

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ISABELA ERENO DA SILVA

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E
MACROFIBRAS SINTÉTICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2021

ISABELA ERENO DA SILVA

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E
MACROFIBRAS SINTÉTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris.

TOLEDO

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de N° 260

**Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável reforçado
com fibras de aço e macrofibras sintéticas**

por

Isabela Ereno da Silva

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9:10h do dia **04 de maio de 2021** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. André Jacomel Torii
(Unila)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Gustavo Savaris
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

À Manuela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me apoiarem sempre nas minhas escolhas. Agradeço à minha mãe pelas horas cedidas a me ouvir apresentando trabalhos e seminários, mesmo nos momentos mais corridos do dia.

À minha irmã, por me incentivar a ser cada dia melhor e por abrir meus olhos para pontos de vista completamente distintos dos meus.

Agradeço, especialmente, ao meu orientador, Gustavo Savaris, por toda a atenção, suporte e paciência nesses últimos anos e por transmitir seu conhecimento de maneira tão natural a ponto de aumentar ainda mais meu interesse pela área de estruturas.

Ao meu namorado, por sempre me apoiar nas minhas loucuras e fazer o possível para que elas se realizem, inclusive me acompanhando nas concretagens e ainda levando um amigo para ajudar. Aliás, muito obrigada Eduardo.

À Isa, pelas dicas e pelo material fornecido que ajudou demais no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores e servidores da UTFPR por toda a aprendizagem e apoio e por participarem, de alguma forma, do meu amadurecimento e desenvolvimento pessoal.

Aos meus amigos, do grupo de 6, pelas risadas, choros e cafés, que com certeza tornaram os últimos cinco anos mais fáceis.

RESUMO

SILVA, Isabela Ereno da. **Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e macrofibras sintéticas.** 2021. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2021.

Devido às propriedades no estado fresco, o concreto autoadensável apresenta vantagens construtivas, como redução no tempo de construção e no custo da mão de obra, além de eliminação da poluição sonora na etapa de compactação devido ao uso de vibradores. Contudo, por apresentar baixo desempenho quando solicitado à tração, fibras podem ser adicionadas à mistura do concreto, melhorando seu comportamento mecânico, gerando um comportamento pós-fissuração. Sabe-se que fibras de aço auxiliam na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto e estudos incluem métodos que possibilitam estimar a força cortante última resistida para esses elementos. Com relação às fibras sintéticas, seu auxílio no concreto está relacionado à redução da fissuração. Assim, a hibridização dessas fibras possibilita aproveitar as características individuais de cada material, combinando suas propriedades mecânicas. O presente trabalho, tem como objetivo analisar o efeito da adição de fibras de aço, de macrofibras sintéticas de polietileno e da hibridização de ambas em vigas de concreto autoadensável sem estribos. Verifica-se que as fibras de aço e as híbridas, garantiram resistência ao cisalhamento superior ao concreto de referência, além de resistirem à carregamentos maiores antes do início da formação de fissuras. Os resultados mostram que a adição de fibras proporcionou um ganho de resistência da matriz, por apresentar um comportamento pós-fissuração. Os valores de força cortante última estimados se aproximaram mais dos obtidos experimentalmente para o concreto com fibras de aço, porém, ficaram próximas dos valores experimentais.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Fibras de aço. Macrofibras sintéticas. Cisalhamento. Quinta-palavra.

ABSTRACT

SILVA, Isabela Ereno da. **Shear strength of self-compacting concrete beams reinforced with steel fibers and synthetic macrofibers.** 2021. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2021.

Due to its fresh state properties, self-compacting concrete has constructive advantages, such as reduced construction time and labor costs, in addition to eliminating noise pollution due to the use of vibrators. However, since self-compacting concrete presents low tension performance, fibers can be added to the concrete mixture to enhance its mechanical properties, creating a post-cracking behavior. It is known that steel fibers improve the shear strength of concrete beams and studies include shear strength prediction methods. Synthetic fibers can improve concrete mixture by minimizing the cracking behavior. Thus, the hybridization of the previous fibers makes it possible to take advantage of its individual characteristics, combining its mechanical properties. This work aims to analyze the influence of adding steel fibers, synthetic polyethylene macrofibers and its hybridization in self-compacting concrete beams without stirrups, in addition to verify the applicability and precision of shear strength prediction methods for concrete reinforced with steel fibers. Although hardened state concrete properties have reduced with fiber addition, fibers influence was more significant in post-cracking behavior. The use of steel and hybrid fibers guaranteed higher shear strength than reference concrete, in addition to resisting greater loads before the beginning of crack formation. Fibers were also responsible for larger crack widths, and among the mixtures, the use of hybrid fibers guaranteed the smallest width, 4,02 mm. Results show that adding fibers in concrete provided an improved matrix strength, with a post-cracking hardening behavior. Furthermore, synthetic macrofibers provided results with great variability, due to the difficulty of incorporating on the concrete mixture, seeing that they agglutinate easily than steel fibers. The predicted values of ultimate shear strength were closer to the obtained experimentally for concrete reinforced with steel fibers, as expected. The highest estimated strengths referred to concrete reinforced with synthetic fibers due to its higher fiber factor. In general, the predictions were close to the experimental.

Keywords: Self-consolidating concrete. Steel fibers. Synthetic macrofibers. Shear. Keyword.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas esquemáticas de carregamento/deflexão para a) concreto reforçado com fibras de aço e b) concreto reforçado com fibras de polietileno.....	8
Figura 2 - Efeito da hibridização de fibras de aço nos mecanismos de fratura do CAA.....	10
Figura 3 - Visão geral dos mecanismos de transferência de cisalhamento para concreto reforçado com fibras.....	11
Figura 4 - Transferência de tensões de cisalhamento pelo intertravamento de agregados.....	14
Figura 5 - (a)Fibras de aço corrugadas e (b) macrofibras sintéticas de polietileno.....	19
Figura 6 - Cura úmida das vigas.....	22
Figura 7 - Detalhamento das vigas.....	23
Figura 8 – Exemplo de armadura das vigas.....	23
Figura 9 - Ensaio de flexão.....	24
Figura 10 - IEV das misturas a) CR, b) CFA, c) CFS e d) CFH.....	27
Figura 11 - CFH (Ensaio Caixa L).....	28
Figura 12 - Força cortante última das vigas.....	31
Figura 13 - Normalização das cargas últimas de cisalhamento.....	32
Figura 14 - Relação entre cargas últimas normalizadas e d , a/d , ρ e V_f	33
Figura 15 - Comparação de V_u últimas.....	35
Figura 16 - Relação V_xW	36
Figura 17 - Vigas após ensaio de flexão.....	37
Figura 18 - Influência das fibras na deflexão do concreto autoadensável.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das fibras.....	7
Tabela 2 - Equações para predição da força cortante última.	16
Tabela 3 - Caracterização dos agregados.	19
Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras.	20
Tabela 5 - Traço do concreto.....	20
Tabela 6 - Cálculo do fator F.....	25
Tabela 7 - Propriedades do concreto no estado fresco.	26
Tabela 8 - Massa específica, absorção e índice de vazios.	28
Tabela 9 - Resistência à compressão aos 28 dias (MPa).	29
Tabela 10 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa).....	29
Tabela 11 - Módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa).	30
Tabela 12 - Resistência à compressão das vigas aos 28 dias (MPa).	30
Tabela 13 - V_u normalizada.	32
Tabela 14 - Relação V_u experimental/ V_u estimada.	35
Tabela 15 - Carga na abertura da fissura (kN).....	36
Tabela 16 - Ângulo de inclinação das fissuras, em graus.....	37
Tabela 17 - Carga última resistida (V_u) e maior abertura de fissura ($W_{máx}$).	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Objetivo geral	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	CONCRETO AUTOADENSÁVEL	4
2.1.1	Ensaio para classificação no estado fresco	5
2.2	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	6
2.2.1	Concreto reforçado com fibras de aço	7
2.2.2	Concreto reforçado com fibras sintéticas	8
2.2.3	Concreto reforçado com fibras híbridas	9
2.3	INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS SEM ESTRIBOS	10
2.3.1	Zona de compressão	12
2.3.2	Transferência de tensões cisalhantes através da fissura	12
2.3.3	Efeito de pino	13
2.3.4	Intertravamento de agregados	13
2.3.5	Efeito de arco	15
2.4	EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA FORÇA CORTANTE ÚLTIMA	15
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	18
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL	18
3.1.1	Aglomerante	18
3.1.2	Agregados	18
3.1.3	Fíler	19
3.1.4	Aditivo superplastificante	19
3.1.5	Fibras	19
3.2	DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL	20
3.3	PRODUÇÃO DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA E DAS VIGAS	21
3.2	ENSAIO DAS VIGAS	23
3.3	ESTIMATIVA DA FORÇA CORTANTE ÚLTIMA	24

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ESTUDO DE DOSAGEM	26
4.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	28
4.2.1	Massa específica, absorção e índice de vazios	28
4.2.2	Resistência à compressão	28
4.2.3	Resistência à tração por compressão diametral	29
4.2.4	Módulo de elasticidade	30
4.2.5	Resistência à compressão dos corpos de prova das vigas	30
4.3	RESISTÊNCIA ÚLTIMA DAS VIGAS	31
4.3.1	Resistência última ao cisalhamento	31
4.3.2	Análise dos parâmetros.....	32
4.3.3	Forças cortantes últimas estimadas.....	34
4.4	FISSURAÇÃO	35
4.5	DEFLEXÃO DAS VIGAS.....	38
5	CONCLUSÕES	42
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A – Curvas granulométricas dos agregados.....	48

1 INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável é um concreto fluido, coeso e com boa trabalhabilidade, de alto desempenho, que pode ser aplicado e compactado apenas pelo seu peso próprio, sem a necessidade de vibração. Essas melhorias de propriedades no estado fresco ocorrem devido às técnicas de densificação da microestrutura da pasta de cimento, por meio de aditivos superplastificantes e partículas ultrafinas. Algumas de suas principais vantagens construtivas são a redução de tempo de construção e de custo de mão de obra, além de proporcionar um melhor ambiente de trabalho, graças à eliminação dos impactos gerados na etapa de vibração. Apesar da excelente trabalhabilidade, o concreto autoadensável apresenta pouco desempenho elástico, principalmente quando solicitado à tração (ZHANG; HAN; HUA, 2018; HOSSAIN et al., 2013; RAMBO; SILVA; FILHO, 2014).

Como alternativa para a melhoria da resistência à tração e dos comportamentos de fissuração, fibras podem ser adicionadas à mistura do concreto. Além disso, elas auxiliam no aprimoramento de outras propriedades mecânicas do concreto endurecido, como tenacidade, ductilidade e resistência à flexão, ao impacto e à fadiga. Existem fibras de inúmeros materiais, como aço, vidro, carbono e polímeros e cada uma auxilia no desempenho do concreto de maneira diferente. Geralmente utilizam-se fibras de aço com propósito estrutural e fibras sintéticas em aplicações não estruturais, porém, quando é desejável combinar as propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibras, tirando proveito das características individuais de cada uma, opta-se por utilizá-las de forma híbrida na mistura do concreto (HOSSAIN et al., 2013; RAMBO; SILVA; FILHO, 2014; ZHANG; HAN; HUA, 2018).

Em diversos casos, o congestionamento de armadura, causado pela grande quantidade de estribos, dificulta a fundição do concreto, especialmente em vigas esbeltas, por exemplo. Nessas ocasiões, a adição de fibras pode melhorar a resistência ao cisalhamento e reduzir ou eliminar a necessidade de estribos, tornando essa uma das aplicações de maior interesse nos últimos tempos (LANTSOGHT, 2019).

No geral, as pesquisas têm apresentado resultados majoritariamente positivos ao acrescentar fibras na mistura de concreto. Torres e Lantsoght (2019), estudaram a substituição de estribos por fibra de aço e concluíram que a adição de 0,6% de fibras ao concreto apresentou valores que, de acordo com o Eurocode 2 (CEN, 2005), permitem a substituição do estribo mínimo. Já a adição de 1,2% garantiu os valores exigidos pela norma americana ACI 318 (ACI,

2014) para a substituição do estribo mínimo, além de alterar o estado de ruptura de cisalhamento para ruptura por flexão. Zhang, Han e Hua (2018), obtiveram uma melhoria da capacidade de carga última de vigas de concreto autoadensável com adição apenas de fibras de aço e com a utilização de fibras híbridas, ademais concluíram que, com o aumento do teor de fibras, a tensão da armadura longitudinal, a largura e o espaçamento das fissuras reduziram de maneira significativa. Jen, Trono e Ostertag (2016) ao comparar concreto convencional e concreto autoadensável, ambos reforçados com fibras híbridas, concluíram que houve uma melhoria significativa na resposta pós ruptura nos dois casos.

Dessa maneira, o presente trabalho tem como premissa analisar a influência da hibridização de fibras de aço e macrofibras poliméricas na resistência ao cisalhamento do concreto autoadensável, por meio de um programa experimental com vigas sem armadura transversal.

1.1 JUSTIFICATIVA

A alternativa de utilizar o concreto autoadensável é favorável para a redução dos problemas relacionados à trabalhabilidade de um compósito de concreto reforçado com fibras híbridas. Além disso, com a criação e aprimoramento de novos aditivos químicos, a viscosidade das misturas é melhorada, resultando em uma melhor resistência à segregação. Outra razão que torna vantajosa a opção pelo concreto autoadensável é o fato de ele possibilitar uma zona de transição interfacial mais densa, devido à sua quantidade limitada de agregados graúdos e ao seu maior volume de finos. Tal fator contribui na força de ligação entre matriz e fibras, gerando uma melhora da tenacidade pós-fissuração dos compósitos produzidos com concreto reforçado com fibras (JEN; TRONO; OSTERTAG, 2016; RAMBO; SILVA; FILHO, 2014).

Segundo Jen, Trono e Ostertag (2016), vários estudos a respeito da incorporação do concreto autoadensável ao estudo do concreto reforçado com fibras têm sido realizados, porém, faltam dados sobre a integração de diferentes tipos de fibras e sobre otimizações que garantem boa dispersão das fibras e reduzem o risco de segregação. Ademais, de acordo Navas et al. (2018), apesar das pesquisas existentes poderem ser consideradas grande avanço na área relacionada ao comportamento cisalhante de elementos reforçados com macrofibras sintéticas, ainda são poucos os estudos experimentais que avaliam a resistência ao cisalhamento do concreto na presença dessas macrofibras.

Conforme exposto anteriormente, comprova-se a necessidade de estudos relacionados a utilização de fibras híbridas, incluindo especialmente macrofibras, na mistura do concreto autoadensável. Assim, a presente pesquisa tem como justificativa aumentar o conjunto de dados pré-existentes sobre o assunto, bem como contribuir para o estudo da influência das fibras presentes no concreto autoadensável na resistência ao cisalhamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência da adição de fibras de aço e de macrofibras sintéticas, bem como sua hibridização, em vigas de concreto autoadensável.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar, experimentalmente, a resistência ao cisalhamento das vigas;
- Quantificar resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável com fibras de aço e macrofibras sintéticas;
- Comparar a força cortante última estimada por equações da literatura com a encontrada experimentalmente;
- Avaliar o modo de ruptura das vigas;

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa contempla analisar o comportamento do concreto autoadensável com a adição de baixos teores de fibras de aço e de macrofibras sintéticas em vigas com resistência à compressão inferior a 30 MPa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentadas informações relevantes a respeito do concreto autoadensável e da utilização do concreto, convencional e autoadensável, reforçado com fibras de aço, macrofibras sintéticas e fibras híbridas. Além disso, são apresentados métodos de previsão da força cortante última de vigas reforçadas com fibras.

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Comparado ao concreto convencional, o concreto autoadensável tem se tornado uma alternativa muito mais interessante na área da construção civil (JAIN; PRADHAN, 2020). O concreto autoadensável (CAA), foi originado no Japão, em 1988, com o intuito de melhorar a durabilidade do concreto. Com a redução de trabalhadores especializados na indústria da construção civil, a qualidade das construções passou por um processo de decadência, uma vez que, para se obter um concreto de boa durabilidade são necessárias compactação e mão de obra adequadas. Dessa maneira, uma alternativa encontrada foi a utilização do concreto autoadensável, por ter a capacidade de se compactar apenas com seu peso próprio e sem a necessidade de vibração externa (OKAMURA; OUCHI, 2003).

O concreto autoadensável é dosado com o objetivo principal de prover auto compactação, ou seja, deve ser coeso e apresentar boa trabalhabilidade, em situações em que a seção da estrutura apresenta alta taxa de armadura. Dessa maneira, caracteriza-se como um concreto fluido que apresenta espalhamento acima de 550 mm e abatimento de tronco de cone acima de 200 mm (JAIN; PRADHAN, 2020; ZHANG; HAN; HUA, 2018; RAMBO; SILVA; FILHO, 2014).

Para que as características em estado fresco sejam possíveis, deve-se ter grande atenção na escolha dos componentes e nas proporções da mistura do concreto, sendo necessário menor quantidade de agregados graúdos e maior conteúdo de pasta. Além disso, as melhorias nas propriedades do concreto autoadensável em estado fresco devem-se à utilização de aditivos superplastificantes, modificadores de viscosidade e partículas ultrafinas como meio de densificação da microestrutura da pasta de cimento (JAIN; PRADHAN, 2020; ZHANG; HAN; HUA, 2018; RAMBO; SILVA; FILHO, 2014).

Algumas vantagens de utilização do concreto autoadensável, citadas por Tutikian e Dal Molin (2008) são maior rapidez na construção, redução de mão de obra por facilitar espalhamento e nivelamento, maior segurança do local de trabalho, aumento da durabilidade da estrutura, possibilidade de construção de inúmeras formas e dimensões, redução do custo final do concreto e/ou da estrutura, eliminação da poluição sonora causada pela vibração e vantagem ambiental, por aplicar em sua composição alto teor de resíduos industriais como cinza volante e escória de alto forno. Ademais, Rambo, Silva e Filho (2014) citam que o CAA, por apresentar microestrutura densa e baixa permeabilidade, auxilia o elemento estrutural diminuindo a taxa de corrosão do reforço utilizado. Por fim, o aproveitamento das propriedades do concreto autoadensável em concretos reforçados com fibras tem sido estudado como alternativa para reduzir o risco de segregação e garantir uma dispersão mais adequada das fibras (JEN; TRONO; OSTERTAG, 2016).

2.1.1 Ensaios para classificação no estado fresco

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a capacidade do concreto de fluir entre obstáculos mantendo sua coesão, integridade e resistência à segregação são propriedades necessárias de se analisar ao se tratar do concreto autoadensável. Nessa situação, a classificação do concreto autoadensável de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2017) é realizada pela análise de seis fatores: espalhamento, tempo de escoamento, índice de estabilidade visual, habilidade passante, viscosidade e resistência à segregação.

A determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual é realizada, segundo a norma NBR 15823 (ABNT, 2017), utilizando o cone de Abrams, onde o espalhamento (*slump-flow*) é obtido pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro do concreto, em milímetros (mm); o tempo de escoamento (t_{500}) é o intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o fim do escoamento do concreto e o índice de estabilidade visual (IEV) é determinado visualmente. Já a habilidade passante pode ser determinada por três métodos: método do anel J, método da caixa L e método da caixa U.

Além disso, a determinação da viscosidade pode ser realizada pelo método do funil V, enquanto a resistência à segregação pode ser avaliada por dois métodos: método da coluna de segregação e método da peneira (ABNT, 2017).

2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

A incorporação de fibras à mistura de concreto tem se destacado por influenciar positivamente propriedades intrínsecas do concreto, relacionadas à ductilidade e a resistência à tração. Essa técnica vem sendo desenvolvida desde as décadas de 1950 e 1960, inicialmente com fibras de aço e vidro e, atualmente, são utilizadas fibras de diversos materiais com diferentes propriedades e geometrias otimizadas (JEN; TRONO; OSTERTAG, 2016; RAMBO; SILVA; FILHO, 2014). O estudo realizado por Borges, Motta e Pinto (2019) analisou a adição de fibras vegetais (sisal e rami) e de polipropileno ao concreto para aplicação em paredes estruturais, exemplificando a variedade de materiais que têm sido pesquisados para utilização como reforço.

Além do melhoramento das propriedades citadas anteriormente, as fibras proporcionam meios de absorção de energia, fazendo com que sua incorporação à mistura do concreto permita uma origem mais tardia de trincas e um atraso da ruptura do elemento estrutural, otimizando, assim, as interações fibra-trinca. Ademais, dependendo de sua disposição no elemento estrutural, as fibras podem auxiliar no controle e no atraso da propagação de fissuras, quando presentes na zona de fissuração, ou fornecendo um caminho de transferência de esforços, impedindo o aumento dessas fissuras quando incorporadas nas falhas (JEN; TRONO; OSTERTAG, 2016).

Outra maneira de aplicação das fibras no concreto é sua incorporação de forma híbrida, combinando fibras de mais de um material e de diferentes dimensões. Exemplos dessas aplicações são apresentados por Zhang, Han e Hua (2018), que analisaram combinações de fibras de aço, de macro propileno e de micro propileno, e Rambo, Silva e Filho (2014), que estudaram o efeito da hibridização de fibras de aço nos comportamentos reológico e mecânico do concreto autoadensável utilizando fibras de aço retas com ganchos de variados comprimentos e diâmetros. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades de diferentes tipos de fibras.

Apesar de as fibras apresentarem inúmeros benefícios quando incorporadas ao concreto, deve-se ter cautela quanto à sua proporção na mistura, para que a trabalhabilidade do material não seja comprometida, optando-se pelo uso do CAA devido à sua elevada fluidez (JEN; TRONO; OSTERTAG, 2016; RAMBO; SILVA; FILHO, 2014).

Tabela 1 - Propriedades das fibras.

Fibra	Diâmetro (µm)	Massa específica (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)
Sisal	229,98	1,51	353,95
Rami	40,00	1,49	241,87
Aço	750,00	7,85	≥1100,00
Micro polipropileno	18,00	0,91	615,00
Macro polipropileno	740,00	0,91	465,00

Fonte: Adaptado de Borges, Motta e Pinto (2019) e de Ding et. Al (2016).

É comprovado, por meio de pesquisas experimentais, que dependendo do tipo da fibra e das propriedades do material da fibra utilizada, ao adicionar 1% de fibra na mistura do concreto, é possível alcançar bons resultados em termos de resistência ao cisalhamento, controle de fissuras e ductilidade. Porém, Torres e Lantsoght (2019) recomendam utilizar 0,75% de fibras para substituição do estribo mínimo, visto que quantidades de fibra superiores a 1% não apresentam uma melhora significativa na resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras.

2.2.1 Concreto reforçado com fibras de aço

A adição de fibras de aço na mistura de concreto é realizada, principalmente, para finalidade estrutural, uma vez que é responsável pelo melhoramento de suas propriedades mecânicas, tais como ductilidade, tenacidade e resistência nos modos de ruptura provocados por tração (ZHANG; HAN; HUA, 2018; TORRES; LANTSOGHT, 2019; LANTSOGHT, 2019). Ademais, além de a presença de fibras de aço aumentar a resistência ao impacto e à fadiga, ela auxilia no controle da fissuração e o comportamento pós-fissuração do concreto (RAUECKER et al., 2019). Além disso, nos casos em que há um excesso de armação no concreto, ao se dispersar fibras de aço, a resistência ao cisalhamento pode ser melhorada e os estribos podem ser reduzidos ou deixarem de ser necessários (LANTSOGHT, 2019).

Em um ensaio com vigas de concreto autoadensável realizado por Zhang, Han e Hua (2018), foi verificado que, ao adicionar apenas fibras de aço, a capacidade de carga última foi aumentada e a deflexão das vigas diminuída. Além disso, percebeu-se que, ao aumentar o teor de fibras, a tensão atuante na armadura longitudinal, a largura e o espaçamento das fissuras reduziram de maneira significativa.

2.2.2 Concreto reforçado com fibras sintéticas

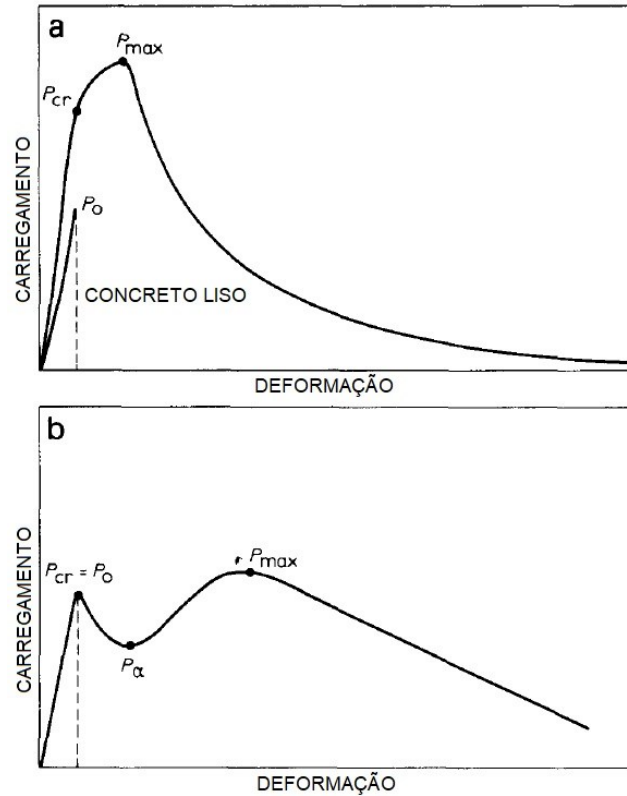
Devido ao alto custo das fibras de aço e de sua natureza corrosiva, desde a década de 1970, fibras sintéticas foram estudadas como substituintes do aço para aplicação em concreto (LI; WU; LIU, 2018). De acordo com Salvador e Figueiredo (2013), em elevados níveis de deformação, a carga resistida pelas fibras de aço pode ser superada pela resistência das fibras poliméricas.

Um exemplo são as microfibras de polipropileno, que apresentam grande importância na redução de risco de incêndio, por serem mais eficazes do que as fibras de macro polipropileno e de aço, de acordo com Zhang, Han e Hua (2018) e Ding, et al. (2016). Segundo os mesmos autores, as fibras de macro polipropileno são outra solução, que vêm ganhando espaço em elementos estruturais devido à sua altíssima resistência à corrosão e à possibilidade de melhoramento significativo do comportamento mecânico de estruturas de concreto.

Seguindo o mesmo viés, as fibras de polietileno podem auxiliar na melhoria da tenacidade e nas características do concreto quanto à flexão (KOBAYASHI; CHO, 1982). Essa melhoria pode ser explicada ao analisar o diagrama representado na Figura 1.

De acordo com Kobayashi e Cho (1982), comparando as situações “a” e “b”, percebe-se que o aço (situação “a”) influencia principalmente na melhoria de resistência referente ao estado limite de serviço (P_{cr}), porém a ruptura ocorre devido a saída de fibras da matriz após atingir a carga máxima (P_{max}), fazendo com que a resistência do concreto decaia de maneira brusca apesar de haver uma melhoria na tenacidade. Já o polietileno (situação “b”), inicialmente não apresenta uma melhoria com relação à P_{cr} , contudo, após o surgimento de fissuras, a força de tensão é suportada apenas pelas fibras, de maneira que uma elevada resistência é garantida mesmo com altas deformações.

Figura 1 - Curvas esquemáticas de carregamento/deflexão para a) concreto reforçado com fibras de aço e b) concreto reforçado com fibras de polietileno.



Fonte: Adaptado de Kobayashi e Cho, 1982.

Li, Wu e Liu (2018) analisaram a adição de fibra de polietileno de ultra alto peso molecular ao concreto e verificaram que esse reforço apresenta alta influência no desempenho do concreto quanto à resistência a tração e à capacidade de absorção de energia. Entretanto, a resistência à compressão do concreto reforçado com essa fibra não apresentou alteração alguma, levando os autores a acreditarem que a hibridização entre a fibra de polietileno de ultra alto peso molecular e a fibra de aço pode aprimorar tanto a resistência a compressão quanto à tração.

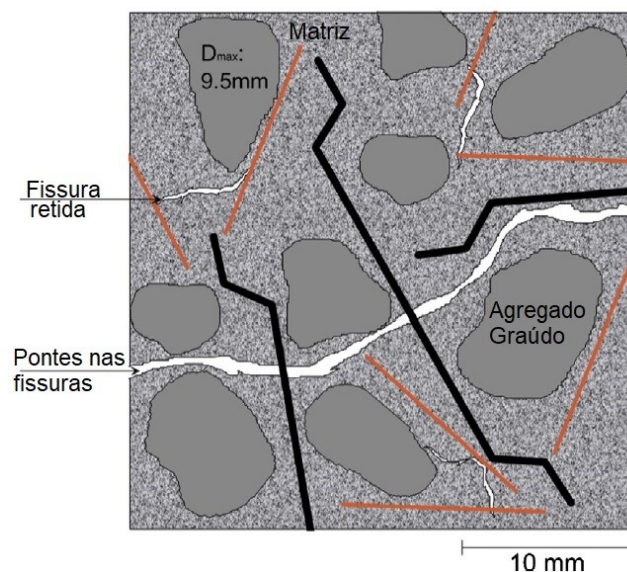
2.2.3 Concreto reforçado com fibras híbridas

Usualmente, a opção por utilizar fibras híbridas provém da possibilidade de aproveitar e combinar as diferentes características de cada material com a finalidade de melhorar as propriedades do concreto. De acordo com Zhang, Han e Hua (2018), uma opção de hibridização é a união entre as fibras de aço, utilizadas com finalidade estrutural, e as sintéticas, para aproveitamento não estrutural, como por exemplo, resistência ao fogo, ou à retração. Outra possibilidade de combinação entre fibras, que provou ser eficaz na melhoria das propriedades mecânicas do concreto autoadensável, no caso, além de apresentar um resultado positivo na

resposta pós ruptura do elemento analisado, são fibras de aço e de álcool polivinílico (PVA) (JEN; TRONO; OSTERTAG, 2016).

Rambo, Silva e Filho (2014) optaram por utilizar apenas um material, o aço, porém variando o comprimento dos ganchos e o diâmetro das fibras. Nessa situação, as fibras híbridas também apresentaram resultados positivos quando misturadas ao CAA, melhorando o estado limite de serviço da estrutura. A Figura 2 representa o efeito dessa hibridização nos mecanismos de ruptura do concreto autoadensável. Onde, na situação demonstrada, as fibras retas (sem gancho nas extremidades) atuam no mecanismo de arraste das microfissuras, o que contribui para a capacidade de absorção de energia do sistema. Além disso, a altos níveis de deformação, o efeito de ponte entre as fissuras, gerados pelas fibras com ganchos nas extremidades, auxiliam no comportamento pós-fissuração do concreto, redistribuindo as tensões e controlando a abertura das fissuras.

Figura 2 - Efeito da hibridização de fibras de aço nos mecanismos de fratura do CAA.



Fonte: Adaptado de Rambo, Silva e Filho (2014).

2.3 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS SEM ESTRIBOS

De acordo com Lantsoght (2019), para entender o comportamento de elementos de concreto reforçados com fibras, é importante revisar as propriedades mecânicas que se alteram devido à presença desses reforços, como resistência a tração do concreto, fissuração, resistência

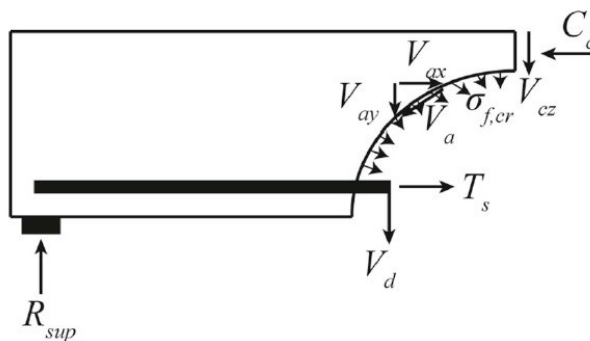
a flexão, fadiga, ductilidade, retração e fluência. A autora sugere que, no caso de fibras de aço, para que se tenha uma maior influência nas propriedades mecânicas é interessante utilizar fibras com alto fator de forma. Ainda com relação a resistência ao cisalhamento, parâmetros como resistência a compressão do concreto, razão entre o vão de cisalhamento e a altura da viga, dimensão máxima do agregado e quantidade de armadura longitudinal são influentes no comportamento dos elementos de concreto (SNEED; RAMIREZ, 2010).

De acordo com Slobbe, Hendriks e Rots (2012) a falha, por cisalhamento, de uma viga sem estribos ocorre, geralmente, quando há a formação de uma fissura diagonal que se estende da zona de compressão até a armadura de flexão.

Apesar do fato de que os mecanismos de transferência de cisalhamento são de alta complexidade e dificuldade de identificação devido às complexas redistribuições de tensões que ocorrem no período pós-fissuração, usualmente, a resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado sem estribos é influenciada por mecanismos como a zona de compressão do concreto sem fissura, o efeito de pino de cisalhamento da armadura longitudinal e as ações de intertravamento de agregados. A contribuição de cada mecanismo de cisalhamento é alterada conforme a magnitude da carga aplicada, além de ser influenciada por um padrão de fissuração.

Na Figura 3 são identificados estes mecanismos. A resistência ao cisalhamento é fornecida pela zona de compressão do concreto (V_{cz}), pela armadura longitudinal, através do efeito de pino (V_d) e pelo engrenamento dos agregados sobressalentes na face da trinca (V_a). A tensão residual no concreto através da trinca é substituída pela contribuição da resistência a tração do concreto reforçado com fibras de aço ($\sigma_{f,cr}$). A resultante do concreto comprimido é representada por C_c , e a reação do apoio por R_{sup} .

Figura 3 - Visão geral dos mecanismos de transferência de cisalhamento para concreto reforçado com fibras.



Fonte: Lantsoght (2019).

2.3.1 Zona de compressão

Tensões cisalhantes presentes na zona de compressão do concreto, quando ainda se encontra intacta e não fissurada, contribuem na resistência ao cisalhamento do elemento de concreto. A magnitude da força cisalhante transferida é limitada pela profundidade da zona de compressão. No caso de uma viga delgada e sem compressão axial, essa força apresenta uma contribuição mínima na resistência do concreto, devido à altura relativamente pequena da zona de compressão (SLOBBE; HENDRIKS; ROTS, 2012). Segundo Lantsoght (2019), no concreto armado a zona de compressão corresponde à valores entre 20% e 40% da resistência total de cisalhamento.

As fibras não alteram a resistência da zona de compressão, contudo sua influência é relacionada com a altura dessa zona, uma vez que a adição de fibras altera o equilíbrio horizontal como resultado da soma da resultante do concreto tensionado (T_c). Como consequência, a altura da zona de compressão do concreto reforçado com fibras de aço é maior do que no concreto armado. Ademais, as fibras fornecem resistência de cisalhamento pós fissuração. Por fim, quando há propagação da fissura crítica de cisalhamento, a falha pode ocorrer quando essa fissura é estendida até a zona de compressão e os mecanismos de transporte de cisalhamento, provenientes da resistência do concreto não trincado na zona de compressão, são perdidos (LANTSOGHT, 2019).

2.3.2 Transferência de tensões cisalhantes através da fissura

Segundo Slobbe, Hendriks e Rots (2012), logo antes da resistência a tração ser atingida, as microfissuras pré-existentes do concreto começam a aumentar e/ou novas microfissuras se formam devido à separação entre os agregados graúdos e a matriz. Com o aumento da tensão, as microfissuras tendem a se aglutinar, mas as tensões de tração continuam atuando. Quando essa aglutinação é concretizada, forma-se uma macrofissura causando o desaparecimento da tensão residual.

Esse mecanismo resistente ao cisalhamento da tensão através da fissura se dá pelas fibras que interligam as fendas, no caso de concreto reforçado com fibras. Para que tal ação ocorra eficientemente, ela depende de fatores como a ligação interfacial entre a fibra e a matriz, a dimensão máxima do agregado utilizado, a quantidade utilizada de fibras e suas propriedades como características de ruptura e arrancamento, geometria, escoamento de cisalhamento e fator

de fibra. Ademais, a orientação das fibras no concreto é importante para a resistência ao cisalhamento, dando-se atenção às fibras perpendiculares ao plano de fissura, que se mostraram mais eficientes (LANTSOGHT, 2019).

2.3.3 Efeito de pino

Segundo Lantsoght (2019), efeito de pino é a contribuição da armadura longitudinal na resistência à abertura e escorregamento das trincas de cisalhamento. A resistência máxima que pode ser concebida pelo efeito de pino tem relação com a resistência à tração da cobertura do concreto, que rompe por meio de divisão quando a força de efeito de pino é bastante considerável. Sabe-se que a ligação entre o concreto e o reforço influencia também nesse mecanismo. Quando há a ausência de estribos, o cisalhamento máximo na armadura é limitado pela resistência a tração do cobrimento de concreto que suporta a barra. O efeito de pino apresenta grande importância quando, principalmente, a armadura longitudinal é distribuída em mais de uma camada (SLOBBE; HENDRIKS; ROTS, 2012).

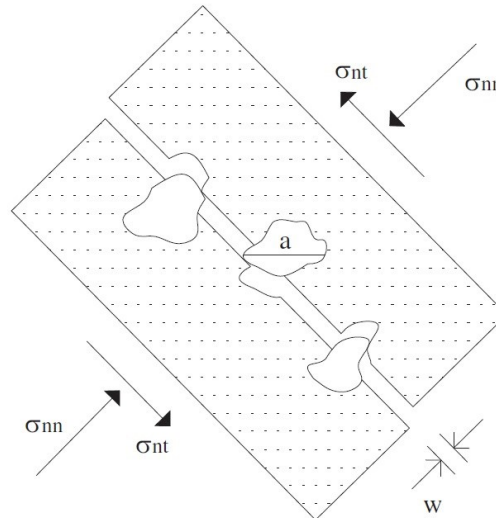
Ao comparar concreto reforçado com fibras e concreto armado convencional, observa-se que o primeiro apresenta uma maior resistência à tração, e conseqüente melhoria no efeito de pino. O uso das fibras também possibilita um aprimoramento nas propriedades da ligação – principalmente contra a falha da ponte – e uma redução da propagação de fissuras, resultando em uma disseminação mais lenta das fissuras de pino e em uma resistência maior de efeito de pino. Esse mecanismo contribui de 10% a 35% da resistência ao cisalhamento no concreto reforçado com fibras (LANTSOGHT, 2019).

2.3.4 Intertravamento de agregados

A transferência de cisalhamento ao longo da superfície da fissura diagonal depende de diversos aspectos, como o modo de ruptura do concreto, por exemplo. Em concretos de resistência à compressão abaixo de 50 MPa, a fissura geralmente ocorre através da matriz e da zona de ligação entre a matriz e o agregado, devido as diferentes resistências entre esses elementos. Em virtude das partículas de agregados sobressalentes na face da fissura, essa superfície pode ser considerada áspera. Enquanto essas partículas protuberantes são maiores que a largura da fissura, a superfície fissurada pode prover resistência ao escorregamento e a força de cisalhamento pode ser transferida. Esse mecanismo é denominado intertravamento de

agregados e é demonstrado na Figura 4 – sendo w a largura da fissura, σ_{nn} a tensão normal e σ_{nt} a tensão tangencial – (SLOBBE; HENDRIKS; ROTS, 2012).

Figura 4 - Transferência de tensões de cisalhamento pelo intertravamento de agregados.



Fonte: Slobbe, Hendriks e Rots (2012).

Em consequência de mecanismos de interação entre tensões normais e cisalhantes, o intertravamento de agregados é um efeito complexo de se entender. Conforme as partículas de agregados deslizam umas sobre as outras, as fissuras sofrem deslizamento e, conseqüentemente, tendem a se dilatar. Quando esse alargamento é limitado pelo reforço do concreto, tensões normais são introduzidas à superfície e, além disso, conforme as fissuras se alargam, a resistência ao cisalhamento decai, devido à perda de contato entre as faces da fissura (SAGASETA; VOLLUM, 2010).

Em concretos leves e de alta resistência, o modo de ruptura é diferente, pois as fissuras atravessam as partículas de agregados, levando a uma superfície de fissura mais lisa. Entretanto, a transferência de cisalhamento por fricção ao longo da superfície fissurada ainda é possível, porém em menor extensão. Além do modo de ruptura do concreto, o tamanho do agregado, a largura da fissura e a força de compressão são aspectos importantes para a transferência de cisalhamento (SLOBBE; HENDRIKS; ROTS, 2012).

Segundo Lantsoght (2019), experimentos demonstram que, no teste de cisalhamento direto, essa capacidade de intertravamento dos agregados é menor em corpos de prova de concreto armado em relação ao concreto sem armadura. Para o concreto reforçado com fibras de aço e sem armadura de flexão, ao aumentar o volume de fibras gradativamente de 0% a

1,5%, há um aumento quase linear da capacidade de intertravamento, sendo mais significativa para concretos de alta resistência à compressão. Entretanto, em ensaios de cisalhamento direto do tipo (*push-off*), utilizando concreto reforçado com fibras contendo armadura de flexão, verificou-se que a efetividade de cisalhamento das fibras depende da quantidade de armadura que transpassa o plano de ruptura.

2.3.5 Efeito de arco

O efeito de arco é o mecanismo resistente de cisalhamento que resulta do suporte de compressão entre a carga e o apoio. Tal mecanismo aumenta significativamente a resistência ao cisalhamento de vigas com vãos de cisalhamento curtos. Como nem todas as equações para a resistência de cisalhamento levam esse efeito em consideração, as predições obtidas podem ser bastante conservadoras para a resistência de elementos com vãos de cisalhamento curto (LANTSOGHT, 2019).

Ao adicionar fibras de aço no concreto, a propriedade de arqueamento é aprimorada, de maneira a aumentar a resistência ao cisalhamento de vigas com valores pequenos de a/d (razão entre a distância entre apoio e aplicação de carga e a altura efetiva), com uma razão menor que 2,5, de acordo com Slobbe, Hendriks e Rots (2012). Essa situação é atribuída à compressão adicional através da fissura fornecida pelas fibras, que ajuda a sustentar a transferência da tensão de cisalhamento por meio da fissura crítica. Quando comparado ao concreto armado, o efeito de amolecimento do apoio diagonal do concreto é reduzido e as características de deformação, melhoradas (LANTSOGHT, 2019).

2.4 EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA FORÇA CORTANTE ÚLTIMA

Inúmeras pesquisas contemplam equações empíricas para obter a resistência ao cisalhamento de vigas com adição de fibras de aço, sendo algumas apresentadas na Tabela 2.

A grande maioria das equações consideram o fator de fibra (F), proposto por Narayanan e Kareem-Palanjian (1984), que tem como função definir as propriedades das fibras, levando em consideração o comprimento da fibra L_f (mm), o diâmetro da fibra D_f (mm), o volume de fibras V_f (%) e o fator de ligação d_f . O fator F é dado pela equação:

$$F = \frac{L_f}{D_f} V_f d_f$$

De acordo com Narayanan e Darwish (1987), o fator de ligação pode ser considerado igual a 0,5 para fibras lisas, 0,75 para fibras frisadas e 1,0 para fibras com ganchos nas extremidades. Já na situação de fibras híbridas, Anithu e Sabeena (2018), consideram o fator de fibra como a soma do fator F de cada tipo de fibra utilizada.

Tabela 2 - Equações para predição da força cortante última.	
Autor	Equação Proposta
Ashour, Hasanain e Wafa (1992)	$V_u = \left[(2,11^3 \sqrt{f_c}) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0,333} \right] bd \text{ se } \frac{a}{d} \leq 2,5$
Imam et al. (1997)	$V_u = 0,6\psi^3 \sqrt{\omega} \left[f_c^{0,44} + 275 \sqrt{\frac{\omega}{\left(\frac{a}{d}\right)^5}} \right] bd$ $\psi = \frac{1 + \sqrt{\frac{5,08}{d_a}}}{\sqrt{1 + \frac{d}{25d_a}}}$ $\omega = \rho(1 + 4F)$
Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999)	$V_u = [(0,167 + 0,25F)\sqrt{f_c}]bd$
Kwak et al. (2002)	$V_u = \left[3,7e(f_{sp})^{\frac{2}{3}} \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} + 0,8,0,41\tau F \right] bd$ $e = \begin{cases} 3,4 \frac{d}{a} \text{ para } \frac{a}{d} \leq 3,4 \\ 1 \text{ para } \frac{a}{d} > 3,4 \end{cases}$
Narayanan e Darwish (1987)	$V_u = \left[e \left(0,24f_{sp} + 80\rho \frac{d}{a} \right) + 0,41\tau F \right] bd$ $e = \begin{cases} 2,8 \frac{d}{a} \text{ para } \frac{a}{d} \leq 2,8 \\ 1 \text{ para } \frac{a}{d} > 2,8 \end{cases}$
Sharma (1986)	$V_u = \left[\frac{2}{3} f_{sp} \left(\frac{d}{a} \right)^{0,25} \right] bd$

Fonte: Autoria própria (2020).

Onde:

F é o fator de fibra, b é a base da viga, d é a altura efetiva, $\frac{a}{d}$ é a razão entre a distância entre apoio e aplicação de carga e a altura efetiva, d_a é o diâmetro máximo do agregado, f_c é a

resistência a compressão do concreto aos 28 dias, f_{sp} é a resistência à tração por compressão diametral, ρ é a taxa de armadura longitudinal e τ é a resistência de ligação entre fibra e matriz.

Para obter a resistência de ligação entre fibra e matriz (τ), são realizados os ensaios do tipo *pull-out*. Pelo fato deste ensaio ser de difícil execução, Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999) recomendam considerar $\tau = 0,66\sqrt{f_c}$.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais e os ensaios utilizados em um programa experimental realizado nos laboratórios de Materiais de Construção e de Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Toledo, a fim de avaliar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável com adição de fibras de aço, sintéticas e híbridas, comparadas à resistência de vigas deste concreto sem fibras.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

3.1.1 Aglomerante

Foi utilizado como aglomerante hidráulico cimento Portland com adição de material pozolânico (CP II-Z-32) da marca Votoran. Devido à presença do material pozolânico, tal cimento possibilita secagem e trabalhabilidade adequada a todos os tipos de obra, além de ser adequado para estruturas que apresentem contato com ambientes agressivos.

3.1.2 Agregados

Como agregado graúdo foi utilizada rocha britada de origem basáltica, de dimensão máxima característica igual a 9,5 mm. Sua caracterização se deu por meio das normas NM 248 (ABNT, 2003), NM 53 (ABNT, 2009) e NM 46 (ABNT, 2003), sendo elas referentes aos ensaios de granulometria, massa específica e determinação da quantidade de material pulverulento, respectivamente.

Já como agregado miúdo, utilizou-se areia natural de rio de origem quartzosa e sua caracterização foi realizada a partir dos ensaios de granulometria e massa específica, segundo a NM 248 (ABNT, 2003) e a NM 52 (ABNT, 2009). Os resultados da caracterização dos agregados são apresentados na Tabela 3. As porcentagens de material retido acumulado sobre as peneiras e a curva de distribuição granulométrica estão disponibilizadas no Apêndice A.

Tabela 3 - Caracterização dos agregados.

Propriedade	Areia	Brita 0
Dimensão máxima característica (mm)	-	9,50
Módulo de finura	1,51	-
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,47	3,02
Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,52	2,85
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,60	2,76
Absorção de água (%)	-	3,16
Teor de material pulverulento (%)	-	0,98

Fonte: Autoria própria (2020).

3.1.3 Fíler

A fim de se proporcionar coesão à mistura, garantindo as características de autoadensabilidade do concreto autoadensável, foi utilizado fíler calcário calcítico comercializado pela empresa Calfipar, localizada no município de Almirante Tamandaré-PR.

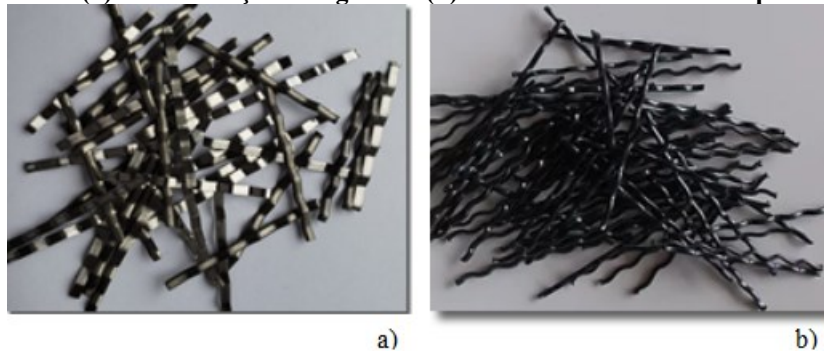
3.1.4 Aditivo superplastificante

Foi utilizado aditivo superplastificante à base de policarboxilato de sódio, TEC-FLOW 8000 da marca GCP *applied technologies*.

3.1.5 Fibras

Dois tipos de fibras foram utilizados: fibras de aço corrugadas (FA) e macrofibras sintéticas de polietileno (FS), apresentadas na Figura 5. Na Tabela 4 encontram-se as propriedades das fibras utilizadas.

Figura 5 - (a)Fibras de aço corrugadas e (b) macrofibras sintéticas de polietileno.



Fonte: Adaptado de MM Fibras ® (2020).

Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras.

Fibra	Material	Comprimento	Densidade	Resistência à tração (por filamento)
FA	aço carbono tipo I ASTM A 820	40 mm	7,85 g/cm ³	800 MPa
FS	monofilamentos de polietileno	50 mm	1,12 g/cm ³	350 MPa

Fonte: MM Fibras ® (2020).

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O traço para a produção do concreto autoadensável de referência foi definido com base nas recomendações de EFNARC (2005) e seguiu a proporção 1:2,29:2,04:0,51 (cimento:areia:brita:filer), com relação água/cimento igual a 0,58 e teor de aditivo superplastificante correspondente a 0,10% da massa de cimento. Tal traço resultou em um concreto com resistência à compressão axial de, aproximadamente, 30 MPa e atendeu aos parâmetros de concreto autoadensável demandados pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

Segundo a recomendação de Torres e Lantsoght (2019) a adição de fibras deve ser limitada a 0,75% para não comprometer a trabalhabilidade do concreto. Porém, a fim de facilitar as proporções para a hibridização e evitar a redução significativa da fluidez, optou-se por utilizar a proporção total de fibras de 0,5%.

Dessa maneira, foram realizadas quatro misturas para fins comparativos: concreto autoadensável de referência (CR); concreto com adição de 0,5% de fibras de aço (CFA); concreto com adição de 0,5% de macrofibras sintéticas (CFS); concreto com adição de partes iguais das duas fibras, ou seja, 0,25% de fibras de aço e 0,25% de macrofibras sintéticas (CFH). A Tabela 5 indica as quantidades dos materiais para a produção de 1 m³ de concreto.

Tabela 5 - Traço do concreto.

	Cimento (kg)	Areia Nat. (kg)	Filer (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Aditivo Sp (g)	FA (kg)	MF (kg)
CR	360,00	824,00	184,00	734,33	208,67	360,00	0	0
CFH	360,00	824,00	184,00	734,33	208,67	360,00	40,00	0
CFHS	360,00	824,00	184,00	734,33	208,67	360,00	0	5,60
CFHA	360,00	824,00	184,00	734,33	208,67	360,00	20,00	2,80

Fonte: Autoria própria (2020).

3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA E DAS VIGAS

Inicialmente o concreto autoadensável de referência foi produzido em uma betoneira de eixo inclinável com capacidade de 240 litros, sendo avaliada a trabalhabilidade/fluidez por meio do ensaio de espalhamento (*slump flow*) e corrigido o teor de aditivo até obter resultados acima de 700 mm, sendo, em seguida, realizados os ensaios de caixa L e funil V para verificação da habilidade passante e viscosidade, respectivamente, conforme NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

Os concretos autoadensáveis com adição de fibras foram produzidos a partir de uma betonada de concreto de referência, com incorporação das fibras aos poucos durante a mistura dos materiais, sendo este processo continuado por cinco minutos após a adição de todo o volume de fibras. Para cada mistura de concreto autoadensável com adição de fibras foram realizados os ensaios de espalhamento, caixa L e funil V.

Para cada mistura foram produzidos 30 litros de CAA, utilizados para moldagem de 60 corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura), sendo 15 do concreto de referência e 15 de cada mistura de concreto com adição de fibras, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submersos em água para cura úmida por 28 dias. De cada mistura cinco corpos de prova foram utilizados para determinar a resistência à compressão axial f_c , de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) e cinco corpos de prova foram destinados ao ensaio de módulo de elasticidade, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017). Os demais corpos de prova foram utilizados para determinação da resistência à tração (f_{sp}) por meio do ensaio de compressão diametral, de acordo com a norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Além disso, três corpos de prova cilíndricos (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura) foram moldados com cada mistura de concreto para determinação da massa específica, absorção e índice de vazios, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005).

Foi realizada uma segunda etapa de concretagem, produzindo 50 litros de concreto de cada mistura para a moldagem das vigas e de três corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura), que foram utilizados para determinação da resistência à compressão axial f_c , de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para os ensaios de resistência ao cisalhamento, foram moldadas duas vigas de cada mistura, totalizando 8 vigas, com seção transversal de 100 mm x 200 mm e 1000 mm de

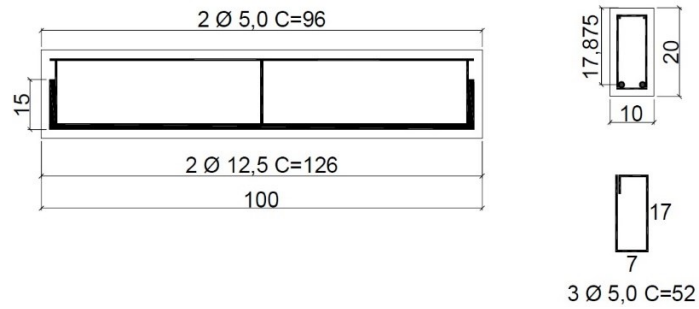
comprimento. Todas as fôrmas foram preenchidas da mesma maneira, de forma que o lançamento do concreto autoadensável fosse de uma extremidade a outra, seguindo sempre o mesmo sentido. Após 24 horas de concretagem, as vigas foram desmoldadas e armazenadas no Laboratório de Estruturas sob uma lona plástica, sendo umedecidas diariamente ao longo de uma semana, conforme a Figura 6, para então serem mantidas em condição ambiente até a data de realização dos ensaios.

Figura 6 - Cura úmida das vigas.



Fonte: Autoria própria (2020).

A armadura das vigas consistiu em dois fios de aço CA-60 com diâmetro nominal de 5,0 mm na zona comprimida, junto à face superior e duas barras de aço CA-50, com 12,5 mm de diâmetro, como armadura longitudinal de tração. Apesar de a armadura transversal não ser utilizada, foram necessários estribos de CA-50 com diâmetro nominal de 5,0 mm posicionado nas extremidades e na região de aplicação de carga, para auxiliar na montagem da armadura longitudinal e evitar a ruptura nessas regiões. A geometria e o detalhamento das armaduras das vigas estão presentes nas Figura 7 e 8.

Figura 7 - Detalhamento das vigas.

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 8 – Exemplo de armadura das vigas.

Fonte: Autoria própria (2020).

3.2 ENSAIO DAS VIGAS

As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão à três pontos, utilizando um pórtico de reação com 3 pistões hidráulicos com capacidade de carga de 500 kN cada. A abertura das fissuras foi mensurada com o auxílio de dois transdutores lineares de deslocamento (LVDT's) distanciados igualmente do ponto de aplicação de carga e a deflexão da viga foi obtida com o uso de um relógio comparador, posicionado na face inferior da viga, como apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Ensaio de flexão a 3 pontos e instrumentação.



Fonte: Autoria própria (2020).

3.3 ESTIMATIVA DA FORÇA CORTANTE ÚLTIMA

A força cortante última foi estimada utilizando as equações da Tabela 2, sendo comparadas aos valores mensurados experimentalmente. Os dados necessários referentes à estrutura de concreto são os seguintes:

- Altura efetiva da viga: 178,75 mm;
- Base da viga: 100,00 mm;
- Distância entre o apoio e a aplicação de carga: 400,00 mm;
- Taxa de armadura longitudinal: 1,376%;
- Diâmetro máximo do agregado: 9,50 mm.

Já os dados necessários ao cálculo dos fatores de fibra (F) e o próprio fator (obtido apenas substituindo os valores na expressão apresentada em 2.4), estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Cálculo do fator F.

Dados	CFA	CFS	CFH	
Tipo de fibra	aço	sintética	aço	sintética
Comprimento da fibra em mm (L_f)	40	50	40	50
Diâmetro da fibra em mm (D_f)	2,4	1,0	2,4	1,0
Fator de ligação d_f	0,75	0,75	0,75	0,75
Volume de fibras em porcentagem (V_f)	0,50%	0,50%	0,25%	0,25%
Fator de fibra (F) parcial	-	-	0,03125	0,09375
Fator de fibra (F) final	0,0625	0,1875	0,1250	

Fonte: Autoria própria (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ESTUDO DE DOSAGEM

Na Tabela 7 são apresentadas as propriedades das quatro misturas de concreto em seu estado fresco. Para o espalhamento, foram determinados os valores obtidos antes e após a adição de fibras, permitindo analisar a influência das fibras nessa propriedade.

Tabela 7 - Propriedades do concreto no estado fresco.

Propriedade	CR	CFA	CFS	CFH
Espalhamento sem fibras(mm)	745,0	732,5	707,5	707,5
Espalhamento com fibras (mm)	-	572,5	447,5	507,5
Caixa L (mm/mm)	1,12	0,65	0,65	0,55
Funil V (segundos)	3,9	5,7	5,5	7,0

Fonte: Autoria própria (2021).

Além das propriedades supracitadas, a NBR 15823-2 (ABNT, 2017) aborda o índice de estabilidade visual (IEV). Em nenhuma das misturas analisadas houve evidência de segregação ou exsudação, assim, todas correspondem à classe altamente estável (IEV 0). Tal situação pode ser verificada na Figura 10.

A presença das fibras, sejam elas de aço ou sintéticas, afetou significativamente o espalhamento do concreto autoadensável, sendo a situação mais crítica de espalhamento verificada ao crescer as fibras sintéticas à mistura, podendo ser atribuída ao fato das fibras apresentarem pequena massa específica e se aglomerarem facilmente antes mesmo de serem inseridas na betoneira.

Apesar de se verificar a necessidade de incorporar as fibras aos poucos e de optar por utilizar o concreto autoadensável para minimizar tal efeito, já esperado, observa-se uma perda de espalhamento ainda significativa, de maneira que as misturas CFS e CFH não cumpriram o requisito de espalhamento mínimo de 550 mm, não podendo mais ser classificadas como concreto autoadensável.

Figura 10 - IEV das misturas a) CR, b) CFA, c) CFS e d) CFH.

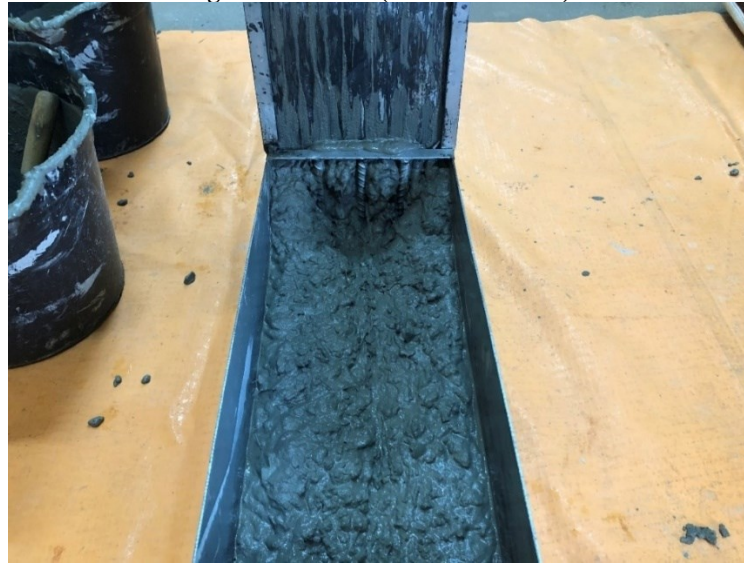


Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), o resultado do ensaio de caixa L deve ser superior a 0,8 para concretos autoadensáveis. A presença de fibras impossibilitou a obtenção de tais resultados. Durante a realização do ensaio para o concreto autoadensável com fibras híbridas, as fibras reduziram consideravelmente a habilidade passante do concreto, impedindo que ele fluísse pelos espaços entre as barras, como pode ser verificado na Figura 11.

Apesar do aumento do tempo de escoamento no ensaio do funil V, todas as misturas podem ser classificadas como VF 1 (ABNT, 2017), onde todos os tempos aferidos foram inferiores a 9 segundos.

Figura 11 - CFH (Ensaio Caixa L).



Fonte: Aatoria própria (2021).

4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Massa específica, absorção e índice de vazios

Os resultados dos ensaios de massa específica, de absorção e de índice de vazios estão dispostos na Tabela 8. A presença de fibras não alterou significativamente estas propriedades. A massa específica média em todos os casos foi de $2,60 \text{ g/cm}^3$, com coeficiente de variação (CV) 1,1%, a absorção média foi de 8,3%, com CV igual a 5,0% e o índice de vazios médio foi de 18%, com CV de 3,9%.

Tabela 8 - Massa específica, absorção e índice de vazios.

Mistura	Massa específica (g/cm^3)	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
CR	2,60	8,4	18,0
CFA	2,60	8,6	18,3
CFS	2,56	8,2	17,3
CFH	2,62	7,8	17,0

Fonte: Aatoria própria (2021).

4.2.2 Resistência à compressão

Os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova ensaiados são apresentados na Tabela 9. É possível observar nos valores médios de

resistência que a adição de fibras, em todas as situações, resultou na redução dessa resistência em relação ao concreto de referência. A mistura que apresentou maior redução de resistência à compressão do compósito foi o CFH, por volta de 18%.

Tabela 9 - Resistência à compressão aos 28 dias (MPa).

CP	CR	CFA	CFS	CFH
1	27,17	24,46	25,24	22,32
2	28,28	23,04	25,43	23,58
3	29,41	24,86	23,63	22,16
4	26,57	24,35	24,56	24,07
5	26,88	25,02	26,25	24,27
Média	27,66	24,35	25,02	23,28
Desvio padrão	1,17	0,78	0,98	0,98

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir do teste Tukey-Kramer, observou-se que, entre as misturas reforçadas com fibras, não existe diferença significativa na resistência à compressão das amostras, porém quando comparadas com o concreto de referência, verifica-se diferença estatística em todos os casos. A resistência à compressão média total das amostras foi de 25,08 MPa e o coeficiente de variação (CV), 7,54 %.

4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral estão expostos na Tabela 10. Assim, como no caso anterior, a presença de fibras resultou em uma menor resistência à tração do concreto autoadensável. A resistência média total entre os valores é de 2,43 MPa e as amostras apresentam coeficiente de variação igual a 11,67%.

Tabela 10 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa).

CP	CR	CFA	CFS	CFH
1	2,57	2,90	2,05	2,36
2	2,85	2,48	2,20	2,28
3	2,35	2,39	2,19	2,30
4	3,09	2,45	2,07	2,49
5	2,66	2,51	2,45	2,00
Média	2,71	2,55	2,19	2,29
Desvio padrão	0,28	0,20	0,16	0,18

Fonte: Autoria própria (2021).

Pelo teste de Tukey-Kramer, verifica-se diferença significativa ao comparar o concreto de referência com o concreto reforçado com fibras sintéticas e com fibras híbridas. Entre os concretos reforçados com fibra e entre o CR e o CFA, as amostras são consideradas estatisticamente iguais.

4.2.4 Módulo de elasticidade

Os valores de módulo de elasticidade obtidos encontram-se na Tabela 11. Em todas as situações, o módulo de elasticidade das misturas de concreto com fibras é menor do que a mistura de referência. Porém, de acordo com o teste de Tukey-Kramer, os dados não apresentam diferença estatística entre si, com coeficiente de variação de 6,98%.

Tabela 11 - Módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa).

CP	CR	CFA	CFS	CFH
1	28,90	24,30	26,50	27,30
2	28,40	26,90	26,90	27,10
3	28,90	23,70	30,20	27,20
4	28,70	25,20	28,80	28,40
5	28,80	29,90	23,80	26,70
Média	28,74	26,00	27,24	27,34
Desvio padrão	0,21	2,49	2,43	0,63

Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.5 Resistência à compressão dos corpos de prova das vigas

Os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova ensaiados são apresentados na Tabela 12. Assim como no estudo de dosagem, observa-se nos valores médios que a adição de fibras, em todas as situações, resultou na redução dessa resistência em relação ao concreto de referência.

Tabela 12 - Resistência à compressão das vigas aos 28 dias (MPa).

CP	CR	CFA	CFS	CFH
1	24,60	23,09	19,63	20,94
2	25,68	22,44	19,44	21,95
3	24,05	22,41	18,28	21,26
Média	24,78	22,65	19,12	21,38
Desvio padrão	0,83	0,38	0,73	0,52

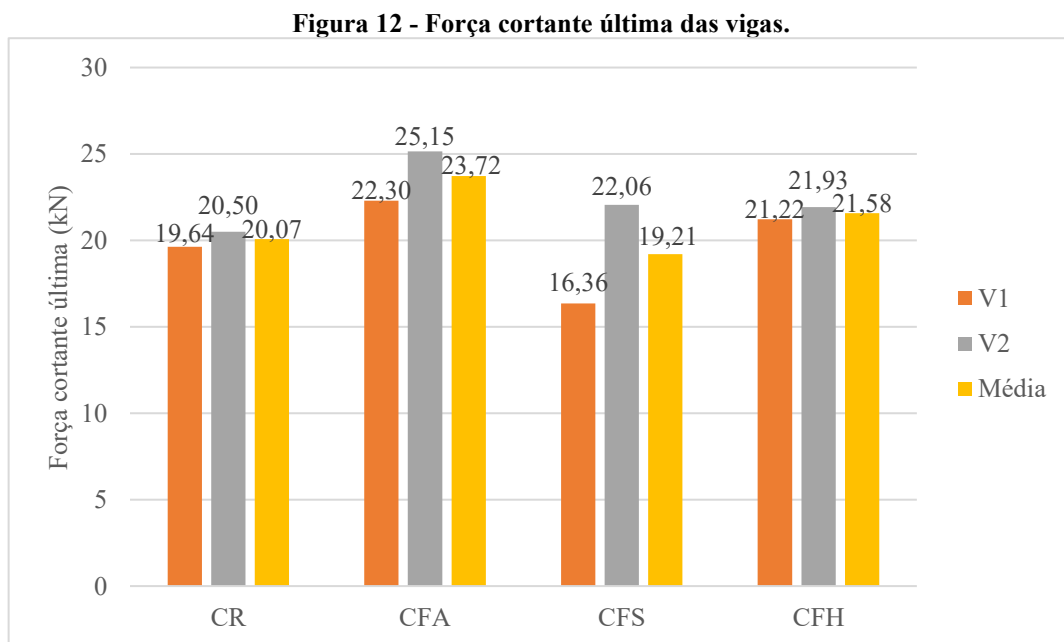
Fonte: Autoria própria (2021).

Ao comparar as resistências à compressão das misturas produzidas para o concreto do estudo de dosagem e para a concretagem das vigas, foram verificadas pequenas diferenças, podendo ser relacionadas a uma dispersão não homogênea das fibras na mistura e ao fato de que, para a moldagem dos corpos de prova da etapa de concretagem das vigas, foi utilizado o concreto restante na betoneira.

4.3 RESISTÊNCIA ÚLTIMA DAS VIGAS

4.3.1 Resistência última ao cisalhamento

Os resultados de força cortante última ($V_{u, experimental}$) resistida pelas vigas a partir do ensaio de flexão à três pontos são apresentados na Figura 12.



Fonte: Autoria própria (2021).

É possível notar que as resistências de cisalhamento médias das vigas reforçadas com fibras de aço e com as fibras híbridas foram superiores à viga com concreto de referência. No entanto, verifica-se, para misturas de CFS, uma grande variação entre as forças cortantes últimas das duas vigas ensaiadas, que resultou em uma na menor média de resistência ao cisalhamento. Tal comportamento pode ser influenciado pela distribuição das fibras no

concreto, uma vez que as fibras sintéticas apresentaram uma tendência de se aglutinar mais do que as fibras de aço, resultando em menor espalhamento no estado fresco.

4.3.2 Análise dos parâmetros

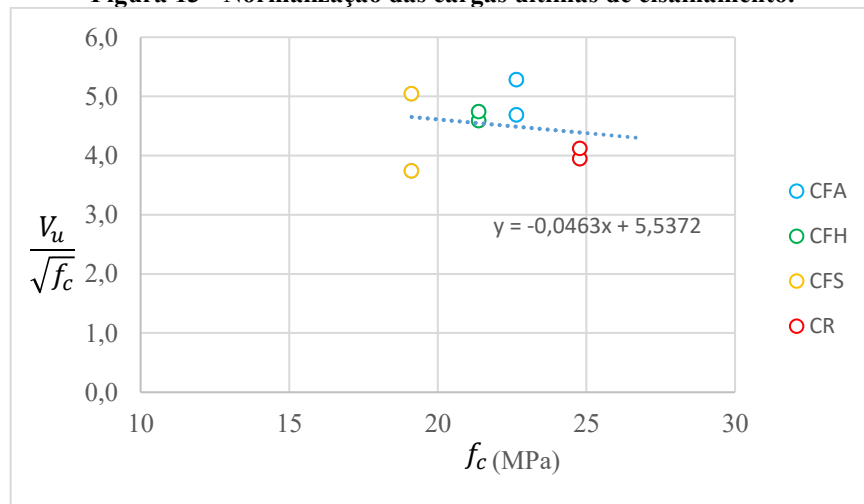
Para eliminar a influência da resistência à compressão do concreto na análise da força cortante última das vigas, os dados foram normalizados considerando a raiz quadrada da resistência à compressão dos corpos de prova e são apresentados na Tabela 13. A relação entre os valores normalizados e a resistência à compressão axial do concreto é apresentada na Figura 13, onde verifica-se uma redução da resistência ao cisalhamento das vigas com o aumento da resistência à compressão do concreto.

Tabela 13 - V_u normalizada.

Viga	CR	CFA	CFS	CFH
1	3,94	4,69	3,74	4,59
2	4,12	5,28	5,04	4,74
Média	4,03	4,98	4,39	4,67

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 13 - Normalização das cargas últimas de cisalhamento.

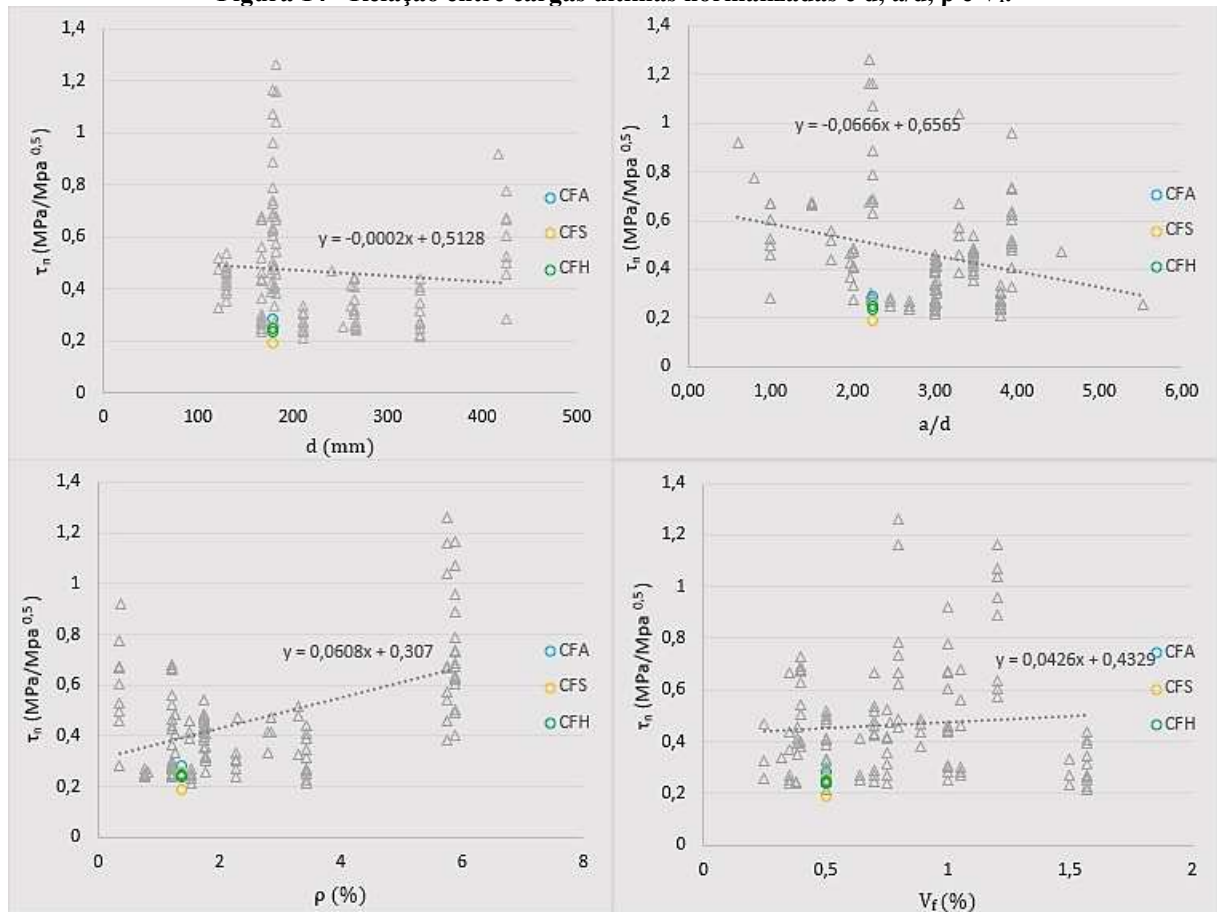


Fonte: Autoria própria (2021).

Os principais parâmetros que influenciam na resistência ao cisalhamento, de acordo com LANTSOGHT (2019) são taxa de armadura, altura efetiva da viga, relação a/d , volume de fibras utilizado, o fator de fibras e o diâmetro máximo do agregado utilizado. No caso desse

trabalho, apenas o fator de fibra foi alterado, ou seja, os demais fatores se mantiveram constantes em todas as vigas. Para fins comparativos, os dados de taxa de armadura, altura efetiva da viga, relação a/d e volume de fibras foram adicionados aos gráficos plotados por Laufer (2020), como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Relação entre cargas últimas normalizadas e d, a/d, ρ e V_f .



Fonte: Adaptado de Laufer (2020).

Apesar de as relações de cargas últimas normalizadas realizadas por Laufer (2020) englobarem apenas vigas de concreto reforçado com fibras de aço, percebe-se que todas as misturas das vigas analisadas neste trabalho se encaixam no conjunto de dados de outras pesquisas. Além disso, é possível observar que as vigas reforçadas com fibras híbridas apresentam valores intermediários entre CFA e CFS.

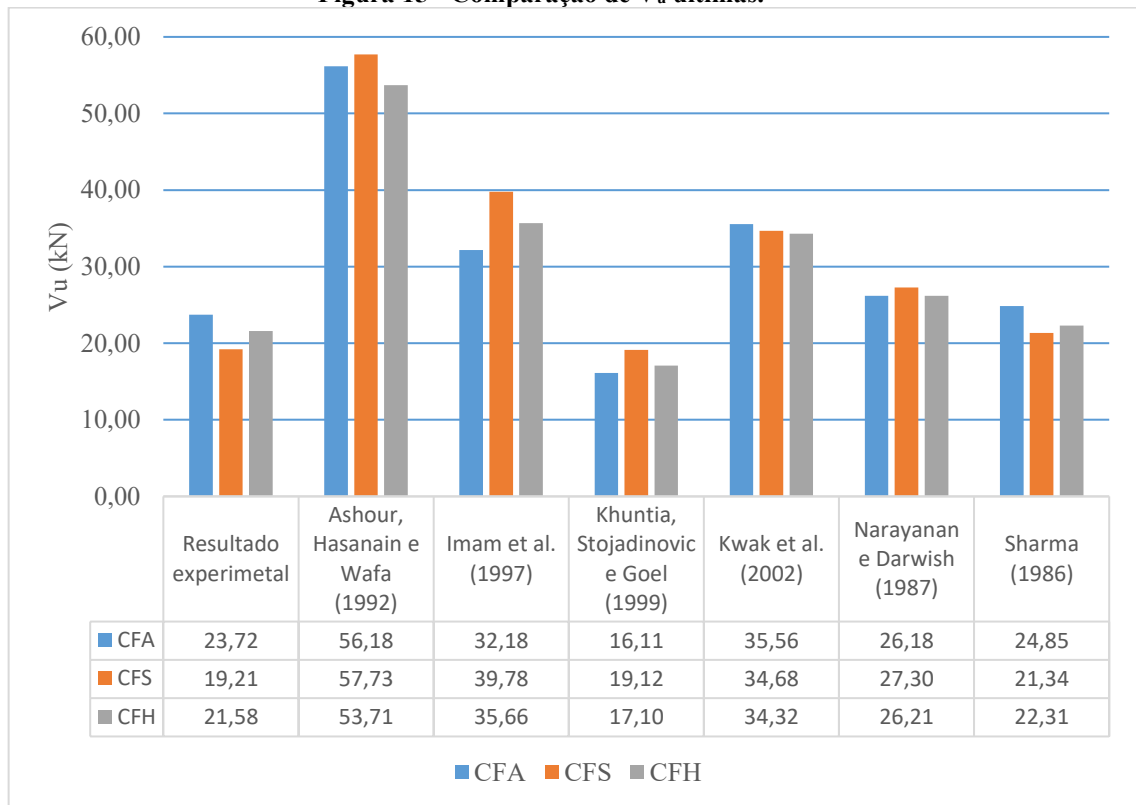
4.3.3 Forças cortantes últimas estimadas

Para estimar a resistência última das vigas reforçadas com fibra, foram utilizadas as propriedades geométricas das vigas ensaiadas, o fator F para cada situação, disponibilizado na Tabela 6 e os resultados dos ensaios de resistência à compressão (Tabela 9) e resistência à tração por compressão diametral (Tabela 10). As equações utilizadas estão descritas na Tabela 2. Assim, os valores de força cortante última obtidos experimentalmente e estimados encontram-se na Figura 15.

A equação proposta por Ashour, Hasanain e Wafa (1992), que gerou resistências últimas maiores às obtidas experimentalmente, apresentou os resultados mais discrepantes quando comparados aos valores obtidos experimentalmente.

Sharma (1986) propôs o modelo que mais se aproximou das resistências últimas reais ao cisalhamento, apresentando relações entre força cortante experimental e estimada mais próximas de 1,0. As demais equações sugeriram valores diferentes, porém não tão discrepantes como o primeiro modelo (conferir Tabela 14).

Com relação às diferentes misturas, a maioria dos modelos estimou valores maiores de força cortante última para o concreto reforçado com macrofibras sintéticas, com exceção das equações propostas por Kwak et al. (2002) e por Sharma (1986). Tal situação pode ser explicada pelo fator F, que apresentou o maior valor para adição de macrofibras sintéticas apenas. Além disso, pode-se verificar na Tabela 14, que os valores estimados pelas equações se aproximaram mais dos obtidos experimentalmente para o concreto reforçado com fibras de aço, como era de se esperar. A única exceção foi o modelo proposto por Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999), que apresentou relação entre força cortante experimental e estimada igual a 1,0 para o CFS.

Figura 15 - Comparação de V_u últimas.

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 14 - Relação V_u experimental/ V_u estimada.

Modelo	CFA	CFS	CFH
Ashour, Hasanain e Wafa (1992)	0,42	0,33	0,40
Imam et al. (1997)	0,74	0,48	0,61
Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999)	1,47	1,00	1,26
Kwak et al. (2002)	0,67	0,55	0,63
Narayanan e Darwish (1987)	0,91	0,70	0,82
Sharma (1986)	0,95	0,90	0,97

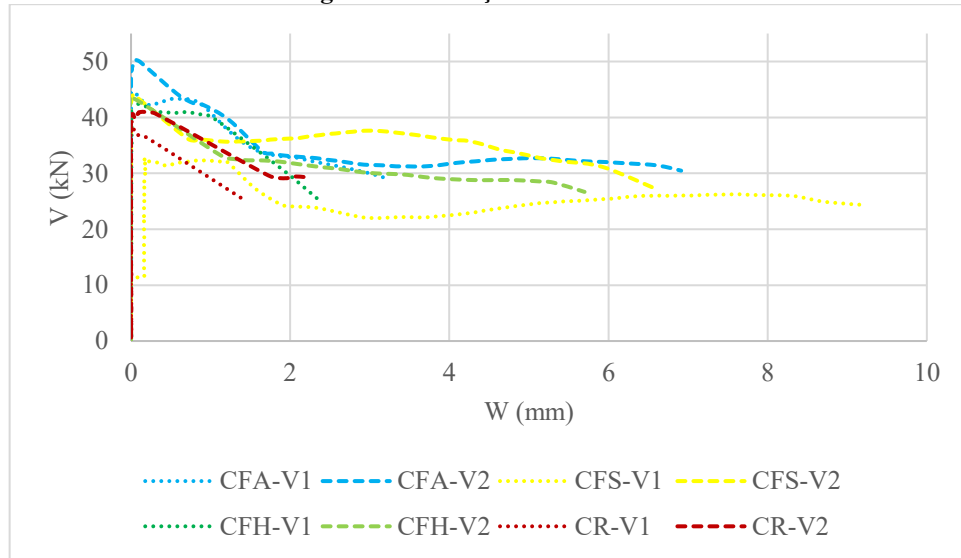
Fonte: Autoria própria (2021).

4.4 FISSURAÇÃO

As cargas em que ocorreram a formação de fissuras de cada viga foram determinadas a partir da análise dos valores medidos pelos LVDT e estão disponibilizadas na Tabela 15. O gráfico de força cortante (kN) versus abertura de fissura (mm) está disposto na Figura 16. Ressalta-se que a ruptura ocorreu logo após a formação da fissura nas vigas de concreto sem fibras, enquanto para vigas com fibras verificou-se um comportamento pós-fissuração. Em

todas as situações, exceto na viga 1 de CFS, a adição de fibras ao concreto autoadensável suportou um carregamento maior do que a mistura de referência antes do início das fissuras.

Figura 16 - Relação V vs. w.



Fonte: Autoria própria (2021).

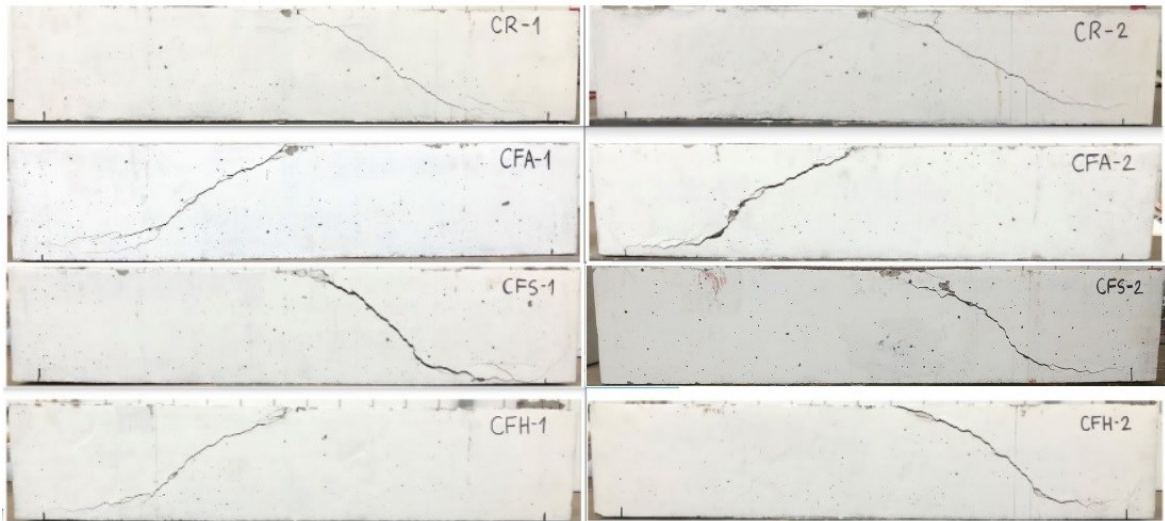
Tabela 15 - Carga na abertura da fissura (kN).

Viga	CR	CFA	CFS	CFH
1	39,27	36,83	32,64	42,40
2	36,69	48,35	41,08	40,60

Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 16 são apresentadas as vigas após ruptura. Assim como Singh e Jain (2014), as vigas reforçadas com fibras mostraram o alargamento de uma fenda inclinada proeminente, que indicou a vinda de um colapso iminente. Além disso, em todas as amostras, foi verificado o esmagamento da zona de compressão no ponto de aplicação do carregamento.

Figura 17 - Vigas após ensaio de flexão.



Fonte: Autoria própria (2021).

Após a realização do ensaio de flexão, foram medidos os ângulos de inclinação da fissura de cisalhamento, apresentados na Tabela 16. Foram observadas variações entre os ângulos de inclinação. Além disso, exceto para o concreto com fibras sintéticas que apresentou maior inclinação média da fissura (41°), todas as vigas apresentaram ângulo de inclinação médio próximos, entre 32° e $36,5^\circ$, e estão de acordo com Singh e Jain (2014) que obtiveram, angulações inferiores a 80° em todos os casos.

Tabela 16 - Ângulo de inclinação das fissuras, em graus.

Viga	CR	CFA	CFS	CFH
1	35	34	43	37
2	29	32	39	36
Média	32	33	41	36,5

Fonte: Autoria própria (2021).

Os valores de carga última resistida (V_u) e maior abertura de fissura ($W_{máx}$) de cada viga estão dispostos na Tabela 17. Apesar de a adição das fibras, tanto de aço como sintéticas, sendo a segunda na situação híbrida, serem responsáveis por suportar uma maior carga última, a presença delas influenciou numa maior abertura de fissuras. Nessa situação, o efeito de ponte das fibras possibilitou a transferência de tensões através da fissura, mesmo com aberturas maiores.

Tabela 17 - Carga última resistida (V_u) e maior abertura de fissura ($W_{máx}$).

Viga	CR	CFA	CFS	CFH
------	----	-----	-----	-----

	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)	V_u (kN)	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)	V_u (kN)	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)	V_u (kN)	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)	V_u (kN)
1	1,40	19,64	3,17	22,30	9,19	16,36	2,34	21,22
2	2,21	20,50	6,91	25,15	6,56	22,06	5,70	21,93
Média	1,81	20,07	5,04	23,72	7,87	19,21	4,02	21,58

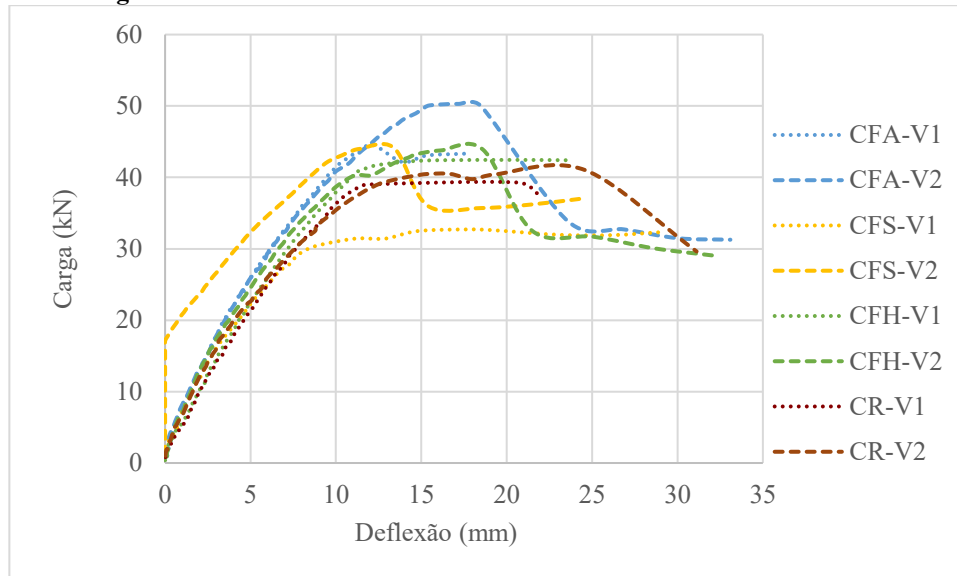
Fonte: Aatoria própria (2021).

Os resultados indicam que, para o caso em estudo, a hibridização das fibras proporcionou um melhor desenvolvimento para o concreto, uma vez que, apesar de garantir uma carga de última resistida intermediária (quando comparada às misturas com fibras não híbridas), garantiu a menor abertura de fissuras entre os concretos reforçados. Ao contrário do obtido por Singh e Jain (2014), a mistura com maior fator de fibras (concreto reforçado com macrofibras sintéticas) apresentou a maior abertura de fissura, além da menor carga última resistida.

4.5 DEFLEXÃO DAS VIGAS

Os gráficos de carga (kN) versus deflexão da face inferior das vigas (mm) são apresentados na Figura 17. Observa-se que as curvas apresentam comportamento parecido e que, em todos os casos, as fibras proporcionaram um comportamento pós-fissuração de *hardening*. Esse comportamento ocorre quando, após o início da formação de fissuras, as fibras proporcionam um ganho de resistência da matriz, que ocorre principalmente devido a uma orientação preferencial das fibras nas regiões e direções que recebem as maiores tensões (SOUZA, et al., 2018).

Figura 18 - Influência das fibras na deflexão do concreto autoadensável.



Fonte: Autoria própria (2021).

As curvas podem ser divididas em 4 fases principais, assim como o apresentado por Rambo, Silva e Filho (2014). Na primeira fase ocorre a resposta elástica inicial, compreendida no intervalo entre 0 mm e, aproximadamente, 5 mm, que é praticamente inalterada pela presença de fibras, independente do material ou da hibridização. De acordo com Salvador e Figueiredo (2013), o trecho entre o início da aplicação da carga e a carga máxima suportada refere-se ao módulo de elasticidade do compósito, que depende das características da matriz cimentícia do concreto. Como os ensaios de módulo de elasticidade discutidos anteriormente não apresentaram diferença estatística entre si, essa análise a respeito do comportamento inicial das curvas pode ser realizada.

Na etapa inicial a única viga que apresentou um comportamento atípico foi a CFS-V2, onde, apesar do aumento da carga aplicada apresentou deflexão inicial nula até 17,6 kN. Esse erro possivelmente ocorreu devido alguma falha no funcionamento do relógio comparador durante a etapa inicial do ensaio. Após o início da leitura da deflexão, a curva apresentou comportamento semelhante às demais.

A segunda fase é delimitada pelo limite de proporcionalidade. Observa-se que nesse momento, as curvas do concreto de referência estão abaixo das demais, com exceção da CFS-V1. O aumento da resistência das vigas com adição de fibras deve-se ao fato do efeito de ponte que essas fibras fazem através das microfissuras (RAMBO, SILVA e FILHO, 2014). A terceira fase é caracterizada pelo comportamento de *hardening*, marcado pela formação de uma fissura

proeminente. Com o alargamento da fissura, ocorreu uma queda na resistência das vigas, caracterizando a quarta fase. O melhor comportamento observado na flexão foi para vigas com adição de fibras de aço, que obtiveram resistência média de 23,72 kN, representando um acréscimo de 18% com relação ao concreto de referência.

De acordo com Salvador e Figueiredo (2013), a carga suportada pós-fissuração aumenta com a proporção de fibras adicionadas e depende da aderência da fibra à matriz e de seu módulo de elasticidade. Assim, como era de se esperar, a resposta pós-fissuração do concreto reforçado com macrofibras sintéticas e com fibras de aço diferiram entre si. Seguindo a mesma lógica, de maneira positiva, a hibridização das fibras gerou resultados intermediários com relação às situações anteriores.

A diferença de comportamento das curvas entre as misturas CFA e CFS, confirmam o exposto por Salvador e Figueiredo (2013) e por Kobayashi e Cho (1982). As vigas com fibras de aço apresentam uma queda da resistência devido ao deslizamento das fibras assim que a carga é transferida para elas e sua capacidade de absorção de energia é recuperada quando sua ancoragem é mobilizada. Para o CFA-V1, o ganho de resistência residual ocorreu próximo à deformação de 14 mm e para o CFA-V2, 25 mm.

Já para as vigas com macrofibra sintética de polietileno, como a falha da matriz ocorre a pequenas deformações, as macrofibras sintéticas são menos capazes de absorver energia em pequenas deflexões, em comparação com as fibras de aço. Todavia, para aberturas grandes de fissuras, a energia absorvida pelas fibras de polietileno pode superar a absorvida pelas fibras de aço, como pode-se verificar na Figura 16 entre as deflexões de 22 e 29 mm. Porém, na situação aqui analisada, devido à grande variabilidade e discrepância dos resultados referentes à mistura CFS, não há a garantia de que essa mistura possa realmente superar o comportamento das vigas com fibras de aço a maiores deformações.

Para as vigas reforçadas com fibras híbridas, conforme exposto anteriormente, os resultados obtidos encontram-se na faixa intermediária entre as vigas com fibras sem hibridização. Com relação ao comportamento das curvas, ao comparar a hibridização de fibras com o concreto de referência, a primeira situação garantiu um aumento de 7,5% no carregamento máximo resistido e manteve maior resistência até a deflexão aproximada de 20 mm.

Ao comparar a análise dos comportamentos do ensaio de flexão e das propriedades do concreto endurecido, fica bastante claro que as fibras apresentam um desempenho mais

significativo na etapa de pós-fissuração do concreto. Assim, apesar dos valores de resistência à compressão inferiores, os resultados do ensaio de flexão à três pontos confirmam o fato de as propriedades no estado fresco não influenciarem a resistência no comportamento pós-fissuração do concreto, como observado por Souza *et al.* (2018).

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foram avaliadas as propriedades físicas e de um traço de concreto autoadensável sem fibras e outras três composições com adição de fibras de aço, sintéticas e híbridas, além da resistência ao cisalhamento de vigas sem armadura transversal moldadas com estes tipos de concreto, podendo ser estabelecidas as seguintes conclusões:

1. A presença de fibras reduziu significativamente o espalhamento do concreto autoadensável, de forma que as misturas com fibras híbridas e com fibras sintéticas não puderam mais ser classificadas como autoadensável.
2. A presença de fibras no concreto não alterou suas propriedades de massa específica, absorção e índice de vazios dos concretos. Os resultados obtidos de resistência à tração e resistência à compressão foram inferiores para os concretos reforçados com fibras, porém a influência das fibras foi mais significativa no comportamento pós-fissuração do concreto;
3. As vigas reforçadas com fibras de aço e as com fibras híbridas garantiram resistências ao cisalhamento superiores ao concreto de referência.
4. Os valores de força cortante última estimados por equações apresentadas na literatura se aproximaram mais dos resultados obtidos experimentalmente para o concreto reforçado com fibras de aço, justificando a necessidade de estudos com fibras sintéticas e híbridas para estabelecimento de novas equações.
5. A adição de fibras garantiu maior resistência ao concreto antes da formação de fissuras e maiores valores de abertura de fissura para carga última, demonstrando um comportamento pós-fissuração em relação ao concreto de referência. As fibras de aço apresentaram os melhores resultados do comportamento pós-fissuração do concreto.
6. A hibridização de fibras apresentou resultados de pós-fissuração intermediários à utilização de fibras não híbridas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os principais parâmetros que influenciam na resistência ao cisalhamento são taxa de armadura, altura efetiva da viga, relação a/d , volume de fibras utilizado, o fator de fibras e o diâmetro máximo do agregado utilizado. No caso desse trabalho, apenas o fator de fibra foi alterado, ou seja, os demais fatores se mantiveram constantes em todas as vigas. Dessa forma, é interessante que sejam realizados estudos que analisem a influência da alteração desses parâmetros no concreto autoadensável reforçado com fibras.

Além disso, é interessante que se tenham investigações mais aprofundadas a respeito do comportamento de fibras sintéticas no concreto autoadensável, dando atenção ao estudo de dosagem para garantir as propriedades do concreto no estado fresco. Bem como, estudos que tratem do controle da distribuição das fibras na mistura do concreto.

Por fim, são necessárias maiores investigações a respeito da hibridização de fibras, realizando uma análise que englobe diferentes proporções dos materiais, a fim de se analisar qual tipo de fibra apresenta maior influência nas propriedades do concreto e, principalmente, no seu comportamento pós-fissuração.

REFERÊNCIAS

- ACI COMMITTEE 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary** (ACI 318-14/318R-14). Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.
- ANITHU, D. SABEENA, M. V. Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 5, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- 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 ISO 6892-1**: Materiais metálicos – Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- 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.

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

ASHOUR, S. A.; HASANAIN, G. S.; Wafa, F. F. Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams. **ACI Structural Journal**, 1992, p. 176-184.

BORGES, A. P. S. N.; MOTTA, L. A. de C.; PINTO, E. B. Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, 2019. ISSN 1517-7076.

CEN, EUROCODE 2; NEN-EN 1992-1-1:2005. **Design of Concrete Structures – Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings**. Bruxelas, Bélgica: Comité Européen de Normalisation, 2005.

DING, Y.; ZHANG, C.; CAO, M.; ZHANG, Y.; AZEVEDO, C. Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire. **Construction and Building Materials**, v. 113, 2016, p. 456-469.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use**. EFNARC, 2005.

HOSSAIN, K. M. A. et al. Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres. **Construction and Building Materials**, v. 45, 2013, p. 20-29.

IMAM, M. et al. Shear domain of fibre-reinforced high-strength concrete beams. **Engineering Structures**, v. 19, n.9, 1997, p.738-747.

JAIN, S.; PRADHAN, B. Fresh, mechanical, and corrosion performance of self-compacting concrete in the presence of chloride ions. **Construction and Building Materials**, v. 247, 2020.

JEN, G.; TRONO, W.; OSTERTAG, C. P. Self-consolidating hybrid fiber reinforced concrete: Development, properties and composite behavior. **Construction and Building Materials**, v. 104, 2016, p. 63-71.

KHUNTIA, M.; STOJADINOVIC, B.; GOEL, S. C. Shear Strength of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. **ACI Structural Journal**, 1999, p. 283-289.

KOBAYASHI, K.; CHO, R. Flexural characteristics of steel fibre and polyethylene fibre hybrid-reinforced concrete. **Composites**. Butterworth & Co, 1982.

KWAK, Y. et al. Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. **ACI Structural Journal**, 2002, p. 530-538.

LANTSOGHT, E. O. L. Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. **Materials**, v. 12, 2019, p. 917.

LANTSOGHT, E. O. L. How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? **Composites Part B**, v. 175, 2019.

LAUFER, I. G. **Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável com adição de fibras de aço**. 2020. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2020.

LI, J.; WU, C.; LIU, Z. Comparative evaluation of steel wire mesh, steel fibre and high performance polyethylene fibre reinforced concrete slabs in blast tests. **Thin-Walled Structures**, v. 126, 2018, p. 117-126.

MM FIBRAS PARA CONCRETO. Especificação técnica. Disponível em: <<https://mmfibras.com.br/tipos-de-fibra/>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

NARAYANAN, R.; DARWISH, I. Y. S. Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement. **ACI Structural Journal**, 1987, p. 216-227.

NARAYANAN, R.; KAREEM-PALANJIAN, A. S. Effect of Fiber Addition on Concrete Strengths. **Indian Concrete Journal**, v. 58, n. 4, 1984, p. 100-103.

NAVAS, F. O. et al. An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres. **Construction and Building Materials**, v. 169, 2018, p. 888-899.

NAVIDI, W. **Probabilidade e estatística para ciências exatas**. 1ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, 2003, p. 5-15.

RAMBO, D. A. S.; SILVA, F. de A.; FILHO, R. D. T. Effect of steel fiber hybridization on the fracture behavior of self-consolidating concretes. **Cement & Concrete Composites**, v. 54, 2014, p. 100-109.

RAUECKER, J. C. N.; JUNIOR, W. M. P.; PITUBA, J. J. de C.; ARAÚJO, D. de L. Uma abordagem experimental e numérica para determinação de curvas de compressão para concreto simples e reforçados com fibras de aço. **Revista Matéria**, v. 24, n. 3, 2019. ISSN 1517-7076.

SAGASETA, J.; VOLLUM, R. L. Influence of aggregate fracture on shear transfer through cracks in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 2, 2011, p.119-137.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D de; Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Matéria**, v. 18, n. 2, 2013, p. 1273-1285. ISSN 1517-7076.

SHARMA, A. K. Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. **ACI Structural Journal**, 1986, p. 624-628.

SINGH, Bhupinder; JAIN, Kranti. Appraisal of Steel Fibers as Minimum Shear Reinforcement in Concrete Beams. **ACI Structural Journal**, 2014, p. 1191-1202.

SLOBBE, A. T.; HENDRICKS, M. A. N.; ROTS, J. G. Sequentially linear analysis of shear critical reinforced concrete beams without shear reinforcement. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 50, 2012, p. 108-124.

SNEED, L. H.; RAMIREZ, J. L. Influence of Effective Depth on Shear Strength of Concrete Beams – Experimental Study. **ACI Structural Journal**, v. 107, n.5, 2010, p. 554-562.

SOUZA, D. A.; DIAS, G. S.; MELO, A. H. V.; VASCONCELOS, C. V. S. A.; BARBOZA, A. S. R. Avaliação do comportamento no pós-fissuração de concreto com reforço híbrido de fibras. In: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Ibracon, 2018.

TORRES, J. A.; LANTSOGHT, E. O. L. Influence of Fiber Content on Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. **Fibers**, v. 7, 2019, p. 102.

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

ZHANG, C.; HAN, S.; HUA, Y. Flexural performance of reinforced self-consolidating concrete beams containing hybrid fibers. **Construction and Building Materials**, v. 174, 2018, p. 11-23.

ZHANG, F.; DING, Y.; XU, J.; ZHANG, Y.; ZHU, W.; SHI, Y. Shear strength prediction for steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. **Engineering Structures**, v. 127, 2016, p. 101-116.

APÊNDICE A – Curvas granulométricas dos agregados

Tabela A. 1 – Granulometria: Porcentagem de material retido acumulado.

Peneira (mm)	Areia natural	Brita 0
19,000	-	0,00%
9,500	-	10,07%
4,750	0,0%	78,18%
2,360	0,4%	97,86%
1,180	2,0%	99,17%
0,600	7,3%	99,38%
0,300	48,0%	99,48%
0,150	93,3%	99,65%
0,075	100,0%	100,00%

Figura A. 1 – Curva granulométrica da areia.

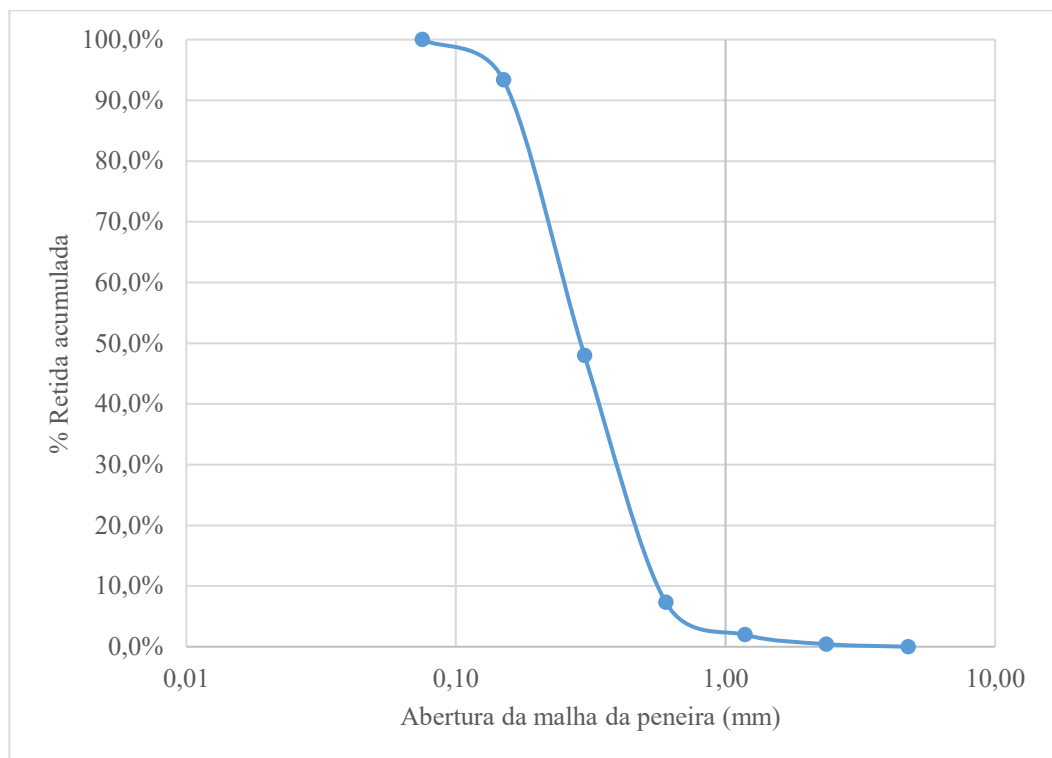


Figura A. 2 - Curva granulométrica da brita.

