

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI – COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

AMANDA DONATO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM PEÇAS DE
CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRAS DE POLIETILENO**

TOLEDO

2022

AMANDA DONATO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM PEÇAS DE
CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRAS DE POLIETILENO**

Evaluation of shear strength of polyethylene macrofibers reinforced concrete

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: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2022



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.

AMANDA DONATO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM PEÇAS DE
CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRAS DE POLIETILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25 de Novembro de 2022

Gustavo Savaris
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

Fernando Nunes Cavalheiro
Mestre em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

TOLEDO

2022

Aos que estiveram ao meu lado nesta incrível
jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por possibilitar que meus objetivos fossem alcançados e por permitir minha existência junto a pessoas maravilhosas.

Aos meus pais, Nivaldo e Adélia, por serem meus exemplos de perseverança, pela vida, apoio, conselhos, paciência, compreensão, incentivo e, principalmente, por nunca terem medido esforços para nos proporcionarem o melhor. Aos meus irmãos, Leonardo e Gabriela, por me distraírem nos momentos estressantes e pelo companheirismo. Aos meus avós por serem fonte inesgotável de amor e cuidado. Ao meu tio, Claudinei, por ser meu exemplo dentro da Engenharia. Família, sem o apoio de vocês a caminhada seria mais difícil, amo vocês ao infinito e além.

Ao Miguel pelo companheirismo, paciência, ensinamentos, apoio, auxílios e por sempre acreditar em mim quando eu mesma não acreditava. Obrigada por tanto, meu amor.

Aos amigos que fiz nestes anos, principalmente à Flávia, pelos conselhos e acolhimentos em sua casa, à Laryssa por sempre me receber em sua casa, pelos cafés e risadas, e ao Rafael pelo companheirismo, por me auxiliar nos loucos dias de laboratório e de desespero. Aos meus amigos fora da universidade pelos encontros regados a tererê, pipoca e muita conversa, proporcionando momentos memoráveis.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Gustavo Savaris, por conduzir este trabalho com sabedoria e paciência, estando sempre disposto a sanar minhas dúvidas, por mais simples que fosse, além de nunca medir esforços e dedicação para nos guiar durante a trajetória acadêmica.

Agradeço também ao Prof. Dr. Carlos Balestra por nos ensinar com tanto amor e alegria, transmitindo com maestria os conhecimentos e por fazer nascer em mim o amor pela pesquisa. Ainda, aos outros professores que passaram pela minha vida, muito obrigada por ajudarem a moldar o meu ser.

À UTFPR por ser minha segunda casa nestes últimos anos, me proporcionar um ensino de qualidade e fazer de mim uma grande profissional.

Não importa o que aconteça, continue a nadar.
(WALTERS, GRAHAM; **PROCURANDO NEMO**,
2003).

RESUMO

Devido à sua fácil fabricação e ao seu manuseio simples, o concreto convencional é o material mais empregado na construção civil, mas a sua baixa resistência ao cisalhamento torna-o frágil, o que resulta em ruptura brusca. Como alternativa para amenizar o problema apresentado, macro e microfibras podem ser incorporadas à matriz do concreto, incrementando as suas propriedades mecânicas e sua ductilidade, além de auxiliar na contenção das fissuras. O presente estudo teve por objetivo quantificar a resistência ao cisalhamento de elementos em concreto armado, analisar os efeitos da adição de fibras de polietileno no concreto e verificar seu comportamento pós-fissuração. Para tanto, foram produzidos três traços de concreto, sendo nomeados como CC0 para o traço com 0% de fibras, CRF1,5 para o traço com 1,5% de adição e CRF3 para o traço com 3,0%. Para avaliação das características mecânicas do CRF foram moldados corpos de prova prismáticos do modelo *push-off*, com e sem estribos para ensaios de cisalhamento direto e corpos de prova cilíndricos para os ensaios de compressão, tração e módulo de elasticidade. Para analisar a abertura de fissuras e o comportamento pós-fissuração foi utilizado o método de correlação de imagens digitais. Após a realização do programa experimental foi possível observar que a incorporação de fibras poliméricas em altos teores afetou significativamente a trabalhabilidade do concreto de modo que o traço com 3,0% de adição de fibras, com aditivo, apresentou abatimento de tronco de cone de 0 mm. Ainda, quanto à resistência ao cisalhamento o traço com 1,5% de adição de fibras apresentou um decréscimo de 9,31% em comparação ao traço CC0 sem estribo, já o traço com 3,0% de adição apresentou um decréscimo de 6,34% em relação ao traço CC0 sem estribo, no entanto quanto ao controle de abertura de fissuras o traço CRF3 apresentou melhores resultados, além de não apresentar ruptura brusca. Quanto ao processo de fissuração dos elementos observou-se a efetividade das fibras, visto que o concreto convencional apresentou aberturas de 7,52 mm, 2,976 mm para o CRF1,5 e 13,506 mm para o CRF3. Assim, é possível concluir que a adição de altos teores de fibras de polietileno não contribui efetivamente para o aumento da resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade e quanto ao cisalhamento, no entanto as fibras garantem um bom comportamento pós-fissuração.

Palavras-chave: Cisalhamento; CID; Fibras; *Push-off*.

ABSTRACT

Due to its easy manufacture and simple handling, conventional concrete is the most used material in civil construction, but its low shear strength makes it brittle, which results in sudden rupture. As an alternative to alleviate the problem presented, macro and microfibers can be incorporated into the concrete matrix, increasing its mechanical properties and ductility, as well as helping to contain cracks. This study aimed to quantify the shear strength of elements in reinforced concrete, analyze the effects of adding polyethylene fibers to concrete and verify its post-cracking behavior. For this purpose, three concrete mixes were produced, being named CC0 for the mix with 0% of fibers, CRF1.5 for the mix with 1,5% of addition and CRF3 for the mix with 3,0%. To evaluate the mechanical characteristics of the CRF, prismatic specimens of the push-off model were molded, with and without stirrups for direct shear tests and cylindrical specimens for compression, traction and modulus of elasticity tests. To analyze crack opening and post-cracking behavior, the digital image correlation method was used. After carrying out the experimental program, it was possible to observe that the incorporation of polymeric fibers in high levels significantly affected the workability of the concrete, so that the mix with 3,0% of fiber addition, with additive, presented a slump of cone of 0 mm. Still, regarding shear strength, the mix with 1,5% fiber addition showed a decrease of 9,31% compared to the CC0 mix without stirrup, while the mix with 3,0% addition showed a decrease of 6,34% in relation to the CC0 trait without stirrup, however regarding the crack opening control, the CRF3 trait showed better results, in addition to not presenting sudden rupture. As for the cracking process of the elements, the effectiveness of the fibers was observed, since the conventional concrete presented openings of 7,520 mm, 2,976 mm for the CRF1,5 and 13,506 mm for the CRF3. Thus, it is possible to conclude that the addition of high levels of polyethylene fibers does not effectively contribute to the increase in compressive and tensile strength, elastic modulus and shear strength, however the fibers ensure good post-cracking behavior.

Keywords: Shear; DIC; Fibers; Push-off.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Teoria Atrito-Cisalhamento	26
Figura 2: Efeito de pino: deslocamento vertical e comprimento.	28
Figura 3: Plano de fissuração	29
Figura 4: Esquematização do ensaio do tipo <i>Push-off</i>	31
Figura 5: Concentração de tensões em concretos sem adição de fibras.	32
Figura 6: Concentração de tensões em concretos com adição de fibras.	32
Figura 7: Diagrama tensão-deformação para CC e CRF e seu comportamento à tração	33
Figura 8: Distribuição das tensões durante e após a fissuração.....	34
Figura 9: Esquema do deslocamento da linha neutra devido a distribuição de tensões.....	35
Figura 10: Amostra e equipamentos posicionados para realização do ensaio <i>push-off</i>	36
Figura 11: Exemplos de padrões gerados por diferentes meios.	37
Figura 12: Macrofibra estrutural sintética de polietileno da MM fibras®	39
Figura 13: Dimensões do corpo de prova utilizados para o ensaio <i>Push-off</i>	41
Figura 14: Esquematização da armação utilizada no ensaio <i>Push-off</i>	41
Figura 15: Corpo de prova posicionado para permanecer em cura úmida.....	44
Figura 16: Processo de preparação dos corpos de prova para utilização do método CID	45
Figura 17: Equipamentos posicionados para monitoramento do ensaio	46
Figura 18: Verificação da qualidade do padrão	47
Figura 19: Da esquerda para direita - <i>Slump test</i> CC0, CRF1,5 e CRF3	49
Figura 20: Tensões residuais do CRF3	51
Figura 21: Corpos de prova após ensaio Barcelona, da esquerda para a direita- CC0, CRF1,5 e CRF3	52
Figura 22: Resistências médias à compressão e tração	53
Figura 23: Módulo de elasticidade dos exemplares.....	54
Figura 24: Deslocamento vertical dos corpos de prova CC0 com e sem estribo	55
Figura 25: Tensões de cisalhamento média aos 28 dias (MPa)	56
Figura 26: Deslocamento vertical dos corpos de prova dos traços CRF1,5 e CRF3.....	56
Figura 27: Disposição de pontos sobre a face do elemento	57
Figura 28: Abertura de fissuras para o traço CC0.....	58
Figura 29: Abertura de fissuras para o traço CRF1,5.....	58
Figura 30: Abertura de fissuras para o traço CRF3.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de fibras e suas propriedades.....	21
Tabela 2: Equações apresentadas na literatura para estimativa da resistência ao cisalhamento por atrito.....	27
Tabela 3: Normas para caracterização de agregados	39
Tabela 4: Propriedades físicas e mecânicas do monofilamento de polietileno.....	39
Tabela 5: Quantidade de materiais para produção de 1 m ³ de concreto	40
Tabela 6: Resultado da caracterização dos agregados	48
Tabela 7: Propriedades do concreto no estado fresco	49
Tabela 8: Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa)	50
Tabela 9: Resistência à tração aos 28 dias (MPa)	50
Tabela 10: Resistências residuais do traço CRF3.....	51
Tabela 11: Módulo de elasticidade (GPa).....	52
Tabela 12: Resistência ao cisalhamento aos 28 dias (MPa).....	54
Tabela 13: Relação entre tensão última cisalhante e abertura máxima de fissuras	57
Tabela 14: Tensões de cisalhamento normalizadas	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CC	Concreto Convencional
CID	Correlação de imagens digitais
CRF	Concreto reforçado com fibras
CRF-PE	Concreto reforçado com fibras de Polietileno
DMC	Diâmetro máximo característico
GPa	Gigapascal
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
SHCC	Strain Hardening Cementitious Composites
UHPC	Concreto de ultra alto desempenho
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ZTI	Zona de Transição da Interface

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
A_{sw}	Área de armadura transversal
b_w	Largura da alma
c	Coesão
Δ	Deslocamento
δ_p	Deslocamento vertical
f_c	Resistência à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{cm}	Resistência média do concreto à compressão
$f_{cm,k}$	Resistência característica média à compressão
f_t	Resistência à tração
f_{tk}	Resistência característica do concreto à tração
f_{tm}	Resistência média do concreto à tração
$f_{tm,k}$	Resistência característica média à tração
f_y	Tensão de escoamento da armadura transversal
$f_{yw,k}$	Resistência ao escoamento do aço da armadura transversal
\varnothing	Ângulo de atrito interno
Mm	Milímetros
μ	Coefficiente de atrito
μm	Micrômetros
P_f	Carga de punção
ρ_v	Taxa de armadura
ρ_{sw}	Taxa de armadura transversal
ρ_w	Taxa de armadura geométrica
σ_n	Tensões externas
T_u	Força de tração última na armadura
$T_{méd}$	Tensão de cisalhamento média
T_u	Tensão de cisalhamento última
T_n	Tensão de cisalhamento normalizada
V	Força cortante
V_u	Força cortante horizontal última
W	Abertura da fissura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivo geral.....	18
1.3	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Concreto reforçado com fibras (CRF)	20
2.1.1	Adesão Fibra-Matriz	23
2.1.2	Macrofibras de Polietileno	24
2.2	Cisalhamento	24
2.2.1	Teoria Atrito-Cisalhamento.....	26
2.2.2	Efeito de Pino	28
2.2.3	Engrenamento dos Agregados	29
2.3	Ensaio de cisalhamento direto.....	30
2.4	Comportamento pós-fissuração	31
2.5	Correlação de imagens digitais (CID)	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Materiais utilizados	38
3.1.1	Aglomerante	38
3.1.2	Agregados	38
3.1.3	Fibras	39
3.1.4	Aditivos.....	40
3.2	Dosagem do concreto.....	40
3.3	Especificações dos corpos de prova	40
3.4	Produção dos traços de concreto.....	43
3.5	Ensaio de resistência.....	44
3.6	Monitoramento dos ensaios	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Caracterização dos agregados.....	48
4.2	Caracterização do concreto	48
4.2.1	Propriedades do concreto no estado fresco	48
4.2.2	Propriedades do concreto no estado endurecido	50
4.3	Resistência ao cisalhamento	54
4.4	Abertura de fissuras e deslocamentos.....	57

4.4.1	Tensões de cisalhamento normalizadas	59
5	CONCLUSÕES	61
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICE A – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS	69

1 INTRODUÇÃO

A construção civil e o setor imobiliário são atividades econômicas de destaque, consideradas como um propulsor para o desenvolvimento da economia federal. Entretanto, a realização de obras urbanas da maneira convencional é igualmente expressiva no que diz respeito à degradação do meio-ambiente. O espaço para a execução das construções geralmente carrega várias práticas inadequadas e prejudiciais à natureza, tais como o desperdício de materiais, um controle de qualidade insatisfatório e o descarte indevido de resíduos, que são poluentes ou que estimulam a extração excessiva de matéria-prima.

Como alternativa de custo módico para frear parte desses problemas, existe a possibilidade de adicionar fibras ao concreto convencional, tornando-o mais eficaz e estimulando uma administração saudável dos recursos disponíveis. O desenvolvimento da engenharia civil permitiu o conhecimento sobre diversos materiais e metodologias de construção eficazes, mas que são frequentemente obscurecidos pelo emprego dos tradicionais concreto e aço (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Quanto ao concreto convencional (CC), estima-se que sejam consumidos aproximadamente 1,9 tonelada por habitante, tornando-o o segundo material mais consumido no mundo (PEDROSO, 2009). Sua popularidade se deve a simplicidade de sua composição, fabricação e manuseio, bem como a sua elevada resistência à compressão e a possibilidade de emprego em ambientes agressivos. Porém, esse material apresenta características desfavoráveis, como a tendência para rupturas bruscas quando solicitado por tensões de tração. Com relação a isso, a adição de macro e microfibras ao concreto resulta em um composto heterogêneo de alto desempenho, reforçado por filamentos, capaz de substituir as armaduras convencionais até mesmo em sua totalidade, além de conferir ao concreto características mecânicas superiores (PEREIRA, 2017).

A adição de fibras favorece as propriedades mecânicas do material, além de resultar na redução do surgimento de fissuras e afins. Conforme Figueiredo (2011), observa-se que nos últimos anos houve um aumento gradativo no uso desse material em pré-moldados, pisos, revestimentos de túneis, tubos de concreto para águas pluviais e esgoto sanitário, entre outros. Esta ampla utilização do concreto

reforçado com fibras (CRF) deve-se à harmonia existente entre fibra-matriz, as quais possuem boa aderência evitando o arrancamento da fibra.

Diversos tipos de fibras são utilizados na construção civil, podendo ser classificadas quanto sua natureza em naturais ou sintéticas, quanto à sua dimensão, em macro ou microfibras, e quanto seu módulo de elasticidade. As macrofibras são de modo geral utilizadas como elementos de reforço, já as microfibras são utilizadas como reforço de matriz.

As macrofibras de polietileno, objeto desse estudo, trabalham em harmonia com o concreto, pois há uma excelente compatibilidade mecânica, física e química entre esses materiais (RODRIGUES; MONTARDO; 2002), possuem alta resistência a tração e alto módulo de elasticidade. Ademais, o polietileno (PE) é quimicamente inerte, ou seja, não reage ao entrar em contato com outros materiais, tal característica se dá devido à sua natureza parafínica, seu alto peso molecular e estrutura parcialmente cristalina (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA; 2003).

Atualmente utilizam-se fibras em estudos quanto a compósitos do tipo *Strain Hardening Cementitious Composites* (SHCC) e em concretos de ultra alto desempenho (UHPC), contudo, apesar do aumento gradativo no emprego de fibras nas últimas décadas, ainda há uma carência de estudos minuciosos sobre os efeitos dessas adições em peças de concreto armado. As normas de dimensionamento de estruturas de concreto atuais não possuem uma seção específica que leve em consideração a influência das fibras nos cálculos de tensões, sendo omissas quando o assunto é CRF (PEREIRA, 2017).

A falta de padronização ocorre também quando o assunto é resistência ao cisalhamento em CC, desta forma, inúmeros trabalhos são desenvolvidos visando uma melhor compreensão deste fenômeno apresentando novas formulações e metodologias.

Outro ponto importante quando se trata de CC e CRF é a dificuldade de mensurar e avaliar os efeitos do pós-fissuração. Medições realizadas por meio de extensômetros são as mais utilizadas, no entanto a dificuldade de determinação da região de falha por tração torna os resultados difíceis de serem analisados. Assim, o emprego de novas tecnologias para instrumentação de ensaios, como a correlação de imagens digitais (CID), que utiliza imagens obtidas com uma frequência pré-estabelecida, fornecendo dados mais precisos sobre a formação de fissuras no concreto.

Desse modo, o presente trabalho busca avaliar a resistência e transferência de tensões cisalhantes e o comportamento pós-fissuração em peças em concreto com adição de fibras de polietileno com teores de 0,0%, 1,5% e 3,0%. Ainda, para avaliar a resistência ao cisalhamento será utilizada a metodologia *push-off* e, para avaliação dos efeitos pós-fissuração, será utilizada o método de correlação de imagens digitais.

1.1 Justificativa

A lamelaridade dos agregados que compõem o concreto prejudica a coesão dos elementos, enfraquecendo a zona de transição da interface (ZTI), tornando o elemento frágil principalmente quando solicitado à esforços de tração. Tais fragilidades podem ser contornadas quando são adicionadas fibras a matriz do concreto. Devido as suas pequenas dimensões e boas características mecânicas, a incorporação de fibras a matriz do concreto mostra-se promissora na redução do enfraquecimento apresentado na ZTI.

O CRF é muito utilizado internacionalmente, de tal forma que existem várias normativas e estudos acerca do assunto. Contudo, a utilização desse compósito no Brasil ainda é baixa, centralizado em aplicações com baixos teores de fibra (FIGUEIREDO, 2011), havendo poucas e recentes normas nacionais.

Em 2021 foram publicadas as normas NBR 16935, 16938, 16939, 16940, 16941 e 16942, proporcionando um melhor entendimento quanto ao comportamento do CRF, além de promover o controle de qualidade deste material. No entanto, tais normativas ainda são vagas quanto a especificidades do CRF, além disso, há uma carência de estudos quanto a relação entre os materiais do compósito, quais as restrições apresentadas pelas fibras e quanto ao uso desses filamentos para fins estruturais.

Sabe-se que as macrofibras são amplamente utilizadas para reforço estrutural e as microfibras são mais utilizadas para conter a fissuração do concreto, além disso, a utilização de filamentos poliméricos favorecem a obtenção de elementos compósitos com características marcantes e diferentes de outros materiais convencionais, como baixo peso específico do elemento, resistência à corrosão e ao ataque de microrganismos e maior resistência mecânica. Todavia, o

uso de fibras ainda não é comum o bastante no Brasil para engajar pesquisas sobre essa tecnologia, não havendo muita clareza ou reconhecimento sobre o seu potencial para o melhoramento das propriedades mecânicas do concreto e das suas resistências.

Ademais, quanto a determinação de resistência ao cisalhamento, as normas existentes quantificam esse valor por meio de formulações empíricas, ainda, estas normativas não consideram fatores como o engrenamento de agregados, modo de carregamento e taxa de armadura (LIMA, 2019).

Quanto ao monitoramento de peças concreto armado quando submetidos à esforços, observa-se que o CID tem se mostrado promissor devido à facilidade de sua aplicação e precisão, superando os dispositivos convencionais. Para a aplicação desse método é necessário à utilização de aparelhos para a realização das fotografias como um tripé, uma câmera digital e um *software* que posso ler e interpretar as imagens. A utilização do método CID propicia o monitoramento da estrutura momento a momento devido à frequência com que as imagens são obtidas, assim fornecendo com precisão os dados do elemento após o início da fissuração.

1.2 Objetivo geral

Avaliar o efeito de adições de fibras de polietileno (PE) ao concreto na resistência ao cisalhamento direto.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar o modo de ruptura e quantificar a resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras por meio de ensaios *push-off*;
- Avaliar a influência de diferentes teores de fibras nas propriedades do concreto no estado fresco;
- Analisar por meio do método de correlação de imagens digitais o processo de fissuração;

- Comparar as resistências ao cisalhamento dos concretos com adição de fibras com estruturas que apresentem armadura transversal mínima estabelecida pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Embora o termo “compósito” esteja relacionado a tecnologias de ponta, desenvolvidos primordialmente para uso militar, tem-se que o emprego desses materiais é mais antigo, datado da antiga Mesopotâmia, onde foram incorporadas fibras vegetais em tijolos de barro a fim de contornar a fragilidade desses elementos (KAEFER, 1998). Da era da Mesopotâmia aos dias atuais inúmeros materiais compósitos foram desenvolvidos, os quais podemos citar tijolos reforçados com palha, argamassa com adição de gordura animal, leite e sangue, concreto armado, concreto reforçado com fibras (CRF), entre outros.

Compósitos são materiais fabricados por dois ou mais constituintes, em um nível macroscópico, com composições, estruturas e propriedades distintas, sendo que esses materiais combinam-se conferindo ligação e resistência (matriz e reforço, respectivamente), além disso, verifica-se que a matriz desses materiais pode ser sintética ou natural (NETO; PARDINI, 2016).

Conforme Budinski (1992), compósitos considerados de maior importância são aqueles que possuem como combinação materiais cerâmicos e polímeros. Para a ciência dos materiais, os elementos compostos por cimento Portland são considerados cerâmicos, visto que esses apresentam fragilidade, alta rigidez e tendência a fissuração devido à secagem. Ainda, conforme Neto e Pardini (2016), os filamentos utilizados como reforço em compósitos podem se apresentar na forma de fibras contínuas, picadas ou em partículas.

2.1 Concreto reforçado com fibras (CRF)

A fragilidade do concreto ocorre devido ao grande volume de vazios. Tal volume proporciona uma baixa resistência da zona de transição na interface do concreto ocasionando a presença de fissuras e microfissuras conforme o aumento do carregamento na peça estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O concreto por si só não possui capacidade de interromper a propagação das fissuras, assim havendo a necessidade de buscar meios que possam suprir essa insuficiência.

Nesse contexto, surge o concreto reforçado com fibras (CRF), o qual passou a ser mais utilizado a partir da década de 1960. Desde então, diversas melhorias vêm sendo alcançadas nesta área devido ao conhecimento obtido quanto a interface

fibra-concreto. Após três décadas do início massivo do uso de CRFs, inúmeros tipos de compósitos com fibras estavam disponíveis no mercado (LEE; BARR, 2003). As fibras podem ser consideradas como agregados lamelares, posto que o seu comprimento é muito maior que seu diâmetro.

Ademais, esses materiais podem ser classificados como macro ou microfibras, quanto ao seu módulo de elasticidade, conforme o seu diâmetro e como naturais, artificiais ou sintéticas (NASCIMENTO, 2015), conforme apresentado na Tabela 1. Além disso, as fibras variam consideravelmente com relação à sua propriedade, efetividade e custo (BENTUR; MINDESS, 2007).

Tabela 1: Tipos de fibras e suas propriedades.

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Amianto					
Crocidolita	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2,0-3,0
Crisólito	0,02-0,4	2,6	164	3,1	2,0-3,0
Polipropileno	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Aramida (Kevlar)	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Carbono	8-9	1,6-1,7	230-280	2,5-4,0	0,5-1,5
Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Poliétileno	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
Fibra de madeira	-	1,5	71,0	0,9	-
Sisal	10-50	1,5	-	0,8	3,0
Matriz do cimento (para comparação)	-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

Fonte: Bentur e Mindess (2007).

Com relação a sua classificação quanto às dimensões, consideram-se macrofibras aquelas que possuem diâmetro maior que 0,3 mm e comprimento de 30 a 60 mm e as microfibras são aquelas que apresentam diâmetro entre 10 e 30 μm e comprimento entre 3 e 18 mm (SALVADOR, 2012). Ainda, podem ser consideradas macrofibras aquelas que são utilizadas como elemento de reforço e as microfibras aquelas que se configuram como componente de matriz.

Sabe-se também que além das características mecânicas e suas dimensões, a orientação das fibras também influencia na qualidade do compósito. Quando orientadas em relação ao plano de ruptura, as fibras possuem grande habilidade de transferência de cargas (SOUZA *et al*, 2017).

As fibras, quando isoladas, resistem bem aos esforços de tração, contudo, quando solicitadas a compressão, torção e flexão, colapsam rapidamente devido à sua esbeltes. Assim, estas apresentam função estrutural quando aglutinadas e estabilizadas com o auxílio de alguma matriz (NETO; PARDINI, 2016). A adição desse material a matriz cimentícia proporciona maior resistência e ductilidade. Além do mais, conforme estudo de Ghanbarpour *et al.* (2010), as fibras agem efetivamente na prevenção da propagação de fissuras, visto a sua capacidade de absorção de energia.

Ainda, segundo Mehta e Monteiro (2008), a fração de adição e o tipo de fibras gera efeitos significativos na resistência do CRF. Ademais, conforme Lucena (2017), além da classificação quanto ao tipo, é possível classificar o CRF quanto ao teor da adição, sendo elas:

- Baixa fração volumétrica (<1%): Utilizado quando se deseja reduzir a fissuração decorrido da retração;
- Moderada fração volumétrica (entre 1 e 2%): Utilizado quando se deseja aumento em propriedades como módulo de ruptura, tenacidade e resistência ao impacto;
- Alta fração volumétrica (>2%): Nesta fração há um endurecimento por deformação do compósito, assim, devido ao melhoramento do seu desempenho, esses compósitos são considerados como de alto desempenho.

No contexto da construção civil, verifica-se uma maior utilização de filamentos de origem sintética, como fibras de carbono, polipropileno, vidro e aço, devido às suas elevadas propriedades mecânicas. No entanto, apesar de suas baixas propriedades mecânicas, estudos como os de Magalhães (2009), Auersvaldt, Lay e Miranda (2019) e de Xu *et al.* (2020) trazem resultados promissores quanto à substituição de fibras sintéticas por naturais.

Entre os modelos mais utilizados, as fibras de aço fornecem ao concreto aumento da resistência à tração e da tenacidade, impactando positivamente na redução da taxa de armadura do elemento (XU *et al*, 2020). Em contrapartida, as

fibras de polipropileno são mais utilizadas para a manutenção da resistência residual pós-fissuração (SOUZA, 2021).

2.1.1 Adesão Fibra-Matriz

O bom desempenho de um elemento reforçado com fibras depende principalmente da boa adesão entre a fibra e a matriz. A matriz cimentícia na proximidade das fibras é mais porosa do que o restante da matriz, isso ocorre devido a diferença entre o diâmetro das partículas de cimento e das fibras (BENTUR; MINDESS, 2007).

A interação fibra-matriz também depende da adesão, do atrito e da ancoragem mecânica. Assim, tem-se que o comprimento de ancoragem, o aspecto da fibra e sua orientação quanto ao carregamento aplicado têm grande influência na adesão à matriz (SINGH, 2016). Desse modo, para garantir uma boa aderência é necessário aumentar a rugosidade da fibra, torcer a fibra ao longo de seu comprimento ou criar zonas de ancoragem para obter amarração mecânica nas extremidades (MOREIRA, 2018).

Sabe-se que a zona de transição interfacial (ZTI) possui uma microestrutura completamente diferente da matriz do compósito. Conforme Bentur e Mindess (2007) a lamelaridade da fibra proporciona a formação de uma lâmina de água nas partículas secas da ZTI, gerando uma camada porosa formada por cristais de C-S-H e etringita. Desse modo pode-se inferir que a interface fibra-matriz possa não ser a região mais fraca da ligação, mas sim a zona rica em C-S-H (PEREIRA, 2017). Bentur e Mindess (2007) sugerem que pode haver um melhoramento na adesão fibra-matriz quando se é feita uma boa dosagem da matriz, sendo ela bem graduada, com fíler, finos grãos de cimento e fibras de pequena seção transversal.

Ainda, Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que é imprescindível que exista equilíbrio entre a matriz e a resistência da fibra, uma vez que se tenha uma fraca adesão entre fibra e matriz, os filamentos podem deslizar mesmo em baixos níveis de carregamento, não contribuindo com a transferência das tensões. Em contrapartida, caso a adesão seja muito forte, as fibras podem fraturar antes de possibilitarem a dissipação da energia, desse modo salienta-se a importância de buscar a boa dosagem dos elementos a fim de garantir os resultados esperados.

2.1.2 Macrofibras de Polietileno

O polietileno é, atualmente, um dos plásticos mais vendidos e reciclados no mundo devido à sua versatilidade, facilidade de processamento, seu preço reduzido e por ser o único polímero termoplástico não tóxico (CANDIAN, 2007). O polietileno é obtido a partir da polimerização do monômero gasoso etileno.

O polietileno pode ser subdividido em polietileno de baixa densidade, polietileno linear de baixa densidade, polietileno de média densidade e polietileno de alta densidade. O polietileno de alta densidade (PEAD) é polimerizado em baixa pressão e sua fusão ocorre a uma temperatura elevada devido sua cristalinidade, dessa forma, o empacotamento e alinhamento das cadeias de polímeros são mais eficientes elevando a intensidade de ação das forças intermoleculares (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). Entre as propriedades mais expressivas do polietileno podemos citar as altas resistências químicas, mecânica e ao *stress cracking*, ainda, observa-se elevadas características de fluência, rigidez, abrasão e impacto (CANDIAN, 2007).

Atualmente houve um aumento considerável na utilização de fibras poliméricas para a produção de CRF devido às suas características mecânicas, as quais proporcionam melhorias na capacidade de deformação do compósito, resistência ao impacto e melhor controle de fissuração da matriz cimentícia (BENTUR; MINDESS, 2007).

2.2 Cisalhamento

A ruptura por cisalhamento ocorre quando um elemento estrutural sofre a ação de duas forças de mesmo módulo e sentido, mas em direções opostas, que agem em um plano paralelo a elas. Ainda, as tensões de cisalhamento podem ser transferidas pela superfície de contato e pela armadura transversal à interface de cisalhamento (ARAÚJO, 1997).

A transferência pela superfície de contato pode ser subdividida em três etapas, sendo elas por adesão ou aderência, por atrito e por ação mecânica. Conforme Pereira (2016) sabe-se que ao ser solicitado por forças externas, a armadura que atravessa o plano de cisalhamento do elemento é tracionada, assim,

além da resistência pelo atrito entre as faces que deslizam o cisalhamento também é resistido pelo efeito de pino.

Devido à complexidade de determinar as deformações e tensões cisalhantes ocorridas no concreto, inúmeros métodos experimentais têm utilizado métodos de análise por meio da determinação dos campos de deslocamentos apresentados nos elementos em estudo (MOREIRA, 2015).

Sabe-se que os elementos estruturais quando solicitados pelos carregamentos, principalmente as vigas, podem romper por cisalhamento. Em tal efeito, surgem fissuras diagonais abaixo da linha neutra em várias direções (FRENCH, 2017). No entanto, em casos que se tem o efeito de cisalhamento direto, a fratura do elemento ocorre em locais onde há descontinuidade geométrica, gerando fissuras perpendiculares a linha neutra, de tal modo que não há flexão do elemento. Conforme Savaris (2016), os modos de ruptura por cisalhamento são influenciados pela quantidade e direção da armadura em relação ao plano de cisalhamento.

De acordo com Beer *et al.* (2008), a tensão de cisalhamento média ($\tau_{méd}$) pode ser determinada pela Equação 1.

$$\tau_{méd} = \frac{V}{A} \quad (1)$$

Onde:

$\tau_{méd}$: tensão de cisalhamento média (Pa);

V: força cortante (N);

A: área de seção transversal (m²).

Entretanto, em materiais compósitos a tensão cisalhante não pode ser considerada uniforme, pois depende de um conjunto de fatores, dentre os quais podemos citar o intertravamento de agregados, ligação química entre pasta e agregado, efeito de pino, além da fricção entre as interfaces das fissuras (SAVARIS; PINTO, 2021). Ao considerar os diferentes fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento, como a coesão entre partículas e o efeito de pino, é necessário realizar uma padronização entre os exemplares.

Para tanto, autores como Walraven e Reinhart (1981) apresentaram formulações que relacionam a resistência ao cisalhamento com a resistência à compressão, chamada de tensão normalizada, a qual é obtida a partir da Equação 2.

$$\tau_n = \frac{\tau_u}{\sqrt{f_{cm,k}}} \quad (2)$$

Onde:

τ_n : Tensão cisalhante normalizada;

τ_u : Tensão de cisalhamento última;

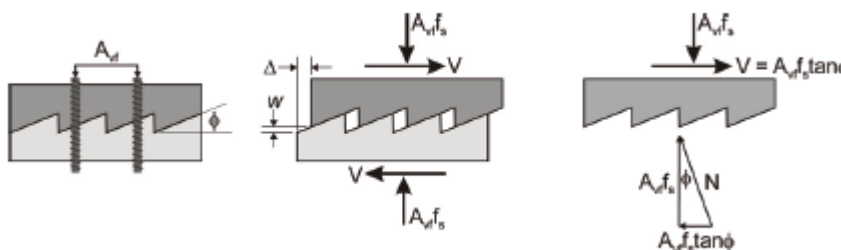
$f_{cm,k}$: Resistência à compressão característica média.

2.2.1 Teoria Atrito-Cisalhamento

A teoria atrito-cisalhamento, proposta por Birkeland e Birkeland (1966), considera que o mecanismo de transferência de tensões na interface do concreto é composto pelo atrito e pela taxa de armadura transversal ao plano de cisalhamento.

Em outros termos, o esforço cortante horizontal (V) tende a deslocar as faces do concreto, movimento que é impedido por uma força de atrito μP , em que μ é o coeficiente de atrito e P a força normal que atua no plano. Esse deslocamento provoca a separação de duas partes do elemento por um plano rugoso com inclinação ϕ . A utilização de armaduras tem por objetivo evitar esse movimento devido ao surgimento de esforços de tração (τ) que comprimem o elemento.

Figura 1: Teoria Atrito-Cisalhamento



Fonte: Adaptado de Birkeland e Birkeland (1966).

Dessa forma, fazendo uma breve análise do modelo acima, Birkeland e Birkeland (1966), puderam verificar por decomposição de forças que $T \tan \phi$ é equivalente a μP , assim, a resistência ao cisalhamento na interface pode ser descrita como:

$$V_u = T_u * \tan \phi = A_{sw} * f_y * \tan \phi \quad (3)$$

$$\tau_u = \rho_w * f_y * \tan \phi \leq 5,5 \text{MPa} \quad (4)$$

Em que:

V_u : Força cortante horizontal última;

T_u : Força de tração última na armadura;

$\tan \phi = \mu$: Coeficiente de atrito;

A_{sw} : Área de armadura transversal;

f_y : Tensão de escoamento da armadura transversal, limitado a 414 Mpa;

τ_u : Tensão de cisalhamento última;

ρ_w : Taxa de armadura geométrica, limitado a 0,015.

Ainda, tem-se que os valores do coeficiente de atrito variam conforme o material da superfície assim, para concreto monolítico μ é igual a 1,07, para superfícies altamente rugosas o coeficiente é de 1,4 e para conexões aço-concreto o valor varia de 0,8 a 1,0.

Mattock, Li e Wang (1976) incluíram na mesma teoria os efeitos de tensões externas (σ_n) e uma parcela de coesão (c). Após a alteração feita por Mattock, Mansur, Vinayagam e Tan (2008) sugeriram uma mudança na teoria inicial, descartando a influência de tensões externas, formulando uma equação geral para resistência à transferência de cisalhamento, dada por:

$$\frac{\tau_u}{f_c} = \frac{c + \mu * (\rho_v * f_y)^a}{(f_c)^b} \leq k \quad (5)$$

Os coeficientes a, b, c e μ são apresentados na Tabela 2 em diferentes pesquisas realizadas.

Tabela 2: Equações apresentadas na literatura para estimativa da resistência ao cisalhamento por atrito.

Referência	C	μ	A	B	K
ACI (2005)	0	1,4	1	1	$0,2 \leq 5,5/f_c$
PCI (1992)	0	1,4 quando $\rho_v f_y < 4,14$ ou $1,4(2,07/\rho_v f_y + 0,5)$	1	1	-
Mattock e Hawkins (1972)	$2,8/f_c$	0,878 quando $\rho_v f_y \geq 1,4$	1	1	0,3
Mattock (1976)		0,8	1	1	0,3
Walraven <i>et al.</i> (1987)	0	$0,878(f'_c)$	$0,167(f'_c)$	1	0,3
Lin e Chen (1989)	0	$\sqrt{[1,75(f'_c)^{0,5}]} / \rho_v f_y \leq$ $1,43(f'_c)^{0,25}$	1	1	0,3
Mau e Hsu (1988)	0	0,66	0,5	0,5	0,3
Loov e Patnaik (1994)	0	0,573	0,45	0,45	0,3
Mattock (2001)	$0,1 \leq 5,517/f_c$	0,8*	1	1	$0,3 \leq 16,5/f_c$

*quando $\rho_v f_y / f_c \geq (c/1,45)$, aplicar os valores da outra coluna.

Fonte: Adaptado de Mansur, Vinayagam e Tan (2008)

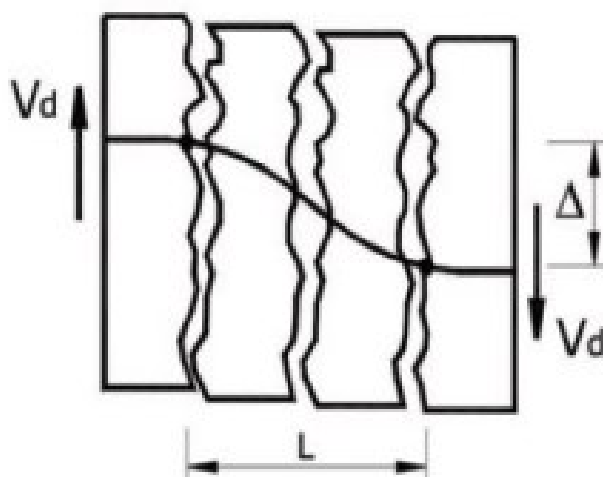
2.2.2 Efeito de Pino

Sabe-se que com o aumento do deslocamento do concreto quando submetido a tensões a armadura será tracionada até o escoamento, desse modo a armadura de cisalhamento irá induzir compressão na interface, transferindo a força cisalhante por atrito (PEREIRA, 2016). Ainda, tem-se que este efeito é devido a tentativa de corte e flexão das barras ao serem interceptadas por alguma fissura de cisalhamento (FILHO, 2019). Entre os fatores que influenciam tal efeito, podemos citar a altura do elemento, taxa de armadura, diâmetro da armadura longitudinal, aderência dos agregados, fissuras e armadura transversal (FILHO, 2019).

Assim, o efeito de pino pode ser definido como a capacidade de que as armaduras de reforço têm de transferir forças perpendiculares ao seu eixo (WALRAVEN; REINHARDT, 1981). Sabe-se também que a transferência desses esforços se inicia junto ao deslizamento das faces, deslocando as laterais do elemento.

Estudos desenvolvidos por diferentes autores, citados no ASCE/ACI (1973), chegaram ao consenso de que a força cortante resistida pela barra de aço no efeito de pino varia entre 15% e 25% da força cortante total. Ademais, Manzoli *et al.* (2008) afirmam que este efeito contribui para a transferência de esforços de modo significativo nos estágios de carga próximos ou posteriores à carga crítica.

Figura 2: Efeito de pino: deslocamento vertical e comprimento.



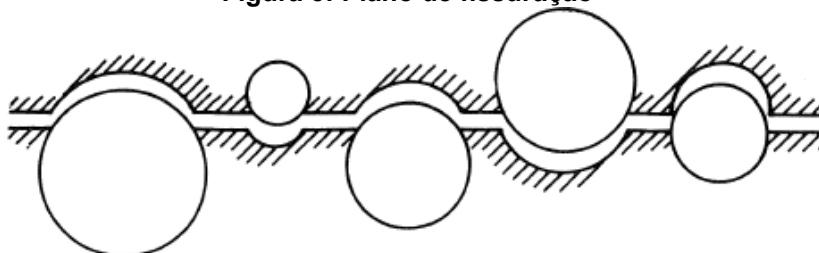
Fonte: Adaptado de Filho (2019).

Sabe-se também que o efeito de pino possui comportamento não-linear, visto que a resistência ao cisalhamento é provocada pelo fendilhamento do concreto no cobrimento das barras (NOGUEIRA, 2010). Ademais, os métodos de falha que podem ocorrer nesse caso são devidos às tensões de cisalhamento em função das barras de aço, falha devido à flexão das barras, falha do concreto e a combinação entre falha do concreto e do aço (FIB, 2008).

2.2.3 Engrenamento dos Agregados

A rigidez do concreto deve-se a qualidade e harmonia existente entre os elementos que o compõe. A resistência apresentada pelo agregado graúdo geralmente é maior que a matriz do concreto, assim, o processo de fissuração ocorre na interface matriz-agregado, percorrendo um caminho pela circunferência da brita (WALRAVEN; REINHARDT, 1981).

Figura 3: Plano de fissuração



Fonte: Walraven e Reinhardt (1981).

De acordo com Pereira (2016), em superfícies rugosas, a transferência dos esforços é garantida pelo agregado graúdo que atravessa a interface de cisalhamento, assim, o tamanho do agregado é fator determinante na resistência ao cisalhamento. Estudos como os de Yang *et al.* (2011), Sherwood (2008) e Savaris (2016) trazem que o aumento do DMC do agregado influencia diretamente na resistência ao cisalhamento, devido ao atrito gerado nas faces da fissura. Contudo, em agregados com dimensões maiores a 25 mm a fratura ocorrerá no agregado, diminuindo a resistência do elemento (SHERWOOD, 2008).

O formato irregular do agregado mostra-se como outro fator importante quanto ao engrenamento. Quando solicitados por tensões cisalhantes, o movimento transversal é impedido devido a aderência dos elementos, e a translação das partes é impedida devido a rugosidade criada pelo agregado (ARAÚJO, 1997).

Os estudos desenvolvidos por Walraven e Reinhardt (1981) trazem que quando o elemento é induzido a forças de cisalhamento a fissuração aumenta e em determinado momento a fissura deixa de aumentar devido a neutralização de forças. Ainda, em esforços de cisalhamento os planos tendem a deslizar entre si, diminuindo a região de contato e aumentando a tensão no local.

Ademais, os autores concluíram que o coeficiente de atrito (μ) da interface está em função da abertura de fissuras (w), do deslocamento (Δ) e do diâmetro do agregado (D), podendo ser expresso pela seguinte equação:

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{-\frac{1}{2}w(w^2+\Delta^2) + \frac{1}{2}\sqrt{w^2(w^2+\Delta^2)^2 - (w^2+\Delta^2)\{(w^2+\Delta^2)^2 - \Delta^2 D^2\}}}{(w^2+\Delta^2)} \quad (6)$$

Contudo, conforme descrito por Dias (2019) a determinação da contribuição do engrenamento é de difícil mensuração devido ao número de variáveis que envolvem este processo.

2.3 Ensaio de cisalhamento direto

A determinação da tensão de cisalhamento em um elemento é comumente feita por meio de ensaios em vigas em tamanhos reais, sendo quantificado a partir do ensaio de flexão à quatro pontos. Contudo a realização desses ensaios demanda de uma grande quantidade de materiais e equipamentos de grande porte.

Como alternativa ao ensaio de flexão a quatro pontos, há o ensaio denominado *push-off*. Esse ensaio, apesar de não ser normatizado, vem sendo utilizado com grande frequência devido à simplicidade dos equipamentos necessários para sua realização e suas pequenas dimensões (SAVARIS, 2016). A redução do tamanho do elemento possibilita a realização de mais ensaios, proporcionando uma análise estatística mais confiável.

Os corpos de prova empregados para realização desse ensaio possuem armadura de montagem para minimizar os efeitos dos esforços de flexão, e então são submetidos à aplicação de cargas verticais (DIAS, 2019). Pode ser realizada uma redução na seção transversal da peça para garantir a posição do rompimento do concreto.

Figura 4: Esquemática do ensaio do tipo *Push-off*



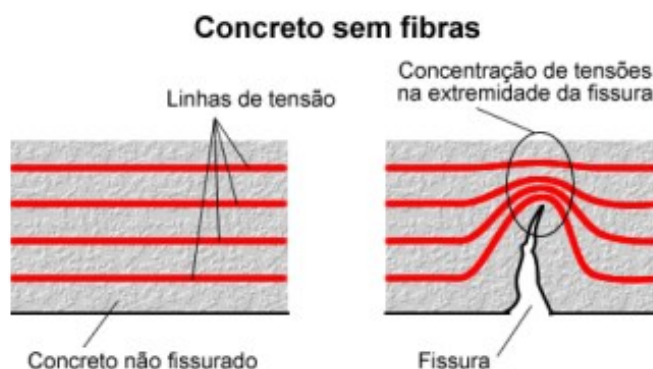
Fonte: Autor (2022)

2.4 Comportamento pós-fissuração

O concreto é, naturalmente, poroso e suscetível a fissuras. O surgimento de fissuras pode ocorrer durante o processo de endurecimento do concreto, devido a retração da superfície e evaporação da água, ou no estado endurecido quando solicitado por esforços mecânicos (DAL MOLIN, 2008).

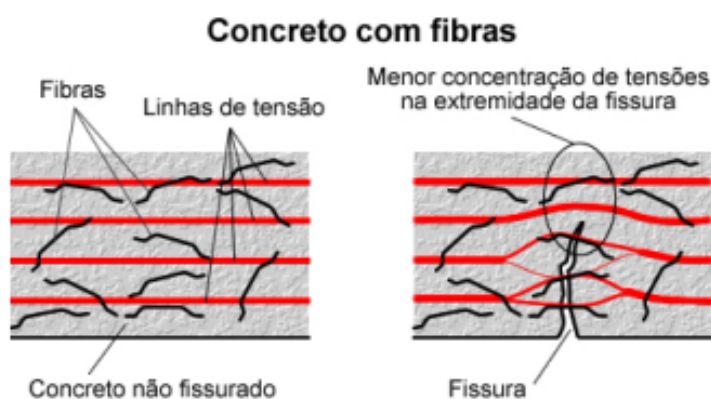
Durante o carregamento do elemento estrutural ocorre uma ligação entre as microfissuras existentes e as novas que surgem devido à distribuição das tensões. Este sistema de fissuras cresce, se propagando rapidamente pelos vazios preexistentes do concreto (VAN MIER, 2013). Após o início do processo de fissuração há uma concentração de tensões na extremidade da abertura, que ocorrem devido ao "corte" das linhas de tensão pelas fissuras (BARROS, 2009), como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Concentração de tensões em concretos sem adição de fibras.



Desse modo, a utilização de fibras surge como alternativa para contornar essa fragilidade, visto que a atuação das fibras se dá após o início do processo de fissuração quando a matriz começa a perder sua rigidez, atuando como ponte para transferência de tensões, proporcionando um retardamento na propagação das fissuras e eventual colapso da estrutura, Figura 6. Ademais, esses elementos incrementam a ductilidade e a resistência à tração, promovendo um melhor controle no processo de fissuração (SOUZA *et al*, 2017).

Figura 6: Concentração de tensões em concretos com adição de fibras.



Essas melhorias possuem dependência direta do módulo de elasticidade do compósito e conseqüentemente das fibras utilizadas. Ainda, são fatores determinantes quanto ao auxílio na resistência residual a disposição das fibras, seu comprimento e modelo (PEREIRA, 2017).

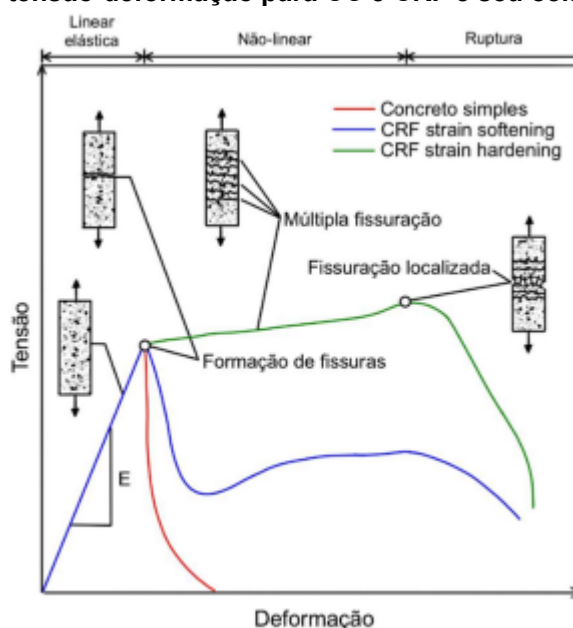
O volume de fibras adicionadas ao CRF possui relação direta com o comportamento do compósito no estágio pós-fissuração. Contudo, existe um volume crítico de adição, entre 2 e 5%, o qual corresponde ao teor de fibras que mantém a capacidade resistente do compósito na ruptura, sendo associado a um compósito

ideal, com fibras contínuas, alinhadas em direção ao esforço principal, conforme proposto por Aveston, Cupper e Kelly (1971). Nessa faixa de volume de adição, ocorre um comportamento elástico linear, semelhante a um patamar de escoamento.

Abaixo do volume crítico (<2%) tem-se o comportamento de *strain-softening*, onde há uma perda na capacidade resistente progressiva após a fissuração da matriz devido ao processo de arrancamento das fibras. Acima do volume crítico, entre 5 e 15%, verifica-se o comportamento de *strain-hardening*, o qual apresenta um ganho na capacidade de resistência após a fissuração da matriz (FIGUEIREDO, 2011), demonstrando melhor a transferência de tensões pelas fibras.

O comportamento do CRF quando submetido a tensões de tração é similar ao ocorrido com o concreto convencional, Figura 7, assim esse compósito também possui uma fase linear onde o elemento ainda não atingiu sua deformação de tração limite e ainda não há o surgimento de fissuras.

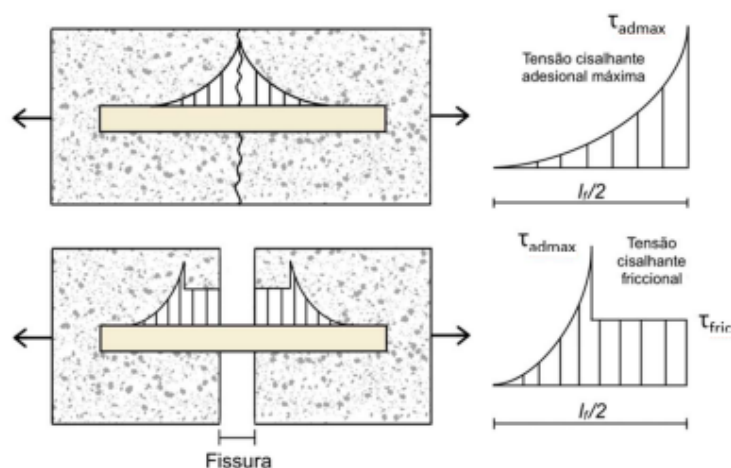
Figura 7: Diagrama tensão-deformação para CC e CRF e seu comportamento à tração



Fonte: Adaptado de Souza, 2021.

O diferencial do CRF ocorre após o compósito atingir sua tensão máxima, durante a fase não-linear. Souza (2021) traz que quando surge a primeira fissura, a matriz já atingiu o pico de tensão, sendo esse superior a sua resistência máxima, portanto, a tensão cisalhante surge no meio da fibra. Quando a fissura começa a propagar, a fibra terá uma tendência ao deslizamento por meio de uma tensão de fricção de tal modo que a tensão cisalhante máxima apareça no local onde ainda não houve deslizamento da fibra, Figura 8.

Figura 8: Distribuição das tensões durante e após a fissuração.



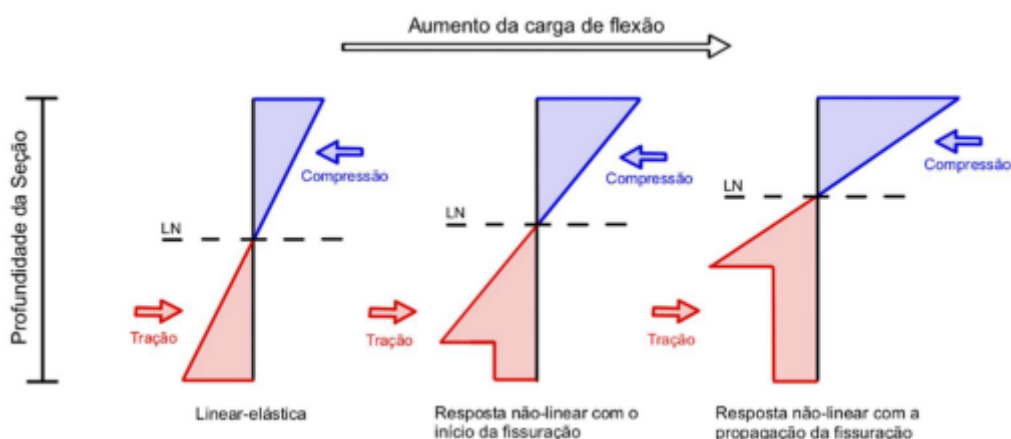
Fonte: Adaptado de Souza, 2021.

Após a fase não-linear há a ruptura do elemento devido ao arrancamento ou ruptura da fibra. Quando a resistência de ligação entre fibra-matriz for menor que a resistência apresentada pela fibra, haverá o arrancamento do filamento. Já para o caso de ruptura ocorre o oposto, a resistência apresentada pela fibra-matriz é maior que a da fibra (SOUZA, 2021).

Ressalta-se que aumentar indefinidamente o tamanho da fibra não irá trazer benefícios na resistência residual visto que existe um comprimento crítico das fibras (L_c). Figueiredo (2011) traz que o L_c pode ser definido como o comprimento em que a fibra atinge uma tensão no centro semelhante à tensão de ruptura quando a fissura é perpendicular à posição da fibra.

Do mesmo modo que no comportamento à tração, o comportamento do compósito à flexão está intimamente relacionado às características da fibra adicionada, assim, o CRF possui maior resistência residual pós-pico e um comportamento pseudo-dúctil quando comparado ao CC. Para que ocorram os aumentos da tenacidade e resistência, a área a ser tracionada aumentará de tal modo que a profundidade da linha neutra irá se modificar, gerando um reequilíbrio das forças, sendo comandada pelas fibras (SOUZA, 2021), Figura 9.

Figura 9: Esquema do deslocamento da linha neutra devido a distribuição de tensões.



Fonte: Adaptado de Jarrat (2011).

2.5 Correlação de imagens digitais (CID)

Além dos problemas encontrados para quantificar os efeitos de coesão e atrito, há também dificuldade na avaliação da contribuição do efeito de pino e engrenamento dos agregados na transferência das forças através das fissuras. Ademais, o monitoramento dos efeitos gerados por forças de cisalhamento e a compreensão do processo de fissuração é complexo visto que a abertura de fissuras ocorre de forma imprevisível conforme o carregamento é aplicado.

Atualmente o monitoramento dos ensaios é realizado em sua maior parte por meio de transdutores de deslocamento (LVDT) e extensômetros, em que o primeiro é utilizado para realizar medições de deslocamentos e o outro para medir deformações (DIAS-DA-COSTA; VALENÇA; JÚLIO, 2010). No entanto, esses equipamentos são limitados e imprecisos, o que torna o processo de análise de dados demorado e ainda gera resultados questionáveis.

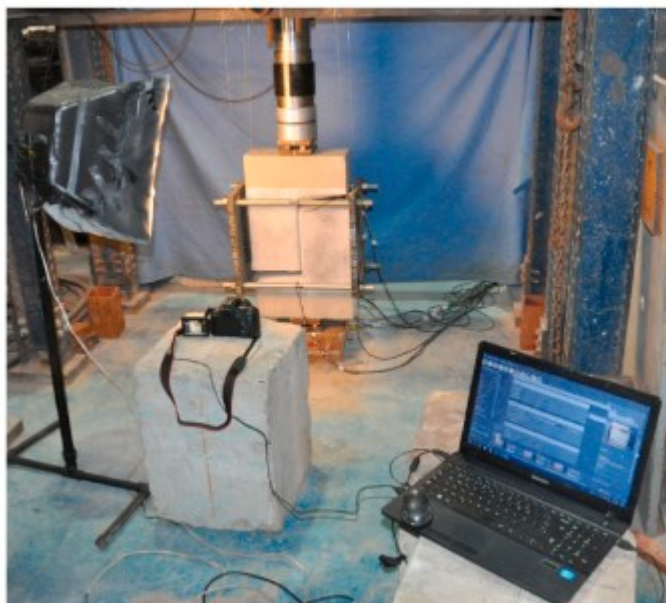
A utilização de LVDTs para monitoramento do processo de fissuração mostra-se ineficaz para realizar análises no pós-fissuração devido à aleatoriedade com que as fissuras são formadas e visto que esta aparelhagem necessita de uma localização prévia para ser instalado. Assim, o método de correlação de imagens digitais (CID) mostra-se promissor visto que esse pode analisar um elemento inteiro.

O CID surge como uma evolução do processo de fotografia de *Speckle*, utilizando-se de técnicas de processamento digital de imagens. Tal método, desenvolvido na década de 80, consiste no registro e rastreamento de imagens do elemento a ser avaliado (RESENDE; CARDOSO; SHEHATA, 2019), assim, o objeto

em estudo é analisado por meio de sucessivas imagens capturadas em uma frequência constante.

Imagens são um conjunto de pequenos elementos foto-sensíveis, conhecidos como pixels. Cada pixel representa um conjunto de números, os quais são: componente de cor Y, Cb e Cr, os quais são uma proporção da luz que incide sobre o elemento fotografado (SANTOS *et al.*, 2015). O CID deve interpretar a diferença da intensidade da luz, os pixels Y,Cb e Cr, e a escala cinza de cada pixel.

Figura 10: Amostra e equipamentos posicionados para realização do ensaio *push-off*.

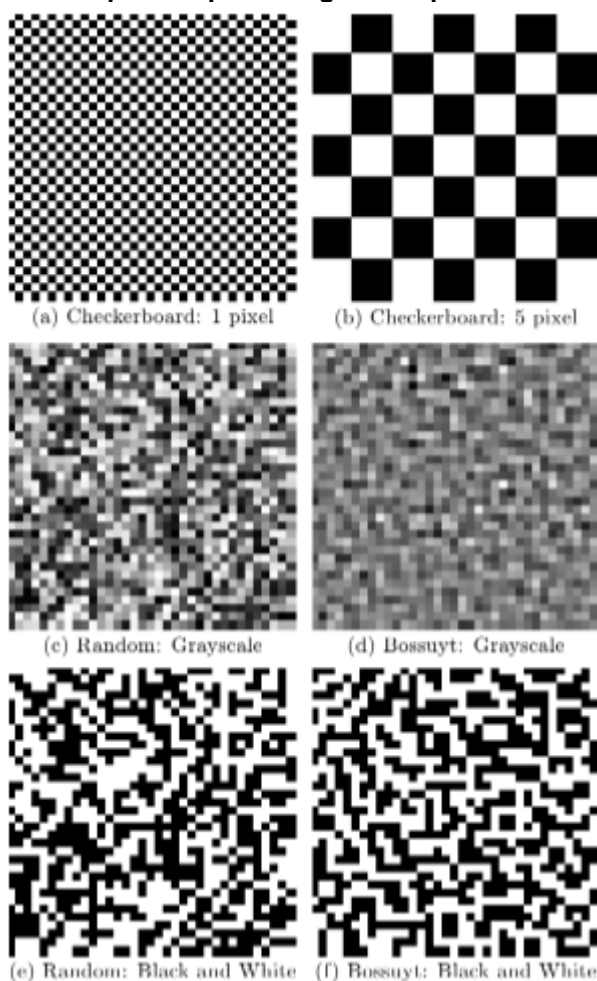


Fonte: Adaptado de Resende, Cardoso e Shehata (2021).

Este processo não considera um ponto isolado, mas sim um conjunto de pixels na vizinhança do ponto. Dessa forma, é necessário criar um padrão aleatório sobre a superfície do elemento com o intuito de garantir a singularidade de cada região do material.

Bomarito *et al.* (2017) apresentam em seu estudo que a utilização de um padrão aleatório é mais eficaz que a utilização de um padrão regular, visto que ao aplicar um padrão preto e branco randômico possui maior eficiência que um padrão cinza devido a melhor diferenciação dos pixels pelo *software* de análise de imagens, Figura 11. Ainda, quando usado uma métrica para melhoramento da amostra aleatória há uma precisão de 10% a mais que o padrão em que não é utilizado a métrica.

Figura 11: Exemplos de padrões gerados por diferentes meios.



Fonte: Adaptado de Bomarito *et al.* (2017)

A utilização do CID mostra-se promissora visto que essa metodologia gera resultados mais precisos e análises mais confiáveis. Ainda, tal metodologia pode facilitar a compreensão dos mecanismos que auxiliam a transferência de esforços durante a fissuração do elemento. Ao compreender como esses mecanismos funcionam, estudos como os de Birkeland e Birkeland (1966) e Walraven e Reinhardt (1981) poderão ser melhorados, possibilitando o dimensionamento de estruturas mais seguras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de avaliar a resistência mecânica ao cisalhamento e o comportamento pós-fissuração do CRF-PE, foi desenvolvido um estudo experimental com três dosagens de concreto. As etapas de caracterização dos materiais, montagem de fôrmas, dobra de armaduras e produção do concreto foram realizados no Laboratório de Estruturas, já a ruptura das peças foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil, ambos situados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Toledo.

3.1 Materiais utilizados

Para a produção foram utilizados materiais disponíveis na região oeste do Paraná, sendo:

3.1.1 Aglomerante

Para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizado como aglomerante o cimento CP-II-Z da marca Votoran, possuindo em sua composição de 6% a 14% de material pozolânico.

3.1.2 Agregados

O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica com dimensão máxima característica (DMC) igual a 12,5 mm, e como agregado miúdo foi utilizado areia natural extraída do Rio Paraná. Estes materiais foram caracterizados seguindo as prescrições contidas nas normativas vigentes, tais normativas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Normas para caracterização de agregados

Norma	Descrição
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 16972	Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios
NBR 16973	Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem
NBR NM 248	Agregados – Determinação da composição granulométrica
NBR 7211	Agregados para concreto – Especificação

Fonte: ABNT (2022).

3.1.3 Fibras

Foram utilizadas nesse estudo fibras do tipo macrofibra estrutural sintética de polietileno da marca MM fibras®, Figura 12, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades físicas e mecânicas do monofilamento de polietileno

Comprimento	Resistência à tração	Deformação na ruptura	Densidade
50 mm	350 Mpa	110,00%	1,12 g/cm ³

Fonte: MM fibras® (2022).

Figura 12: Macrofibra estrutural sintética de polietileno da MM fibras®

Fonte: Autor (2022).

3.1.4 Aditivos

O uso de aditivo superplastificante foi necessário apenas nos traços com adição de fibras, visto que não foi atingida a trabalhabilidade desejada nesses traços. O aditivo utilizado foi o ADVA 800 da marca GCP.

3.2 Dosagem do concreto

O traço do concreto utilizado foi de 1:2,49:2,79 (cimento, areia, brita) utilizado por Turetta *et al.* (2021). Tal traço visa obter um abatimento de tronco de cone de 15 centímetros e resistência à compressão média (f_{cm}) de aproximadamente 35 MPa.

Para analisar a eficiência estrutural da fibra de PE e sua influência no processo pós-fissuração, os teores de filamentos incorporados a matriz do concreto foram de 0%, 1,5% e 3%.

As misturas foram denominadas CC0, CRF1,5 e CRF3, onde CC representa concreto convencional, CRF concreto reforçado com fibras e os números as diferentes porcentagens de adição. A quantidade de material a ser utilizado para a produção de 1 m³ do traço é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Quantidade de materiais para produção de 1 m³ de concreto

	Cimento (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Brita (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	Fibras (Kg/m ³)
CC0	385,39	856,19	967,34	200,40	0,00
CRF1,5	385,39	856,19	967,34	200,40	16,80
CRF3	385,39	856,19	967,34	200,40	33,60

Fonte: Autor (2022).

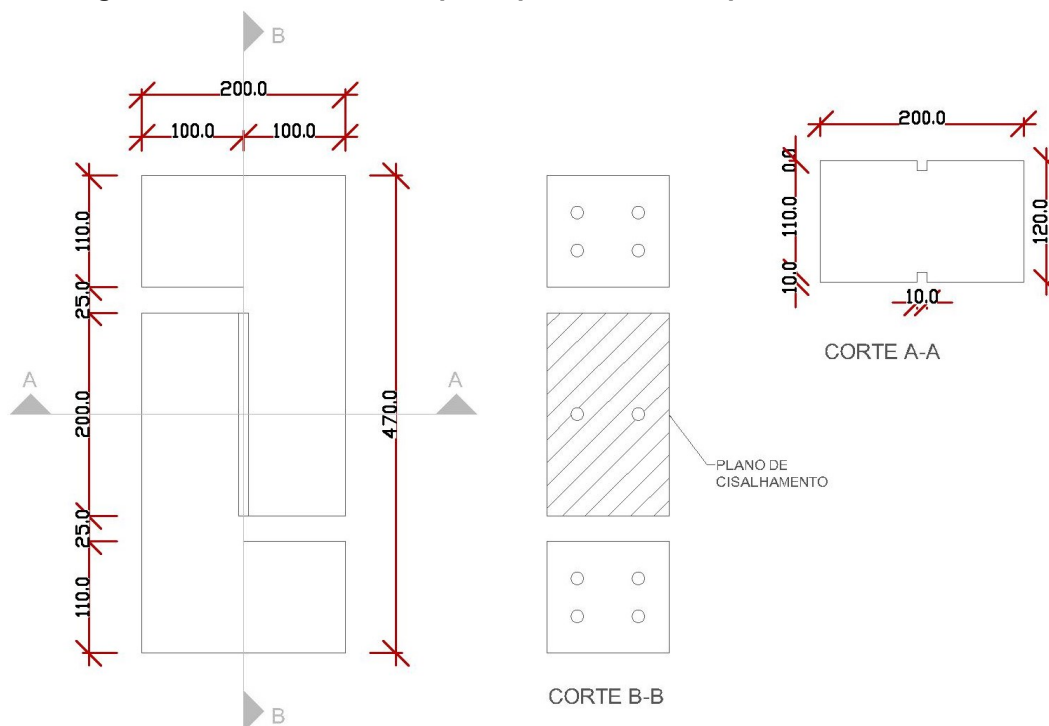
3.3 Especificações dos corpos de prova

Para quantificar e avaliar os efeitos das macrofibras foram produzidos corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto do tipo *push-off*, com dimensões similares às utilizadas por Savaris (2016).

As fôrmas foram fabricadas em MDF com dimensões apresentadas na Figura 13, dessa forma, cada corpo de prova consumiu aproximadamente 11,30 litros de concreto. Para garantir a redução da seção, assegurando o rompimento no

plano indicado, foram inseridos dois filetes de madeira nas paredes do molde, dessa forma a área de cisalhamento foi de aproximadamente 20.000 mm².

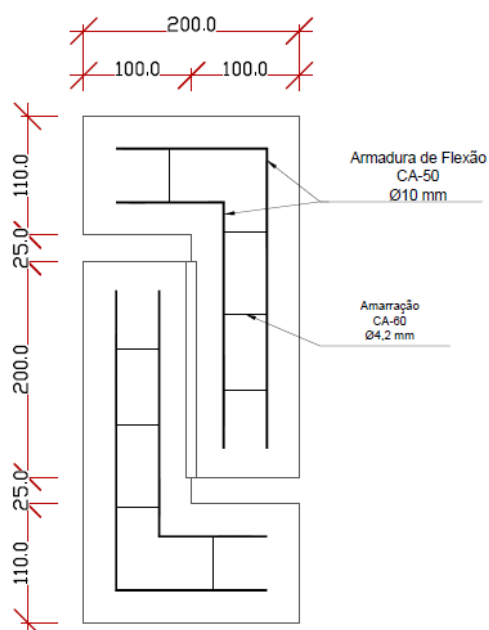
Figura 13: Dimensões do corpo de prova utilizados para o ensaio Push-off



Fonte: Adaptado de Savaris (2016).

A armadura de montagem dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento direto fora composta por barras de CA-50 com 10,0 mm de diâmetro, conforme Figura 14.

Figura 14: Esquemática da armação utilizada no ensaio *Push-off*



Fonte: Autor (2022).

A taxa de armadura transversal utilizada nos traços CC0 foi calculada conforme a Equação 7.

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w * s * \text{sen}\alpha} \quad (7)$$

Onde:

ρ_{sw} : taxa de armadura transversal;

A_{sw} : área da seção transversal dos estribos;

b_w : largura da alma;

s : espaçamento dos estribos, medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural;

α : inclinação dos estribos com relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural;

f_{yk} : resistência ao escoamento do aço da armadura transversal;

f_{ck} : resistência características do concreto à compressão

Assim, a área da seção transversal dos estribos utilizada foi de 0,15 cm², dessa forma foram utilizados em cada corpo de prova 2 estribos de aço CA-50 de diâmetro nominal de 4,2 mm. Ainda, foram moldados 3 corpos de prova sem armadura transversal para os traços CRF1,5 e CRF3, totalizando em 12 corpos de prova prismáticos

Os concretos também foram caracterizados quanto à resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade. No que diz respeito ao ensaio de compressão as NBR 16935 (ABNT, 2021) e NBR 16938 (ABNT, 2021) trazem que o CRF possui o mesmo comportamento que um CC, portanto podem ser ensaiados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). Desse modo foram moldados corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, conforme o que consta na NBR 5738 (ABNT, 2015).

Já os ensaios de resistência à tração foram realizados consoantes a NBR 16939 (ABNT, 2021), a qual traz que os CRFs podem ser submetidos aos ensaios de duplo puncionamento, ou ensaio Barcelona. Para tal ensaio foram moldados corpos de prova com 150 mm de diâmetro por 150 mm de altura.

3.4 Produção dos traços de concreto

Para moldagem dos corpos de prova foi produzido para o primeiro traço, CC0, 83,4 litros de concreto e para os traços com adição de fibras foram produzidos 50,4 litros de concreto, totalizando 185 litros de concreto. Para cada um dos traços foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos para o ensaio de compressão, 3 corpos de prova para o ensaio de duplo puncionamento e 3 para o ensaio de módulo de elasticidade.

Para o traço referência (CC0) foram moldados seis corpos de prova do tipo *push-off* para ensaio de cisalhamento direto. Desses seis, três possuíam apenas a armadura de montagem e os outros três possuíam armadura de montagem e armação transversal. Os traços com adição de fibras foram moldados apenas com armadura de montagem.

Foram produzidas as diferentes configurações de montagem dos corpos de prova para avaliar a possibilidade da retirada dos estribos transversais. Desse modo, ao final foram moldados 27 corpos de prova cilíndricos e 12 prismáticos.

A concretagem foi realizada em três dias distintos devido a limitação de formas, sendo a ordem de concretagem dada por CCO, CRF1,5 e CRF3. Os concretos com adição de fibras foram produzidos a partir de uma betonada do concreto referência. As fibras foram incorporadas à mistura aos poucos para evitar a formação de “ouriços”, aglomerado de fibras, visto que esta formação favorece um aumento da fragilidade do elemento estrutural devido à porosidade gerada nessas regiões.

Durante a moldagem dos corpos de prova prismáticos dos traços CRF1,5 e CRF3 foi necessário utilizar o adensador mecânico por imersão para auxiliar a dispersão do material dentro da fôrma e evitar nichos de concretagem, visto que a aglomeração das fibras estava obstruindo a passagem do material entre a armadura.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e identificados, sendo submetidos ao processo de cura por 28 dias. Os corpos de prova cilíndricos foram mantidos em cura úmida em um tanque de água, em contrapartida os corpos de prova prismáticos foram mantidos em cura úmida sob uma lona plástica, sendo umedecidos durante uma semana, conforme Figura 15, sendo então mantidos em condição ambiente até a realização dos ensaios do concreto no estado endurecido.

Figura 15: Corpo de prova posicionado para permanecer em cura úmida



Fonte: Autor (2022).

3.5 Ensaio de resistência

Os ensaios de resistência foram realizados após o período de cura, 28 dias, respeitando a ordem de moldagem dos corpos de prova e as normativas já citadas. Estes ensaios foram realizados na prensa hidráulica, localizada no laboratório de Materiais de Construção Civil da UTFPR, campus Toledo.

Para os ensaios de compressão axial, os corpos de prova foram submetidos a uma velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Para os ensaios de duplo puncionamento, a velocidade da prensa foi de $0,50 \pm 0,05$ mm/min. A resistência a tração foi calculada pela seguinte equação:

$$f_t = \frac{4 \cdot P_f}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H} \quad (8)$$

Onde:

f_t : resistência à tração;

P_f : carga da punção;

a : diâmetro do disco de aplicação da carga;

H : altura do corpo de prova.

O comportamento pós-fissuração foi avaliado por meio de um diagrama carga *versus* deslocamento vertical. Para tanto foram calculadas as resistências residuais do elemento, sendo calculadas conforme a Equação 9.

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

Em que:

$F_{R,\delta p}$: resistência residual no deslocamento vertical δ_p ;

$P_{\delta p}$: carga residual no deslocamento vertical δ_p .

3.6 Monitoramento dos ensaios

Para monitoramento e avaliação do processo pós-fissuração durante os ensaios de cisalhamento direto foi empregado o método de correlação de imagens digitais (CID). Para tanto, os elementos foram pintados com tinta branca, criando um fundo, após a secagem do fundo foi pulverizado tinta preta por meio de um spray, Figura 16, a fim de gerar um padrão aleatório que possibilite o rastreamento dos pontos e melhor leitura dados pelo *software* GOM correlate.

Figura 16: Processo de preparação dos corpos de prova para utilização do método CID



Fonte: Autor (2022).

Para a captura das imagens foi utilizado uma câmera digital da marca Nikon, modelo Coolpix P100 e um tripé para garantir a estabilidade e posicionamento ideal da câmera. Também foi utilizado um softbox como fonte de luz, sendo este

composto por um tripé, uma lâmpada de LED e um tecido refletor e difusor, Figura 17. Seu uso foi necessário para evitar variação de luminosidade durante o ensaio.

Figura 17: Equipamentos posicionados para monitoramento do ensaio



Fonte: Autor (2022).

As imagens foram capturadas com o auxílio do *software* digiCam Control. A frequência de obtenção das imagens foi limitada a uma foto a cada 5 segundos devido à limitação de captura da câmera. As análises CID foram realizadas com o auxílio do *software* GOM Correlate.

Antes de iniciar os ensaios foram coletadas imagens teste para verificar, por meio do *software* GOM Correlate, a qualidade do padrão aleatório gerado. Um padrão de boa qualidade deve retornar uma imagem esverdeada, Figura 18, e após essa análise os ensaios podem ser iniciados. É importante salientar a necessidade de se obter um padrão ótimo para que sejam realizadas boas leituras dos dados.

Figura 18: Verificação da qualidade do padrão

Fonte: Autor (2022).

Após esta etapa, foram dispostos pontos sobre a superfície do elemento de modo a costurar a fissura para que fosse possível realizar a correta leitura do processo de fissuração. Posteriormente foram inseridas linhas entre dois pontos ortogonais para coletar os deslocamentos verticais e horizontais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os itens a seguir têm por objetivo apresentar as características dos materiais utilizados, as características do concreto no estado fresco, os resultados obtidos após a caracterização das amostras no estado endurecido e o comparativo entre as análises realizadas e a bibliografia existente.

4.1 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados foram submetidos aos ensaios apresentados na Tabela 3. Suas propriedades físicas podem ser observadas na Tabela 6, as curvas granulométricas podem ser encontradas no Apêndice A.

Tabela 6: Resultado da caracterização dos agregados

Parâmetro	Areia	Brita 1
Absorção de água (%)	1,708	2,195
DMC (mm)	-	12,5
Densidade seca (g/cm ³)	2,021	2,824
Densidade saturado superfície seca (g/cm ³)	2,055	2,886
Módulo de finura	2,0	-

Fonte: Autor (2022).

4.2 Caracterização do concreto

Os traços produzidos foram caracterizados no seu estado fresco por meio do ensaio de *Slump Test*, já no estado endurecido foram caracterizados por meio da estimativa das resistências à compressão axial ($f_{cm,k}$), tração ($f_{tm,k}$), módulo de elasticidade e cisalhamento direto.

4.2.1 Propriedades do concreto no estado fresco

O uso de aditivo superplastificante não foi necessário durante a produção do concreto de referência visto que o traço foi dosado buscando obter boa trabalhabilidade e alto abatimento do tronco de cone, no entanto seu uso foi necessário durante a produção dos concretos com adição de fibras. Antes da incorporação do aditivo a mistura, foram realizados ensaios de abatimento de tronco

de cone para analisar a real necessidade de utilização de superplastificante. Como esperado, a incorporação de fibras reduziu a trabalhabilidade do concreto de modo que os valores obtidos no *slump test* foram de 0 mm para os traços com adição de fibras.

Dessa forma foi necessário adicionar aditivo para ajustar a trabalhabilidade. O aditivo foi adicionado por completo durante a mistura dos materiais na proporção de 0,1% sobre a massa de cimento. Os resultados do *Slump Test* após a adição de aditivo podem ser observados na Tabela 7 e na Figura 19.

Traço	Abatimento do concreto (mm)	Teor de aditivo superplastificante (%)
CC0	100	0
CRF1,5	70	0,1
CRF3,0	0	0,1

Fonte: Autor (2022).

Figura 19: Da esquerda para direita - *Slump test* CC0, CRF1,5 e CRF3



Fonte: Autor (2022).

Inicialmente buscava-se atingir um abatimento próximo ao CC0 nos traços com adição de fibras após a incorporação do aditivo, contudo, ao atingir 0,1% de adição optou-se por não aumentar o teor de aditivo, mesmo sem aumento nos valores de abatimento, visto que com esse teor já era possível observar uma tendência a exusadação.

A redução na trabalhabilidade do concreto com adições de fibras pode ser atribuída aos altos teores utilizados e a baixa massa específica do filamento, fator que contribui para a aglomeração das mesmas mesmo antes de serem inseridas na betoneira.

4.2.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão aos 28 dias e médias da resistência à compressão são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa)

CP	CC0	CRF1,5	CRF3
1	26,966	29,901	20,428
2	27,410	28,173	25,408
3	30,144	28,905	24,666
Média	28,173	28,993	23,501
Desvio Padrão	1,721	0,867	2,687
CV	2,961	0,752	7,22

Fonte: Autor (2022).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 8 verifica-se que a resistência à compressão do traço com 1,5% de adição apresentou um pequeno aumento de 2,91% quando comparado ao traço referência. Já o traço com 3% de adição apresentou redução de 16,58% em equiparado ao traço CC0. No entanto, ao realizar um teste de Shapiro-Wilk, verifica-se que não há diferença entre as médias.

Os resultados dos ensaios de tração aos 28 dias e suas estimativas de resistência média são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Resistência à tração aos 28 dias (MPa)

CP	CC0	CRF1,5	CRF3
1	2,548	2,595	1,591
2	2,728	2,569	1,638
3	2,504	2,509	1,957
Média	2,593	2,558	1,729
Desvio Padrão	0,118	0,044	0,199
CV	0,014	0,002	0,039

Fonte: Autor (2022).

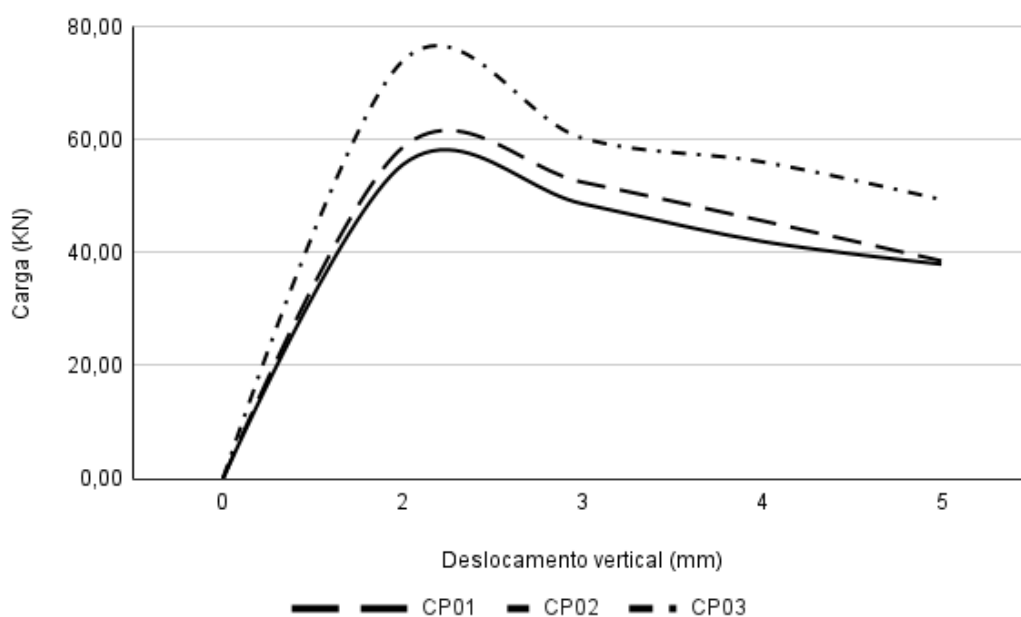
Observa-se que para resistência à tração todos os traços apresentaram redução em suas médias em comparação ao traço referência (CC0), sendo a situação mais crítica para o concreto com 3% de adição de filamentos, havendo uma redução de 39,23% em comparação ao CC0. Por meio do teste de Shapiro-Wilk, verificou-se que estatisticamente não há diferença entre as médias.

Com base na Equação 8 foram calculadas as resistências residuais dos corpos de prova CRF3 quando o disco atingiu 2, 3, 4 e 5 mm. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 10 e o gráfico de tensões na Figura 20.

Tabela 10: Resistências residuais do traço CRF3

CP	$f_{r,\delta p2}$	$f_{r,\delta p3}$	$f_{r,\delta p4}$	$f_{r,\delta p5}$
1	1,473	1,319	1,148	0,969
2	1,396	1,223	1,056	0,954
3	1,858	1,515	1,409	1,242
Média	1,576	1,353	1,204	1,055
Desvio Padrão	0,247	0,149	0,184	0,162
CV	0,061	0,022	0,034	0,026

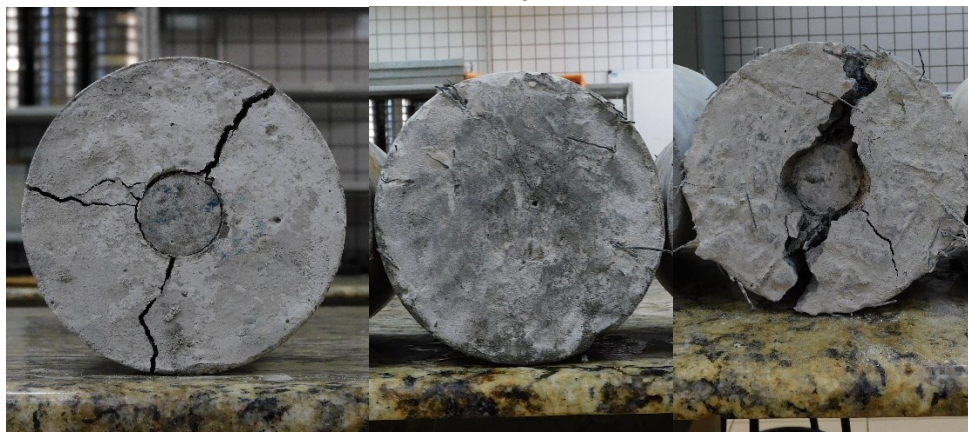
Fonte: Autor (2022).

Figura 20: Tensões residuais do CRF3

Fonte: Autor (2022).

Visualmente, conforme Figura 21, pode-se observar que para o traço CC0 surgiram fissuras radiais como demonstrado por Saludes, Aguado e Molins (2007), no entanto, nos traços com mistura surgiram mais fissuras além das três radiais, tal fenômeno deve-se a presença das fibras, visto que esses elementos possuem a capacidade de suportar e transferir tensões quando a matriz perde resistência, assim as fissuras passam a surgir em pontos diferentes onde há maior fragilidade da matriz.

Figura 21: Corpos de prova após ensaio Barcelona, da esquerda para a direita- CC0, CRF1,5 e CRF3



Fonte: Autor (2022).

As fissuras geradas nos corpos de prova do traço CRF1,5 são menos visíveis que as geradas no traço CRF3 visto que o ensaio do CRF1,5 foi finalizado quando a força decaiu em 20% da força máxima atingida, no entanto, o mesmo foi realizado para o traço CC0, sendo assim já é possível verificar a influência das fibras quanto a abertura de fissuras. Os ensaios do traço CRF3 foram encerrados quando a força decaiu em 80% da força máxima ou quando o deslocamento do disco atingiu 6 milímetros.

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade aos 28 dias. O ensaio de módulo de elasticidade para o CRF3 foi restringido a 2 corpos de prova visto que um dos elementos moldados teve de ser descartado devido aos nichos de concretagem gerados pela baixa trabalhabilidade e fluidez desse traço, o que ocasionou uma diminuição na altura do corpo de prova cilíndrico à estabelecida pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Tabela 11: Módulo de elasticidade (GPa)

CP	CC0	CRF1,5	CRF3
1	29,934	34,518	29,678
2	33,24	34,518	35,852
3	37,549	34,958	
Média	33,574	34,665	32,765
Desvio Padrão	3,818	0,254	4,366
CV	14,581	0,064	19,059

Fonte: Autor (2022).

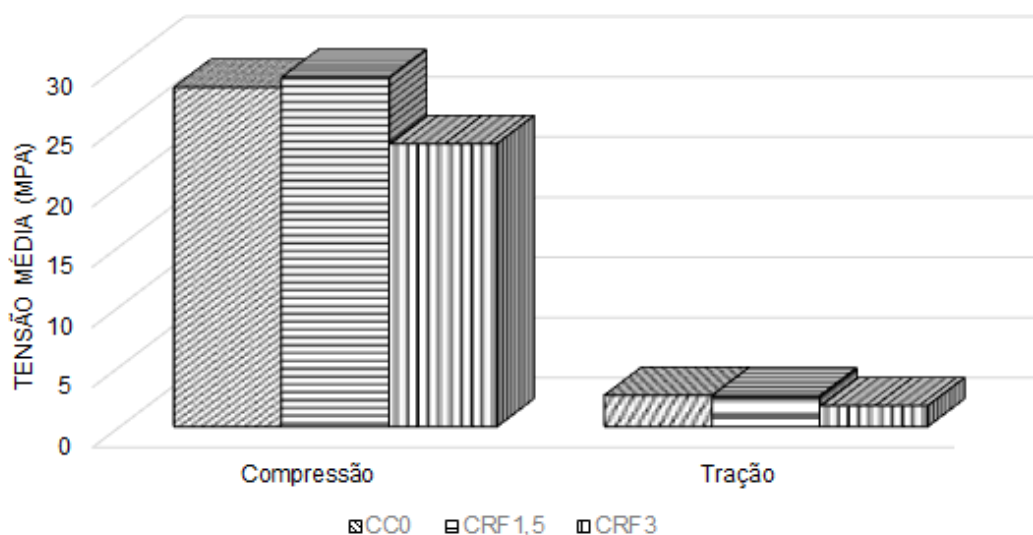
Para esta propriedade, verifica-se que a diferença entre os traços foi mínima, no entanto, o traço CRF1,5 apresentou aumento no módulo de elasticidade de 3,24% comparado ao traço referência. Além disso, com o auxílio do teste de

Shapiro-Wilk constatou-se que não há diferença significativa entre as médias dos traços.

De modo geral os traços com adição de fibras apresentaram valores aproximados ao traço de referência, com baixas variações, conforme Figura 22 e 23, no entanto não apresentaram melhorias expressivas. Figueiredo (2011) traz que a orientação e disposição das fibras na matriz são fatores determinantes quanto à eficácia desse compósito, dessa forma, a falta de controle na disposição das fibras pode justificar os valores baixos de resistência.

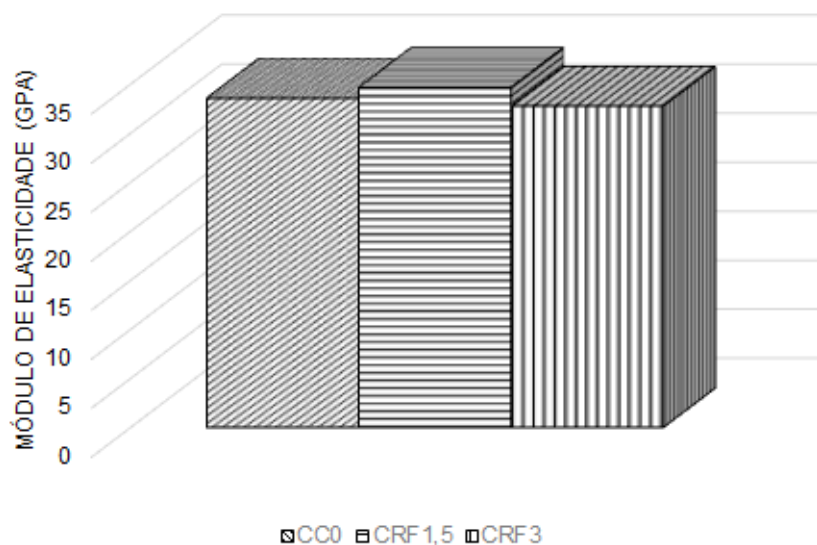
Ainda, conforme Figueiredo (2011) outro fator que pode influenciar na alteração das resistências é a descontinuidade do comprimento das fibras, visto que o comprimento que permanecerá na matriz do concreto irá definir a carga de arrancamento que a fibra irá resistir.

Figura 22: Resistências médias à compressão e tração



Fonte: Autor (2022).

Figura 23: Módulo de elasticidade dos exemplares



Fonte: Autor (2022).

4.3 Resistência ao cisalhamento

Após a finalização dos ensaios de cisalhamento direto, a área cisalhada foi medida com o auxílio de um paquímetro para realizar o cálculo das tensões. Os resultados obtidos após o cálculo das tensões são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resistência ao cisalhamento aos 28 dias (MPa)

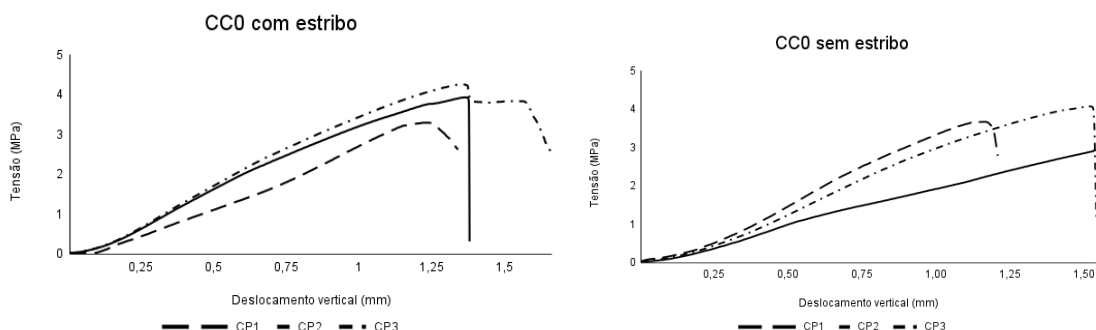
CP	CC0		CRF1,5	CRF3
	Com estribo	Sem estribo		
1	3,298	3,670	3,429	3,100
2	3,933	2,950	2,981	3,009
3	4,264	4,074	3,289	3,909
Média	3,832	3,565	3,233	3,339
Desvio Padrão	0,491	0,568	0,229	0,495
CV	0,241	0,323	0,053	0,245

Fonte: Autor (2022).

Por meio do teste de Shapiro-Wilk verifica-se que não há diferença significativa entre as médias. Os corpos de prova com armadura transversal apresentaram comportamento pseudo-dúctil devido ao escoamento das barras, conforme visto na Figura 24, ainda, estes mesmos elementos não apresentaram separação das duas faces de modo oposto ao observado nos CC0 sem estribo. Já nos corpos de prova sem estribo, apenas o engrenamento dos agregados estava transmitindo tensões, assim, quando a tensão máxima foi atingida não houve mais

transferência de esforços por esse mecanismo, resultando na ruptura brusca do elemento.

Figura 24: Deslocamento vertical dos corpos de prova CC0 com e sem estribo

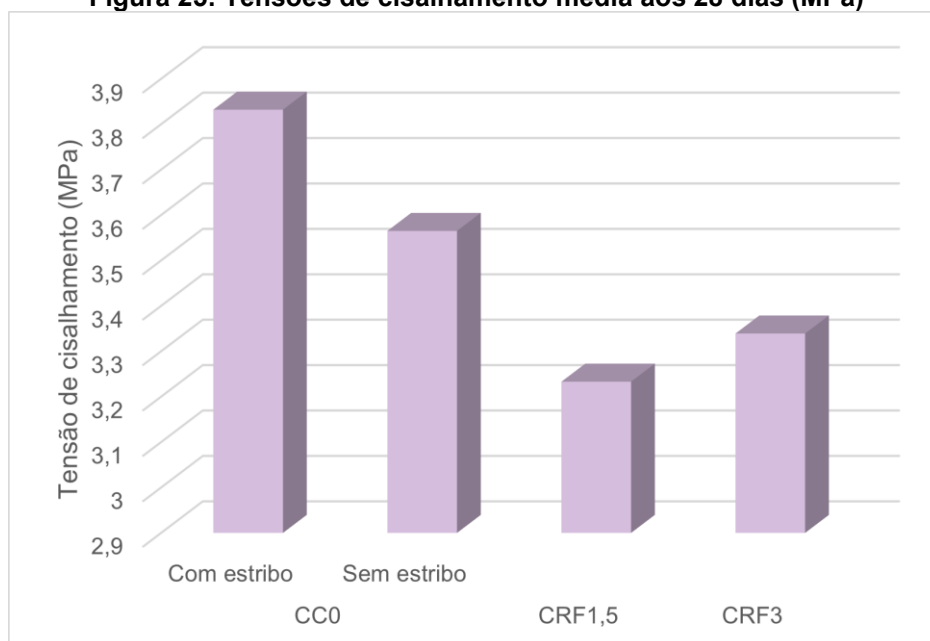


Fonte: Autor (2022).

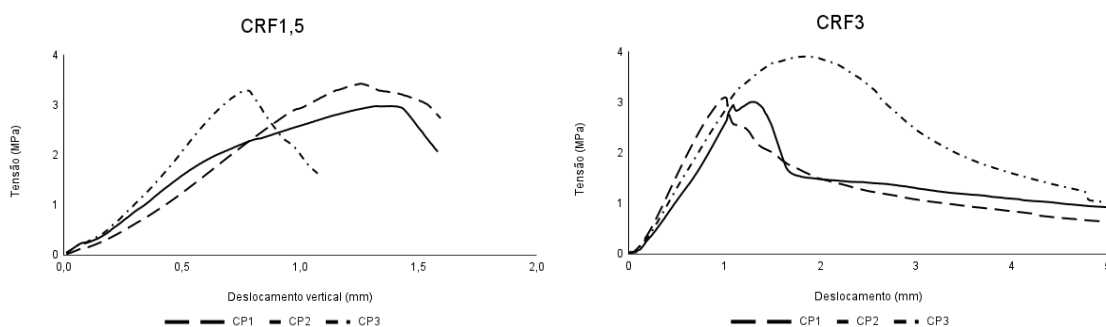
A adição de fibras a matriz do concreto não proporcionou melhorias relevantes na resistência ao cisalhamento, contudo, os traços com adição de filamentos atingiram valores próximos ao traço referência sem estribo, Figura 25. Esperava-se que os traços CRF1,5 e CRF3 atingissem valores similares ou superiores ao traço CC0 sem estribo, um dos motivos que podem ter ocasionados essa situação destaca-se o aumento da zona de transição de interface.

Souza (2021) traz que fibras com menores diâmetros e com geometrias diferentes diminuem a ZTI. No entanto, quando não há uma boa dispersão dos filamentos, favorecendo sua aglomeração e formação de ouriços, os vazios na matriz do concreto aumentam, aumentando a porosidade do concreto e a ZTI, tornando este material mais frágil que o ideal.

De modo oposto ao CC0 sem estribo, os traços com fibras apresentaram comportamento de *strain-softening*, onde há perda gradativa da resistência da matriz, Figura 26, não havendo ruptura brusca e separação das faces.

Figura 25: Tensões de cisalhamento média aos 28 dias (MPa)

Fonte: Autor (2022).

Figura 26: Deslocamento vertical dos corpos de prova dos traços CRF1,5 e CRF3

Fonte: Autor (2022).

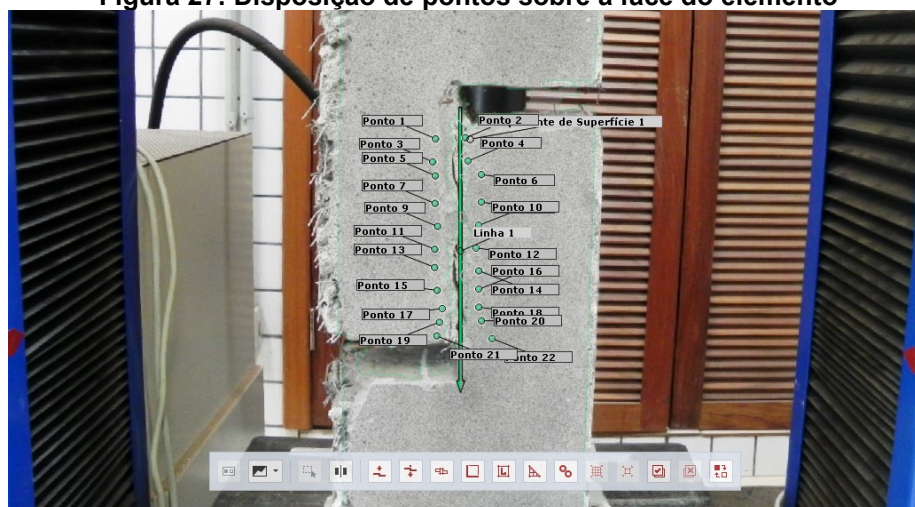
Ressalta-se que, do mesmo modo que os ensaios Barcelona, o ensaio de cisalhamento direto para o traço CRF1,5 foi encerrado quando a força decaiu em 20% da força máxima e para o CRF3 quando a força decaiu em 80% da força máxima atingida. Além disso, os corpos de prova tiveram suas faces separadas após a finalização do ensaio, não havendo ruptura total dos elementos com filamentos.

A partir de uma análise visual dos elementos durante os ensaios, foi possível observar que houve uma leve rotação dos corpos de prova devido aos esforços de flexão.

4.4 Abertura de fissuras e deslocamentos

Para avaliar a abertura de fissuras foi aplicada a metodologia CID, assim, após a finalização dos ensaios de cisalhamento direto, as imagens coletadas durante os ensaios foram armazenadas para posteriormente serem analisadas pelo *software*. O *software* Gom Correlate realizou a medição dos deslocamentos verticais e horizontais de diferentes pontos do corpo de prova, posicionados pelo autor conforme indicado na seção 3.6, Figura 27.

Figura 27: Disposição de pontos sobre a face do elemento



Fonte: Autor (2022).

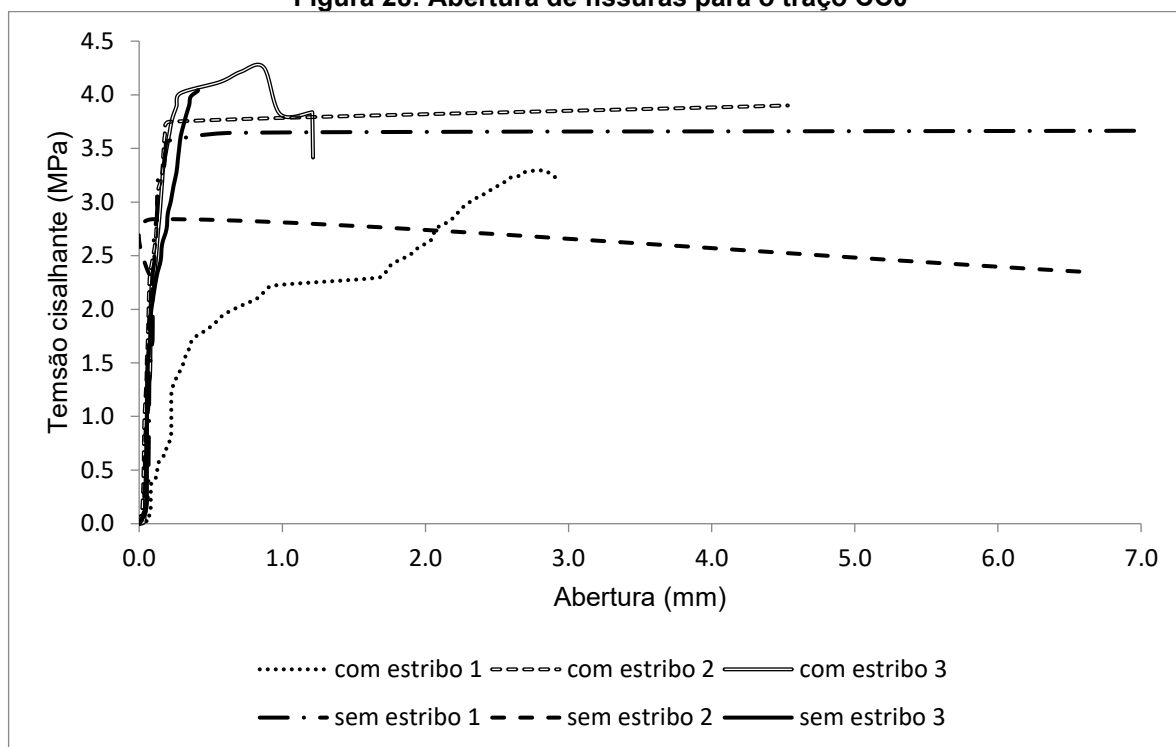
A abertura de fissuras (w) foi determinada a partir do cálculo das hipotenusas de cada ponto. A Tabela 13 demonstra a relação entre a tensão última (MPa) e abertura de fissuras (w) e as Figuras 28, 29 e 30 trazem a relação entre as tensões cisalhantes e a abertura de fissuras durante a ruptura.

Tabela 13: Relação entre tensão última cisalhante e abertura máxima de fissuras

CP	CC0 com estribo		CC0 sem estribo		CRF1,5		CRF 3	
	$\bar{\tau}_u$ (MPa)	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\bar{\tau}_u$ (MPa)	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\bar{\tau}_u$ (MPa)	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\bar{\tau}_u$ (MPa)	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)
1	3,298	2,935	3,67	7,523	3,429	1,263	3,1	11,758
2	3,933	4,741	2,95	6,626	2,981	0,57	3,009	7,404
3	4,264	1,215	4,074	Ruptura total	3,289	1,079	3,909	13,506
Média	3,832	2,964	3,565	7,074	3,233	0,97	3,339	10,889

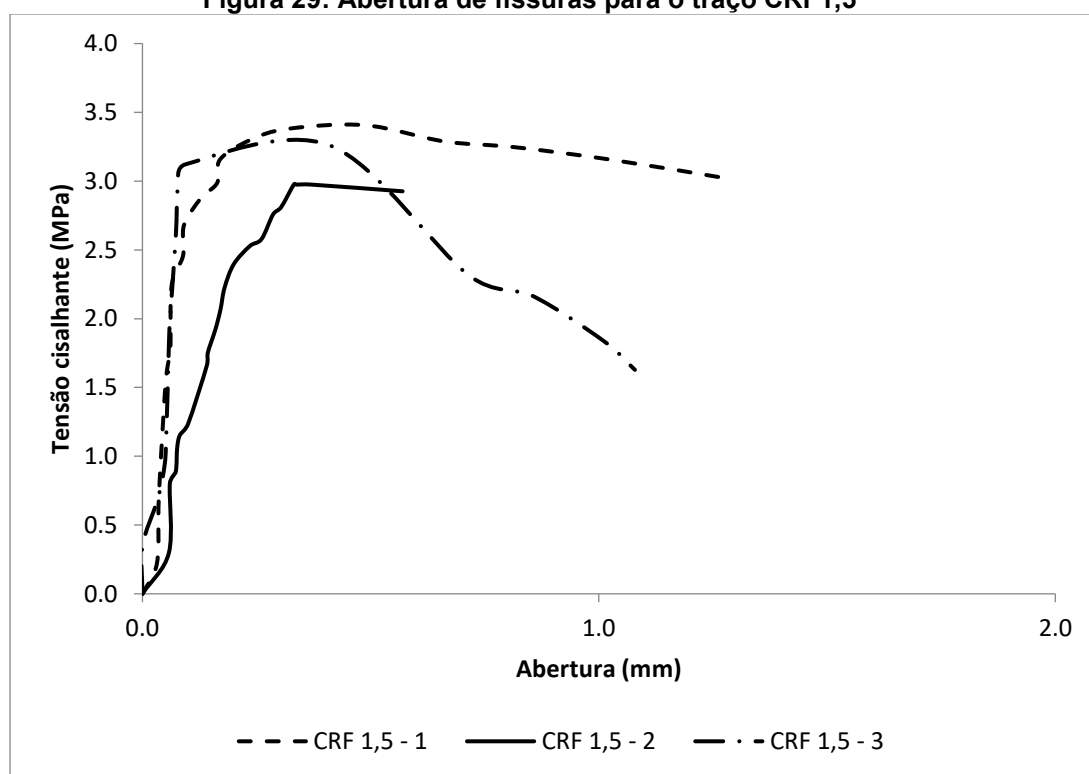
Fonte: Autor (2022).

Figura 28: Abertura de fissuras para o traço CC0



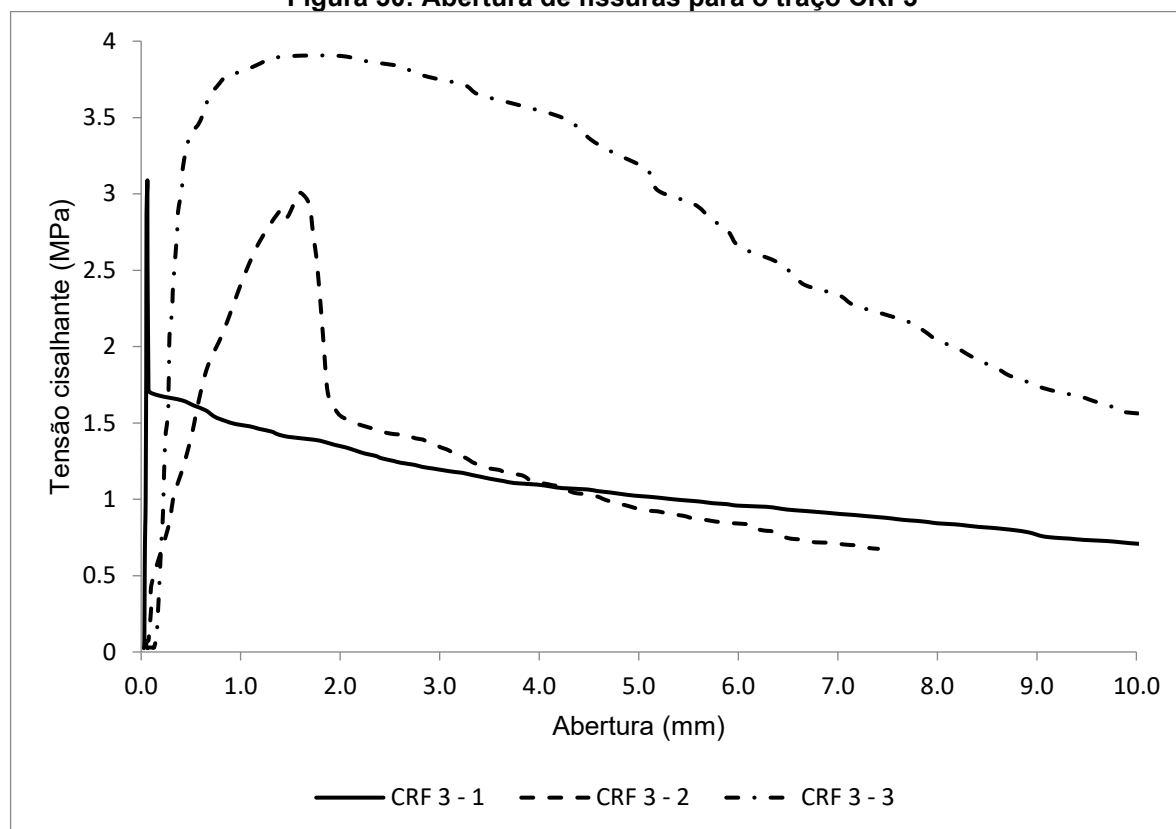
Fonte: Autor (2022).

Figura 29: Abertura de fissuras para o traço CRF1,5



Fonte: Autor (2022).

Figura 30: Abertura de fissuras para o traço CRF3



Fonte: Autor (2022).

Ao realizar a análise de cada traço é possível observar que os corpos de prova onde há a presença de armadura transversal apresentaram maiores valores de abertura de fissuras, além de não apresentar ruptura total. Os corpos de prova CC0 sem armadura transversal apresentaram valores consideráveis de abertura de fissuras, contudo houve ruptura brusca, demonstrando a fragilidade deste material.

De modo contrário ao que ocorre no traço sem fibras, CC0, nos traços com presença de fibras pode ser observado uma diminuição gradativa nas tensões conforme há o aumento das fissuras, sem haver a ruptura brusca do elemento. Além disso, ao levar os elementos ao colapso foi possível observar que durante o processo de carregamento dos elementos as fibras foram arrancadas da matriz cimentícia.

4.4.1 Tensões de cisalhamento normalizadas

Como apresentado na seção 4.3 é possível constatar que não há diferença significativa entre os traços, contudo, conforme apresentado na seção 2.2 é

necessário realizar uma padronização dos elementos. Os resultados da normalização, obtidos a partir da equação 2, são apresentados na Tabela 14 e na Figura 31.

Tabela 14: Tensões de cisalhamento normalizadas

Corpo de prova	τ_u (MPa)	τ_n
CC0 com estribo – 1	3,298	0,621
CC0 com estribo – 2	3,933	0,741
CC0 com estribo – 3	4,264	0,803
CC0 sem estribo – 1	3,67	0,691
CC0 sem estribo – 2	2,95	0,556
CC0 sem estribo – 3	4,074	0,768
CRF1,5 – 1	3,429	0,637
CRF1,5 – 2	2,981	0,554
CRF1,5 – 3	3,289	0,611
CRF3 – 1	3,1	0,639
CRF3 – 2	3,009	0,621
CRF3 – 3	3,909	0,806
Desvio Padrão	0,463	0,09
CV	0,214	0,008

Fonte: Autor (2022).

Observa-se que nos elementos sem estribo e nos com adição de fibras obtiveram uma menor resistência ao cisalhamento em comparação ao traço CC0 com estribo, no entanto, a tensão de cisalhamento normalizada média do CRF3 atingiu patamares mais altos que o CC0 sem estribo, entretanto, para corroborar esses dados é necessário produzir um número maior de exemplares.

5 CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios e análises propostas inicialmente observou-se que os corpos de prova prismáticos utilizados para o ensaio *push-off* apresentaram flexão durante seu ensaio não favorecendo um estado de cisalhamento puro, contudo os resultados obtidos mostram-se coerentes com a bibliografia.

A utilização de altos teores de fibras de polietileno afetou significativamente a trabalhabilidade do concreto, prejudicando a disposição do material em fôrmas com alta densidade de armadura. Ainda, a incorporação de 1,5% de fibras ao concreto contribuiu para o aumento da resistência à compressão em 2,91% e de 3,24% ao módulo de elasticidade, contudo para 3,0% de adição houve um decréscimo de 16,58% na resistência à compressão e de 2,41% para o módulo de elasticidade.

Quanto à resistência à tração, ambos os traços com adições de fibras poliméricas apresentaram valores inferiores ao traço de referência, havendo uma diminuição de 1,37% para o CRF1,5 e de 33,34% para o CRF3. Para o cisalhamento, os traços com adição de filamentos apresentaram valores menores ao traço de referência com e sem estribo, sendo que o CRF1,5 apresentou uma diminuição de 15,58% em comparação ao CC0 com estribo e de 9,31% ao CC0 sem estribo.

Ainda, o CRF3 apresentou uma redução de 12,86% em comparação ao CC0 com estribo e de 6,34% comparado ao traço CC0 sem estribo. No entanto, o traço com 3% de adição apresentou um aumento de 3,28% na resistência quando comparado ao 1,5%.

A incorporação de fibras de PEAD proporcionou um bom comportamento pós-fissuração devido à capacidade de transferência de tensões apresentadas por este tipo de filamento, além disso, as fibras auxiliaram efetivamente no grampeamento das fissuras. Apesar disso, por não apresentar melhorias significativas quanto à resistência ao cisalhamento, este material não é indicado para substituir total ou parcialmente a armadura transversal.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho observou-se a necessidade de buscar uma dosagem adequada para estudos com altos teores de fibras. Além disso, ressalta-se a necessidade de encontrar meios para incorporar as fibras de modo que elas estejam bem dispostas e bem orientadas para garantir uma boa transferência de tensões.

Ainda, sugere-se a produção de mais corpos de prova para obter mais resultados e assim determinar com maior precisão os resultados das características mecânicas, também sugere-se trabalhar com intervalos menores de teor de fibras para determinar o volume ótimo de fibras que proporcione melhorias nas resistências do CRF.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 16886**: Concreto – Amostragem do concreto fresco. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16915**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16935**: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16938**: Concreto reforçado com fibras – Controle de qualidade. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **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.
- _____. **NBR 16942**: Fibras poliméricas para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16973**: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.
- AMERICAN SOCIETY CIVIL ENGINEERS / AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. The shear strength of reinforced concrete members – Chapters 1 to 4. ACI-ASCE

Committee 426, Proceedings ASCE, **Journal of the Structural Division**, v.99, n.ST6, June 1973, p.1091-1187.

ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos submetidos à flexão**. 1997. 230 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. Single and multiple fracture. In: Conference on the Properties of Fiber Composites, London, 1971. **Proceedings**. NPL. p. 15-26.

AUERSVALDT, B. L.; LAY, L. A.; MIRANDA, T. L. Incorporação de Fibras Vegetais de Bambu ao Concreto em Substituição à Fibras Sintéticas. Ponta Grossa: CONBREPPO, 2019.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 155 p. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BEER, F. P. *et al.* Mecânica dos Materiais. Tradução José Beneque Rubert, Walter Libardi, 2011. 5ª ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008.

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

BOMARITO, G. F. *et al.* Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 91, p. 73-85, 2017.

BUDINSKI, K.G.; BUDINSKI, M.K. Properties and selection. **Engineering Materials**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1992.

CANDIAN, L.M. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais**. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

COUTINHO, F.; MELLO, I.L.; SANTA MARIA, L.C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, v. 13, p. 01-13, 2003.

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. 238 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da 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 reforçadas com fibras de aço e PVA**. 2019. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – 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.

FANGUEIRO, R.; ARAÚJO, M. **Fibrous and composite materials for civil engineering applications**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2011.

FIB (International Federation for Structural Concrete). Structural Connections for precast concrete buildings. **Guide to good practice prepared by Task Group 6.2**. Feb. 2008.

FILHO, M. A. O. **Análise numérica e experimental do efeito de pino em lajes maciças de concreto armado**, 185 p. Defesa de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2019

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

FRENCH, R. *et al.* Direct shear behavior in concrete materials. **International Journal of Impact Engineering**, v. 108, p. 89-100, 2017.

GHANBARPOUR, S. *et al.* The effect of type and volume fraction (VF) of steel fiber on the mechanical properties of self-compacting concrete. **Journal of Engineering, Design and Technology**, 2010.

GOM CORRELATE. **Versão 2022 (Rev. 156191)**. Disponível em: <gom.com>. Acesso em: 20 out. 2022.

HSU, T. T. C.; MAU, S. T.; CHEN, B. Theory of shear transfer strength of reinforced concrete. **ACI Structural Journal**, v. 84, nº 2, p. 149-160, January, 1987.

JARRAT, Robert. **Construction of in-situ cast flat slabs using steel fibre reinforced concrete**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Stellenbosch University, Stellenbosch, 2011.

KAEFER, L. F. **A evolução do Concreto Armado**. 1998. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

LIMA, J. C. L. **Proposta para cálculo da tensão de cisalhamento em vigas de concreto armado com estribos**. 2019. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2019. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br:80/jspui/handle/2011/11134>>. Acesso em: 14 abr. 2022.

LEE, M. K.; BARR, B. I. G. Strength and fracture properties of industrially prepared steel fibre reinforced concrete, **Cement and Concrete Composites**. v. 25, p. 321-332, 2003.

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.

MAGALHÃES, A. C. T. V. **Estudo de Fibras Vegetais, mucilagem de cacto e gesso em componentes construtivos**. 2009. 123 f. Dissertação (Mestrado) –

Universidade de Brasília. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Brasília, 2009.

MANSUR, M. A.; VINAYAGAM, T.; TAN, K. Shear transfer across a crack in reinforced high-strength concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, April 2008. pp.294-302.

MANZOLI, O. L. *et al.* Análise tridimensional de elementos estruturais de concreto armado via elementos finitos com descontinuidades incorporadas. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 1, n. 1, p.58-83, mar. 2008.

MATTOCK, A. H.; HAWKINS, M. N. Shear transfer in reinforced concrete – Recent research. **PCI Journal**, March-April, p. 55-75, 1972.

MATTOCK, C. H.; LI, W. K.; WANG, T. C. Shear transfer in lightweight reinforced concrete. **PCI Journal**, 1976. v. 21, nº 1, pp.20-39.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 751 f.

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

MOREIRA, I. S. C. **Comportamento mecânico do Betão reforçado com fibras**. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2018.

MOREIRA, P. G. M. O. **Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação digital de imagem para Avaliação de grandes deformações**. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2015.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA**. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.3.2006.tde-24032006-111305. Acesso em: 25 mar. 2022.

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

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

PANSSONATO, R. S. P. **Controle tecnológico do concreto reforçado com fibras de PET pelo ensaio Barcelona**. 2019. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2019.

PEDROSO, F. L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Concreto e Construções. 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf>. Acesso em: 01 set. 2022.

PEREIRA, E. V. **Influência de fibras de aço no comportamento mecânico e nos mecanismos de fissuração de concretos autoadensáveis**. 170 f. Dissertação

(Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Rio de Janeiro, 2017.

PEREIRA, P. D. S. **Avaliação da teoria atrito-cisalhamento em concreto leve e de alta resistência**. 132 f. Tese de Doutorado. MS thesis, Univ. Est. Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2016.

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. **61º Congresso Brasileiro do Concreto**. Fortaleza: IBRACON, 2019.

RESENDE, T. L.; CARDOSO, D. C. T; SHEHATA, L. C. D. Experimental and theoretical investigation on the stress transfer across cracks due to combined action of steel fibers and aggregate interlock. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 124, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104239>, 2021. Acesso em: 16 mai. 2022.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos. **44º Congresso Brasileiro do Concreto**. Belo Horizonte: IBRACON, 2022.

SALUDES, S.; AGUADO A.; MOLINS, C. **Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado com fibras (Ensayo Barcelona)**. 338 f. Cátedra BMB Innovación en Tecnología del Hormigón. Barcelona, 2007.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. doi:10.11606/D.3.2012.tde-29072013-115851. Acesso em: 28 mar. 2022.

SANTOS, A. H. A. et al. Estudo do efeito de escala utilizando correlação de imagem digital. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, p. 323-340p, 2015.

SAVARIS, G. **Resistência ao cisalhamento do concreto autoadensável**. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SAVARIS, G.; PINTO, R. C. A. Shear friction capacity of self-consolidating concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, 2020.

SHERWOOD, E. G. **One-Way Shear Behaviour of Large, Lightly Reinforced Concrete Beams and Slabs**. Phd Thesis. University of Toronto. Canada, 2008.

SINGH, H. **Steel fiber reinforced concrete: Behavior, Modelling and Design**. Cingapura: Springer, 2017.

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.

SOUZA, F. R. **Concreto reforçado com fibras de PVA aplicado a pavimentos aeroportuários: propriedades mecânicas e dimensionamento**. 121 f. Tese

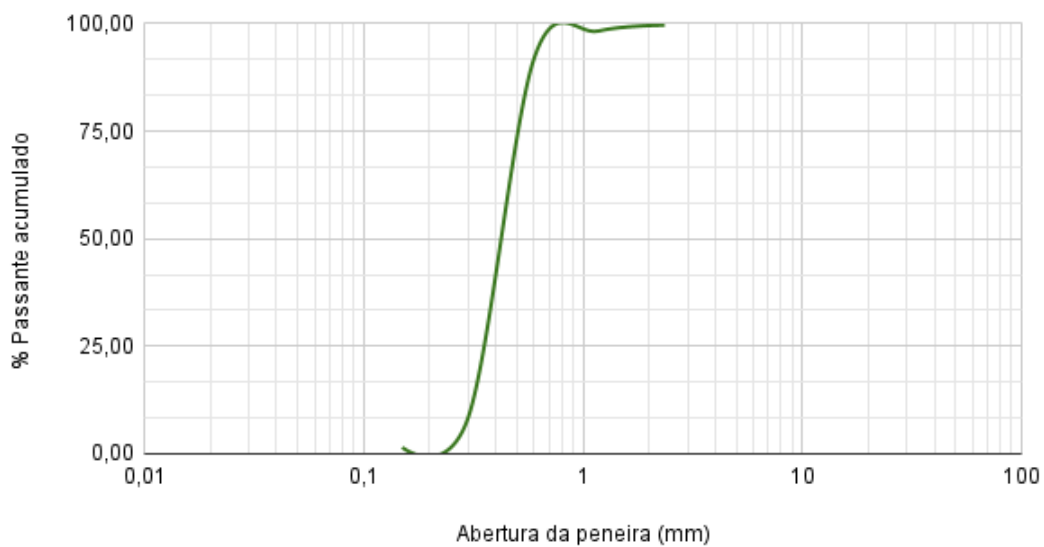
(Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Rio de Janeiro, 2021.

TURETTA, K. V; *et al.* Utilização de resíduos de construção para produção de concreto. **XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**. Guarapuava, 2021.

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

YANG, K. H. *et al.* Effect of Aggregate Size on Shear Behavior of Lightweight Concrete Continuous Slender Beams. **ACI Materials Journal**, v. 108, n° 5, p. 501-509, Sep.-Oct. 2011.

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.

APÊNDICE A – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS**Curva Granulométrica da Areia****Curva granulométrica da Brita 1**