

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RAFAEL MATHEUS NECKEL**

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO COM ADIÇÃO  
DE FIBRAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE**

**TOLEDO**

**2022**

**RAFAEL MATHEUS NECKEL**

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO COM ADIÇÃO  
DE FIBRAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE**

**Shear strength of concrete beams with high-density polyethylene fibers  
addition**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Gustavo Savaris.

**TOLEDO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

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

**RAFAEL MATHEUS NECKEL**

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO COM ADIÇÃO  
DE FIBRAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25/novembro/2022

---

Gustavo Savaris  
Doutor em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo

---

José Gustavo Venâncio da Silva Ramos  
Mestre em Engenharia Civil  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Cascavel

---

Fernando Nunes Cavalheiro  
Mestre em Ciências Ambientais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo

**TOLEDO**

**2022**

Aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Luiza e Alexandre, por acreditarem em mim quando nem eu mesmo acreditei. Aqueles que me ensinaram a ler e escrever, que me incentivaram a estudar desde cedo. Aqueles que não me deixaram desistir no meio do caminho. Vocês são meu porto seguro.

À minha irmã Manuela pelo companheirismo e momentos de leveza.

Ao meu namorado Julian, pela paciência nos momentos de estresse, pela disposição em me ajudar sempre que possível, e acima de tudo acreditar em mim.

À minha sogra, Marlene, que me emprestou o computador quando o meu parou de funcionar num momento crítico deste trabalho. Muito obrigado pelo apoio.

Às psicólogas Marlova, por me ajudar a optar pela Engenharia quando eu estava perdido e Tania, por manter a minha saúde mental equilibrada.

Aos amigos que fiz ao longo desses cinco anos. As Amandas, Laryssa, Eduarda, Rafaela e as Saras, juntos viramos noites estudando, rimos, choramos e nos desesperamos. Ao Vitor por me enlouquecer e salvar minha pele várias vezes. À Fernanda, por estar por dentro de todas as fofocas que rolavam no campus. E aos demais colegas que de alguma forma colaboraram com essa caminhada maluca.

Um agradecimento especial à Amanda Donato, que esteve comigo durante todo o desenvolvimento deste trabalho, lavando brita, fazendo concreto, machucando a coluna e arrancando os cabelos, mas sempre cantarolando alguma música de filme.

Aos amigos de fora da UTF: Diana, Jhulia, Pedro, Larissa, Alana e Thaís pelos rolezinhos, tererês, partidas de Uno e choradeira. E aos amigos virtuais que estiveram presentes durante o período de pandemia.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gustavo Savaris, pela sabedoria, paciência e disposição para me explicar algum conceito que eu não tenha entendido direito.

Por fim, agradeço à UTFPR, aos professores e servidores, por proporcionar um ambiente favorável ao aprendizado, além de se tornar uma segunda casa nos últimos anos.

Quando acordei hoje de manhã, eu sabia quem  
eu era, mas acho que já mudei muitas vezes  
desde então.  
(CARROLL; LEWIS, 1865).

## RESUMO

O uso de fibras para incrementar as propriedades mecânicas do concreto vem sendo estudado ao longo de várias décadas. Sabe-se que as fibras atuam absorvendo as tensões no interior do concreto, contendo o avanço da fissuração. Todavia, a compreensão acerca dos mecanismos de transferência de tensões ainda é insuficiente para quantificar a contribuição das fibras para a resistência ao cisalhamento do concreto. Além disso, o uso de fibras reduz a trabalhabilidade do concreto, o que pode ocasionar outros problemas estruturais. Sendo assim, o presente estudo visa determinar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras de polietileno de alta densidade (PEAD), de maneira a verificar seu comportamento pós-fissuração. Deste modo, foram moldadas vigas de concreto sem armadura transversal e teores de fibras correspondentes a 0,0%, 1,5% e 3,0% do volume de concreto. A resistência foi avaliada empregando o ensaio de flexão a três pontos, sendo também utilizada a metodologia de correlação de imagens digitais para avaliar o processo de fissuração. A presença de fibras afetou a trabalhabilidade do concreto, apresentando abatimento de 80 mm para o concreto com 1,5% e 0 mm para o concreto com 3,0%, ambos com incremento de 0,1% de aditivo superplastificante, necessitando realizar o adensamento mecânico das vigas, enquanto para o concreto de referência o abatimento foi de 90 mm sem adição de superplastificante. Verificou-se que o concreto com 1,5% apresentou um acréscimo na resistência à compressão de 2,91% quando comparado ao concreto comum, enquanto o concreto com 3,0% exibiu um decréscimo de resistência de 16,58%. Analogamente, no módulo de elasticidade houve um aumento de 3,25% no concreto com 1,5% e redução de 2,41% no concreto com 3,0%. Na resistência à tração, em ambos os casos o CRF apresentou resistência inferior ao concreto comum, havendo redução de 1,37% no concreto com 1,5% e 33,34% no concreto com 3,0%. Já em relação à resistência ao cisalhamento, o concreto com 1,5% apresentou decréscimo de 9,07% em relação ao concreto de referência enquanto houve um aumento de 16,67% para o concreto com 3,0%. Verificou-se que as fibras atuaram no controle da fissuração durante a ruptura, apresentando aberturas de 3,785 mm no concreto comum, 1,768 mm no concreto com 1,5% e 4,966 mm no concreto com 3,0%. Ademais, em ambos os traços de CRF as aberturas ocorreram menos bruscamente que no concreto de referência, garantindo maior tempo até a ruptura do elemento. Apenas três das oito equações para estimativa da força cortante última se aproximam dos resultados experimentais o que indica a necessidade de mais estudos para estimar a resistência ao cisalhamento para concreto com fibras poliméricas. Sendo assim, pode-se concluir que a adição de fibras de PEAD não contribui para o aumento da resistência à tração, mas garante um comportamento pós-fissuração, enquanto para a resistência à compressão, somente contribui com adição de moderados teores e para a resistência ao cisalhamento contribui apenas para elevados teores. Contudo, quando comparadas as três resistências e perda de trabalhabilidade, torna-se inviável utilizar este tipo de fibra como reforço estrutural.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras; trabalhabilidade; flexão a três pontos; fissuração; correlação de imagens digitais.

## ABSTRACT

The usage of fibers to increase the mechanical properties of concrete has been studied for several decades. It is known that the fibers act by absorbing the tensions inside the concrete, containing the cracking advance. However, the understanding of the stress transfer mechanisms is still insufficient to quantify the contribution of fibers to the shear strength of concrete. In addition, the use of fibers reduces the workability of concrete, which can cause other structural problems. Therefore, the present study aims to determine the shear strength of concrete beams reinforced with high-density polyethylene (HDPE) fibers, in order to verify their post-cracking behavior. Thus, concrete beams will be molded without transverse reinforcement and fiber contents corresponding to 0.0%, 1.5% and 3.0% of the concrete volume. The shear strength will be evaluated using the three-point bending test, also the digital image correlation methodology was used to evaluate the cracking process. The presence of fibers affected the workability of the concrete, presenting the slump of 80 mm for the concrete with 1.5% and 0 mm for the concrete with 3.0%, both with 0,1% of water reducer additive, requiring mechanical consolidation of the beams, while the slump for plain concrete was 90 mm without water reducer addition. It was verified that the concrete with 1.5% presented an increase in the compressive strength of 2.91% when compared to the plain concrete, while the concrete with 3.0% exhibited a decrease of strength of 16.58%. Analogously, in the modulus of elasticity there was an increase of 3.25% in the concrete with 1.5% and a reduction of 2.41% in the concrete with 3.0%. In terms of tensile strength, in both cases the FRC showed lower strength than plain concrete, with a reduction of 1.37% in concrete with 1.5% and 33.34% in concrete with 3.0%. Regarding the shear strength, the concrete with 1.5% showed a decrease of 9.07% in relation to the plain concrete while there was an increase of 16.67% for the concrete with 3.0%. It was found that the fibers acted to control cracking during failure, showing openings of 3.785 mm in plain concrete, 1.768 mm in concrete with 1.5% and 4.966 mm in concrete with 3.0%. Moreover, in both FRC mixes, the openings occurred less abruptly than in the reference concrete, guaranteeing a longer time until the element failure. Only three of the eight equations used to estimate the ultimate shear force approximate to the experimental results, which indicate the need for further studies in order to estimate the shear strength of polymeric-fiber reinforced concrete. Thereby, it can be concluded that the addition of HDPE fibers does not contribute to the increase in tensile strength, but guarantees a post-cracking behavior, while for the compressive strength, it only contributes with the addition of moderate levels and for the shear strength only contributes to high grades. However, when comparing the three resistances and loss of workability, it becomes impracticable to use this type of fiber as structural reinforcement.

Keywords: Fiber reinforced concrete; workability; three-point bending test; cracking; digital image correlation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição de tensões com adição de fibras ao concreto. ....	23
Figura 2 - Engrenamento dos agregados. ....	26
Figura 3 - (a) Comportamento dos elementos de CRF durante carregamento e diagrama de tensão-deformação; (b) curva de carga-deflexão. ....	29
Figura 4 - (a) Diagrama de <i>strain-hardening</i> ; (b) diagrama de <i>strain-softening</i> . ....	31
Figura 5 - Macrofibra Estrutural Sintética MM. ....	36
Figura 6 - Detalhamento das vigas. ....	38
Figura 7 - a) padrão de pontos aleatórios; b) iluminação do ensaio. ....	40
Figura 8 - Slump test a) CREF; b) CF1,5; c) CF3. ....	41
Figura 9 - Diagrama de carga x deslocamento para as resistências residuais do CF3. ....	43
Figura 10 - Força cortante última obtida experimentalmente (kN). ....	44
Figura 11 - Comparativo entre as forças cortantes estimadas e experimental. ....	46
Figura 12 - Relação entre força cortante (V) e abertura de fissuras (W). ....	48
Figura 13 - Relação entre o tempo do ensaio e a abertura de fissura (W). ....	48
Figura 14 - Vigas ao fim do ensaio de flexão a 3 pontos. ....	49
Figura 15 - Colapso das vigas de CRF. ....	50
Figura A.1 - Curva granulométrica da areia. ....	60
Figura A.2 - Curva granulométrica da brita. ....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações para estimativa de $V_u$ .....	32
Tabela 2 - Quantidade de materiais para produção de 77,4 litros de concreto. ....	35
Tabela 3 - Normas para caracterização de agregados.....	36
Tabela 4 - Caracterização dos agregados.....	36
Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas da Macrofibra Estrutural Sintética MM. ....	36
Tabela 6 - Resistências à compressão e à tração e módulo de elasticidade.....	42
Tabela 7 - Resistências residuais CF3 (MPa).....	43
Tabela 8 - $V_u$ normalizadas (kN). ....	45
Tabela 9 - $V_u$ estimadas (kN).....	45
Tabela 10 - Relação entre $V_{u,experimental}$ e $V_{u,estimada}$ . ....	47
Tabela 11 - Força cortante última ( $V_u$ ) e máxima abertura de fissuras ( $W_{max}$ ). ..	47
Tabela 12 - Ângulos de inclinação das fissuras, em graus. ....	49
Tabela 13 - Máxima flecha das vigas (mm). ....	50
Tabela A.1 - Granulometria: retido acumulado (%). ....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CID	Correlação de imagens digitais
CP	Cimento Portland
CRF	Concreto reforçado com fibras
DMC	Diâmetro máximo característico
LVDT	Transformador Linear de Tensão Diferencial Variável
NBR	Normas Brasileiras
PEAD	Polietileno de alta densidade
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga
$a$	Diâmetro do disco de aplicação da carga de punção
$b$	Base da seção da viga
$b_f$	Largura da mesa em vigas com seção T
$d$	Altura efetiva da viga
$D_f$	Diâmetro da fibra
$d_f$	Fator de ligação
$e$	Fator que leva em consideração a relação $a/d$
$F$	Fator de fibra
$f_c$	Resistência à compressão aos 28 dias
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão
$F_{R,\delta p}$	Resistência residual no deslocamento vertical
$f_{Rk,4}$	Resistência residual da fibra para abertura de fissura de 3,5 mm
$f_{sp}$	Resistência à tração diametral
$f_t$	Resistência à tração por duplo puncionamento aos 28 dias
$GPa$	Gigapascal
$H$	Altura do corpo de prova
$h_f$	Altura da mesa em vigas com seção T
$k$	Fator que considera o efeito escala
$k_f$	Fator que considera a contribuição da mesa em vigas T, $k_f=1$ em vigas retangulares
$kg$	Quilograma
$kN$	Quilonewtons
$L$	Litros
$L_f$	Comprimento da fibra (mm)
$mm$	Milímetros
$MPa$	Megapascal
$N$	Newtons
$n$	Parâmetro que considera o tamanho em vigas com seção T
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$P_f$	Carga de punção
$P_{\delta p}$	Carga residual no deslocamento vertical $\delta_p$
$V_f$	Volume de fibras
$V_{Rd,c}$	Parcela da resistência ao cisalhamento atribuída ao concreto
$V_{Rd,f}$	Parcela da resistência ao cisalhamento atribuída às fibras
$V_u$	Força cortante última
$z$	Braço de alavanca, pode ser considerado 0,9d
$\gamma_{cf}$	Fator de segurança para o concreto

$\gamma_E$	Fator de segurança adicional para a norma francesa
$\delta_p$	Deslocamento vertical do disco
$\theta$	Ângulo da biela de compressão
$\mu m$	Micrômetros
$\rho_l$	Taxa de armadura longitudinal
$\sigma_{Rdf}$	Tensão residual resistente na fibra após a ruptura da viga
$\tau$	Resistência de ligação fibra-matriz
$\tau_{fd}$	Resistência de ligação fibra-matriz
$\psi$	Fator que considera o tamanho do agregado
$\omega$	Fator que considera a armadura longitudinal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>17</b>
1.2.1	Objetivo geral .....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
<b>1.3</b>	<b>Delimitação da pesquisa.....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Concreto reforçado com fibras (CRF) .....</b>	<b>19</b>
2.1.1	Fibras de polietileno de alta densidade (PEAD) .....	21
<b>2.2</b>	<b>Fissuração do concreto .....</b>	<b>22</b>
2.2.1	Correlação de imagens digitais (CID).....	24
<b>2.3</b>	<b>Resistência ao cisalhamento .....</b>	<b>24</b>
2.3.1	Zona de compressão .....	25
2.3.2	Engrenamento de agregados .....	25
2.3.3	Efeito de arco .....	27
2.3.4	Efeito de pino .....	27
<b>2.4</b>	<b>Resistência pós-fissuração .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5</b>	<b>Equações para estimativa da força cortante última .....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização dos materiais .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Produção dos concretos .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Ensaio mecânicos .....</b>	<b>38</b>
3.3.1	Tração por duplo puncionamento .....	38
3.3.2	Cisalhamento.....	39
3.3.3	Estimativa da força cortante última.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Propriedades no estado fresco .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>Propriedades no estado endurecido .....</b>	<b>42</b>
4.2.1	Resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade .....	42
<b>4.3</b>	<b>Resistência ao cisalhamento .....</b>	<b>43</b>
4.3.1	Análise dos parâmetros.....	44
4.3.2	Forças cortantes últimas estimadas .....	45
<b>4.4</b>	<b>Fissuração .....</b>	<b>47</b>

<b>4.5</b>	<b>Deflexão .....</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE A - Caracterização dos agregados .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, dado a sua versatilidade, durabilidade, baixo custo, resistência ao fogo e à água, entre outros. Contudo, segundo Neville (2016), este material apresenta um comportamento frágil, uma vez que sua ruptura ocorre com uma deformação relativamente baixa, principalmente quando submetido a esforços de tração.

Para contornar este problema, a tecnologia de materiais de construção está constantemente buscando alternativas para melhorar a ductilidade e resistência à tração e ao cisalhamento do concreto, incorporando diversos materiais à matriz cimentícia.

Uma alternativa, relativamente econômica, é a incorporação de fibras ao concreto, promovendo um compósito reforçado com filamentos. Esta técnica garante melhor ductilidade ao elemento, uma vez que atua como agente de transferência de tensões, além de retardar o aparecimento de fissuras e conter sua propagação. Recentemente, o concreto reforçado com fibras, também conhecido pela sigla CRF, vem sendo utilizado como revestimento de túneis, pisos, tubos de concreto para águas pluviais e esgoto sanitário, pré-moldados e entre outros.

As fibras incorporadas ao concreto podem ser de diversos tipos e materiais, classificadas conforme sua natureza, dimensão e módulo de elasticidade. As macrofibras geralmente são empregadas como elementos de reforço estrutural, enquanto as microfibras são aplicadas como reforço de matriz.

A zona de transição entre a fibra e a matriz cimentícia é uma região com maior porosidade, devido à diferença entre os materiais, além disso, a lamelaridade da fibra leva ao acúmulo de água em sua superfície. Esses fatores podem enfraquecer a ligação do compósito, sendo assim é importante que a fibra apresente boa adesão à pasta de cimento (BENTUR; MINDESS, 2007). Entretanto, a presença de cristais de C-S-H e etringita nessa região, colabora com a hipótese de que esta interface não seja um ponto fraco, e sim a zona farta em CH (BENTUR; MINDESS, 2007; PEREIRA, 2017).

As fibras de polietileno de alta densidade (PEAD) possuem alto módulo de elasticidade e elevada resistência à tração. Ademais, é um material quimicamente inerte, cujo baixo custo na produção do polímero garante uma ampla disponibilidade do material.



Entretanto, o uso de fibras de maneira geral afeta a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Deste modo, a dosagem adequada é um fator que deve ser levado em conta.

De acordo com Lucena (2017), o CRF pode ser classificado também quanto ao teor de fibras adicionadas, sendo que é considerado de baixa fração volumétrica quando apresenta valores inferiores a 1,0% do volume de concreto, moderada fração volumétrica, com valores entre 1,0 e 2,0% e alta fração volumétrica, se acima de 2,0%.

Apesar do aumento nas pesquisas empregando CRF nos últimos anos, ainda faltam estudos relacionados ao comportamento das fibras em concretos para fins estruturais. Além disso, as normas vigentes no país relacionadas ao dimensionamento de estruturas de concreto armado não levam em conta a adição de fibras (PEREIRA, 2017).

A atual normatização brasileira também não conta com mecanismos para se quantificar a resistência ao cisalhamento de maneira padronizada como ocorre com as tensões de tração e compressão, o que leva os trabalhos relacionados ao assunto a buscarem procedimentos empíricos ou baseados em normas internacionais.

Isto ocorre devido à falta de informações acerca dos mecanismos envolvidos no processo de cisalhamento, todavia há um consenso de que o efeito de pino exerce influência sobre a resistência ao cisalhamento. Este efeito está relacionado à capacidade da armadura de resistir a esforços perpendiculares, provenientes da interação aço-agregado.

Já os efeitos de pós-fissuração, ou seja, após o início da formação de fissuras, apresentam dificuldades de avaliação não restritas apenas ao CRF, uma vez que sua análise ocorre principalmente através da medição da abertura de fissuras por meio de extensômetros, sem conseguir identificar os mecanismos envolvidos no processo de fissuração.

A fim de melhor entender este fenômeno, bem como analisá-lo de maneira mais assertiva, a correlação de imagens digitais (CID) vem sendo utilizada de forma a registrar os ensaios e avaliar a fissuração desde sua formação até o colapso do elemento estrutural.

Sendo assim, o presente trabalho busca analisar o desempenho de vigas de concreto reforçado com fibras de PEAD com teores de fibra de 0,0%, 1,5% e 3,0%,

submetidas ao ensaio de flexão a três pontos de maneira a mensurar a resistência ao cisalhamento do elemento e avaliar o comportamento de pós-fissuração por meio da correlação de imagens digitais.

## **1.1 Justificativa**

Embora amplamente estudado no mundo, no Brasil o CRF ainda é pouco utilizado, com aplicações voltadas majoritariamente a baixos teores de fibra (FIGUEIREDO, 2011).

Apesar de haver inúmeras pesquisas sobre a utilização de fibras no concreto, grande parte refere-se a características como ductilidade e comportamento pós-fissuração, todavia ainda faltam estudos sobre a resistência ao cisalhamento. Além disso, as normas para dimensionamento estrutural desconsideram o uso deste compósito, levando em conta apenas a taxa de armadura e resistência à compressão do concreto (DIAS, 2019).

A determinação da resistência ao cisalhamento está limitada a concepções empíricas que não se atentam a aspectos como engrenamento de agregados e modo de carregamento (LIMA, 2019). Assim, é necessário verificar os efeitos de cada um dos fatores a fim de mensurar a resistência ao cisalhamento real.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto sem armadura transversal com adição de moderado e elevado teores de fibras de PEAD.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinar, experimentalmente, a resistência ao cisalhamento das vigas sem armadura transversal e com adição de fibras sintéticas;
- Avaliar a influência dos teores de fibras nas propriedades do concreto no estado fresco;

- Avaliar o modo de fissuração e ruptura de vigas de concreto com adição de fibras;
- Avaliar a aplicabilidade das equações da literatura para estimativa da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto com adição de fibras.

### **1.3 Delimitação da pesquisa**

O presente estudo avalia experimentalmente, o comportamento do concreto com adição de moderado e alto teores de fibras de PEAD em vigas sem armaduras transversais, com resistência à compressão inferior a 50 MPa, empregando ensaio de flexão a três pontos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No presente capítulo são apresentadas informações relevantes a respeito do concreto reforçado com fibras, das fibras de polietileno de alta densidade, da contribuição para diminuição de fissuras e da resistência ao cisalhamento e pós-fissuração. Além disso, é explicada a metodologia de correlação de imagens digitais.

### **2.1 Concreto reforçado com fibras (CRF)**

O concreto reforçado com fibras (CRF) passou por avanços notáveis nas últimas décadas graças ao melhor entendimento a respeito da interface fibra-concreto, sua produção e seu comportamento. Para fins práticos pode ser considerado um material compósito, assumindo-se que as fibras são descontínuas e distribuídas aleatoriamente pela matriz do concreto, e que a sinergia provida por ambos os constituintes torna o CRF um compósito eficaz (NAAMAN, 2009).

Compósitos são materiais constituídos por dois ou mais componentes com características distintas, que se combinam de maneira a formar um material com propriedades superiores, provendo ligação e resistência, matriz e reforço, respectivamente (NETTO; PARDINI, 2016).

A adição de fibras ao concreto aprimora sua ductilidade e resistência à tração, além de promover a absorção de energia, retardando a propagação e expansão de fissuras e, conseqüentemente, o colapso do elemento, uma vez que as fibras transferem as tensões através das fissuras e proporcionam resistência residual pós-fissuração ao concreto (JEN; TRONO; OSTERTAG, 2016; SALVADOR, 2013). Peruzzi (2002) verificou que as fibras contínuas impactam positivamente na ductilidade do concreto enquanto fibras mais curtas tendem a atuar mais efetivamente no grampeamento das microfissuras.

A maioria das fibras utilizadas na engenharia civil são de origem sintética, devido às moderadas propriedades mecânicas das fibras naturais. Contudo, graças à baixa densidade relativa e natureza renovável, alguns tipos de fibras naturais têm chamado atenção como elementos de reforço (ARAÚJO, 2011).

Nesse contexto, Borges, Motta e Pinto (2019) verificaram que a incorporação de teores de 0,25% e 0,5% de fibras de sisal e de rami ao concreto contribuiu para a

resistência à fissuração do concreto, porém apresentou um aumento de 10% e 26,59% na absorção de água por imersão no CRF com fibras de sisal, e 41,83% e 36,43% no CRF com fibras de rami, mas também observaram uma redução de 29% e 12,26% da absorção por capilaridade para CRF-Sisal e 29% e 32,90% para CRF-Rami. Já Xu et al. (2020) observaram que a adição de fibras de celulose apresentou resultados positivos na resistência à compressão axial, bem como na resistência à fissuração, uma vez que não foram observadas fissuras oblíquas, todavia as fibras reduziram a já baixa resistência à tração do concreto.

Devido à sua alta resistência, módulo de elasticidade elevado e possibilidade de competir com os materiais convencionais de construção estrutural, fibras como de aço, vidro, carbono e basalto são mais utilizadas como reforço do concreto (ARAÚJO, 2011).

Desse modo, Xu et al. (2020) afirmam que a utilização de fibras de aço no concreto impacta na economia de armaduras, bem como no tempo de trabalho. Além disso, apresentam grande flexibilidade em sua geometria, podendo apresentar diversos tamanhos e formatos e melhor ancoragem, quando exibem extremidades em gancho. Marcalikova et al. (2020) compararam a influência da adição de fibras de aço lisas e com ancoragem nas extremidades ao concreto, verificando que em ambos os casos o uso da fibra incrementou a resistência à tração em 15% e 24%, respectivamente, porém o aumento no teor de fibras lisas não apresentou diferenças significativas na resistência ao cisalhamento, como observado para as fibras com ancoragem.

A evolução dos estudos referente à utilização de fibras no concreto permitiu o surgimento de novos materiais, bem como a otimização na geometria das fibras e da produção em série, conferindo maior resistência e ductilidade ao concreto (RAMBO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2014).

Babaie, Abolfazli e Fahimifar (2019) observaram uma pequena redução da resistência à compressão no concreto reforçado com fibras poliméricas, contudo apresentando resistência à flexão semelhante à do concreto reforçado com fibras de aço.

Arain et al. (2019) observaram que a adição de fibras de PVA aprimora a tenacidade e deformação pós-pico, com teor em torno de 2,0% do volume total de concreto, todavia o aumento no teor de fibras não apresenta melhoras quanto à tenacidade, mas contribuem para a resistência à compressão.

Zhou et al. (2020) verificaram que o volume ótimo para fibras basálticas seria de 0,3% a 0,4%, uma vez que excedidos esses teores, as propriedades mecânicas do concreto ficariam comprometidas. Além disso, os autores também observaram que a adição desta fibra altera o modo de ruptura do concreto para não-frágil e que há uma boa aderência à matriz.

John e Dharmar (2021) concluíram que apesar da incorporação de fibras de basalto contribuir para a capacidade de resistência e absorção de energia, sua dispersão irregular pela matriz reduz as propriedades mecânicas do concreto. A adição de fibras de 6 a 36 mm de comprimento e 10 a 25  $\mu\text{m}$  de diâmetro, com teor de até 2% do volume de concreto apresentam melhoras significativas no desempenho do elemento estrutural, podendo este teor se elevar para 4% com a adição de sílica ativa e metacaulim.

Adesina (2021) apontou que o uso de fibras de basalto reduz a fluidez do concreto, uma vez que as fibras absorviam parte da umidade, contudo, a utilização de fibras de menor comprimento, aliado à adição de misturas poderiam contribuir para a trabalhabilidade. Singh (2017), por outro lado, ressalta que concretos contendo fibras de aço mais curtas possuem maior facilidade de bombeamento. Ambos os autores reiteram que a dosagem adequada também é um fator importante quando se diz respeito à trabalhabilidade.

### 2.1.1 Fibras de polietileno de alta densidade (PEAD)

O polietileno é um dos polímeros mais difundidos no mundo, devido à simplicidade e baixo custo de sua produção. Com temperatura de fusão entre 110°C e 115°C, é obtido por meio da polimerização do eteno e tem como fórmula geral o monômero  $(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n$ , sendo considerado um produto atóxico devido a sua composição química. Pode ser classificado quanto a sua densidade, sendo considerado de baixa densidade com valores entre 0,910 e 0,925  $\text{g}/\text{cm}^3$  e alta densidade acima de 0,930  $\text{g}/\text{cm}^3$ . (GEDEL PLÁSTICOS, 2021).

As fibras de PEAD são fabricadas de maneiras diferentes, tendo em vista as distintas aplicações do material, possuem alta tenacidade e módulo de elasticidade, sua resistência à tração varia entre 1.400 a 3.090 MPa e densidade da fibra entre 0,960 e 0,990  $\text{g}/\text{cm}^3$  (ALAGIRUSAMY; DAS, 2011).

Ao comparar concretos com adição de fibras de aço e polietileno, Kobayashi e Cho (1982) verificaram que, apesar de as fibras de aço garantirem maior resistência em relação ao estado limite de serviço (ELS) e melhoria na tenacidade, a resistência pós-pico decaiu de maneira brusca, enquanto as fibras de polietileno não apresentavam melhorias quanto à resistência no ELS, porém apresentou maior resistência após o surgimento das fissuras, suportando maiores deformações.

Tezuka (1989) afirma que os compósitos produzidos com fibras de polietileno e polipropileno têm pouco aumento na resistência mecânica, porém boa capacidade de absorção de energia, o que aumenta a resistência ao impacto e tenacidade.

Alagirusamy e Das (2011) analisaram dois estudos utilizando fibras de PEAD em compósitos cimentícios, constatando um aumento na resistência de impacto e resistência à flexão com 95% de confiabilidade. Além disso, observaram que a tensão pós-pico, bem como a abertura de fissuras ocorre mais lentamente que no CRF com adição fibras de aramida, conferindo uma maior energia de ruptura. Foi verificado também que o mecanismo contribuindo para este comportamento foi o arrancamento da fibra.

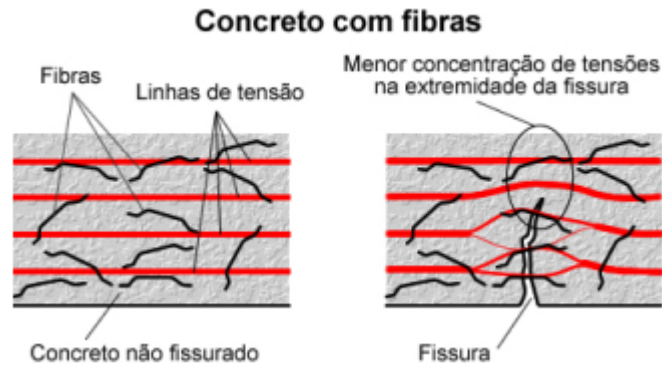
## **2.2 Fissuração do concreto**

As fissuras são um tipo de patologia muito comum em estruturas cimentícias, podendo aparecer logo após o lançamento do concreto ou depois de um período (CORSINI, 2010), caracterizadas como aberturas longitudinais de pequena espessura, que podem surgir em virtude de retração, evaporação da água de amassamento, variação de temperatura, movimentação das formas, ausência de armadura transversal, devido esforços mecânicos como flexão, punção, compressão e cisalhamento, entre outros (DAL MOLIN, 2008; MORAIS, 2017).

Além disso, o processo de fissuração acontece quando as microfissuras pré-existentes no concreto se unem às novas, formadas devido ao carregamento, propagando-se pelos poros do elemento (VAN MIER, 2013). As tensões, impedidas de continuar sua transferência pelo concreto, passam a concentrar-se nas extremidades das fendas, causando maior abertura até que ocorra a falha da peça (BARROS, 2009; PANSSONATO, 2019).

Nesse sentido, a adição de fibras ao concreto auxilia na transferência de tensões, reduzindo a concentração de tensões nas extremidades da fissura e retardando sua propagação, conforme ilustrado pela Figura 1, garantindo ao concreto um comportamento pseudo-dúctil (BARROS, 2009; FIGUEIREDO, 2000).

**Figura 1 - Distribuição de tensões com adição de fibras ao concreto.**



Li (1993) observa que os compósitos cimentícios possuem elevada capacidade de deformação em relação ao concreto convencional, ficando evidente ao comparar seus gráficos de tensão-deformação.

Garcez (2009) verificou que, durante a tração, o CRF com fibras de PVA apresenta estabilização das fissuras em 1,0% de deformação, não apresentando aumentos significativos até a falha do elemento, quando a deformação fica em torno de 5,0%. Essa deformação excedente acontece devido ao aparecimento de novas fissuras, com abertura constante, permitindo a “auto-cicatrização” das fissuras devido à hidratação tardia de cristais cimentantes.

No entanto, as fibras possuem a tendência de se alojar na interface matriz-agregado, região mais frágil do concreto, com maior probabilidade de fissuração. Assim, fibras muito curtas não são capazes de cruzar as aberturas, enquanto fibras muito longas prejudicam as propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Desta forma, o ideal é utilizar fibras cuja razão de seu comprimento pelo DMC do agregado graúdo esteja entre 1,5 e 2,0 (CHENKUI; GUOFAN, 1995).



### 2.2.1 Correlação de imagens digitais (CID)

A fim de monitorar os ensaios experimentais, usualmente, são usados transdutores de deslocamento linear variável, com sigla em inglês LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), para mensurar deslocamentos, e extensômetros elétricos, denominados *strain gages*, para aferir as deformações (DIAS-DA-COSTA; VALENÇA; JÚLIO, 2010).

Todavia, esses equipamentos demandam que o local de sua instalação seja definida previamente e, como o processo de fissuração ocorre de maneira imprevisível, esta técnica acaba se tornando trabalhosa e limitada. Sendo assim, a correlação de imagens digitais (CID) permite analisar os deslocamentos e deformação de uma superfície, observando a cinemática da fissura crítica, além da região de ruptura (RESENDE; CARDOSO; SHEHATA, 2019).

O método baseia-se na comparação de uma imagem digital de referência com outra do mesmo elemento submetido a um carregamento, de maneira a analisar o deslocamento de um ponto de interesse. Com o auxílio de *softwares*, o ponto em questão é mapeado através dos *pixels*, células fotossensíveis, e então comparado com a imagem de referência (RESENDE; CARDOSO; SHEHATA, 2019).

Esta técnica foi utilizada por Gali e Subramaniam (2018), que analisaram a ruptura e o cisalhamento de concretos reforçados com fibra e autoadensáveis. No estudo, os autores pulverizaram tinta preta sobre os elementos a fim de criar um padrão *speckle* que pudesse ser interpretado pelo *software* de correlação.

Resende, Cardoso e Shehata (2020) também empregaram a correlação de imagens em seu ensaio sobre a influência de fibras de aço no efeito de pino de vigas de concreto armado. Para efeito comparativo, os autores também fizeram uso do método LVDT e verificaram grande similaridade entre os resultados obtidos.

Deste modo, a correlação de imagens digitais é uma metodologia viável para análise da ruptura e cisalhamento em vigas de concreto armado.

## 2.3 Resistência ao cisalhamento

Ainda há incertezas acerca dos mecanismos de ruptura por cisalhamento, todavia sabe-se que a falha ocorre de maneira frágil, com o aparecimento de

fissuras diagonais desde a zona de compressão até a armadura (SLOBBE; HENDRIKS; ROTS, 2012).

Ainda não se compreende todos os mecanismos de transferência de tensões cisalhantes em peças de concreto, nem a redistribuição de tensões pós-fissuração, entretanto, sabe-se que a resistência ao cisalhamento do concreto armado também está ligada à zona de compressão do concreto não fissurado e ao efeito de pino de cisalhamento da armadura de flexão. Ademais, a atuação de cada um desses fatores altera-se conforme a magnitude da carga aplicada e pelo padrão de fissuras formado (SILVA, 2021).

### 2.3.1 Zona de compressão

As tensões existentes na zona de compressão do concreto não fissurado são capazes de contribuir para a resistência ao cisalhamento da peça. A intensidade da carga transferida limita-se à profundidade da zona de compressão que, para o concreto armado, varia entre 20% e 40% da resistência ao cisalhamento total. Todavia, para vigas esbeltas sem compressão axial, este mecanismo apresenta pouca contribuição para a transferência de tensões, devido à altura reduzida da zona de compressão (SLOBBE; HENDRIKS; ROTS, 2012; LANTSOGHT, 2019).

Nesse contexto, Lantsoght (2019) avalia que a presença de fibras modifica o equilíbrio horizontal do concreto tensionado, o que aumenta a altura da zona de compressão do CRF em comparação ao concreto armado convencional. Posto isto, a ruptura pode acontecer quando a fissura crítica de cisalhamento se propaga até a zona de compressão, perdendo-se os mecanismos de transferência de tensões.

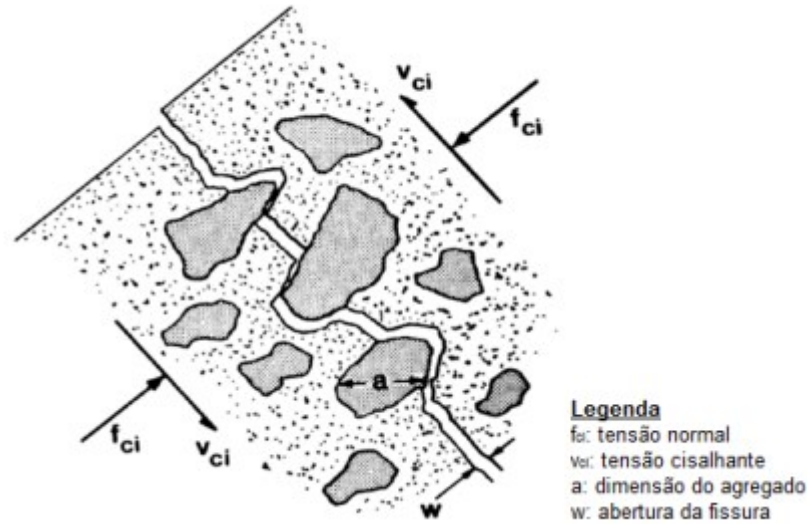
### 2.3.2 Engrenamento de agregados

As ligações físicas e químicas dos materiais garantem a coesão do elemento, ou seja, forças adesivas que, com deslizamentos na interface inferiores a 0,05 mm, contribuem para a resistência ao cisalhamento da peça (RANDL, 2013).

Nos concretos convencionais com resistência à compressão inferior a 50 MPa, a fissuração comumente ocorre na zona de transição entre a matriz cimentícia e o agregado, uma vez que as resistências entre essas fases são diferentes. A

superfície fissurada pode ser considerada áspera, devido à protuberância dos agregados na face da fissura, que por sua vez, são maiores que a largura da fissura. Isto confere uma resistência ao escorregamento à superfície fissurada, podendo transferir a força cisalhante. Este fenômeno é conhecido como engrenamento dos agregados e pode ser observado na Figura 2 (SLOBBE; HENDRIKS; ROTS, 2012).

**Figura 2 - Engrenamento dos agregados.**



Fonte: Vecchio e Collins (1986).

Devido à interação entre as tensões normais e cisalhantes, o entendimento acerca do engrenamento dos agregados acaba tornando-se complexo. A superfície fissurada tem uma tendência de se dilatar em virtude do deslizamento dos grãos de agregados, que reduz a capacidade de transmissão de esforços do concreto e conseqüente redução na resistência ao cisalhamento (WALRAVEN; REINHARDT, 1981; SAGASETA; VOLLUM, 2011).

Além disso, a dimensão e o formato das partículas dos agregados atuam diretamente no desempenho deste mecanismo, uma vez que agregados mais arredondados proporcionam maior envolvimento pelo plano de cisalhamento, interferindo no modo de propagação das fissuras. Ademais verifica-se um aumento na tensão suportada com agregados de DMC maiores (WALRAVEN; REINHARDT, 1981; SAVARIS, 2016).

Sendo assim, Huber, Huber e Kollegger (2019) submeteram peças de concreto ao cisalhamento direto, com o intuito de obter o fator de efetividade dos

agregados, a fim de quantificar a parcela de resistência devida ao engrenamento dos agregados em vigas com armadura transversal.

Huber, Huber e Kollegger (2019) ainda verificaram, por meio de correlação de imagens digitais, que as vigas cujas aberturas de cisalhamento ocorreram de forma mais acentuada no ponto de aplicação de carga possuíam maior resistência ao cisalhamento, bem como maior contribuição do engrenamento de agregados na transferência de tensões em relação às vigas com trincas mais acentuadas no centro da interface cisalhada.

Lantsoght (2019) aponta que o engrenamento de agregados em peças de concreto submetidos ao cisalhamento direto é mais efetivo em corpos de prova sem armadura. Ao avaliar a adição de fibras de aço em elementos de CRF sem armadura, verificou um aumento da efetividade deste mecanismo conforme crescia-se o teor de fibra, todavia nos exemplares armados a eficácia de cisalhamento ficou em função, principalmente, da armadura de flexão.

### 2.3.3 Efeito de arco

O efeito de arco acontece quando os carregamentos são transferidos para os apoios, formando um arco de compressão na viga, que pode aumentar sua resistência ao cisalhamento. Todavia, este fenômeno provoca esforços horizontais que devem ser absorvidos pela armadura de flexão. A intensidade deste efeito e o modo de falha da viga dependem da disposição e ponto de aplicação da força cisalhante, além da esbeltez da viga (SAVARIS, 2016).

Segundo Slobbe, Hendriks e Rots (2012), o emprego de fibras ao concreto aprimora o efeito de arco, aumentando a resistência ao cisalhamento com a razão entre a distância do apoio e ponto de aplicação da força e altura efetiva da viga ( $a/d$ ) relativamente baixa. Assim, Lantsoght (2019) atribui este fator à compressão obtida pela fibra através da fissura, que colaboram na transferência das forças cisalhantes.

### 2.3.4 Efeito de pino

A interação entre o engrenamento dos agregados e a rigidez da armadura longitudinal ocasiona o deslizamento na interface aço-concreto, que tende a se

separar. Assim, o efeito de pino é a capacidade de resistência das barras de reforço aos esforços perpendiculares ao seu eixo (LIMA, 2019). O escorregamento das superfícies causa o deslocamento lateral das extremidades, abrindo fissuras e gerando tensões de flexão e tração axial no vergalhão (RANDL, 2013).

De acordo com o estudo realizado por Fiset, Bastien e Mitchell (2019), em vigas biapoiadas armadas longitudinal e transversalmente, a resistência ao cisalhamento das vigas teve pouca contribuição do efeito de pino, sendo mais efetiva a contribuição dos estribos.

Todavia, a armadura transversal só passa a contribuir de forma eficaz para a transferência da força cortante após a aparição de fissuras. Além disso, não deve ser considerado como armadura longitudinal ao plano de cisalhamento devido à cinemática do processo de fissuração em vigas, que não transfere os mesmos esforços da armadura positiva (DIAS, 2019).

Em vigas de concreto armado sem estribos, a resistência à tração da cobertura de concreto delimita o cisalhamento máximo da armadura. Desse modo, o efeito de pino torna-se ainda mais relevante com armadura longitudinal distribuída em mais de uma camada (SLOBBE; HENDRIKS; ROTS, 2012).

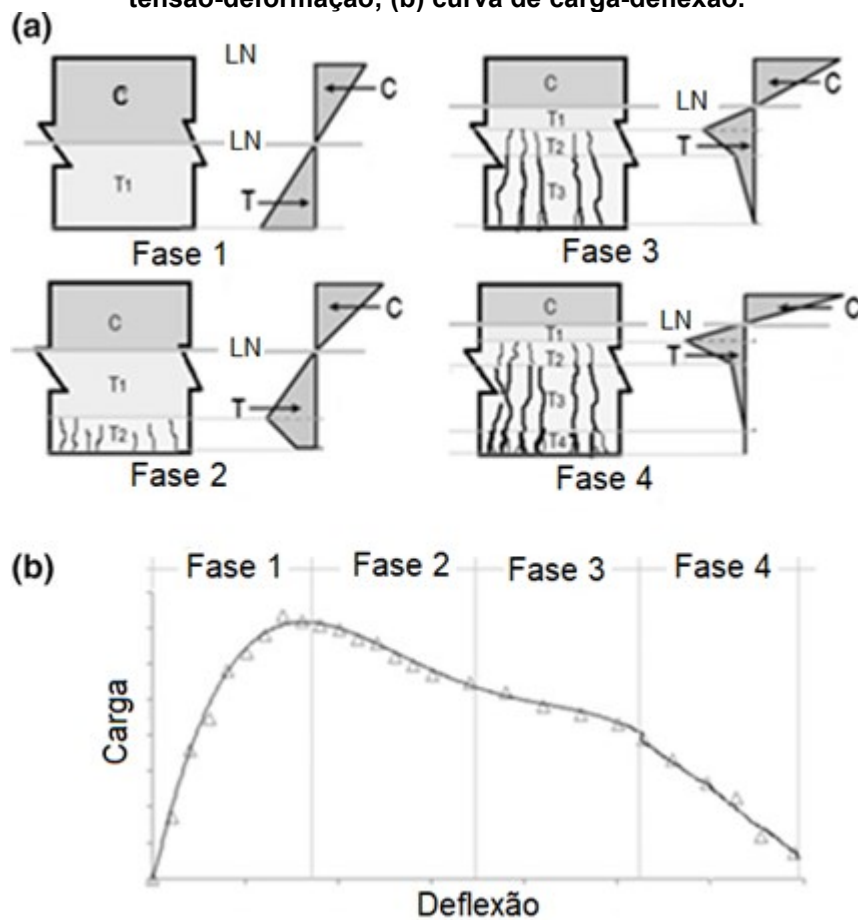
Lantsoght (2019) comparou o concreto armado convencional com o CRF e verificou que a adição de fibras conferiu maior resistência à tração ao concreto e, portanto, maior efetividade ao efeito de pino. Ademais, o grampeamento de fissuras também contribuiu para este mecanismo, uma vez que as fissuras de pino se propagaram mais lentamente. Assim, para o CRF, o efeito de pino teve uma contribuição de 10% a 35% na resistência ao cisalhamento.

## **2.4 Resistência pós-fissuração**

Após o início do processo de fissuração, quando a matriz passa a perder a rigidez, é que a ação da fibra se torna efetiva, aumentando a ductilidade e a resistência à tração, e controlando a propagação de fissuras (SOUZA et al., 2017).

O comportamento dos elementos de CRF submetidos à flexão podem ser classificados em quatro fases: fase não-fissurada, fase fissurada linear-elástica, fase fissurada não-linear e fase de arrancamento/fratura da fibra, como esquematizado na Figura 3 (SINGH, 2017).

Figura 3 - (a) Comportamento dos elementos de CRF durante carregamento e diagrama de tensão-deformação; (b) curva de carga-deflexão.



Fonte: Adaptado de Singh (2017).

De acordo com Singh (2017), durante a primeira fase, a máxima deformação de tração na seção permanece menor que a deformação de tração limite, visto que a máxima tensão de tração geralmente é atingida no final desta fase. A inclinação da curva no diagrama de carregamento-deflexão mantém-se linear até o limite de proporcionalidade, não havendo fissuração na zona de tração da seção da viga.

A fase fissurada linear-elástica é delimitada pelo limite de proporcionalidade. Nela, as tensões de tração são transferidas para as fibras, que atuam como pontes entre as fissuras em toda a zona de tensão da viga. No entanto, este fenômeno resulta no deslocamento da linha neutra na seção. Devido às aberturas relativamente pequenas nas seções, a teoria linear-elástica e o conceito de transformação de seção fissurada podem ser usados para derivar expressões para tensões na seção sob as condições de cargas de serviço (RAMBO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2014; SINGH, 2017).

Na fase fissurada não-linear as microfissuras formadas na fase anterior começam a se alargar, apresentando três regiões distintas na zona de tensão da viga. As fibras na zona de tração começam a escorregar com cargas mais ou menos constantes, sendo que fibras de maior comprimento ainda são capazes de suportar carga adicional, embora com deslizamento crescente. No entanto, fibras com menor comprimento começam a se desprender da matriz (SINGH, 2017).

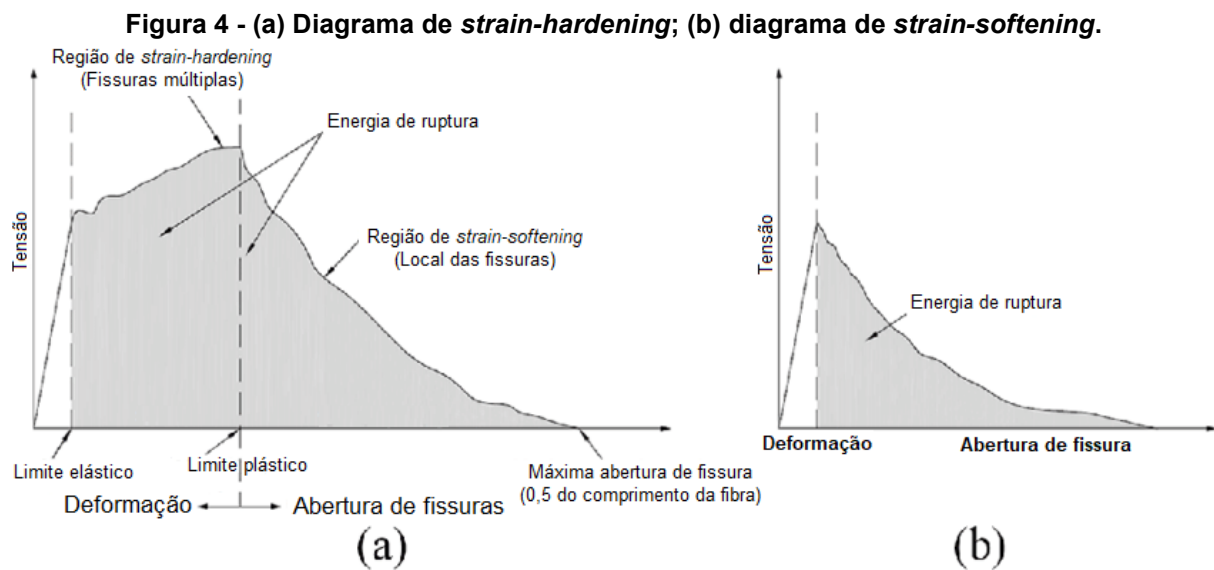
Devido à orientação aleatória das fibras na matriz, uma quantidade substancial de fibras é relativamente menos ativada do que as que estão alinhadas ao longo das trajetórias principais de tensão, reduzindo sua capacidade de carga. Contudo, com o alargamento das fissuras, as fibras inclinadas tendem a esmagar o concreto enquanto tentam se endireitar sob as tensões crescentes, o que leva ao reengajamento das fibras no processo de transferência de carga, apresentando assim um comportamento não-linear (SINGH, 2017).

O comportamento de uma viga de CRF na fase não-linear depende dos parâmetros da fibra ( $V_f$  e  $l/d$ ) além da resistência à compressão do concreto. Outro parâmetro, chamado índice de fibra ( $\beta$ ) e calculado pela razão entre a resistência à tração residual e a resistência à compressão em dada largura da fissura ( $w$ ), pode ser usado para quantificar a resistência à tração residual, verificando a deformação predominante na face de tração da viga no estado último (SINGH, 2017).

Com o aumento da abertura de fissuras, a maioria das fibras eventualmente serão fraturadas ou completamente arrancadas da matriz, dependendo de sua proporção. Isto acontece devido às tensões absorvidas pelas fibras gerarem cisalhamento na interface fibra-matriz. Assim, caso a tensão de cisalhamento na interface seja superior à máxima tensão admitida pela fibra, ocorrerá o arrancamento, resultando em baixas resistências e menor transferência de tensões, caso a tensão de cisalhamento seja inferior à tensão admitida pela fibra, os esforços serão transferidos para a fibra até que ocorra a fratura desta, garantindo maior resistência ao compósito (FIGUEIREDO, 2011).

Na quarta fase, as fissuras são largas o suficiente para eliminar as fibras da matriz, reduzindo a zona de tensão devido à capacidade quase nula do concreto de suportar esforços próximo à face de tração. Este processo resulta em um deslocamento vertical da linha neutra e geralmente é acompanhado por grandes deflexões. No entanto, a viga continua a suportar a carga devido às fibras que ainda estão engatadas próximas à linha neutra (SINGH, 2017).

A ruptura de elementos de CRF pode ser categorizada como *strain-softening* e *strain-hardening*. O primeiro caso ocorre quando utilizadas fibras leves e volumes inferiores a 2,0% ou 3,0%, havendo uma redução gradual na tensão pós-pico conforme o avanço da fissuração. Já o segundo é caracterizado pela formação de fissuras múltiplas, apresentando um aumento de tensão pós-pico. Os modos de ruptura são ilustrados na Figura 4 (RAOUFI; WEISS, 2011).



Fonte: Adaptado de Sherif *et al.* (2020).

Além disso, o arranjo adequado das fibras no concreto contribui para a tensão pós-fissuração do elemento, uma vez que as fibras atuam como ponte de transferência de tensões através das fissuras. Além da distribuição e módulo de elasticidade, o comprimento e geometria da fibra também apresentam impacto significativo na resistência residual (PEREIRA, 2017).

## 2.5 Equações para estimativa da força cortante última

Devido à complexidade do processo de transferência de tensões, inúmeros pesquisadores estimaram a resistência ao cisalhamento através de equações empíricas para determinação da força cortante última ( $V_u$ ). Além disso, algumas normas internacionais, como RILEM (2003) e a norma francesa *Association Française de Génie Civil* (2013) também propõem equações para estimar  $V_u$ . Na Tabela 1 são apresentadas essas equações normativas, bem como algumas formulações empíricas.



A maioria das equações consideram o fator de fibra (F), proposto por Narayanan e Kareem-Palanjian (1984), tendo como função definir as propriedades da fibra, podendo ser calculado pela Equação 1.

$$F = \frac{L_f}{D_f} V_f d_f \quad (1)$$

Em que:

$L_f$  é o comprimento da fibra;

$D_f$  é o diâmetro da fibra;

$V_f$  é o volume de fibras;

$d_f$  é fator de ligação das fibras.

Posteriormente, Narayanan e Darwish (1987) consideraram que  $d_f$  pode ser admitido como 0,5 para fibras lisas, 0,75 para fibras onduladas e 1,0 para fibras com ancoragem nas extremidades.

**Tabela 1 - Equações para estimativa de  $V_u$ .**

(continua)

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

(conclusão)

Kwak et al. (2002)	$V_u = \left[ 3,7e \left( (f_{sp})^{\frac{2}{3}} \left( \rho_l \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \right) + 0,8 \cdot 0,41\tau F \right] bd$ $e = \begin{cases} 3,4 \frac{d}{a} & \text{para } \frac{a}{d} \leq 3,4 \\ 1 & \text{para } \frac{a}{d} > 3,4 \end{cases}$
RILEM (2003)	$V_u = V_{Rd,c} + V_{Rd,f}$ $V_{Rd,c} = 0,12k(100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}}bd$ $V_{Rd,f} = 0,7k_f k \tau_{fd} bd$ $k_f = 1 + n \left( \frac{h_f}{b} \right) \left( \frac{h_f}{d} \right) \leq 1,5$ $n = \frac{b_f - b}{h_f} \leq 3 \text{ e } n \leq \frac{3b}{h_f}$ $\tau_{fd} = 0,12f_{Rk,4}$ $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$
Association Française de Génie Civil (2013)	$V_u = V_{Rd,c} + V_{Rd,f}$ $V_{Rd,c} = \frac{0,21}{\gamma_{cf}\gamma_E} f_c^{\frac{1}{2}}bd$ $V_{Rd,f} = \frac{bz\sigma_{Rd,f}}{\tan \theta}$

Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999),  $\tau$  pode ser estimado por meio da Equação 2.

$$\tau = 0,66\sqrt{f_c} \quad (2)$$

Algumas equações levam em conta a resistência à tração por compressão diametral, contudo, a NBR 16939 (ABNT, 2021) que estabelece os procedimentos para determinação da resistência à tração do CRF considera o ensaio de tração por duplo puncionamento. Deste modo, Igwe, Ekwulo e Ottos (2016) propuseram a Equação 3 para estimar a resistência à tração por compressão diametral.

$$f_{sp} = 1,152(f_t)^{e^{0,005701}} \quad (3)$$

Em que:

$a$  é a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga;

$b$  é a base da seção da viga;

$b_f$  é a largura da mesa em vigas de seção T;

$d$  é a altura efetiva da viga;

$d_a$  é o diâmetro máximo do agregado;

$e$  é o fator que leva em consideração a relação  $a/d$ ;

$f_c$  é a resistência à compressão, aos 28 dias;

$f_{ck}$  é a resistência característica do concreto;

$f_{Rk,4}$  é a resistência residual da fibra para abertura de fissura de 3,5 mm;

$f_{sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral;

$f_t$  é a resistência à tração por duplo puncionamento;

$h_f$  é a altura da mesa em vigas de seção T;

$k$  é o fator que considera o efeito escala;

$k_f$  é o fator que considera a contribuição da mesa em vigas de seção T,  $k_f=1$

em vigas retangulares;

$n$  é o parâmetro que considera o tamanho em vigas de seção T;

$z$  é o braço de alavanca, que pode ser considerado como  $0,9d$ ;

$V_{Rd,c}$  é a parcela de resistência ao cisalhamento atribuída ao concreto;

$V_{Rd,f}$  é a parcela de resistência ao cisalhamento atribuída às fibras;

$\gamma_{cf}$  é o fator de segurança para concreto;

$\gamma_E$  é o fator de segurança adicional para a norma francesa;

$\theta$  é o ângulo da biela de compressão;

$\rho_l$  é a taxa de armadura longitudinal;

$\sigma_{Rd,f}$  é a tensão residual resistente da fibra após a ruptura da viga;

$\tau$  é a resistência de ligação entre fibra-matriz;

$\tau_{fd}$  é a resistência de ligação entre fibra-matriz;

$\psi$  é o fator que considera o tamanho do agregado;

$\omega$  é o fator que considera a armadura longitudinal.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a resistência ao cisalhamento das vigas de concreto reforçado com fibras de PEAD foram produzidos, a partir de um concreto de referência, os concretos com 1,5% e 3,0% de fibras. A moldagem dos corpos de prova, bem como os ensaios de resistência foram realizados nos Laboratórios de Materiais de Construção e de Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Toledo.

#### 3.1 Caracterização dos materiais

O presente trabalho baseia-se na produção de um concreto de referência com traço de 1:2,49:2,79, com relação água/cimento de 0,52 conforme utilizado por Turetta et al. (2021), bem como na produção de concretos com adições de 1,5% e 3,0% de fibra de PEAD, conforme quantidades apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Quantidade de materiais para produção de 77,4 litros de concreto.**

Mistura	Cimento Portland (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (kg)	Fibra (kg)	Aditivo (kg)
CREF	29,82	66,25	74,85	15,51	-	-
CF1,5	29,82	66,25	74,85	15,51	1,310	0,0298
CF3	29,82	66,25	74,85	15,51	2,620	0,0298

**Fonte: Autoria própria (2022).**

O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z-32) da marca Votoran, pois a presença de 6% a 14% de material pozolânico em sua composição tende a diminuir a permeabilidade e melhorar a trabalhabilidade do concreto, além de ser um dos cimentos mais consumidos comercialmente devido à sua versatilidade.

Foram utilizadas areia natural de rio como agregado miúdo e rocha basáltica britada como agregado graúdo, com DMC igual a 12,5 mm. A fim de determinar a distribuição granulométrica e massa específica, os materiais foram submetidos a ensaios de caracterização conforme regulamentam as normas especificadas na Tabela 3. As propriedades dos agregados estão apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 3 - Normas para caracterização de agregados.**

<b>Norma</b>	<b>Título</b>
NBR 7211	Agregados para concreto – Especificação
NBR 16915	Agregados – Amostragem
NBR 16916	Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água
NBR 16917	Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água
NBR NM 248	Agregados – Determinação da composição granulométrica

**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Tabela 4 - Caracterização dos agregados**

<b>Propriedade</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>
Dimensão máxima característica (mm)	-	12,5
Módulo de finura	2,001	-
Densidade seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,021	2,824
Densidade saturado superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,055	2,886
Absorção de água (%)	1,708	2,195

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Foi utilizado o aditivo superplastificante ADVA 800 da marca GCP apenas nos traços com adição de fibras, sendo dosado em 0,10% da massa de cimento.

As fibras utilizadas na produção do concreto reforçado com fibras de PEAD foram do modelo Macrofibra Estrutural Sintética MM, da MM Fibras para Concreto, exibidas na Figura 5. Suas propriedades são apresentadas na Tabela 5.

**Figura 5 - Macrofibra Estrutural Sintética MM.**

**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas da Macrofibra Estrutural Sintética MM.**

<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração (MPa) (por filamento)</b>	<b>Alongamento por ruptura (%)</b>	<b>Fator de forma (FF)</b>
50	1,12	350	110	50

**Fonte: MM Fibras ® (2022).**

### 3.2 Produção dos concretos

Utilizando uma betoneira de eixo inclinado com volume de cuba de 240 litros foram produzidos 77,4 litros de cada mistura de concreto, totalizando 232,2 litros, que foram classificados conforme as normas NBR 16935 (ABNT, 2021) e NBR 16938 (ABNT, 2021) quanto ao controle de qualidade e procedimentos do concreto reforçado com fibras. Sendo assim, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) com cada mistura de concreto, que foram submetidos ao ensaio de compressão axial normatizado pela NBR 5739 (ABNT, 2015).

Para a determinação da resistência à tração, a NBR 16939 (ABNT, 2021) define que os corpos de prova, com 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura, devem ser submetidos ao ensaio de duplo puncionamento, também conhecido como ensaio Barcelona. Para isso, foram moldados 3 corpos de prova com as especificações normatizadas.

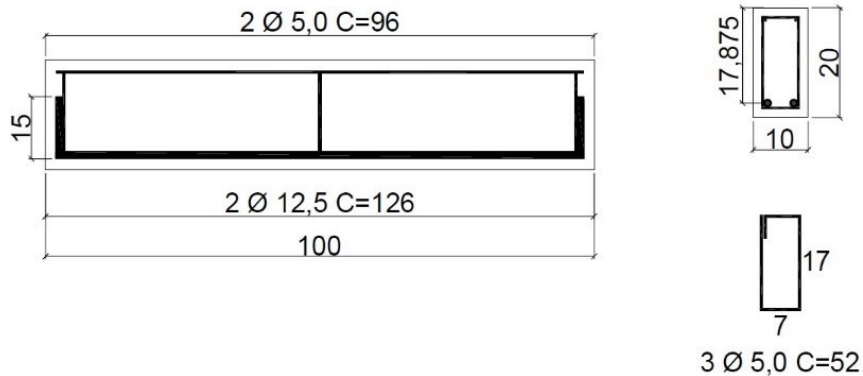
Para a determinação do módulo de elasticidade, foram moldados 3 corpos de prova de cada mistura de concreto, conforme normatizado pela NBR 8522 (ABNT, 2021).

Por fim, para determinar a resistência ao cisalhamento, foi realizado o ensaio de flexão a três pontos utilizando 3 vigas com cada mistura de concreto, com 1000 mm de comprimento, com seção transversal de 100 mm de largura por 200 mm de altura, conforme utilizado por Silva (2021).

A armadura de flexão foi composta por duas barras de aço CA-50 com 12,5 mm na parte inferior da viga e duas barras de aço CA-50 com 5,0 mm na parte superior. Além disso, foram utilizados três estribos de aço CA-50 com 5,0 mm posicionados nas extremidades e no centro da viga para facilitar a montagem das armaduras, conforme detalhamento de Silva (2021) na Figura 6.

Os corpos de prova foram devidamente identificados após 24h da concretagem e submetidos ao processo de cura em tanque de água por 28 dias. Já as vigas foram armazenadas no Laboratório de Estruturas envolvidas uma lona plástica, que garantiu a umidade durante o processo de cura até completar 28 dias.

**Figura 6 - Detalhamento das vigas.**



Fonte: Silva (2021).

### 3.3 Ensaios mecânicos

Os ensaios de resistência foram realizados 28 dias após a moldagem dos respectivos corpos de prova, respeitando seus períodos de cura e diferentes idades. Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade, com velocidade de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, e Barcelona, enquanto as vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a três pontos. Os ensaios de tração, compressão e módulo de elasticidade foram realizados na prensa hidráulica do Laboratório de Materiais, enquanto o ensaio de flexão a três pontos ocorreu no Laboratório de Estruturas, ambos na UTFPR campus Toledo.

#### 3.3.1 Tração por duplo puncionamento

Os corpos de prova foram ensaiados na prensa hidráulica, com velocidade de deslocamento de  $0,50 \pm 0,05$  mm/min. A resistência à tração por duplo puncionamento foi calculada pela Equação 4.

$$f_t = \frac{4P_f}{9\pi aH} \quad (4)$$

Em que:

$f_t$  é a resistência à tração;

$P_f$  é a carga de punção;

$a$  é o diâmetro do disco de aplicação da carga;

$H$  é a altura do corpo de prova.

A fim de verificar a resistência pós-fissuração, foram calculadas as resistências residuais, através da Equação 5.

$$f_{R,\delta p} = \frac{4P_{\delta p}}{9\pi aH} \quad (5)$$

Em que:

$f_{R,\delta p}$  é a resistência residual no deslocamento vertical  $\delta_p$ ;

$P_{\delta p}$  é a carga residual no deslocamento vertical  $\delta_p$ .

A partir dos valores obtidos, pôde ser traçado o diagrama de carga por deslocamento vertical e então, analisado o comportamento pós-fissuração dos concretos.

### 3.3.2 Cisalhamento

As vigas foram ensaiadas fazendo uso de um pórtico de reação com três pistões hidráulicos como capacidade de carga de 500 kN cada, e velocidade de carregamento de 5,0 mm/min.

A abertura das fissuras foi observada e mensurada a partir do método de correlação de imagem digital, utilizando o *software* GOM Correlate. Para rastreamento dos pontos de interesse, as vigas foram pintadas com tinta branca e, em seguida, tinta preta foi pulverizada sobre a superfície de análise, de maneira a criar um padrão aleatório, conforme apresentado na Figura 7a.

A captura das imagens ocorreu utilizando-se uma câmera da marca Nikon, modelo Coolpix P100, com frequência de 1 fotografia a cada 5 segundos, de forma a registrar o ensaio desde o posicionamento da viga até a ruptura do elemento. Além disso, visando a resolução adequada das imagens, foi utilizada iluminação indireta, conforme Figura 7b.



Figura 7 - a) padrão de pontos aleatórios; b) iluminação do ensaio.



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.3.3 Estimativa da força cortante última

De acordo com Lantsoght (2019), pode-se adotar os parâmetros  $f_{Rk,A} = f_{sp}$ , e  $\sigma_{Rd,f} \cong 0,772F$ . Os parâmetros  $\gamma_{cf}\gamma_E$  foram desconsiderados, uma vez que estão sendo analisados resultados experimentais e não o dimensionamento de vigas.

Além disso, também foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Base da viga = 100 mm;
- Altura efetiva = 178,75 mm;
- Distância entre apoio e ponto de aplicação da carga = 400 mm;
- Taxa de armadura = 1,376%;
- DMC = 12,5 mm.

Pelo fator de fibra calculado pela Equação 1 para ambos os teores de fibra, obteve-se  $F_{CF1,5} = 0,5625$  e  $F_{CF3} = 1,125$ .

Todos os parâmetros são explicados na lista de símbolos.

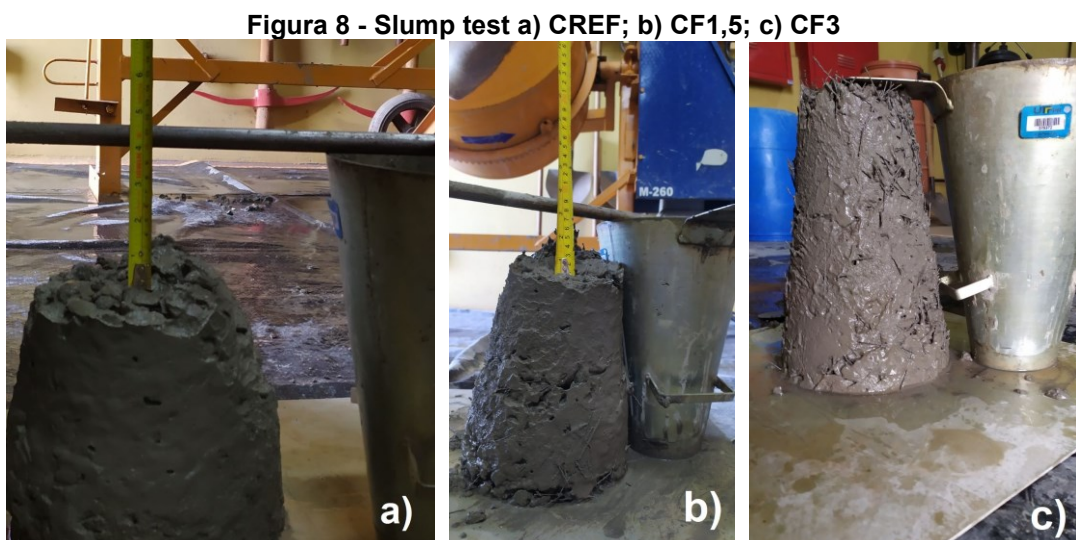
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Propriedades no estado fresco

A trabalhabilidade dos concretos foi mensurada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), sendo para o CREF obtido 90 mm, sem utilização de aditivos.

No CF1,5, o *slump test* foi realizado três vezes: concreto sem fibras, após adição das fibras e após incorporação do aditivo. Isso permitiu observar o impacto da soma de cada material além da dosagem do aditivo. Os abatimentos alcançados foram de 100 mm, 0 mm e 80 mm, respectivamente. Verificou-se, também, que com adição de 29,82 g de aditivo, totalizando 0,10% da massa de cimento, o concreto já apresentava uma película lúzida, indicando que o acréscimo de mais do material levaria à exsudação do concreto. Ressalta-se que as fibras foram gradualmente adicionadas de maneira a garantir uma boa dispersão pelo concreto.

Por fim, para produção do CF3 e já sabendo a quantidade de aditivo necessária, este foi incorporado à água na fase anterior à mistura na betoneira. O abatimento obtido foi de 0 mm, todavia optou-se por não acrescentar aditivo para que o concreto não exsudasse. Os testes são mostrados na Figura 8.



Fonte: Autoria própria (2022).

A fim de evitar nichos de concretagem e exposição das armaduras, as vigas de concreto reforçado com fibras foram adensadas com auxílio de adensador mecânico. Verificou-se que para o CF3 as fibras emaranhavam-se formando uma

malha, que tendiam a separar-se da argamassa durante o adensamento. Isto se deve à tendência das fibras de PEAD de se aglutinar, conforme apontado por Silva (2021), uma vez que, devido ao menor peso das fibras, a vibração do processo de adensamento contribui para a movimentação das fibras pela matriz do concreto.

## 4.2 Propriedades no estado endurecido

### 4.2.1 Resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, à tração por duplo punção e módulo de elasticidade, aos 28 dias, bem como a resistência média, desvio padrão e coeficiente de variação são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Resistências à compressão e à tração e módulo de elasticidade.**

CP	Resistência à Compressão (MPa)			Resistência à Tração (MPa)			Módulo de Elasticidade (GPa)		
	CREF	CF1,5	CF3	CREF	CF1,5	CF3	CREF	CF1,5	CF3
1	26,966	29,901	20,428	2,548	2,596	1,591	29,934	34,518	29,678
2	27,410	28,173	25,409	2,728	2,569	1,638	33,240	34,518	35,852
3	30,144	28,905	24,666	2,504	2,509	1,957	37,549	34,958	-
Média	28,173	28,993	23,501	2,593	2,558	1,729	33,574	34,665	32,765
Desvio padrão	1,721	0,867	2,687	0,119	0,044	0,199	3,818	0,254	4,366
CV	2,962	0,752	7,220	0,014	0,002	0,040	14,581	0,065	19,059

Fonte: Autoria própria (2022).

Pode-se observar que o CF1,5 apresenta um acréscimo na resistência à compressão de 2,91% quando comparado ao CREF, enquanto o CF3 exibe um decréscimo de resistência de 16,58%. Isto pode estar atrelado à dispersão irregular das fibras pelo concreto.

Analogamente à resistência à compressão, no módulo de elasticidade houve um aumento de 3,25% no CF1,5 e redução de 2,41% no CF3. Devido ao elevado volume de fibras no CF3, um dos corpos de prova cilíndricos teve de ser descartado, pois sua altura era inferior à estabelecida pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Já a resistência à tração em ambos os casos o CRF apresentou menor resistência que o concreto de referência, havendo uma redução de 1,37% no CF1,5 e 33,34% no CF3.

Não foi possível obter as resistências residuais de tração para o traço CF1,5 uma vez que o ensaio Barcelona foi finalizado quando houve o decréscimo de 20% da máxima carga aplicada, assim como no concreto de referência. Já para o CF3, a prensa foi calibrada para encerrar o ensaio quando a carga aplicada decaísse em 80%, ou quando o deslocamento vertical do disco atingisse de 6,0 mm.

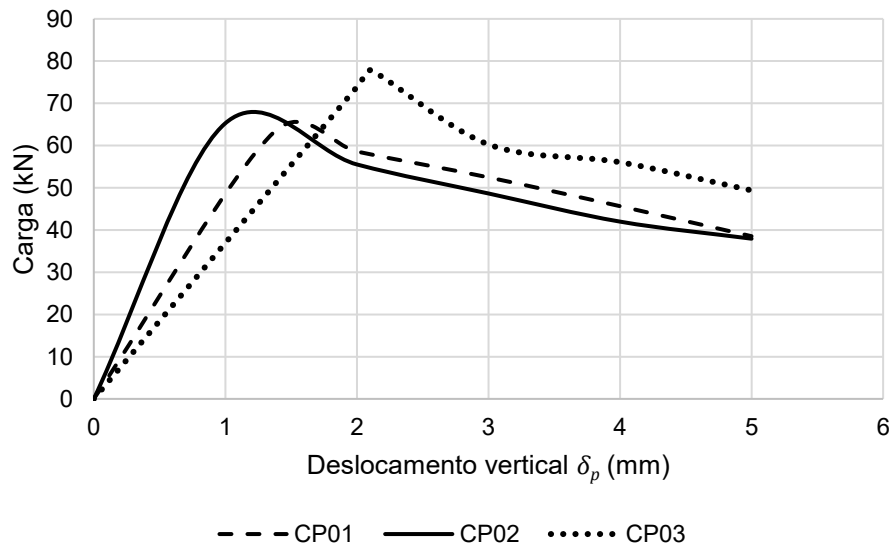
A partir da Equação 5 foi possível calcular as resistências residuais quando o deslocamento dos discos atingiu 2, 3, 4 e 5 mm. Os valores para o CF3 são apresentados na Tabela 7 e a curva de tensões residuais na Figura 9.

**Tabela 7 - Resistências residuais CF3 (MPa).**

CP	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	$f_{R,5}$
1	1,4733	1,3194	1,1478	0,9690
2	1,3964	1,2235	1,0558	0,9542
3	1,8579	1,5156	1,4096	1,2419
Média	1,5759	1,3528	1,2044	1,0550
Desvio padrão	0,2473	0,1489	0,1836	0,1620
CV (%)	0,0611	0,0222	0,0337	0,0262

Fonte: Autoria própria (2022).

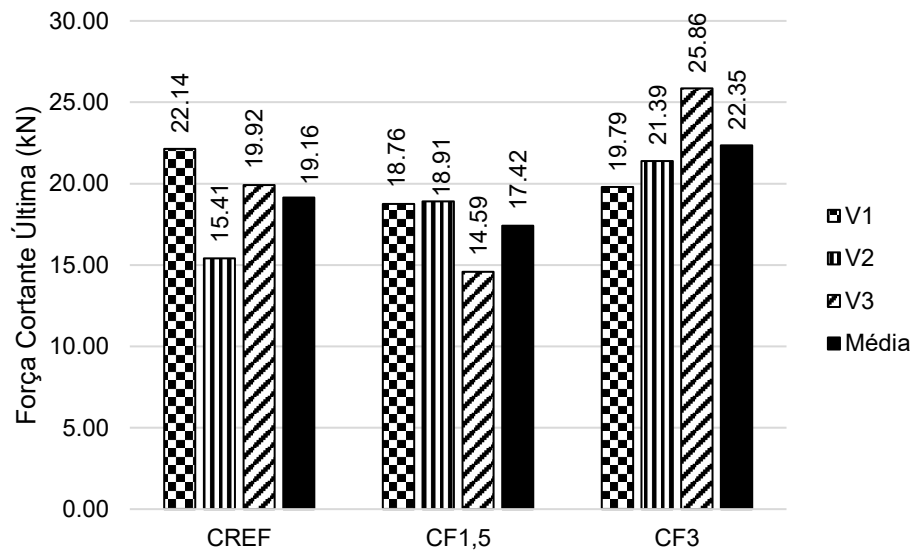
**Figura 9 - Diagrama de carga x deslocamento para as resistências residuais do CF3.**



Fonte: Autoria própria (2022).

### 4.3 Resistência ao cisalhamento

A partir do ensaio de flexão a 3 pontos, obteve-se a força cortante última ( $V_{u,experimental}$ ), conforme Figura 10, para o cálculo da resistência ao cisalhamento.

**Figura 10 – Força cortante última obtida experimentalmente (kN).**

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se que a força cortante média para CF1,5 é inferior à do concreto de referência em 9,07%, o que corrobora com o que foi observado por Alagirusamy e Das (2011), que afirmam que o excesso de fibras têm efeitos negativos quanto ao desempenho do concreto na flexão. Já para o CF3, contradizendo a afirmação anterior, houve um aumento de 16,67% do esforço cortante. Isto pode estar relacionado ao engrenamento dos agregados e das fibras, que como verificado por Lantsoght (2019), este efeito é mais efetivo conforme o aumento do teor de fibras, podendo proporcionar maior transferência de tensões e absorção de energia.

#### 4.3.1 Análise dos parâmetros

Segundo Lantsoght (2019), a resistência ao cisalhamento é influenciada pela taxa de armadura, DMC do agregado, altura efetiva da viga, relação  $a/d$ , volume de fibras e fator de fibras. No presente trabalho houve variação apenas no volume de fibras, mantendo-se os demais parâmetros constantes.

A fim de eliminar a influência da variação da resistência à compressão dos concretos, os valores de  $V_u$  foram normalizados através da Equação 6, sendo os resultados apresentados na Tabela 8.

$$V_{u,normalizada} = \frac{V_u}{\sqrt{f_c}} \quad (6)$$

**Tabela 8 -  $V_u$  normalizadas (kN).**

<b>Viga</b>	<b>CREF</b>	<b>CF1,5</b>	<b>CF3</b>
1	4,17	2,86	4,11
2	3,53	3,51	3,01
3	3,73	3,97	5,34
Média	3,81	3,45	4,15

**Fonte: Autoria própria (2022).**

O acréscimo de resistência corrobora com a análise realizada por Laufer (2020), que afirma que, para concretos com resistência à compressão inferior a 50 MPa, há um acréscimo da máxima tensão de cisalhamento resistida em vigas conforme o aumento do volume de fibra.

#### 4.3.2 Forças cortantes últimas estimadas

A fim de estimar as forças cortantes últimas a partir das equações da Tabela 1, foram necessários os dados obtidos nos ensaios de tração e compressão.

As estimativas para a força cortante última são apresentadas na Tabela 9.

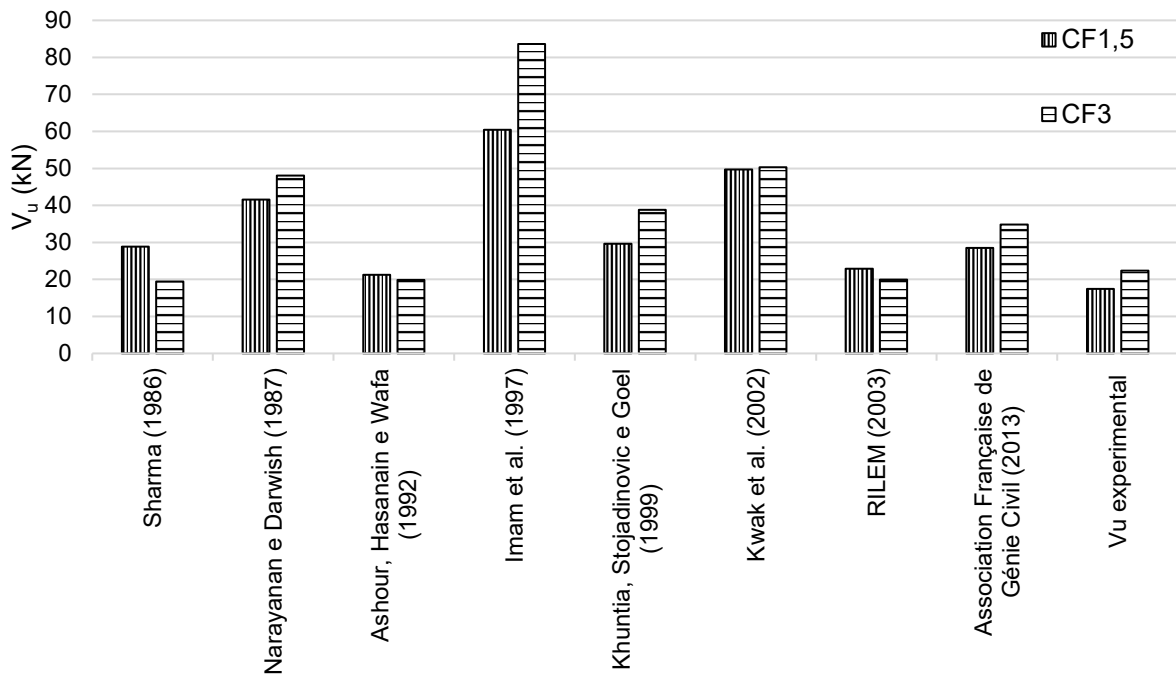
**Tabela 9 -  $V_u$  estimadas (kN).**

<b>Modelo</b>	<b>CF1,5</b>	<b>CF3</b>
Sharma (1986)	28,86	19,46
Narayanan e Darwish (1987)	41,55	48,11
Ashour, Hasanain e Wafa (1992)	21,26	19,83
Imam et al. (1997)	60,47	83,60
Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999)	29,61	38,84
Kwak et al. (2002)	49,69	50,30
RILEM (2003)	22,85	19,95
Association Française de Génie Civil (2013)	28,54	34,85

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Sendo assim, é possível comparar as estimativas com os valores obtidos experimentalmente, conforme pode-se observar na Figura 11.

**Figura 11 - Comparativo entre as forças cortantes estimadas e experimental.**



Fonte: Autoria própria (2022).

Todas as estimativas da força cortante última para as vigas de CF1,5 foram superiores aos dados experimentais, enquanto para as vigas de CF3, a equação normativa RILEM (2003) e os modelos propostos por Sharma (1986) e Ashour, Hasanain e Wafa (1992) apresentaram força cortante estimada inferior à força cortante experimental.

As estimativas que mais se aproximaram da força cortante experimental foram as propostas por Ashour, Hasanain e Wafa (1992) e RILEM (2003), com a relação entre os dados experimentais e estimados próximos de 1,00, como exibido na Tabela 10.

Já a equação proposta por Imam et al. (1997) apresentou as estimativas mais discrepantes com os resultados dos ensaios. As demais estimativas também expõem discrepâncias, apesar de não tão acentuadas quanto a anterior, com exceção de Sharma (1986), que se aproxima das estimativas de Ashour, Hasanain e Wafa (1992).

Ressalta-se que as formulações que mais se aproximaram da força cortante experimental não consideram o fator de fibra, o que sugere que as demais equações podem não ser indicadas para o tipo de fibra analisado.

**Tabela 10 - Relação entre  $V_{u,experimental}$  e  $V_{u,estimada}$ .**

Modelo	CF1,5	CF3
Sharma (1986)	0,60	1,15
Narayanan e Darwish (1987)	0,42	0,46
Ashour, Hasanain e Wafa (1992)	0,82	1,13
Imam et al. (1997)	0,29	0,27
Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999)	0,59	0,58
Kwak et al. (2002)	0,35	0,44
RILEM (2003)	0,76	1,12
Association Française de Génie Civil (2013)	0,61	0,64

**Fonte: Autoria própria (2022).**

#### 4.4 Fissuração

Por meio da correlação de imagens digitais foi possível analisar o processo de formação de fissuras das vigas. O *software* GOM Correlate fez a análise do deslocamento dos pontos que se desejou avaliar, indicando as componentes nos eixos X e Y desse deslocamento, deste modo, a abertura da fissura ( $W$ ) é calculada pelo Teorema de Pitágoras, sendo  $W$  equivalente à hipotenusa dessas coordenadas. Além disso, como as fissuras de cisalhamento são inclinadas, foi necessário considerar o ângulo de inclinação das fissuras, apresentados na Tabela 12.

Os ensaios foram encerrados quando o decréscimo de carga aplicada atingiu 20% da carga máxima. A Tabela 11 apresenta a relação entre a força cortante última e máxima abertura das fissuras, enquanto a Figura 12 exibe a relação entre a força cisalhante e a abertura de fissuras na ruptura e a Figura 13 expõe a relação entre o tempo de ensaio e a abertura de fissuras.

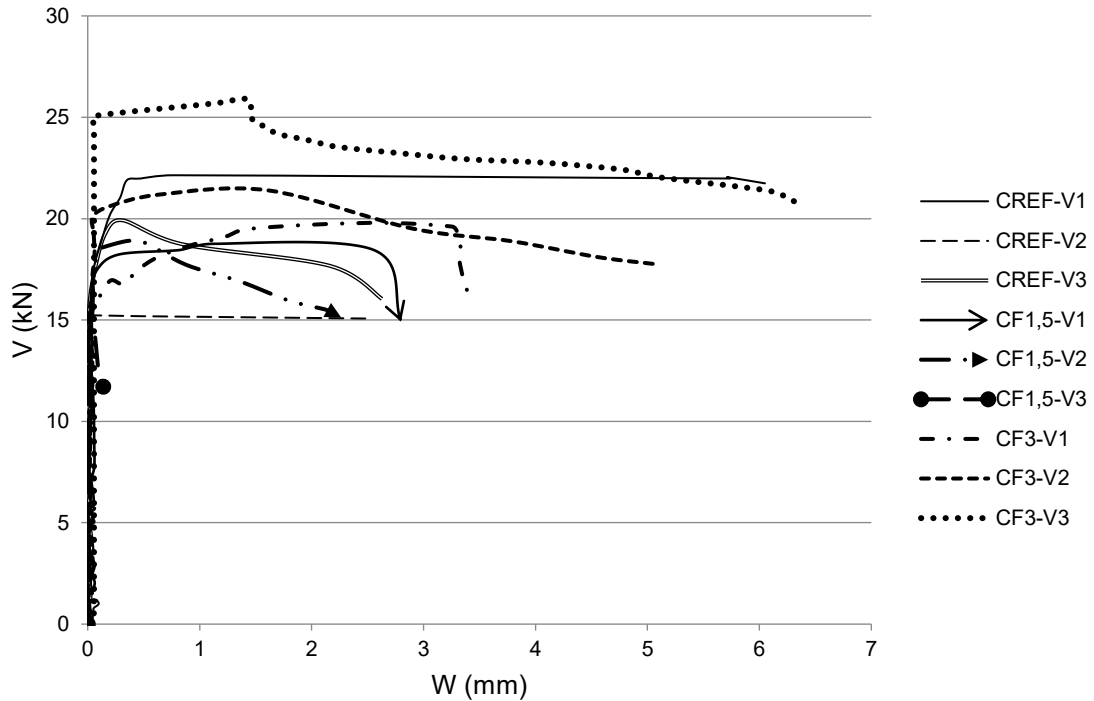
**Tabela 11 - Força cortante última ( $V_u$ ) e máxima abertura de fissuras ( $W_{max}$ ).**

Viga	CREF		CF1,5		CF3	
	$V_u$ (kN)	$W_{max}$ (mm)	$V_u$ (kN)	$W_{max}$ (mm)	$V_u$ (kN)	$W_{max}$ (mm)
1	22,14	6,066	18,76	2,799	19,79	3,451
2	15,41	2,639	18,91	2,366	21,39	5,129
3	19,92	2,650	14,59	0,140	25,86	6,319
Média	19,16	3,785	17,42	1,768	22,35	4,966

**Fonte: Autoria própria (2022).**

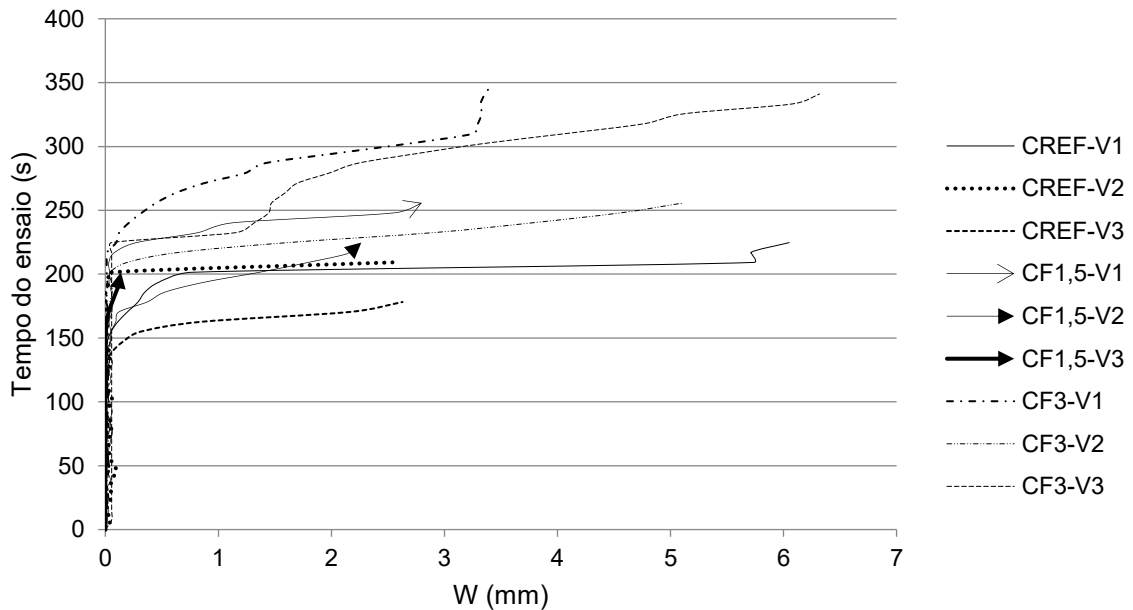


Figura 12 - Relação entre força cortante (V) e abertura de fissuras (W).



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 13 - Relação entre o tempo do ensaio e a abertura de fissura (W).



Fonte: Autoria própria (2022).

Verifica-se que, enquanto no concreto de referência as fissuras se abrem bruscamente com abertura média de 3,785 mm, nos concretos com fibras observa-se uma redução gradual na força cisalhante conforme o alargamento das trincas. Este comportamento é mais visível no CF3 devido ao aumento da força cortante,

que permitiu uma maior abertura nas fissuras durante a ruptura, com abertura média de 4,966 mm. Já no caso do CF1,5, verifica-se que as fibras atuaram de maneira efetiva no grampeamento das fissuras, uma vez que apresentaram abertura média de 1,768 mm na ruptura.

Além disso, é possível observar que o início do processo de fissuração ocorre com o tempo de ensaio semelhante para todas as vigas, sendo que nas vigas de CRF, a máxima abertura de fissuras e ruptura do elemento ocorrem com tempo superior ao concreto de referência. Isto significa que, mesmo para o CF1,5 que teve menor resistência ao cisalhamento, há uma maior resistência residual devido às fibras.

**Tabela 12 - Ângulos de inclinação das fissuras, em graus.**

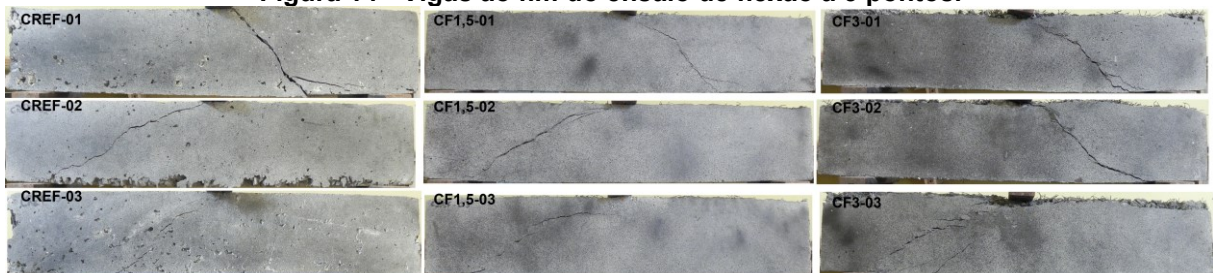
Viga	CREF	CF1,5	CF3
1	55,61	48,91	52,73
2	28,86	30,25	42,54
3	43,22	35,61	27,69
Média	42,56	38,26	40,99

Fonte: Autoria própria (2022).

Verificou-se que o aumento no teor de fibras não impactou na inclinação das fissuras, uma vez que as médias dos ângulos ficaram próximas à 40°, estando de acordo com os resultados encontrados por Silva (2021), que obteve uma média de 41° de inclinação para vigas com adição do mesmo tipo de fibra.

Entretanto, foi observado que, enquanto nas vigas de CREF as fissuras apresentaram formato retilíneo, as vigas de CRF assumiram uma característica de dupla curvatura, sendo acentuada conforme o aumento no teor de fibras, como pode ser visto na Figura 14.

**Figura 14 - Vigas ao fim do ensaio de flexão a 3 pontos.**



Fonte: Autoria própria (2022).

Além disso, uma viga de cada teor de fibra foi carregada até o colapso total a fim de observar se houve ruptura das fibras por tração ou arrancamento da matriz cimentícia, conforme Figura 15, constando-se o arrancamento do concreto. O que corrobora com a queda de resistência do CF1,5, que conforme explicado por Figueiredo (2011), deve-se à menor transferência de tensões uma vez que a interface fibra-matriz falha antes da tensão de ruptura da fibra.

**Figura 15 - Colapso das vigas de CRF.**



Fonte: Autoria própria (2022).

#### 4.5 Deflexão

Pelo GOM Correlate também foram medidas as flechas máximas das vigas na ruptura, conforme Tabela 13. Entretanto, conforme Rambo, Silva e Toledo Filho (2014), a deflexão na ruptura é atrelada ao módulo de elasticidade, não havendo diferença em comparação ao concreto de referência. Deste modo, não foi possível realizar a análise da deflexão das vigas.

**Tabela 13 - Máxima flecha das vigas (mm).**

Viga	CREF	CF1,5	CF3
1	7,996	2,692	5,71
2	2,576	5,046	5,076
3	3,476	0,289	8,016
Média	4,683	2,676	6,267

Fonte: Autoria própria (2022).

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas de um traço de concreto convencional sem fibras e outras duas composições com adição de fibras de polietileno de alta densidade (PEAD), com teores de 1,5% e 3,0% do volume total do concreto. Sendo assim, pode ser estabelecidas as seguintes conclusões:

- A presença das fibras comprometeu a trabalhabilidade do concreto de forma que a adição de aditivo superplastificante poderia levar à exsudação;
- A presença das fibras contribuiu para a resistência à compressão em 2,91% para o teor 1,5%, enquanto para o teor 3,0% houve um decréscimo de resistência de 16,58%;
- A presença das fibras reduziu a resistência à tração conforme aumentado o teor de fibras, sendo 1,37% e 33,34% para os traços CF1,5 e CF3, respectivamente, porém apresentaram um comportamento pós-fissuração;
- As vigas com 1,5% de fibras tiveram um decréscimo na resistência ao cisalhamento de 9,07%, enquanto foi verificado um acréscimo de resistência de 16,67% para vigas com 3,0% de fibras;
- As fibras atuaram como ponte de transferência de tensões, mas como não contribuíram para o aumento da resistência ao cisalhamento, não são indicadas para substituição total ou parcial da armadura transversal;
- Em geral, as estimativas para a força cortante última propostas na literatura apresentam resultados discrepantes para fibras de PEAD, necessitando de mais estudos de modelagem matemática para fibras poliméricas;
- As fibras foram efetivas no grampeamento de fissuras, com aberturas menos bruscas garantindo maior tempo até a ruptura do elemento.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho, o volume de fibras foi o parâmetro variado de maneira a observar o comportamento do CRF. Verificou-se um aumento de resistência para alto teor de fibra (3,0%), enquanto um decréscimo para teor moderado (1,5%). Assim, é interessante observar a variação de resistência ao cisalhamento para

teores com intervalos menores, de maneira a verificar o volume ótimo de fibras para acréscimo de resistência.

Além disso, devido à trabalhabilidade, é importante que seja estudada a dosagem adequada para emprego de teores de fibra elevados, assim como métodos de lançamento e adensamento do concreto de maneira a garantir uma distribuição mais uniforme das fibras pela matriz cimentícia.

Devido à discrepância na maioria das equações para estimativa da força cortante última, verifica-se a falta de estudos envolvendo modelagem matemática a fim de considerar a contribuição de fibras poliméricas para a resistência ao cisalhamento.

Por fim, ressalta-se que outros parâmetros ligados à resistência ao cisalhamento, como DMC dos agregados, altura efetiva da viga, taxa de armadura, relação  $a/d$  e fator de fibras não foram alterados neste trabalho. Desse modo, estudos futuros podem abordar variações nesses parâmetros a fim de verificar sua contribuição para a resistência em vigas de CRF com altos teores de fibra.

## REFERÊNCIAS

ADESINA, A. Performance of cementitious composites reinforced with chopped basalt fibres – An overview. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 266, part A, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120970>. Acesso em: 27 mar. 2022.

ALAGIRUSAMY, R.; DAS, A. Yarns: Production, processability and proprieties. *In*: FANGUEIRO, R. **Fibrous and composite materials for civil engineering applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.

ARAIN, M. F; et. al. Study on PVA fiber surface modification for strain-hardening cementitious composites (PVA-SHCC). **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 107-116, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.072>. Acesso em: 02 abr. 2022.

ARAÚJO, M. Types of fibrous textiles and structures. *In*: FANGUEIRO, R. **Fibrous and composite materials for civil engineering applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.

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

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

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 8522**: Concreto Endurecido – Determinação dos Módulos de Elasticidade e de Deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16886**: Concreto – Amostragem do concreto fresco. Rio de Janeiro: ANBT, 2021.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16915**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16935**: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16938: Concreto reforçado com fibras – Controle de qualidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16939: Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. **Bétons fibrés à ultra-hautes performances: Recommandations.** França: AFGC, 2013.

BABAIE, R.; ABOLFAZLI, M.; FAHIMIFAR, A. Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete. **Journal of the Mechanical Behavior of Materials**, vol. 28, no. 1, p. 119-134, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/jmbm-2019-0014>. Acesso em: 24 mar. 2022.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço.** 2009. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites.** New York: Taylor & Francis, 2007.

BORGES, A. P. S. N.; MOTTA, L. A. C.; PINTO, E. B. Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0679>. Acesso em: 22 mar. 2022.

CHENKUI, H.; GUOFAN, Z. Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, n. 3, p. 199-206, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00012-2](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00012-2). Acesso em: 29 abr. 2022.

CORSINI, R. Trinca ou fissura? **Téchne**, São Paulo, v. 160, p. 56-60, jul. 2010.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul.** 1988. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DIAS, R. P. **Análise dos Mecanismos de Transferência de Esforços de Cisalhamento em Peças de Concreto Armado Convencional e Reforçado com Fibras de Aço e PVA.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2019.

DIAS-DA-COSTA, D.; VALENÇA, J.; JÚLIO, E. Monitorização Estrutural até à Rotura Aplicando Técnicas de Pós-Processamento de Dados Obtidos por Fotogrametria. **Encontro Nacional Betão Estrutural**, 2010.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com fibras**. 2011. 256 f. Tese (Livre-Docência) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com fibras de aço**. Boletim Técnico, Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FISET, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D. Shear strengthening of concrete members with unbonded transverse reinforcement. **Engineering Structures**, v. 180, p. 40-49, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.008>. Acesso em: 28 abr. 2022.

GALI, S.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Improvements in fracture behavior and shear capacity of fiber reinforced normal and self consolidating concrete: A comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 205-217, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.194>. Acesso em: 30 abr. 2022.

GARCEZ, E. O. **Investigação do comportamento de Engineered Cementitious Composites reforçados com fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GEDEL PLÁSTICOS. **Polietileno de Alta Densidade (PEAD)**. Disponível em: <https://gedelplasticos.com.br/artigos/pead-polietileno-de-alta-densidade>. Acesso em: 31 out. 2022.

GOM CORRELATE. **Versão 2022 (Rev. 156191)**. Disponível em: [gom.com](http://gom.com). Acesso em: 05 nov. 2022.

HUBER, T.; HUBER, P.; KOLLEGGER, J. Influence of aggregate interlock on the shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups. **Engineering Structures**, v. 186, p. 26-42, mai. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.074>. Acesso em: 28 abr. 2022.

IGWE, E. A.; EKWULO, E. O.; OTTOS, C. G. Correlation of Tensile Strength of Split Cylinder Test and Double Punch Test of a Rubberized Asphalt Concrete Used in Flexible Pavement Design. **International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE)**, v. 2, n. 5, p. 8-15, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20431/2454-8693.0205002>. Acesso em: 20 nov. 2022.

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

JEN, G.; TRONO, W.; OSTERTAG, C. P. Self-consolidating hybrid fiber reinforced concrete: Development, properties and composite behavior. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 104, p. 67-71, fev. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.062>. Acesso em: 22 mar. 2022.

JOHN, V. J.; DHARMAR, B. Influence of basalt fibers on the mechanical behavior of concrete - A review. **Structural Concrete**, n. 22, p. 491-502, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/suco.201900086>. Acesso em: 23 mar. 2022.



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

KOBAYASHI, K.; CHO, R. Flexural characteristics of steel fibre and polyethylene fibre hybrid-reinforced concrete. **Composites**, v. 13, n. 2, p. 164-168, 1982. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0010-4361\(82\)90054-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(82)90054-4)>. Acesso em: 30 out. 2022.

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

LANTSOGHT, E. O. L. Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. **Materials**, v. 12, n. 6, p. 917, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12060917>. Acesso em: 28 abr. 2022.

LANTSOGHT, E. O. L. How do Steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete without stirrups? **Composites Part B: Engineering**, v. 175, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107079>. Acesso em: 28 abr. 2022.

LI, V. C. From micromechanics to structural engineering – The design of cementitious composites for civil engineering applications. **Japan Society of Civil Engineers**, n. 471, p. 1-12, jul. 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.2208/jscej.1993.471\\_1](https://doi.org/10.2208/jscej.1993.471_1). Acesso em: 29 abr. 2022.

LIMA, J. C. L. **Proposta para Cálculo da Tensão de Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado com Estribos**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Pará, 2019.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

MARCALIKOVA, Z. et al. Determination of Mechanical Characteristics for Fiber-Reinforced Concrete with Straight and Hooked Fibers. **Crystals**, v. 10, n. 6, p. 545, jun. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/cryst10060545>. Acesso em: 22 mar. 2022.

MM FIBRAS PARA CONCRETO. **Especificação técnica**. Disponível em: <https://mmfibras.com.br/tipos-de-fibra>. Acesso em: 31 out. 2022.

MORAIS, R. S. **Patologias geradas por erros de execução de estruturas de concreto armado: causas, medidas preventivas e consequências**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia da Construção Civil) – Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, 2017.

NAAMAN, A. E. **High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Classification and Applications**. In: CBM-CI International Workshop. Karachi, Pakistan, p. 389-401, 2009. Disponível em:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.615.3856>. Acesso em: 21 mar. 2022.

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

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

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. ampl. São Paulo: Blucher, 2018.

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

PANSSONATO, R. S. P. **Controle tecnológico do concreto reforçado com fibras de PET pelo ensaio Barcelona**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2019.

PEREIRA, E. V. **Influência de fibras de aço no comportamento mecânico e nos mecanismos de fissuração de concretos autoadensáveis**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PERUZZI, A, P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland Modificada com látex e adição de sílica ativa**. 2002. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de São Carlos, São Carlos, 2002.

RAMBO, D. A. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of steel fiber hybridization on the fracture behavior of self-consolidating concretes. **Cement and Concrete Composites**. Elsevier, v. 54, p. 100-109, nov. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.004>. Acesso em: 21 mar. 2022.

RANDL, N. Design Recommendations for Interface Shear Transfer in Fib Model Code 2010. **Structural Concrete**, v. 14, n. 3, p. 230-241, set. 2013. Crossref, doi:10.1002/suco.201300003.

RAOUFI, K.; WEISS, J. The role of fiber reinforcement in mitigating shrinkage cracks in concrete. *In*: FANGUEIRO, R. **Fibrous and composite materials for civil engineering applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.

RESENDE, T. L.; CARDOSO, D. C. T.; SHEHATA, L. C. D. Uso da técnica de correlação de imagem digital (CID) para análise das contribuições de diferentes mecanismos na resistência à força cortante de vigas de concreto. *In*: 61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 2019, Fortaleza. **Anais [...]** IBRACON, 2019. p. 1-15. ISSN 2175-8182.

RESENDE, T. L.; CARDOSO, D. C. T.; SHEHATA, L. C. D. Influence of steel fibers on the dowel action of RC beams without stirrups. **Engineering Structures**, v. 221, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111044>. Acesso em: 30 abr. 2022.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. RILEM TC 162 - TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 36, p. 560-563, 2003.

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, p. 119-137, fev. 2011. Disponível em: doi:10.1680/mac9.00191. Acesso em: 28 Abr. 2022.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SAVARIS, G. **Resistência ao Cisalhamento do Concreto Autoadensável**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

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

SHERIF, M. et al. Design guidelines and optimization of UHP-FRC blast walls for different scaled distances. **International Journal of Protective Structures**, p. 1-21, 2020. DOI: 10.1177/2041419620912751

SILVA, I. E. **Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e macrofibras sintéticas**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2021.

SINGH, H. **Steel Fiber Reinforced Concrete: Behavior, Modelling and Design**. Cingapura: Springer, 2017.

SLOBBE, A. T.; HENDRIKS, 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, p. 108-124, mar. 2012. ISSN 0168-874X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2011.09.002>. Acesso em: 28 abr. 2022.

SOUZA, D. A. et al. Aplicação do ensaio de dupla punção na análise do comportamento estrutural de concreto fluído reforçado com fibras. **59º Congresso Brasileiro do Concreto**. Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.

TEZUKA, Y. **Concreto Armado com fibras**. ABCP. São Paulo, 1989. 24p.

TURETTA, K. V. et al. Utilização de resíduos de construção para produção de concreto. *In: XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. 2021, Guarapuava. **Anais [...]** Curitiba: UTFPR, 2021. p. 1-6. ISSN: 2179-331X.

VAN MIER, J. G. M. **Concrete Fracture: A Multiscale Approach**. 1ª. ed. London: Taylor & Fancis Group, 2013. 315 p.

VECCHIO, F. J.; COLLINS, M. P. The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subject to Shear. **ACI Journal**, v. 83, p. 219-231, mar-abr. 1986.

WALRAVEN, J. C.; REINHARDT, H. W. Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading. **HERON**, v. 26, n. 1A, p. 1-68, 1981.

XU, H. et al. Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 261, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120610>. Acesso em: 22 mar. 2022.

ZHOU, H. et. al. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. **Materials**, v. 13, n. 6, p. 1362, 2020. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma13061362>. Acesso em: 23 mar. 2022.

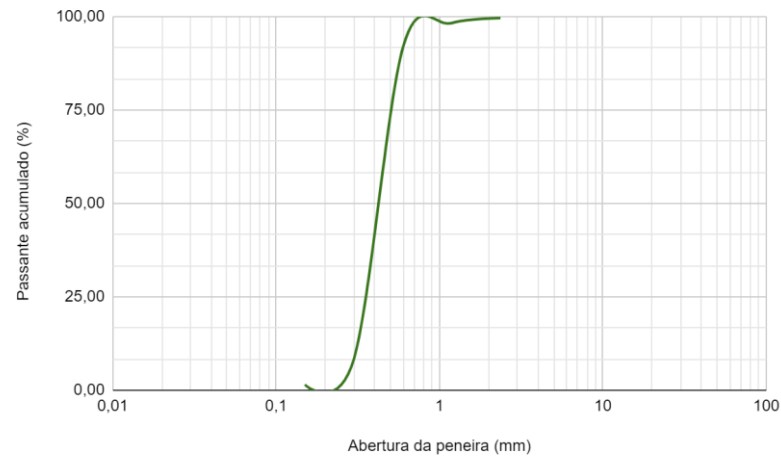
## APÊNDICE A - Caracterização dos agregados

**Tabela A.1 - Granulometria: retido acumulado (%).**

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>
19,1	0	1,1
12,5	0	55,41
9,5	0	87,58
6,3	0	98,74
4,75	0,01	99,51
2,36	0,35	99,51
1,18	1,72	99,51
0,6	7,94	99,51
0,3	91,54	99,51
0,15	98,52	99,51
Fundo	100	100

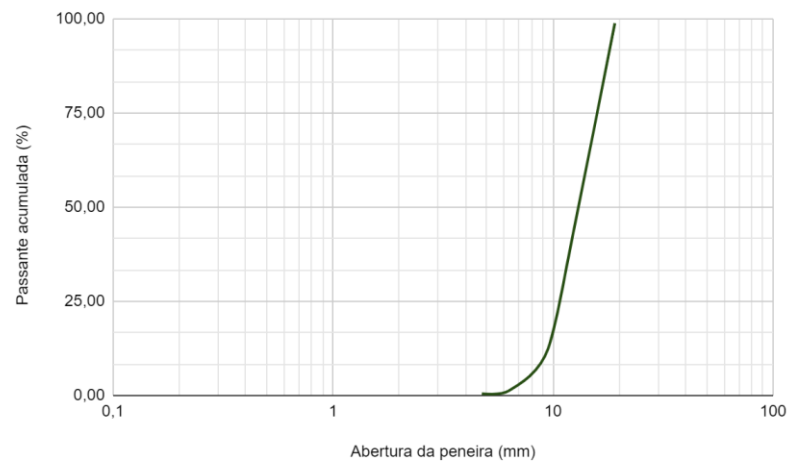
**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Figura A.1 - Curva granulométrica da areia.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Figura A.2 - Curva granulométrica da brita.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**