tração na flexão é a mesma utilizada no ensaio de compressão.

Figura 24 – Ensaio de tração na flexão em corpos de prova prismáticos de concreto



Fonte: O Autor (2021).

A determinação da resistência a tração na flexão pode ser definida pela Equação 15.

(Eq. 15)

$$F_{ct} = \frac{F * l * 1000 * 9,81}{b * d^2}$$

Onde,

F_{ct} = Resistência a tração na flexão (MPa);

l = dimensão do vão entre os apoios (mm);

F = carga aplicada (tf);

b = largura média do corpo de prova (mm);

d = altura média do corpo de prova (mm).

3.6. ÍNDICES FÍSICOS DO CONCRETO ENDURECIDO

A determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto endurecido são determinados pela norma ABNT NBR 9778:2009. Para os ensaios físicos, foram utilizadas três amostras do concreto produzido com volume mínimo de 1500 cm³. Inicialmente, as amostras foram submetidas a secagem em estufa a 105°C por um período de 72 h e então determinada sua massa (Ms). Após, a amostra foi imersa em água por um período

de 72 h e novamente determinada sua massa (M_{sat}). Por fim, a amostra foi suspensa por uma cesta de aço, fixa a uma balança de precisão, e imersa em água. O valor obtido durante a imersão é definido como massa hidrostática (M_i).

As equações a seguir foram utilizadas para determinação da absorção de água (Eq. 16), índice de vazios (Eq. 17), massa específica do concreto seco (Eq. 18) e massa específica do concreto saturado (Eq. 19). O valor característico para cada formulação foi obtido pela média dos resultados de 3 amostras.

(Eq. 16)

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s}$$

(Eq. 17)

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i}$$

(Eq. 18)

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} * 1000$$

(Eq. 19)

$$\rho_{sat} = \frac{M_s}{M_s - M_i} * 1000$$

Onde,

M_s = massa seca da amostra (g);

M_{sat} = massa saturada da amostra (g);

M_i = massa hidrostática da amostra (g)

A = absorção de água (%);

I_v = Índice de vazios (%);

ρ_s = massa específica seca do concreto endurecido (kg/m^3);

ρ_{sat} = massa específica saturada do concreto endurecido (kg/m^3).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados e as propriedades verificadas no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável de referência e com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações. A seguir, serão apresentadas as discussões acerca do tema.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados utilizados no concreto desenvolvido foram obtidos pelo processo de britagem de rocha granítica na cidade de Joinville. Dessa forma, tanto os agregados graúdos quanto os miúdos possuem a mesma natureza mineralógica. A seguir serão apresentadas algumas propriedades dos agregados.

4.1.1. Distribuição granulométrica dos agregados

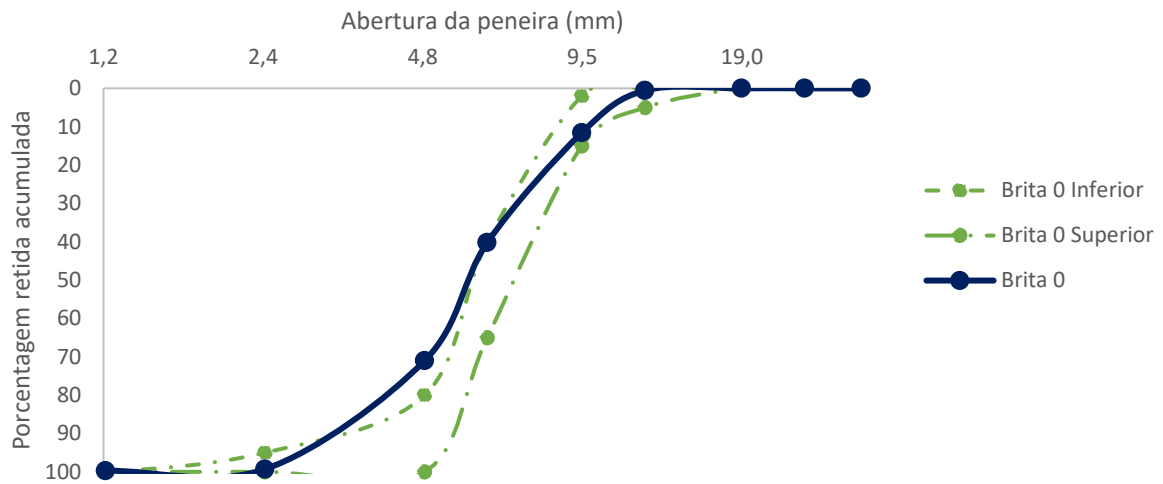
Foram realizados ensaios de granulometria para o agregado graúdo (brita 0) e os agregados miúdos (areia industrial e filer) constituintes do concreto autoadensável utilizados no estudo. A Tabela 5 apresenta os resultados de módulo de finura e dimensão máxima característica do agregado graúdo. Com os resultados do ensaio de granulometria é possível traçar a curva de distribuição granulométrica do material (Gráfico 1) junto aos limites estabelecidos por norma.

Tabela 5 – Módulo de finura e dimensão máxima característica do agregado graúdo

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)
Brita 0	5,81	12,5

Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: O Autor (2021).

Pode-se verificar que o agregado graúdo está ligeiramente fora do limite inferior da brita 0 nas peneiras com menor abertura. Isso indica que há uma maior concentração de grãos mais finos que o usual, porém, o material ainda pode ser classificado como brita 0, sem prejuízo as propriedades do concreto autoadensável.

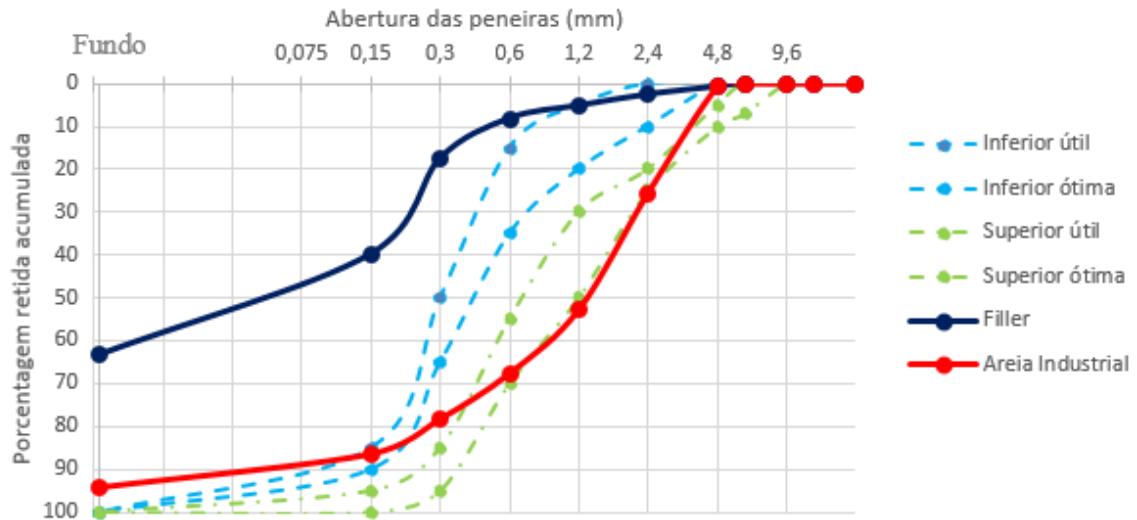
Os agregados miúdos utilizados na produção do concreto autoadensável foram dois, a areia industrial e o filer. O módulo de finura, a dimensão máxima característica e a porcentagem de material pulverulento são apresentados na Tabela 6. A distribuição granulométrica desses são apresentados no Gráfico 2. O teor de material pulverulento foi considerado como a porcentagem de material passante na peneira 0,15 mm.

Tabela 6 - Módulo de finura, dimensão máxima característica e porcentagem de material pulverulento do agregado miúdo

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)	Material pulverulento (%)
Areia Industrial	3,12	4,75	5,67
Filer	0,74	1,18	36,80

Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 2 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos



Fonte: O Autor (2021).

No gráfico, é possível perceber que a curva de distribuição granulométrica da areia industrial encontra-se no limite da zona superior útil. Também, o módulo de finura desse material é próximo a 3,2, valor estabelecido por norma como mínimo para caracterizar uma areia como grossa. Dessa forma, pode-se afirmar que a areia industrial é uma areia média a grossa. Quanto ao filer, o material não se enquadra nas zonas definidas para areias. Ainda assim, possui uma distribuição granulométrica que se assemelha a uma areia muito fina, fato comprovado pelo valor do módulo de finura ser inferior a 2,0 caracterizando uma areia muito fina. Também, pode-se afirmar que a porcentagem de material pulverulento presente no material é expressivo.

A Figura 7, apresentada em 3.2, apresenta o aspecto visual dos agregados. Nota-se que os agregados possuem grãos arredondados. Essa é uma característica importante para um bom desempenho de um concreto autoadensável, uma vez que formatos arredondados facilitam a fluidez do concreto.

4.1.2. Determinação da massa específica do agregado miúdo

Os resultados de massa específica obtidos para os agregados miúdos são apresentados na Tabela 7 – Massa específica dos agregados miúdos Tabela 7. Os valores obtidos em ensaio são coerentes com os materiais usualmente empregados na construção civil.

Tabela 7 – Massa específica dos agregados miúdos (g/cm³)

	Areia industrial	Filer
Massa específica do agregado seco	2,52	2,50
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca	2,55	2,55
Massa específica aparente	2,71	2,62

Fonte: O Autor (2021).

4.1.3. Massa específica do agregado graúdo

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos para massa específica nas condições agregado seco, saturado superfície seca e massa específica aparente, além de absorção de água do agregado graúdo. Os resultados obtidos são coerentes com os usualmente observados em agregados graúdos.

Tabela 8 – Massa específica e absorção de água do agregado graúdo (g/cm³)

	Brita 0
Massa específica do agregado seco	2,70
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca	2,72
Massa específica aparente	2,77
Absorção de água	0,98%

Fonte: O Autor (2021).

4.1.4. Massa unitária dos agregados

A Tabela 9 apresenta a massa unitária característica dos agregados utilizados no estudo.

Tabela 9 – Massa unitária dos agregados (g/cm³)

Material	Massa unitária
Brita 0	1,62
Areia	1,57
Filer	0,95

Fonte: O Autor (2021).

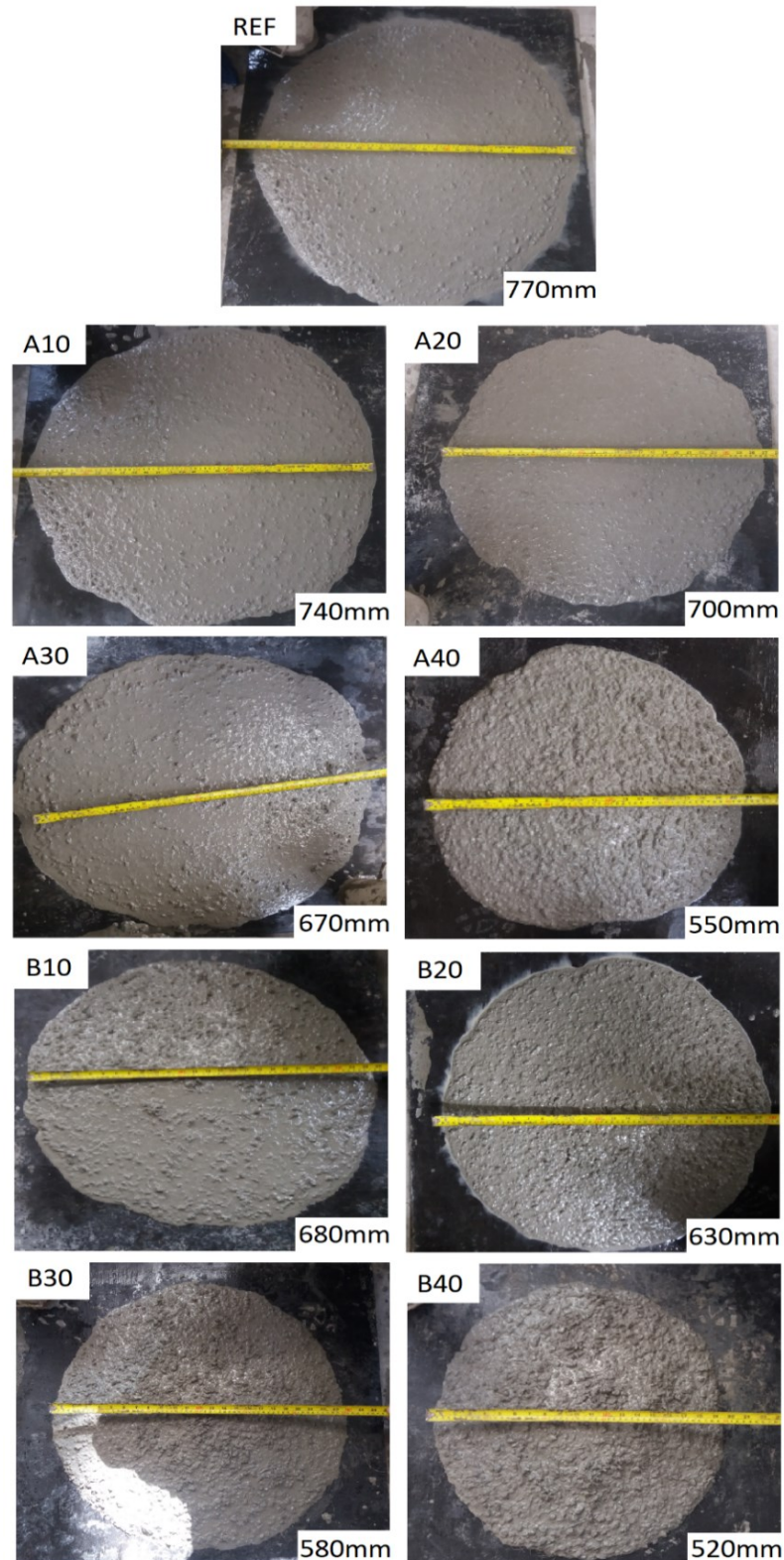
4.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS

Essa seção apresenta os resultados obtidos no ensaio experimental do concreto autoadensável com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações.

4.2.1. Espalhamento, classe de estabilidade e classe de viscosidade plástica aparente

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para espalhamento do concreto autoadensável com os diferentes teores de fibras de aço e polipropileno.

Figura 25 – Espalhamento do concreto autoadensável variando a concentração de fibras de aço e polipropileno



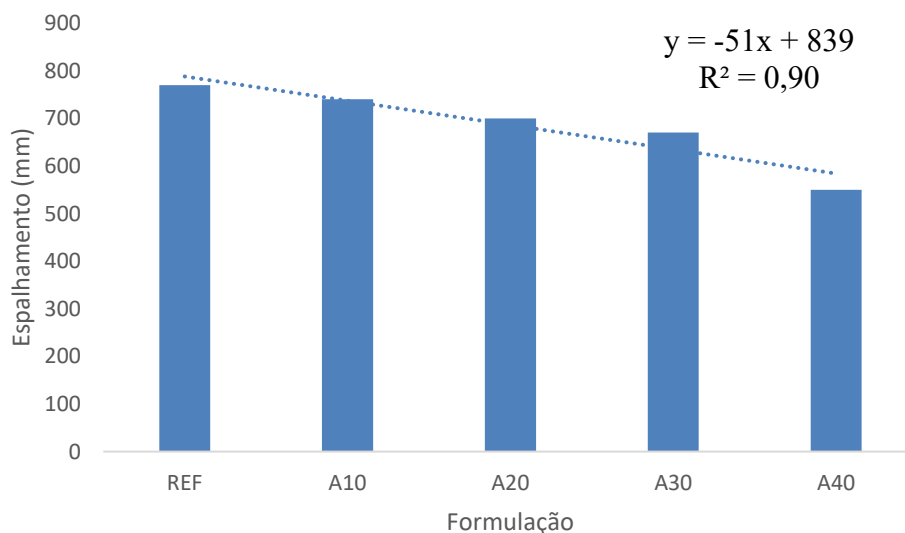
Fonte: O Autor (2021).

O Gráfico 3 apresenta os valores de espalhamento de concreto autoadensável com adição de fibras de aço, enquanto os valores de espalhamento do concreto com adição de fibras de polipropileno são apresentados no Gráfico 4.

Pela análise dos Gráficos 3 e 4 é possível concluir que a adição de fibras reduz a fluidez do concreto, sendo essa proporcional a quantidade de fibras adicionadas. Essa diminuição de fluidez pode ser justificada pelo entrelaçamento das fibras na mistura de concreto, que dificulta o espalhamento do concreto autoadensável. Conforme é observado no gráfico, essa redução obedece satisfatoriamente uma equação de primeiro grau. O valor do ajustamento da curva é de 0,9 e 0,98 para as formulações com adição de fibras de aço e de polipropileno respectivamente. Isso indica que 90% dos dados das formulações com fibras de aço e 98% dos dados das formulações com fibras de polipropileno podem ser explicados através da reta de tendência, sendo que 10% e 2% dos dados, respectivamente, são afetados por variáveis não controláveis.

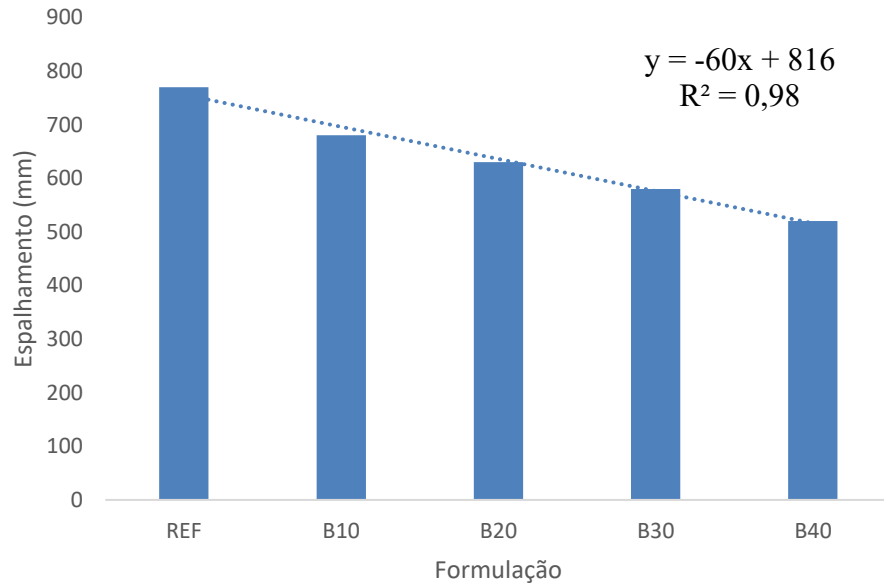
As fibras poliméricas apresentam uma redução mais significativa, fato que pode ser comprovado pelo maior coeficiente de inclinação da reta de tendência do espalhamento das fibras poliméricas em relação as fibras de aço. Vale ressaltar nessa análise que a ABNT NBR 15823-1:2017 define a classe do concreto autoadensável de acordo com seu espalhamento.

Gráfico 3 – Resultados dos espalhamentos do concreto autoadensável com diferentes teores de fibras de aço



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 4 – Resultados dos espalhamentos do concreto autoadensável com diferentes teores de fibras de polipropileno



Fonte: O Autor (2021).

Dessa forma, o concreto REF é classificado como classe SF 3. As formulações A10, A20, A30, B10 e B20 se enquadram na classe SF 2, enquanto que as formulações B40 e B30 são classificadas como classe SF 1. A formulação A40 encontra-se no limite da Classe 1, enquanto que a formulação B40, não é considerada como concreto autoadensável conforme norma já mencionada.

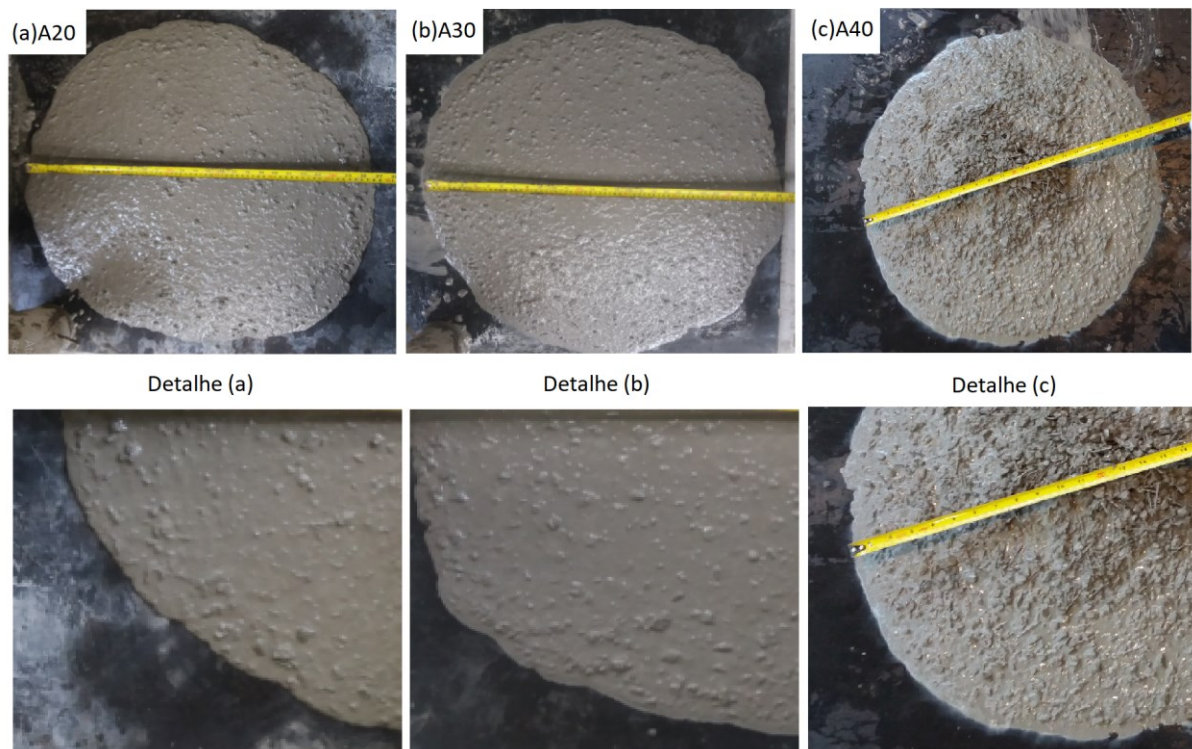
Portanto, pode-se afirmar que a concentração de 30 kg/m³ (A30 e B30) é o limite de adição de ambas as fibras, para o traço de concreto utilizado no experimento, uma vez que adições superiores de fibras de aço ou polipropileno não mais caracterizam um concreto autoadensável.

A estabilidade do concreto foi alterada conforme a concentração de fibras de aço e polipropileno cresceu. Percebe-se que a formulação REF apresenta mínima exsudação, que caracteriza o concreto como estável e classe IEV 1. Essa estabilidade foi mantida para as formulações A10, A20, B10 e B20. As formulações A30 e B30 apresentaram auréola de argamassa nas extremidades do concreto, indicando instabilidade do concreto, podendo ser classificado como IEV 2. As dosagens A40 e B40 apresentaram a segregação entre a argamassa e o agregado graúdo, com grande auréola de argamassa e concentração de agregado graúdo e

fibras no centro da mistura. Dessa forma, essas dosagens podem ser classificadas como IEV 3, altamente instável.

O espalhamento foi repetido de forma a obter confiabilidade dos resultados de estabilidade, confirmando os resultados anteriormente obtidos. Tais condições descritas acima, podem ser verificadas na Figura 26. O item (a) apresentada um concreto com baixa exsudação. O item (b) apresenta auréola de argamassa no entorno do concreto autoadensável, enquanto o item (c) apresenta auréola de argamassa associado a elevada concentração de brita e fibras no centro da placa base.

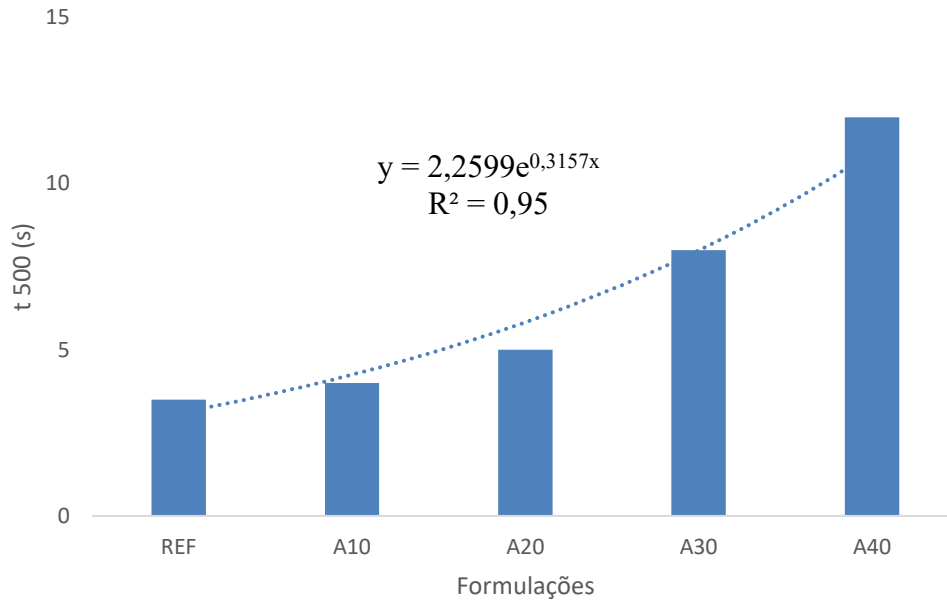
Figura 26 – Estabilidade visual do concreto estável (a) instável (b) e altamente instável (c)



Fonte: O Autor (2021).

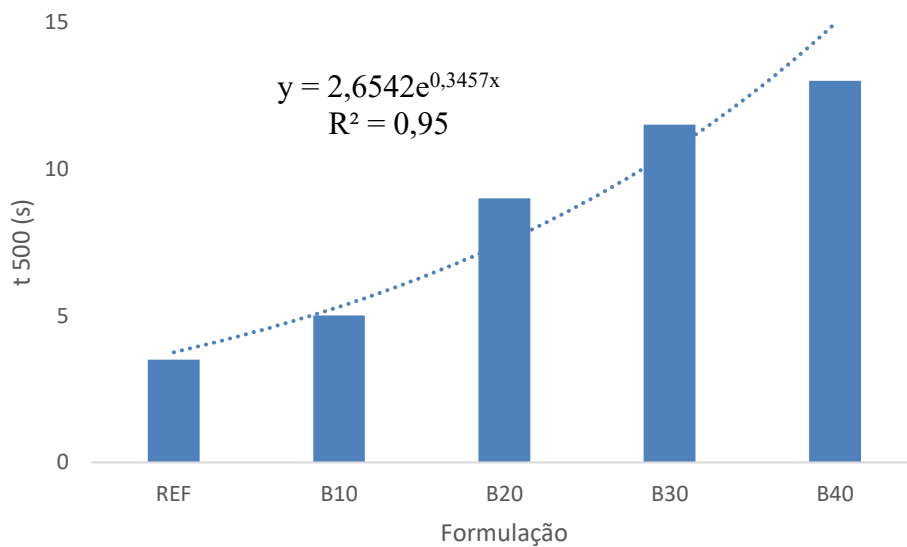
Os Gráfico 5 e Gráfico 6 apresentam a evolução da viscosidade verificada para concretos com adição de fibras de aço e polipropileno, respectivamente. Nota-se que 95% dos resultados obtidos seguem satisfatoriamente uma variação exponencial com a adição de fibras de aço e polipropileno. Vale ressaltar que todas as formulações avaliadas podem ser classificadas com VS 2.

Gráfico 5 – Resultados de viscosidade plástica aparente do concreto REF e com adição de fibras de aço em diferentes teores



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 6 – Resultados de viscosidade plástica aparente do concreto REF e com adição de fibras de polipropileno em diferentes teores

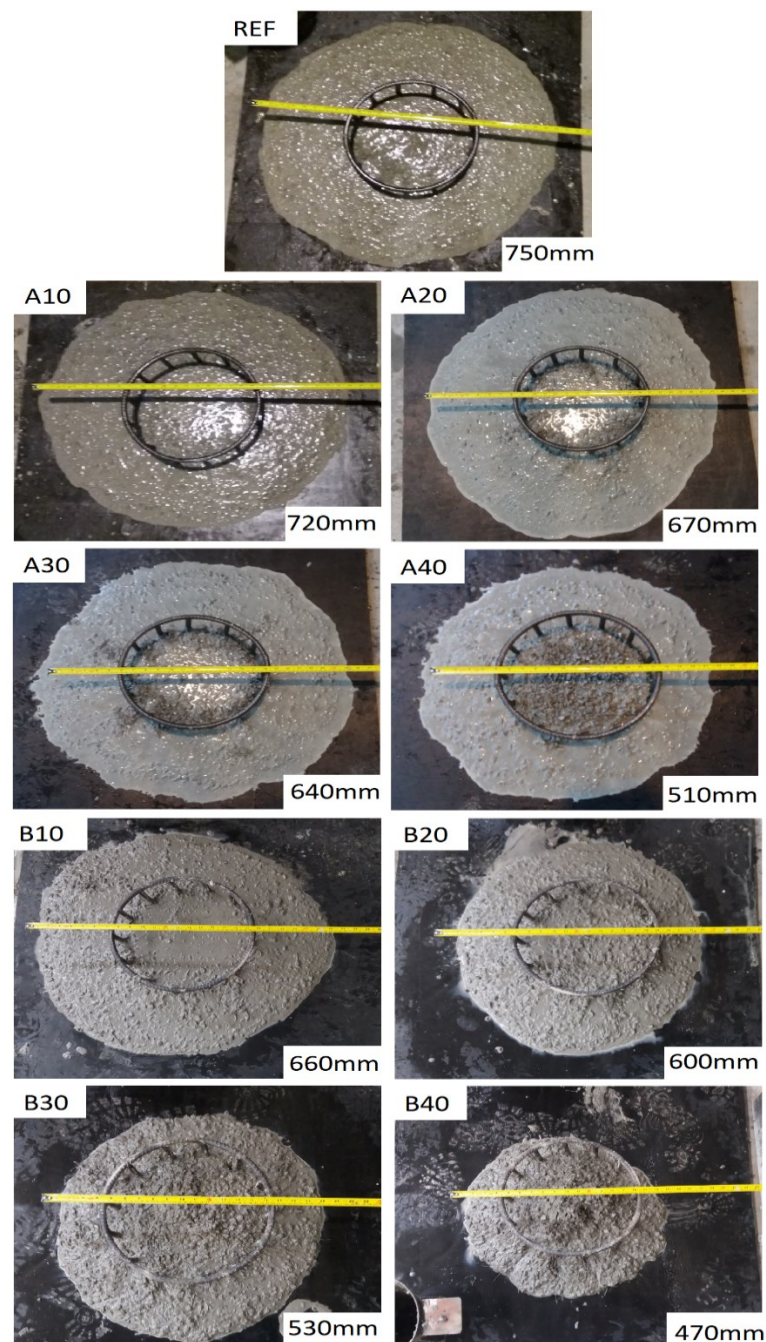


Fonte: O Autor (2021).

4.2.2. Habilidade passante pelo método do anel J do concreto autoadensável reforçado com fibras

A Figura 27 apresenta a verificação da habilidade passante pelo método do anel J nas formulações REF e com adição de fibras de aço e polipropileno.

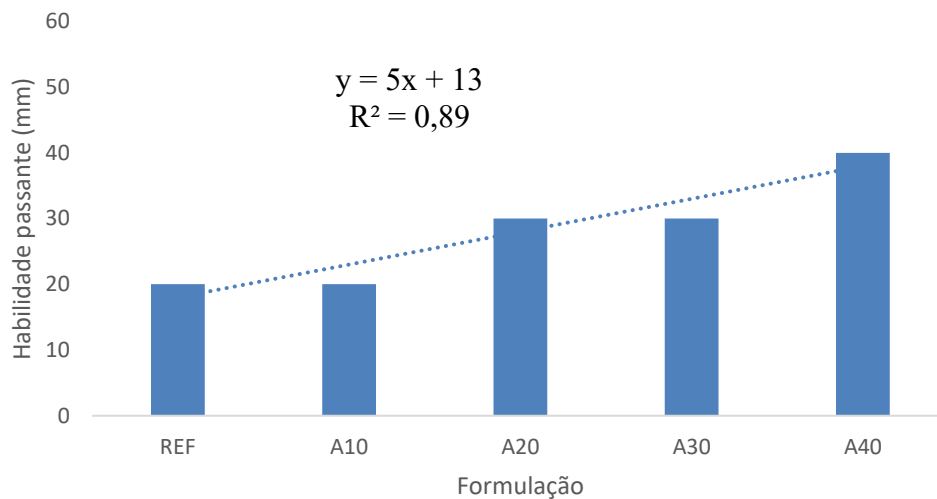
Figura 27 – Verificação da habilidade passante pelo método do anel J do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e polipropileno



Fonte: O Autor (2021).

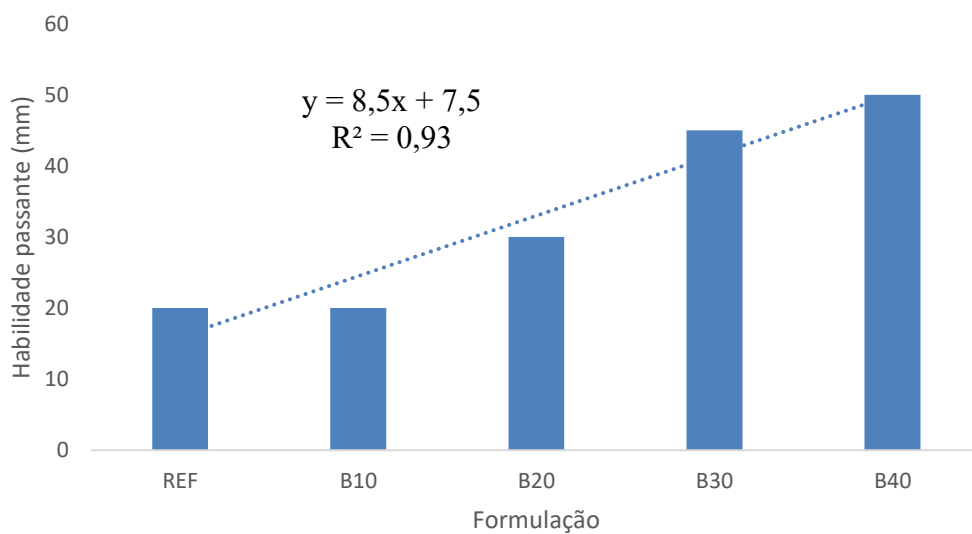
Os resultados obtidos para as misturas com adição de fibras de aço são apresentados no Gráfico 7. Por sua vez, o Gráfico 8 mostra os resultados obtidos para as formulações com fibras de polipropileno.

Gráfico 7 – Habilidade passante pelo método do anel J do concreto autoadensável com adição de fibras de aço em diferentes teores



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 8 - Habilidade passante pelo método do anel J do concreto autoadensável com adição de fibras de polipropileno em diferentes teores



Fonte: O Autor (2021).

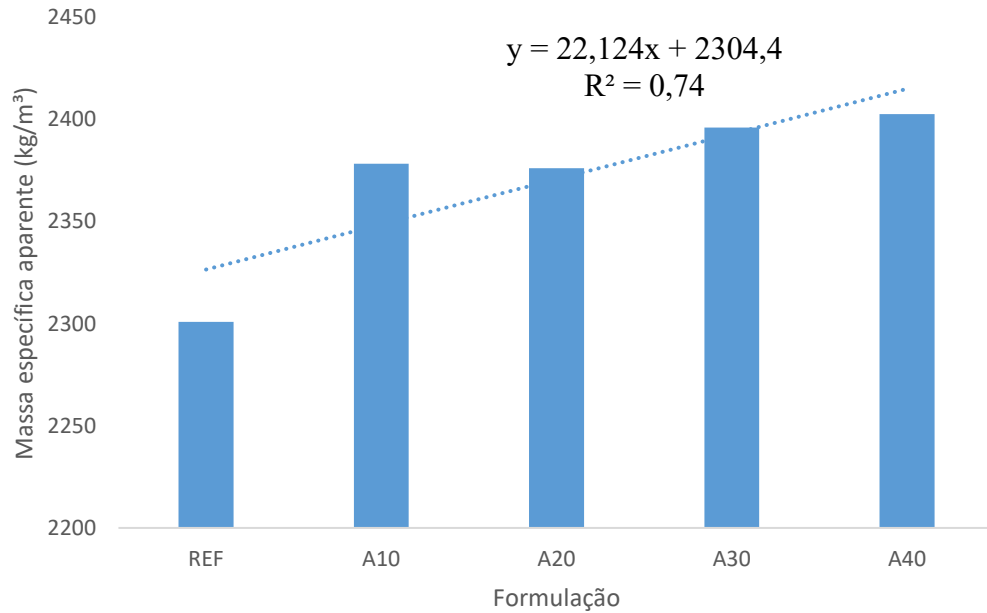
A habilidade passante de 50 mm é definida pela ABNT NBR 15823-1:2017 como o limite para o concreto ser classificado como autoadensável. Dessa forma, todas as formulações podem ser consideradas como concreto autoadensável. A evolução da habilidade passante pode ser adequadamente descrita por uma equação de primeiro grau, conforme equações apresentadas nos Gráfico 7 e Gráfico 8. As fibras de polipropileno apresentaram evolução mais acentuada da habilidade passante, fato que pode ser comprovado pelo maior coeficiente de inclinação da reta. Dessa forma, pode-se concluir que maiores concentrações de fibras no concreto reduzem sua capacidade de compósito fluir, uma vez que o intertravamento causado pela presença de fibras restringe o escoamento entre a armadura. Além disso, é evidente a ocorrência de segregação nos concretos com adições superiores a 30 kg/m³ (A30, A40, B30 E B40), conforme apresentado na Figura 26. Nota-se que há uma concentração de brita e fibras no centro da placa base, indicando a segregação do material, uma vez que a argamassa fluiu sem dificuldade pelo anel J, enquanto que o agregado graúdo e as fibras foram contidas pelas barras de aço.

4.2.3. Ensaio físicos no estado fresco

A partir do ensaio gravimétrico foram obtidos valores de massa específica aparente do concreto autoadensável com adição de fibras de diferentes tipos e concentrações no estado fresco. O Gráfico 9 apresenta a massa específica aparente verificada para as formulações com adição de fibras de aço, enquanto que o Gráfico 10 ilustra a massa específica aparente do concreto com adição de fibras de polipropileno.

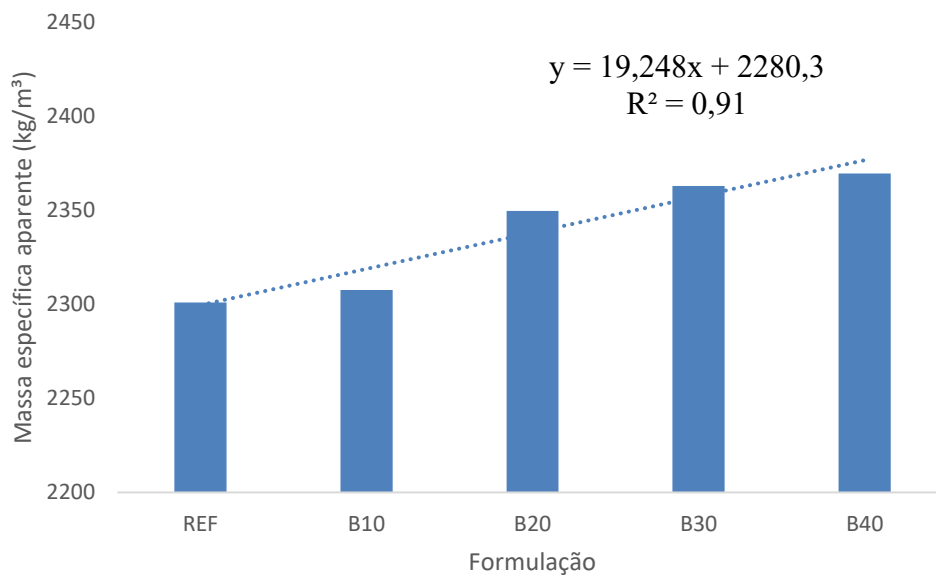
É possível observar pela análise dos gráficos que o aumento da quantidade de fibras na mistura do concreto autoadensável acarreta na elevação da densidade no estado fresco. O comportamento da adição das fibras de aço e de polipropileno, quando avaliada a massa específica aparente, segue uma tendência linear, adequadamente descrito pelas equações apresentadas nos Gráfico 9 e Gráfico 10. Ainda, percebe-se que a massa específica aparente é afetada de forma mais significativa pela fibra de aço do que pela fibra de polipropileno. Isso pode ser comprovado pelo maior coeficiente de inclinação da reta obtida para as formulações com fibras de aço.

Gráfico 9 – Massa específica aparente do concreto com fibras de aço em diferentes concentrações



Fonte: O Autor (2021).

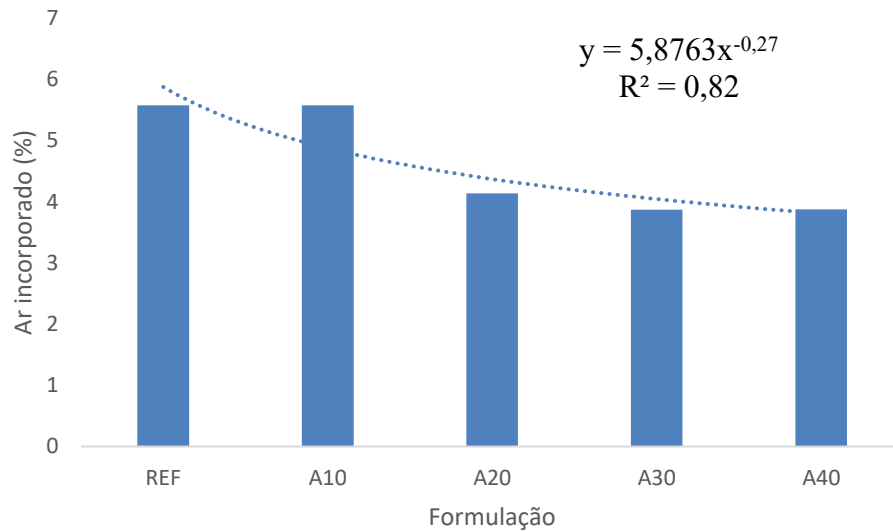
Gráfico 10 - Massa específica aparente do concreto com fibras de polipropileno em diferentes concentrações



Fonte: O Autor (2021).

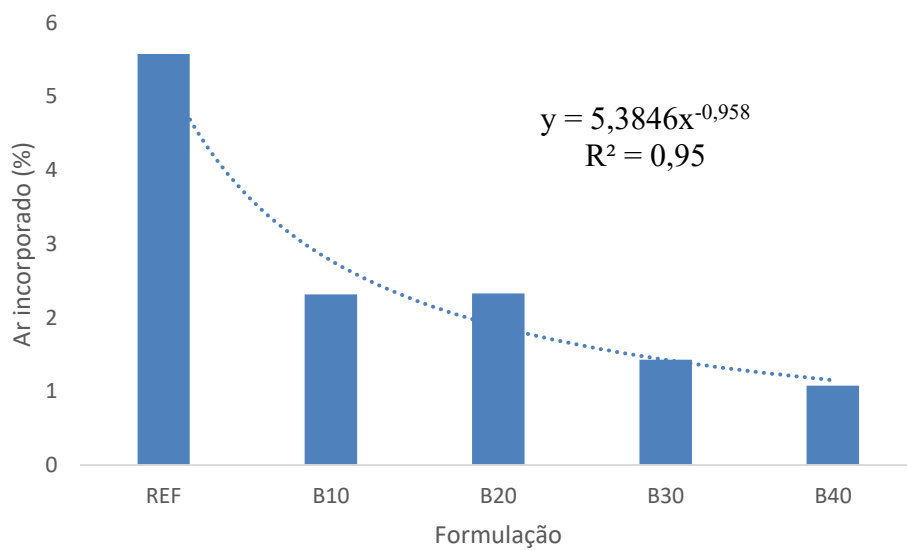
Os Gráfico 11 e Gráfico 12 apresentam o teor de ar incorporado à mistura no estado fresco para formulações com adição de fibras de aço e polipropileno, respectivamente.

Gráfico 11 – Teor de ar incorporado ao concreto autoadensável com adição de fibras de aço em diferentes concentrações



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 12 - Teor de ar incorporado ao concreto autoadensável com adição de fibras de polipropileno em diferentes concentrações

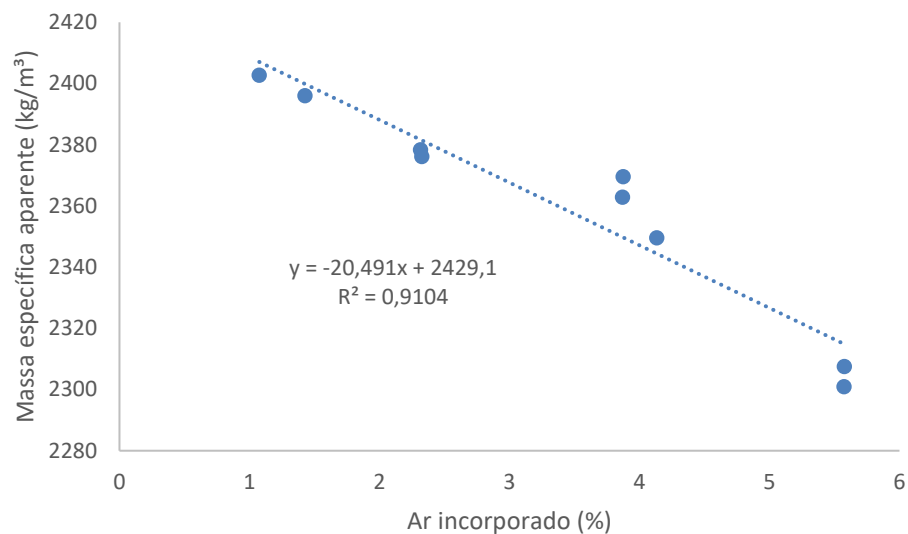


Fonte: O Autor (2021).

A análise do Gráfico 11 e Gráfico 12 permite constatar uma diminuição do teor de ar incorporado à mistura conforme a concentração de fibras cresce. Tal fato é observado tanto para o concreto reforçado com fibras de aço quanto para os com polipropileno. A tendência de comportamento das formulações com adição de fibras pode ser explicado através de uma equação de potência.

Ainda assim, os resultados são correlacionáveis com a massa específica aparente obtida (Gráfico 13) através de uma equação linear, que explica adequadamente 91% dos resultados obtidos. A diminuição do teor de ar incorporado no estado fresco acarreta no aumento da massa específica aparente do concreto, pois há a desincorporação do ar aprisionado no interior do concreto. Por sua vez, a diminuição do teor de ar incorporado diminui o espalhamento do concreto, pois ocorre o aumento da viscosidade do concreto, uma vez que os grãos dos materiais que compõem o concreto estão mais próximos.

Gráfico 13 – Relação entre massa específica aparente e teor de ar incorporado ao concreto autoadensável com fibras



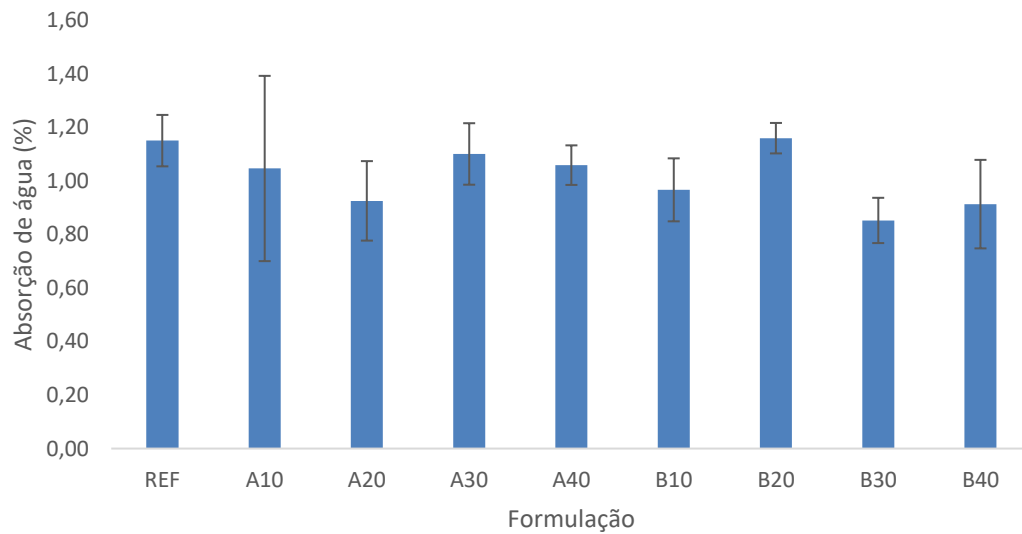
Fonte: O Autor (2021).

Portanto, pode-se afirmar que as propriedades do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e polipropileno se assemelham aos verificado usualmente em concretos autoadensáveis.

4.2.4. Índices físicos das amostras de concreto autoadensável aos 28 dias de cura

A absorção de água obtida para o concreto endurecido REF e nos concretos com adição de fibras de aço ou polipropileno em diferentes concentrações é apresentada no Gráfico 14.

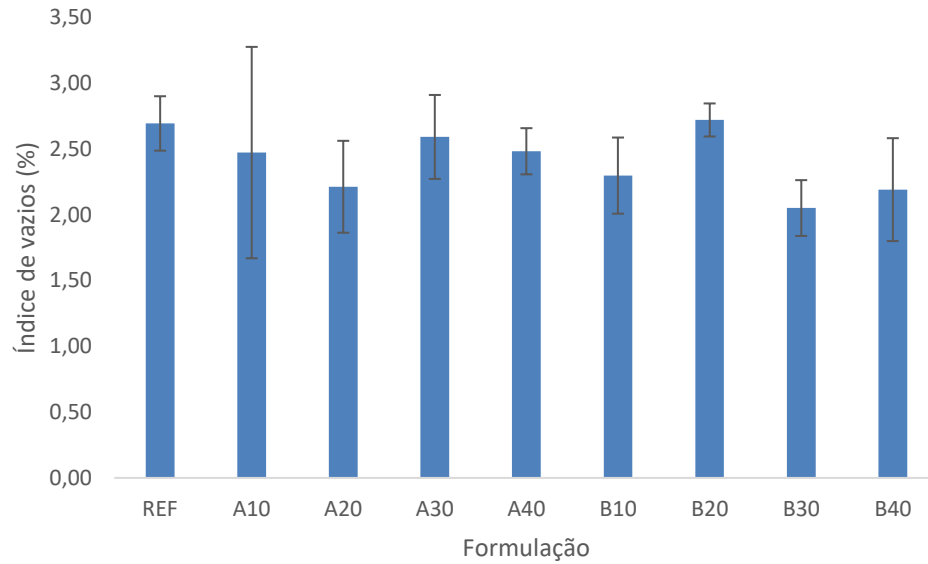
Gráfico 14 – Absorção de água de concretos autoadensáveis com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações



Fonte: O Autor (2021).

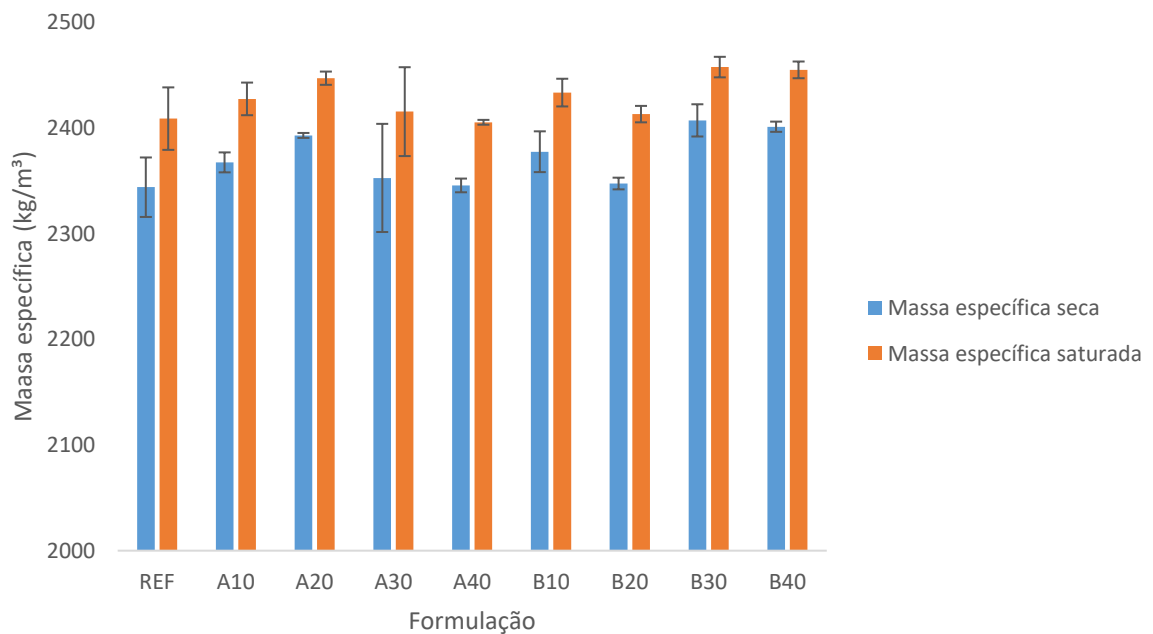
O Gráfico 15 apresenta o índice de vazios verificado nas formulações avaliadas, enquanto o Gráfico 16 apresenta a massa específica alcançada para os concretos autoadensáveis produzidos, em condições secas e saturadas.

Gráfico 15 – Índice de vazios de concretos autoadensáveis com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações



Fonte: O Autor (2021).

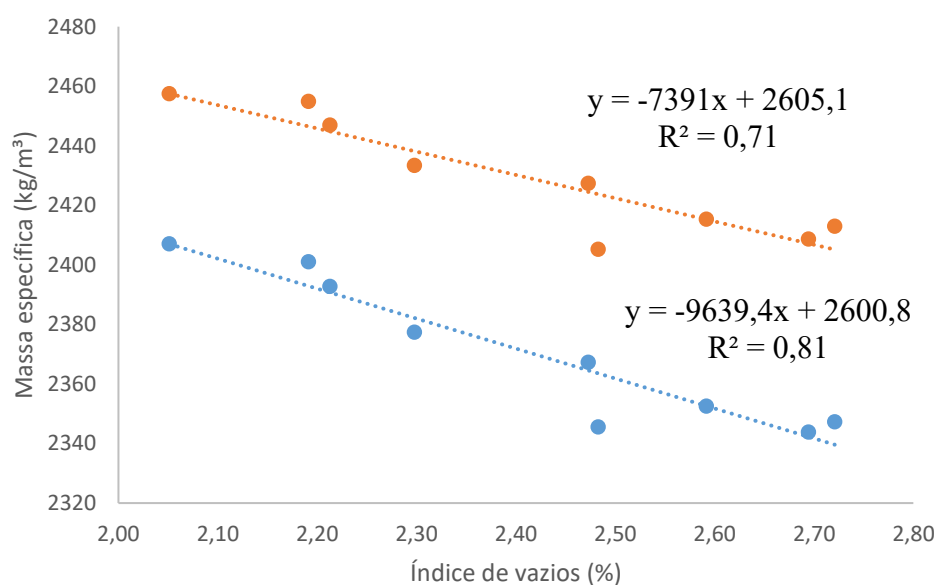
Gráfico 16 – Massa específica do concreto autoadensável nas condições seco e saturado com adição de fibras de aço ou polipropileno em diferentes teores



Fonte: O Autor (2021).

A massa específica de um concreto é inversamente proporcional ao índice de vazios desse, devido a presença de poros. Quanto maior a porosidade de um concreto, menor será sua massa específica. Os resultados do Gráfico 16 apresentam elevado desvio padrão, o que dificulta uma maior clarividência sobre o impacto da porcentagem de fibras utilizadas nas misturas. O Gráfico 17 apresenta a correlação entre o índice de vazios e a massa específica nas condições seca e saturada. Essa correlação pode ser adequadamente descrita por uma equação de primeiro grau, indicando uma variação constante independente do teor de vazios do concreto. Evidencia-se que o comportamento físico do concreto autoadensável reforçado com fibras se assemelha ao comportamento verificado em concretos convencionais.

Gráfico 17 - Relação entre massa específica e índice de vazios em concretos autoadensáveis com adição de fibras em diferentes teores



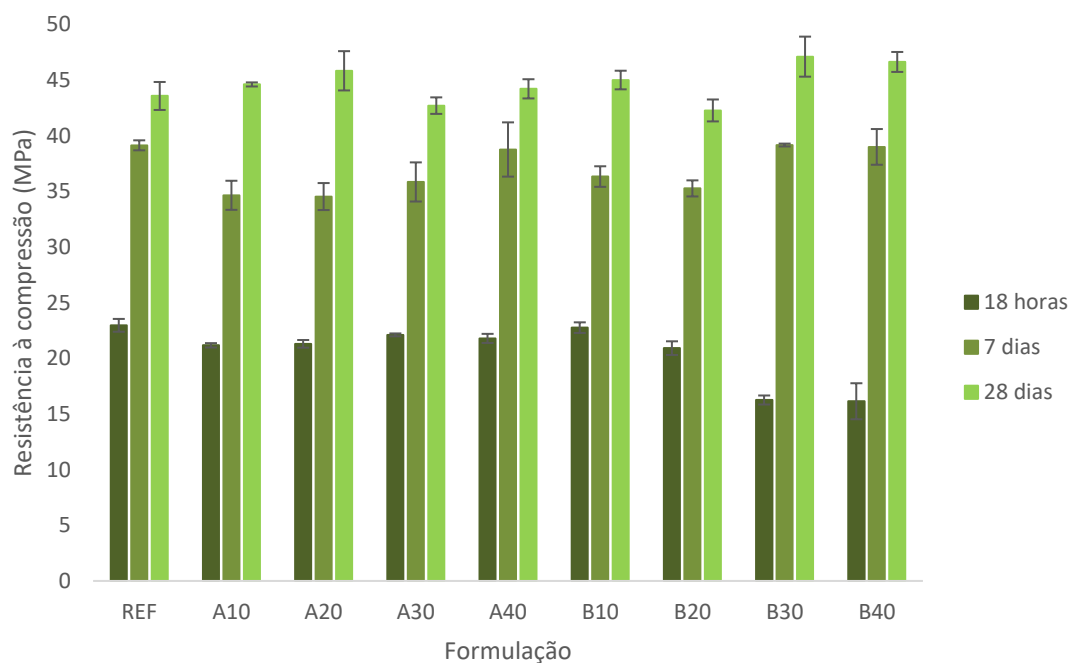
Fonte: O Autor (2021).

4.2.5. Propriedades mecânicas

4.2.5.1 Resistência à compressão axial

O Gráfico 18 apresenta os valores de resistência à compressão do concreto em diferentes idades com adição de fibras. Percebe-se uma evolução coerente das resistências verificadas em cada formulação. Além disso, o desvio padrão obtido em cada formulação é mínimo, indicando uma boa confiabilidade dos resultados obtidos.

Gráfico 18 – Resistência à compressão do concreto autoadensável com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes concentrações as 18 horas, 7 dias e 28 dias de cura



Fonte: O Autor (2021).

Não foi possível estabelecer uma tendência para a evolução da resistência na primeira idade, devido a condições de cura adversos nas 18 horas de idade iniciais. Como exemplo, pode-se citar variações de temperatura. No caso das fibras de aço, com relação a referência, ocorreram reduções da resistência mecânica a compressão da ordem de 3,7% (A30) a 7,8 % (A10). Da mesma forma, as dosagens com adição de fibras de polipropileno apresentaram reduções de 1% (B10) a 30% (B40).

Aos 7 dias de cura, as formulações com adição de fibra de aço sofreram redução da ordem de 1% (A40) a 9,2% (A20) com relação à referência, enquanto que as fibras poliméricas variaram da ordem de 0,36% (B30) a 9,9% (B20). Observa-se que a adição de fibras ao concreto autoadensável não auxiliou na resistência a compressão até os 7 dias de idade, sendo que em nenhuma dosagem com adição de fibras a resistência a compressão foi maior que a referência.

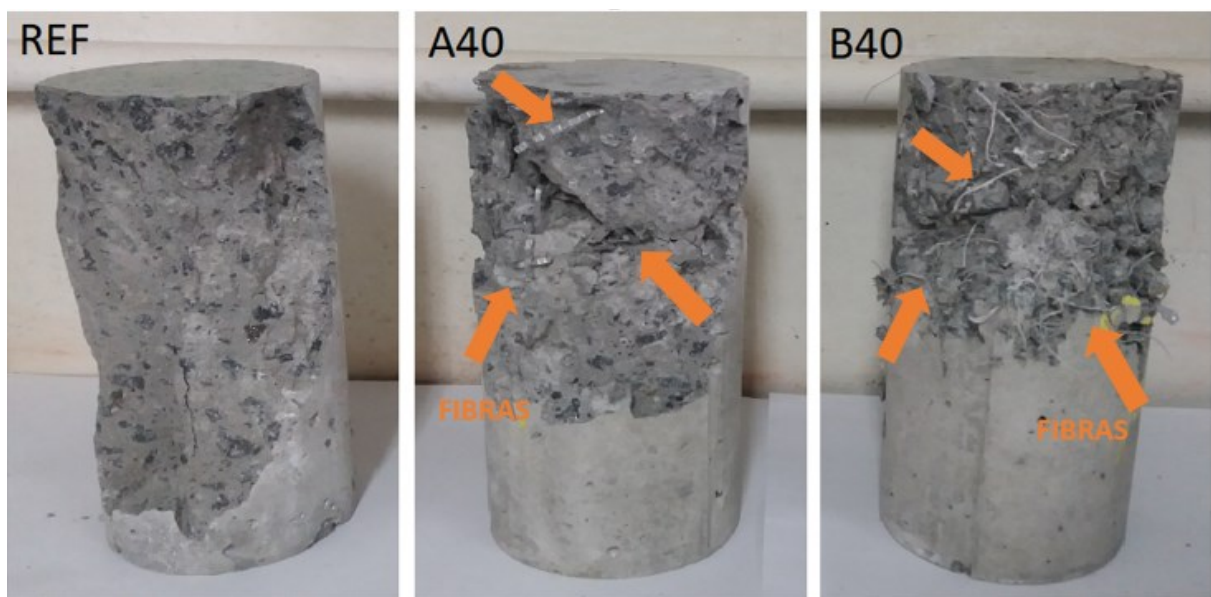
Aos 28 dias de idade, com relação à referência, as formulações com adição de fibras de aço apresentaram 2% de redução (A30) até 5,2% de crescimento (A20), enquanto que para as fibras de polipropileno, as variações foram de diminuição de 9% (B20) a aumento de 8,1% (B30). Nota-se que os resultados de resistência apresentaram uma taxa de evolução constante, entre as idades avaliadas, para cada formulação.

Conclui-se que a adição de fibras, tanto de aço quanto de polipropileno, não apresenta significativa melhora no desempenho à compressão do concreto autoadensável. Tal fato pode ser explicado pela dispersão das fibras no interior do corpo de prova. As fibras posicionadas na direção paralela à aplicação de carga não auxiliaram na resistência à compressão, enquanto que as posicionadas em posição perpendicular auxiliaram na resistência à expansão volumétrica do corpo de prova. Dessa forma, sendo que o corpo de prova cilíndrico apresenta maior dimensão vertical, há uma maior tendência das fibras se orientarem nessa direção.

Apesar disso, a adição de fibras na estrutura do compósito não causou uma ruptura frágil das amostras submetidas à compressão. Em geral, as formulações com fibras apresentaram ruptura por cisalhamento, sendo que as partes dos corpos de prova permaneceram unidas após a execução do ensaio de compressão.

A Figura 28 apresenta a dispersão das fibras de aço e polipropileno no interior do corpo de prova cilíndrico.

Figura 28 – Seção de corpo de prova rompido à compressão das formulações REF, A40 e B40

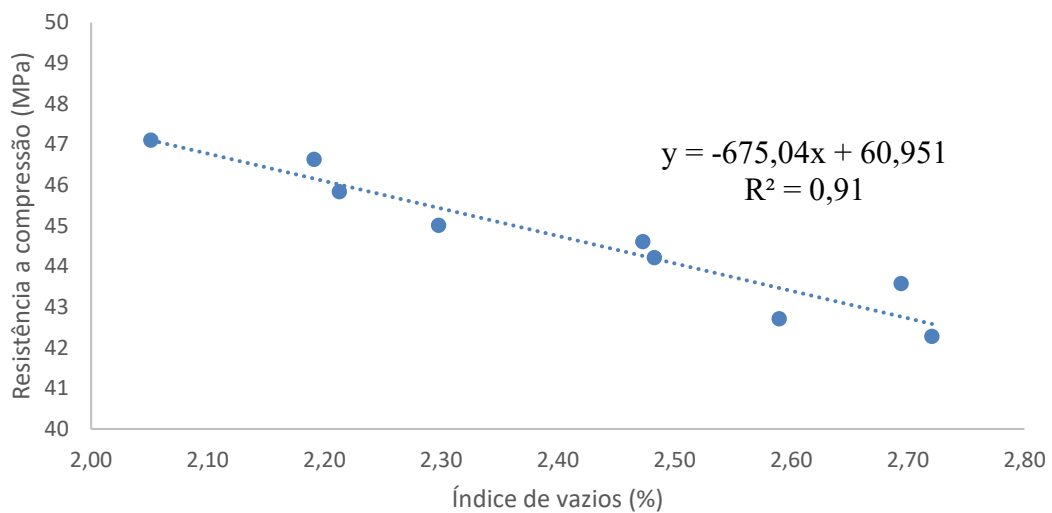


Fonte: O Autor (2021).

A resistência à compressão de um concreto é inversamente proporcional ao índice de vazios, devido a porosidade do concreto, que não contribui para a resistência mecânica do compósito. O Gráfico 19 apresenta a relação entre o índice de vazios e as resistências à compressão verificadas para a formulação REF e demais formulações com adição de fibras em diferentes concentrações. Ocorre uma diminuição da resistência de acordo com o aumento do

número de poros do compósito. Essa relação pode ser adequadamente descrita por uma equação de primeiro grau, evidenciando que as propriedades no estado endurecido do concreto autoadensável reforçado com fibras se assemelham as verificadas em concretos convencionais.

Gráfico 19 – Relação entre resistência à compressão e índice de vazios em concretos autoadensáveis com adição de fibras em diferentes teores

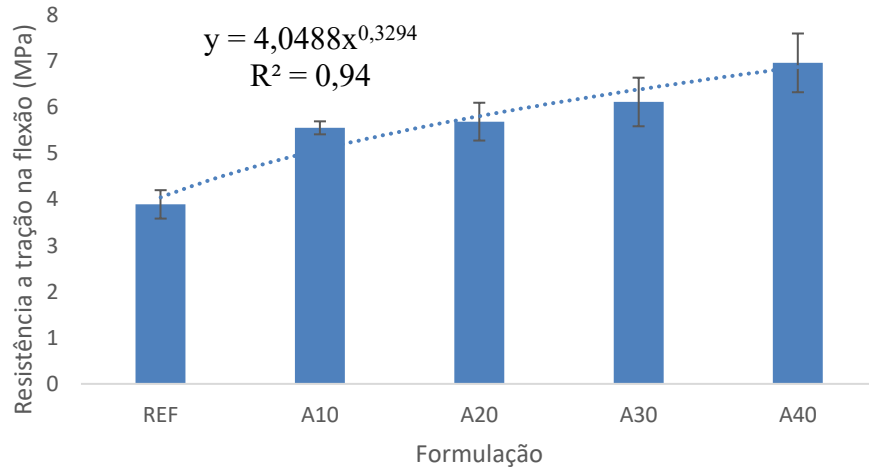


Fonte: O Autor (2021).

4.2.5.2. Resistência à tração na flexão

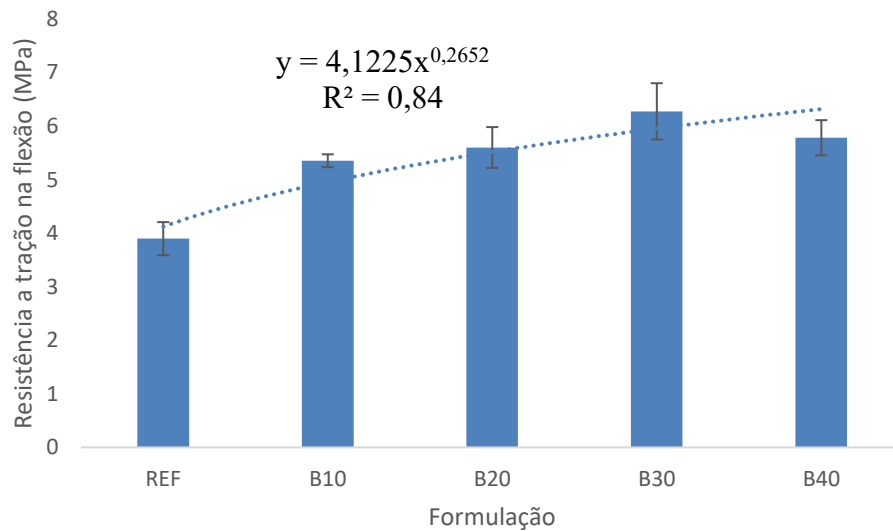
O Gráfico 20 apresenta as resistências à tração na flexão do concreto autoadensável com diferentes teores de fibra de aço. De forma semelhante, o Gráfico 21 apresenta a adição de diversos teores de fibra de polipropileno. Os ensaios foram realizados com 28 dias de cura.

Gráfico 20 - Resistência mecânica a tração na flexão do concreto autoadensável com diferentes teores de fibra de aço



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 21 - Resistência mecânica a tração na flexão do concreto autoadensável com diferentes teores de fibra de polipropileno



Fonte: O Autor (2021).

A análise dos gráficos permite afirmar que as resistências à tração na flexão dos concretos com adição de fibras foram superiores à do concreto referência. Foi verificado desempenho crescente representado de maneira adequada pelo modelo de potência. Dessa forma, a evolução da resistência à tração na flexão apresentou crescimento mais acentuado com

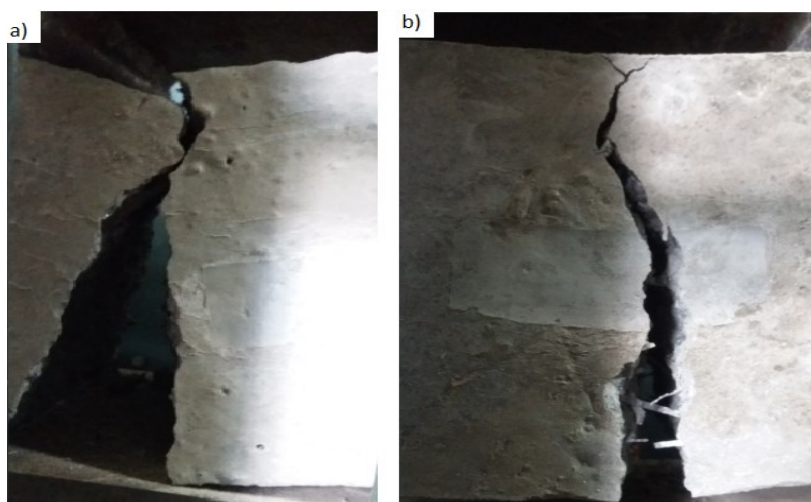
menores concentrações de fibras, enquanto que grandes adições tendem a atingir a constância da resistência mecânica

As fibras de aço apresentaram variação de crescimento de 45,9% a 78,7% em relação a REF. Da mesma forma, as fibras de polipropileno tiveram aumento da resistência de 42,3% a 60,7% em relação a referência. Nota-se que o melhor desempenho da fibra de aço ocorreu na formulação A40, com maior concentração da fibra. Já as formulações com adição de fibras de polipropileno apresentaram um melhor desempenho em B30, seguido de diminuição da resistência em B40. Portanto, é possível afirmar que adições excessivas de fibras de polipropileno afetam o desempenho da resistência à tração na flexão.

A tendência de evolução da resistência a tração na flexão para os concretos autoadensáveis com adição de fibras de aço e de polipropileno apresenta um comportamento logarítmico. O valor do grau de ajustamento da curva (R^2) obtido para a adição de fibras de aço e de polipropileno, 0,94 e 0,84 respectivamente, podem ser considerados bons, uma vez que o valor do resíduo é da ordem de 6% e 15% respectivamente. Esse valor de resíduo é afetado por fatores que não são controláveis no experimento.

A Figura 29 apresenta o rompimento dos corpos de prova à tração na flexão. É possível observar que o rompimento do concreto de referência ocorre de forma abrupta, enquanto os concretos reforçados com fibras de aço e polipropileno apenas apresentam pequenas fissuras, indicando seu rompimento. As formulações reforçadas com fibras mantiveram a estrutura do concreto unida mesma após o rompimento dos corpos de prova.

Figura 29 – Corpos de prova ensaiados a tração na flexão a) sem adição de fibras b) com adição de fibras



Fonte: O Autor (2021).

4.2.6. Dispersão das fibras na matriz do concreto

A Figura 30 a 34 apresentam a seção transversal das amostras ensaiadas. Pode-se observar a dispersão das fibras nas amostras avaliadas.

Figura 30 – Seção transversal REF



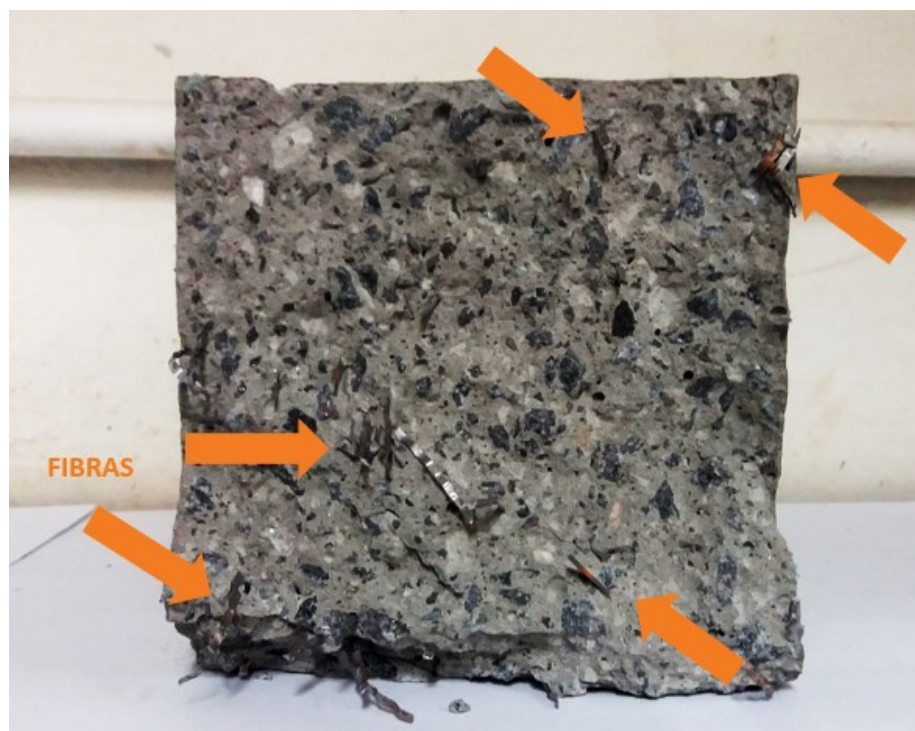
Fonte: O Autor (2021).

Figura 31 – Seção transversal da formulação A20



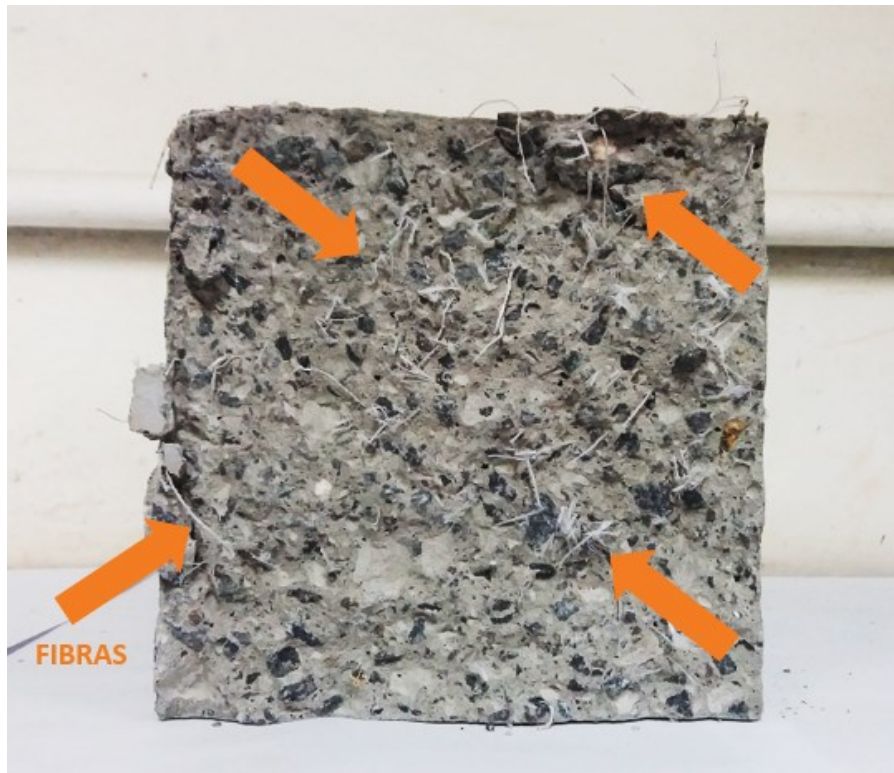
Fonte: O Autor (2021).

Figura 32 - Seção transversal da formulação A40



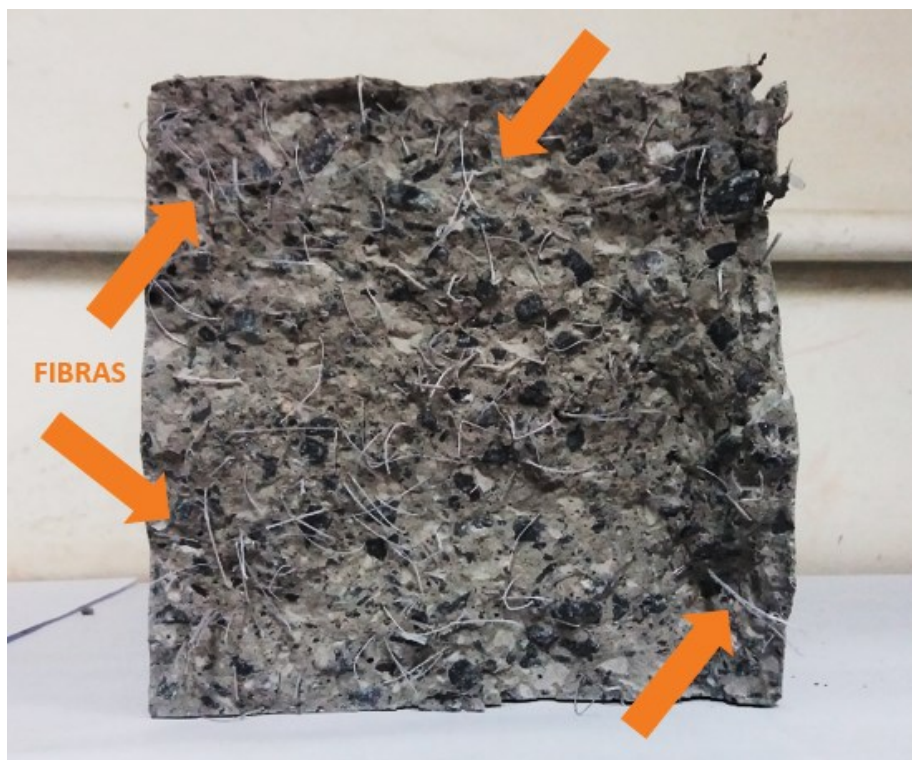
Fonte: O Autor (2021).

Figura 33 – Seção transversal da formulação B20



Fonte: O Autor (2021).

Figura 34 - Seção transversal da formulação B40



Fonte: O Autor (2021).

As Figuras 30 a 34 evidenciam uma distribuição aleatória das fibras no interior da amostra. Da mesma forma, a orientação apresenta-se de forma aleatória. Também, percebe-se que a quantidade de fibras visíveis na seção aumenta conforme a concentração na mistura.

A mistura A40 (Figura 32) e a mistura B40 (Figura 34) representam o mesmo volume de fibras, porém a primeira apresenta uma mistura com fibras de aço, enquanto a segunda apresenta uma seção com fibras de polipropileno. Pode-se perceber que as fibras de polipropileno estão presentes em maior quantidade quando comparadas às fibras de aço. Isso se deve ao fato de que há maior quantidade de fibras de polipropileno por massa de material, conforme apresentado na Tabela 1 e Tabela 2.

Deve-se atentar para a dispersão homogênea da fibra de polipropileno. O módulo de elasticidade dessa fibra (10 GPa) torna o material pouco rígido, fato que favorece o envolvimento da fibra pela argamassa da mistura e facilita a dispersão dessa na mistura. Por outro lado, o aço é um material rígido, propriedade que dificulta a dispersão do material pela mistura.

Além disso, nota-se que as seções das formulações com fibras de polipropileno apresentam as fibras deterioradas, indicando que ocorreu ruptura da fibra durante o rompimento do concreto. Isso não ocorre com as fibras de aço, que se apresentam na geometria inicial mesmo após a ruptura do concreto. Dessa forma, a tensão transmitida à fibra não foi suficiente para ocasionar o escoamento dessa, mas sim causar a ruptura da região de contato entre a fibra de aço e a matriz do concreto.

5. CONCLUSÃO

O estudo realizado objetivou a avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável com adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes teores. A adição de fibras à matriz do concreto provoca alterações nas propriedades em ambos os estados.

No estado fresco, ocorreu a diminuição do espalhamento. As formulações com as maiores concentrações de fibras de aço (A40) e de polipropileno (B40) foram as mais afetadas, sendo não mais caracterizadas como concretos autoadensáveis. De forma semelhante, houve diminuição da habilidade passante pelo método do anel J do concreto. Apesar disso, foram obtidos valores dentro dos indicados por norma para concreto autoadensáveis. Ainda, a viscosidade plástica aparente do concreto foi elevada para intervalos de tempo da ordem de 3 vezes o valor verificado para a REF.

Por sua vez, a massa específica aparente do concreto autoadensável reforçado com fibras cresceu linearmente com o aumento da concentração de fibras de aço e polipropileno, tornando as formulações com adição de fibras mais densas que o concreto REF.

No estado endurecido, a resistência mecânica à compressão dos concretos autoadensáveis reforçados com fibras não apresentou variações significativas em relação à formulação REF. Por outro lado, a resistência à tração na flexão apresentou crescimento estimado por uma equação de potência, representando assim uma propriedade de grande interesse para a indústria da construção civil.

Com base no traço, tipos e concentrações de fibras utilizados no estudo, foi possível definir uma concentração otimizada de fibras que potencializem o desempenho do concreto autoadensável. As formulações com reforço de fibras de aço apresentaram melhor desempenho das propriedades em adições de 20kg/m^3 , caracterizando um concreto estável, com diminuição de 10% de espalhamento da mistura e elevação de 46% da resistência à tração na flexão. Por sua vez, as formulações com fibras de polipropileno apresentaram máximo desempenho das propriedades na concentração de $2,34\text{ kg/m}^3$, sendo a estabilidade do concreto mantida, o espalhamento reduzido em 22% e a resistência mecânica elevada em 57%.

Por fim, é necessária a definição da fluidez e resistência à compressão requeridas do concreto. Dessa forma, pode-se otimizar o desempenho na tração à flexão com adições que mantenham as propriedades do estado fresco e potencializem o desempenho no estado endurecido. Portanto, conclui-se que adições de fibras de aço e de polipropileno ao concreto autoadensável apresentam grandes potenciais, desde que sejam ajustadas ao traço de referência.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliar as propriedades do estado endurecido dos concretos autoadensáveis com adição de fibras de aço e polipropileno mantendo-se constantes as propriedades do estado fresco;
- Avaliar a utilização de outros tipos e concentrações de fibras, uma vez que diversos materiais e geometrias de fibras encontram-se disponíveis na construção civil.
- Fazer o uso de materiais residuais como agregados, que eventualmente causem uma redução das propriedades mecânicas do concreto, buscando recuperar a resistência com o uso de fibras.

REFERÊNCIAS

AMARAL, J. C. J.; SILVA, L. C. F.; MORAVIA, W. G. Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

American Concrete Institute. **Measurement of properties of fiber reinforced concrete**. ACI Committee 544, 1989. Disponível em: http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/5442r_89.pdf. Acesso em: 13 nov. 2020.

American Society for Testing and Materials. **Standard specification for steel fiber for fiber-reinforced concrete**. ASTM A820 / A820M-16. ASTM International, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**. Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**. Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**. Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

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

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

AYDIN, A. C. Self compactibility of high volume hibryd fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p 1149-1154, jun. 2007.

BARROS, A. R. de. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/392/1/Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20comportamento%20de%20vigas%20de%20concreto%20%20autoadens%C3%A1vel%20refor%C3%A7ado%20com%20fibras%20de%20a%C3%A7o.pdf>. Acesso em: 22 de abril de 2021.

CÁCERES, A. R. E. et al. Caracterização geométrica de macrofibras poliméricas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, n. 5, p. 644-668, mar. 2015.

CARNIO, M. A. **Propagação de trinca por fadiga do concreto reforçado com baixo teores de fibras**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

EPC – ELASTO PLASTIC CONCRETE. Ficha técnica BarChip MQ58. EPC do Brasil. Campinas, 2015. Disponível em: http://epcdobrasil.com.br/ficha-produtos/ficha_tecnica_barchip_58.pdf. Acesso em: 11 de janeiro de 2021

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. 2000. Boletim técnico (BT/PCC/260) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. 2011. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011

FIGUEIREDO, A. D. et al. **Concretos especiais**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2004.

GAO, J. FOURIE, A. Spread is better: an investigation on the mini-slump test. **Minerals Engineering**, vol. 71, 2015, p. 120-132.

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. 2010. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GOMES, Paulo C. C.; BARROS, Alexandre R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. Editora Pini. São Paulo, 2009.

HANAI, J. B. Comportamento resistente, ductilidade e confinamento. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisas e realizações**. São Paulo: Ibracon, v.1, 2005. p. 165-200.

HELENE, Paulo R. L.; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1.ed, São Paulo. Editora PINI, 1993. 349 p.

ITAMBÉ. CP V-ARI: Cimento Portland de alta resistência inicial. Itambé: Balsa Nova, 2018. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-v-ari/>. Acesso em 13 de abril de 2021.

LIGA QUÍMICA. Certificado de Análise Liga Flow 47 P. Sistema da Qualidade. **Liga Química Industrial**. Araranguá, 2020.

LUCENA, J. C. T. de. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de estruturas – Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-30032017-104705/pt-br.php>. Acesso em 22 de abril de 2021.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

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

MM FIBRAS. Tipos de fibras. **MM Fibras para concreto**. São José, 2014. Disponível em: <https://mmfibras.com.br/tipos-de-fibra/>. Acesso em 11 de janeiro de 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo: Bookman, 2016

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

ONGHERO, L. **Combate à retração e fissuração em concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de vidro**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 585-614.

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc_download&gid=1848&Itemid=. Acesso em: 24 fev. 2021.

SUKUMAR, B.; NAGAMANI, K.; RAGHAVAN, R. S. Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. **Construction and Building Materials**. v. 22, n. 7, p. 1394–1401, 2008.

VASCONCELOS, R. E. **Fratura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

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**. v. 25, n. 7, p. 3417-3426, 2011.