

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO RECICLADAS**

**Luiza Campos Coelho**

São Carlos  
2023

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO RECICLADAS**

**Luiza Campos Coelho**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-graduação em Engenharia Civil  
da Universidade Federal de São Carlos  
para a obtenção do título de Mestre

**Área de concentração:** Estruturas e  
Geotecnia

**Orientadora:** Margot Fabiana Pereira

São Carlos  
2023





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Luiza Campos Coelho, realizada em 28/09/2023.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Margot Fabiana Pereira (UFSCar)

Profa. Dra. Silvana de Nardin (UFSCar)

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (UFG)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Dedico essa dissertação a quem colaborou diretamente comigo: meus pais, minha irmã, meu esposo, meus amigos e minha orientadora; sem os quais eu não teria concluído essa dissertação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, pois me concedeu discernimento para tomar as melhores decisões ao longo do meu curso e força para atingir os meus objetivos.

Aos meus pais Heber Coelho e Ana Paula Coelho por proporcionarem estabilidade para iniciar e prosseguir no curso.

Ao meu esposo pelo apoio emocional para seguir nessa jornada.

À minha orientadora, pela disponibilidade, paciência e por todo o conhecimento passado para que eu pudesse desenvolver esse trabalho.

A todos os professores e técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Civil (DECiv/UFSCar) pela disponibilidade sempre que solicitados.

Aos meus colegas de pós-graduação por proporcionarem um ambiente agradável para o desenvolvimento dessa pesquisa.

## RESUMO

COELHO, L. C. **Análise do Comportamento Mecânico de Concreto Reforçado com Fibras de Aço Recicladas Comparando com Fibras de Aço Industriais.** 2023. 146p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

Visando minimizar os impactos ambientais, diversos cientistas se debruçam sobre formas de reciclar, reutilizar e aproveitar materiais que atingiram o final de sua vida útil, como é o caso dos pneus inservíveis, que geram milhões de toneladas de materiais descartados por ano. A partir das resoluções dos órgãos ambientais, a indústria de pneumáticos passou a direcionar os pneus inservíveis para que os componentes sejam utilizados como insumos em outras indústrias. Estudos recentes apontam uma potencial substituição das fibras de aço industriais, utilizadas como reforço em estruturas de concreto na construção civil, por fibras de aço extraídas dos pneus inservíveis. Com isso, essa pesquisa exploratória realizou uma Revisão Sistemática da Literatura – RSL sobre o tema e um programa experimental. A RSL apresentou o panorama das pesquisas sobre o assunto e norteou o desenvolvimento do programa experimental a partir da análise ampla dos estudos experimentais analisados. O programa experimental separou e caracterizou as FAR utilizadas na pesquisa, também caracterizou os materiais constituintes do CRF, e caracterizou o CRF no estado fresco e no estado endurecido, variando o tipo de fibra adicionado em FAR e FAI; e o teor de adição, em: 0, 0,3% e 0,6%. Para compreender a influência da adição das fibras no estado fresco, foram realizados os ensaios de abatimento e de tronco de cone e ensaio de ar incorporado. Para analisar o comportamento no estado endurecido, foram realizados ensaios de tração, compressão e flexão. A partir da RSL foi possível concluir que as fibras de aço industriais podem ser substituídas pelas fibras de aço recicladas sem perdas significativas nas propriedades mecânicas do elemento estrutural, sob as ações de compressão, tração, cisalhamento e flexão. Da mesma forma, a partir do programa experimental, foi possível concluir, que as FAR adicionadas ao concreto diminuem a trabalhabilidade da mistura, aumentam a porosidade da mistura, diminuem a resistência à compressão, aumentam a resistência à tração, aumentam a resistência à flexão, proporcionam um decréscimo das resistências residuais; no geral o comportamento foi similar ao comportamento das FAI. É importante ressaltar que a comparação entre os tipos de fibras é complexa devido à heterogeneidade das características das FAR.

*Palavras-chave: Resíduos de Pneus. Concreto Reforçado com Fibras de Aço Recicladas. Construção Sustentável. Tensão de Flexão em Vigas de Concreto.*

## ABSTRACT

Aiming to minimize environmental impacts, several scientists are looking at ways to recycle, reuse and take advantage of materials that have reached the end of their useful life, such as waste tires, which generate millions of tons of discarded materials per year. Following resolutions from environmental agencies, the tire industry began to divert waste tires so that the components could be used as inputs in other industries. Recent studies point to a potential replacement of industrial steel fibers, used as reinforcement in concrete structures in civil construction, with steel fibers extracted from scrap tires. Therefore, this exploratory research carried out a Systematic Literature Review – RSL on the topic and an experimental program. RSL presented an overview of research on the subject and guided the development of the experimental program based on a broad analysis of the experimental studies analyzed. The experimental program separated and characterized the FAR used in the research, also characterized the constituent materials of the CRF, and characterized the CRF in the fresh state and in the hardened state, varying the type of fiber added in FAR and FAI; and the addition content, in: 0, 0.3% and 0.6%. To understand the influence of adding fibers in the fresh state, the slump and frustum tests and the entrained air test were carried out. To analyze the behavior in the hardened state, tensile, compression and flexion tests were carried out. From the RSL it was possible to conclude that industrial steel fibers can be replaced by recycled steel fibers without significant losses in the mechanical properties of the structural element, under the actions of compression, tension, shear and flexion. Likewise, from the experimental program, it was possible to conclude that FAR added to concrete decreases the workability of the mixture, increases the porosity of the mixture, decreases the compressive strength, increases the tensile strength, increases the flexural strength, provide a decrease in residual resistance; In general, the behavior was similar to the behavior of the FAI. It is important to highlight that the comparison between fiber types is complex due to the heterogeneity of FAR characteristics.

*Keywords: Tire Waste. Reinforced Concrete with Recycled Steel Fibers. Sustainable construction. Bending Stress in Concrete Beams.*

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	METODOLOGIA .....	14
<b>2.</b>	<b>REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	16
2.1.1.	<i>Ensaio de caracterização do CRF.....</i>	<i>17</i>
2.1.2.	<i>Origem e extração das fibras de aço recicladas.....</i>	<i>21</i>
2.2	METODOLOGIA DA RSL.....	24
2.2.1.	<i>Planejamento da RSL .....</i>	<i>24</i>
2.2.2.	<i>Execução .....</i>	<i>27</i>
2.2.3.	<i>Extração .....</i>	<i>27</i>
2.3	RESULTADOS DA RSL.....	27
2.4	SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS.....	30
2.4.1.	<i>Propriedades das fibras de aço recicladas.....</i>	<i>31</i>
2.4.2.	<i>Comportamento no estado fresco .....</i>	<i>43</i>
2.4.3.	<i>Comportamento à compressão.....</i>	<i>46</i>
2.4.4.	<i>Comportamento à tração (ensaio de tração por compressão diametral) .....</i>	<i>58</i>
2.4.5.	<i>Comportamento ao cisalhamento .....</i>	<i>62</i>
2.4.6.	<i>Comportamento à flexão .....</i>	<i>63</i>
2.4.7.	<i>Pós fissuração .....</i>	<i>70</i>
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>81</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	81
3.2	METODOLOGIA.....	83
3.2.1	<i>Separação e caracterização da amostra útil de fibras de aço recicladas.....</i>	<i>83</i>
3.2.2	<i>Caracterização dos demais materiais constituintes do CRF.....</i>	<i>87</i>
3.2.3	<i>Metodologia para caracterização do CRF.....</i>	<i>88</i>
3.2.3.1.	<i>Metodologia dos ensaios no estado fresco.....</i>	<i>92</i>
3.2.3.2.	<i>Metodologia dos ensaios no estado endurecido .....</i>	<i>93</i>
3.3	RESULTADOS .....	97
3.3.1	<i>Separação das fibras de aço recicladas úteis .....</i>	<i>97</i>
3.3.2	<i>Caracterização geométrica e mecânica das FAR.....</i>	<i>101</i>

3.3.3	<i>Caracterização do CRF no estado fresco e no estado endurecido</i> .....	106
3.3.3.1.	Trabalhabilidade e ar incorporado .....	106
3.3.3.2.	Resistência à compressão axial .....	108
3.3.3.3.	Resistência à tração por compressão diametral .....	109
3.3.3.4.	Resistência à Flexão .....	111
3.3.3.5.	Resistência residual .....	117
3.3.4	<i>Comparação entre as fibras industriais e recicladas</i> .....	118
3.3.5	<i>Custo dos materiais</i> .....	120
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	121
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>123</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>125</b>
	<b>APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DO CRF COM MISTURA HÍBRIDA DE FIBRAS</b> .....	<b>132</b>
	<b>APÊNDICE B – ENSAIOS DE COMPRESSÃO E TRAÇÃO DE CRF COM MISTURA HÍBRIDA DE FIBRAS</b> ..	<b>134</b>
	<b>APÊNDICE C – ENSAIO DE FLEXÃO DE CRF COM MISTURA HÍBRIDA DE FIBRAS</b> .....	<b>136</b>
	<b>APÊNDICE D – DADOS DE LABORATÓRIO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL REALIZADO NO PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE E – DADOS DE LABORATÓRIO DO ENSAIO DE TRAÇÃO REALIZADO NO PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE F – DADOS DE LABORATÓRIO DO ENSAIO DE FLEXÃO REALIZADO NO PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>140</b>
	<b>APÊNDICE G – IMAGENS DO ENTALHE EXECUTADO NOS CP’S PRISMÁTICOS</b> .....	<b>141</b>
	<b>APÊNDICE H – FIGURAS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS</b> .....	<b>141</b>

# 1. Introdução

---

A questão ambiental tem estado nos debates sociais, científicos, governamentais e políticos, nos quais são estabelecidas metas universais para que as empresas gerem menos resíduos, destinem adequadamente, reciclem ou incorporem em outra cadeia produtiva materiais que seriam descartados.

De forma a contribuir com o meio ambiente alguns pesquisadores vem tentando incorporar resíduos de outras indústrias na construção civil, como o caso das fibras de aço recicladas de pneus inservíveis em adição ao concreto.

As Fibras de Aço Industriais - FAI adicionadas a matriz de concreto ganharam protagonismo visto as propriedades mecânicas do material que podem ser aprimoradas, como a resistência à tração na pós-fissuração, resistência ao impacto, resistência à flexão e resistência à fadiga.

As fibras de aço industriais, apesar de serem uma interessante alternativa para o reforço do concreto, ainda são componentes obtidos de chapas ou blocos de aço oriundos de processo de mineração, um processo extremamente prejudicial ao meio ambiente. Recentemente alguns estudos indicam uma potencial substituição da fibra de aço industrial por fibra de aço reciclada com origem em pneus que atingiram o final da sua vida útil, visto que possuem comportamento mecânico similar quando adicionados ao concreto (CAGGIANO et al., 2017; LEONE, et al., 2016; MASTALI; et al., 2018; PENG, et al., 2016; SIMALTI; SINGH, 2021).

A Figura 1 apresenta o material oriundo da indústria de reciclagem contendo a fibra de aço reciclada que será utilizada nessa pesquisa com partículas de outros materiais, como borracha e corda.

**Figura 1: Material oriundo da indústria de reciclagem contendo as fibras de aço recicladas e outras partículas de materiais**



Fonte: Arquivo próprio, 2021.

Para a substituição total ou parcial das fibras de aço industriais, é necessário analisar se a fibra de aço reciclada influencia no comportamento do concreto da mesma forma, ou de forma semelhante, à fibra de aço industrial.

Para alcançar estas propriedades mecânicas desejadas, especialmente a resistência à flexão na pós-fissuração, é necessário considerar os fatores de influência no comportamento do CRF, segundo Bentur e Mindess (2007):

- fibra: tipo, geometria, proporção, volume, orientação e distribuição;
- matriz: resistência e dimensão dos agregados;
- corpo de prova: tamanho, geometria, método de preparação e taxa de carregamento;

Para caracterizar o comportamento do CRF são realizados ensaios de tração na flexão. Neste ensaio, quando o concreto simples apresenta a primeira fissuração, a fibra atua como barreira à propagação de tensões. No CRF, as fibras podem atravessar as fissuras e atuar como pontes de transferência de tensão, e com isso reduzir a abertura e propagação das fissuras e, conseqüentemente, promover maior capacidade de deformação.

As Fibras de Aço Recicladas – FAR, extraídas de pneus inservíveis, são um material complexo devido à heterogeneidade das fibras, que possuem diversas variáveis que interferem em suas características mecânicas. É necessário considerar a variabilidade do material reciclado porque existem pneus reciclados de diferentes veículos, e pneus reciclados para diferentes usos, pneus mais reforçados e para uso nas cidades; causando uma variação nas dimensões dos fios de aço que os compõem. Outra questão são os processos de reciclagem, o que dificulta o levantamento de parâmetros para caracterização

das FAR. É possível incluir a metodologia de extração da FAR, também como variável, pois existem processos que submetem a FAR à queima para remoção da borracha aderida que pode reduzir a resistência à tração direta do material. Estas características interferem diretamente no resultado do compósito.

Portanto, essa pesquisa tem como objetivo apresentar uma Revisão Sistemática da Literatura – RSL sobre o CRF com adição de FAR e um programa experimental comparando o comportamento mecânico do CRF com adição de FAR e de FAI, no estado fresco e no estado endurecido; fazendo uma análise ampla entre o resultado da RSL, comparando com o resultado do programa experimental. Por fim, essa pesquisa se justifica pela dificuldade de definir as propriedades mecânicas do material reciclado e por contribuir para iniciativas sustentáveis na indústria da construção civil.

## **1.1 OBJETIVOS**

É objetivo geral dessa pesquisa analisar o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço recicladas comparando com o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço industriais.

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- Determinar uma metodologia de separação das fibras de aço recicladas úteis para o reforço do concreto;
- Analisar a influência do teor de adição de fibras de aço recicladas na trabalhabilidade e na porosidade do concreto no estado fresco e comparar com o concreto com adição de fibras de aço industriais;
- Analisar a influência do teor de adição de fibras de aço recicladas no comportamento mecânico do CRF no estado endurecido e compará-lo com o concreto com adição de fibras de aço industriais;

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

A utilização de fibras de aço recicladas de pneus inservíveis como solução para a substituição de fibras de aço industriais ainda é um campo pouco explorado, os primeiros estudos sobre o tema datam de 2017, porém é um campo de pesquisa promissor que pode contribuir para a indústria da construção civil tanto com o desempenho mecânico, como também em minimizar os impactos ambientais causados pela utilização de recursos naturais.

De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP (2021) e RECICLANIP (2021), no ano de 2020, no Brasil, foram coletados corretamente 102% do

número de pneus comercializados naquele ano, 42 milhões de unidades de passeio, evidenciando a necessidade de buscar alternativas para a incorporação adequada dos resíduos desse material.

Portanto, essa pesquisa se justifica pela crescente necessidade, em todas as indústrias, de substituir materiais oriundos de recursos naturais por materiais reciclados; pela necessidade em incorporar materiais reciclados como nova matéria prima.

### 1.3 METODOLOGIA

A fim de atingir os objetivos propostos, a pesquisa foi dividida em 2 partes, na primeira parte foi desenvolvida a Revisão Sistemática da Literatura e na segunda parte foi desenvolvido o Programa Experimental.

A pesquisa bibliográfica apresentará a síntese dos documentos analisados na RSL no campo do concreto com adição de fibras de aço recicladas e as lacunas existentes. A RSL foi realizada utilizando diferentes bases de dados, e levando em consideração a geometria da fibra, o processo de reciclagem de pneus, a influência da adição de fibra de aço reciclada nas propriedades frescas e endurecidas do concreto. As etapas da Revisão Sistemática da Literatura foram:

- a) Planejamento: Preenchimento do protocolo de pesquisa, contendo a estratégia de busca, as *strings* de busca, as bases de dados que foram utilizadas e qual software foi utilizado;
- b) Execução da Revisão sistemática: Aplicação de critérios de seleção dos artigos e critérios de extração dos artigos;
- c) Sumarização: Apresentação dos resultados obtidos.

Maiores detalhes referentes a RSL são apresentados no Capítulo 02.

O Programa experimental apresenta como resultado as principais características das fibras de aço recicladas, a análise do comportamento mecânico de corpos de prova de Concreto Reforçado com Fibras de Aço Recicladas – CRFAR. O programa experimental seguiu as seguintes etapas:

- a) Separação e caracterização das fibras de aço recicladas úteis para a adição no concreto;
- b) Caracterização dos materiais constituintes do concreto, como as FAI, agregado graúdo e agregado miúdo;
- c) Definição do traço base: Testes de misturas de concreto para a posterior elaboração do corpos-de-prova;

- d) Confeção dos corpos-de-prova: foram confeccionados 30 CP's cilíndricos e 20 CP's prismáticos;
- e) Realização dos ensaios para a compreensão do comportamento mecânico do compósito: foram realizados ensaios no estado fresco, como o ensaio de abatimento de tronco de cone e o ensaio de ar incorporado; e ensaios no estado endurecido, como o ensaio de tração por compressão diametral, compressão axial; tração na flexão com obtenção das resistências residuais;
- f) Análise dos resultados.

Maiores detalhes do programa experimental podem ser encontrados no Capítulo 03.

## 2. Revisão Sistemática da Literatura

---

Neste capítulo, primeiramente, apresenta uma breve introdução sobre o comportamento geral do concreto reforçado com fibras, indicando principais aspectos relevantes como a influência do tipo de fibra nas propriedades do CRF, dentre outras questões para contextualizar a RSL apresentada em seguida.

Já a RSL apresenta o panorama geral dos estudos envolvendo as fibras de aço recicladas. Com a sumarização dos resultados e conclusões de outros autores sobre o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras de aço recicladas.

### 2.1 INTRODUÇÃO

O Concreto Reforçado com Fibras – CRF é um material que começou a ser aprimorado nos anos 1960 a partir das pesquisas de Ludwig Hatschek dos anos 1890 e desde então, diversos pesquisadores se debruçam sobre o assunto para compreender de fato a influência da adição de fibras ao concreto, quais os impactos sobre o concreto no estado fresco e no estado endurecido e, conseqüentemente, nas propriedades finais do compósito.

A ABNT NBR 16935 (2021) define CRF como um material compósito, caracterizado por uma matriz cimentícia com fibras descontínuas dispersas aleatoriamente em meio alcalino.

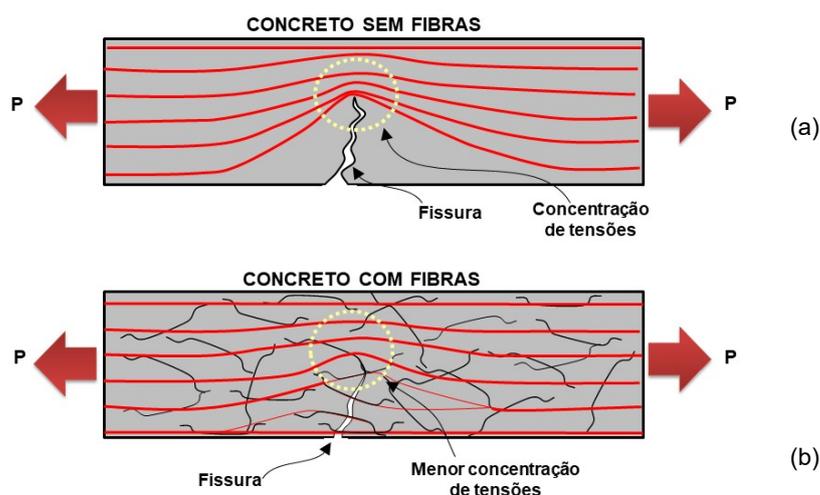
O concreto reforçado com fibras tem a capacidade potencial de incorporar melhor resistência ao fogo, controle da fissuração, resistência mecânica à tração na pós fissuração, dentre outras características físicas e mecânicas finais (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2002).

Bentur e Mindess (2007) ressaltam que as principais contribuições mecânicas da adição das fibras de aço ao concreto são: o aumento da resistência à flexão, ao cisalhamento, ao impacto e à fadiga.

No comportamento mecânico à tração direta, enquanto o concreto simples apresenta um comportamento frágil, o CRF apresenta uma maior capacidade de deformação. Devido à adição de fibras de aço, o CRF apresenta capacidade de controle de abertura e propagação de fissuras por alterar a concentração de tensões, como pode ser observado na Figura 2. No concreto simples quando surge a primeira fissura, ela funciona como uma barreira para a propagação de tensões (Figura 2 a). Já no CRF, as fibras podem cruzar as fissuras e surgir como pontes de transferência de tensão, o que minimiza a concentração de tensões na

extremidade das fissuras e com isso reduzir a abertura e propagação das fissuras, e conseqüentemente, promover maior capacidade de deformação. Esse é o papel mais importante exercido pelas fibras em adição ao concreto e depende, principalmente, da capacidade de aderência da fibra à matriz cimentícia, da distribuição das fibras e das propriedades mecânicas da fibra (CENTONZE; LEONE; AIELLO, 2012).

**Figura 2: Distribuição das tensões em (a) concreto simples e em (b) concreto reforçado com fibras de aço.**

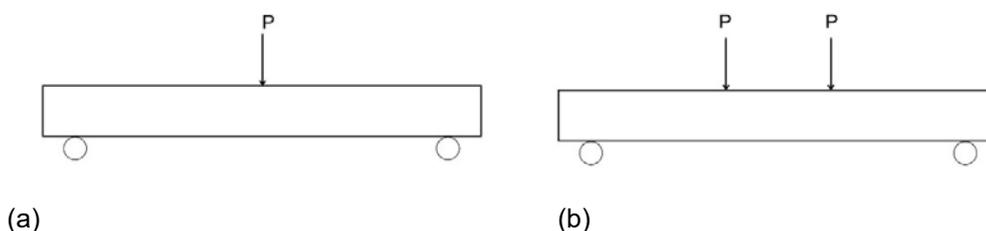


Fonte: Arquivo próprio.

### 2.1.1. Ensaios de caracterização do CRF

A fim de caracterizar o comportamento do material são executados ensaios que simulam o exposto na Figura 2, entretanto pela dificuldade em executar um ensaio de tração direta no concreto, são realizados ensaios de tração na flexão. Os ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos são executados posicionando o corpo de prova sobre 2 apoios e aplicando uma carga centrada, ensaio de flexão em 3 pontos (em inglês: Three Point Bending Test - 3PBT); ou 2 cargas, ensaio de flexão em 4 pontos (em inglês: Four Point Bending Test - 4PBT), conforme mostra a Figura 3.

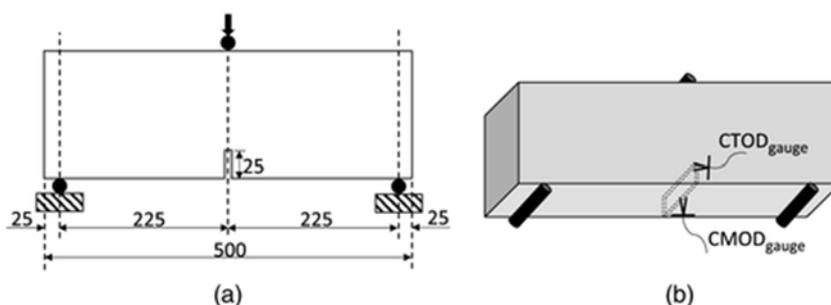
**Figura 3: Ensaio de flexão (a) em 3 pontos e (b) em quatro pontos.**



Fonte: Arquivo próprio.

As normas que regulamentam a realização desses ensaios ao redor do mundo possuem divergências em relação a parâmetros como: dimensão do corpo de prova, corpos de prova com entalhe e sem entalhe, local de monitoramento do deslocamento, dentre outras questões. Quando entalhado, o entalhe é realizado no centro do CP, como mostra a Figura 4. O local de monitoramento do deslocamento pode variar em *Crack Tip Opening Displacement* – CTOD, posicionado na face inferior do corpo-de-prova ou *Crack Mouth Opening Displacement* – CMOD, posicionado no início da fissura; como pode ser observado na Figura 4.

**Figura 4: CP prismático sob ensaio de flexão (a)dimensões de geometria, entalhe e apoios (b)localizações de monitoramento de deslocamento.**

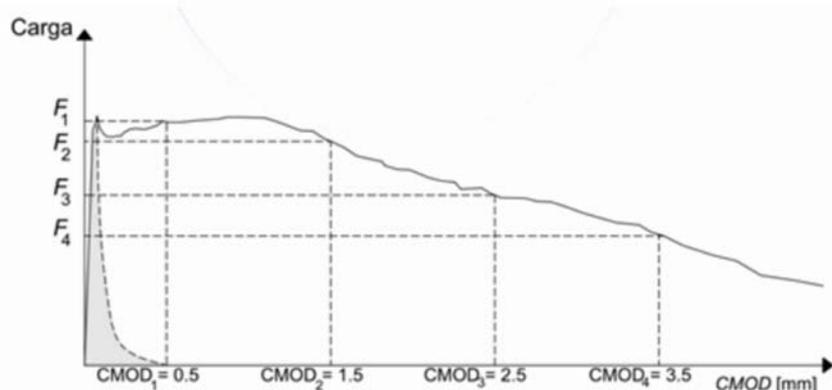


Fonte: Gali, Sharma e Subramaniam (2018).

O ensaio de tração na flexão normatizado no Brasil foi inicialmente proposto no CEB FIB (2012) em seguida a norma ABNT NBR 16940 (2021) descreveu o procedimento desse ensaio. No ensaio de tração na flexão prescrito na norma, obtém-se o gráfico de força por CMOD, onde é possível observar que mesmo após a ruptura da matriz ainda há uma capacidade resistente residual, sendo possível determinar as 4 resistências residuais do CRF, conforme apresentado na Figura 5.

O gráfico de força por CMOD apresentado na Figura 5, é caracterizado por um trecho com comportamento elástico linear e posteriormente a ruptura da matriz que representa a transferência de tensões pelas fissuras através das fibras. Na Figura 5, as forças: F1, F2, F3 e F4 são as resistências residuais do material correspondentes ao: CMOD1, CMOD2, CMOD3, CMOD4; respectivamente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16935, 2021).

Figura 5: Curva de Força - CMOD.

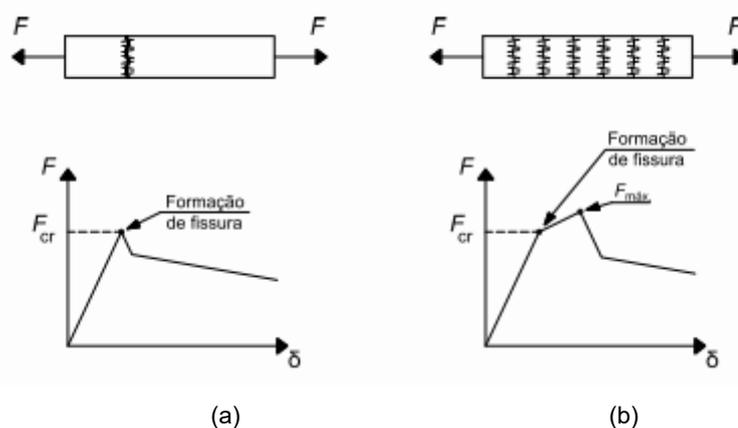


Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 16935, 2021.

Sob tração direta o CRF pode assumir dois tipos de comportamentos: *softening*, caracterizado pela redução gradual da tensão após a primeira fissura; e *hardening*, caracterizado pelo aumento inicial da resistência após o aparecimento da primeira fissura, e posteriormente ao aparecimento de múltiplas fissuras, uma queda; esses dois tipos de comportamentos são demonstrados na Figura 6.

A classificação do comportamento do compósito em *softening* e *hardening* está diretamente ligada com o volume de fibras adicionado, a adição de fibras acima do volume crítico proporciona um comportamento *hardening*, já a adição de fibras abaixo do volume crítico proporciona um comportamento *softening*. O volume crítico é definido como o teor de fibras que mantém a mesma capacidade resistente do compósito após a ruptura da matriz cimentícia.

Figura 6: Comportamentos de softening e hardening do CRF sob tração direta. (a) comportamento softening e (b) comport hardening.



No Brasil, para especificar diretrizes para a utilização de CRF em elementos estruturais, tem-se a ABNT NBR 16935 (2021), que teve sua primeira edição em fevereiro de 2021, nela especificam-se os requisitos gerais, as classificações, métodos de análise, critérios de dimensionamento, dentre outros procedimentos para a elaboração de projeto utilizando o CRF.

Por meio da ABNT NBR 16935 (2021), é possível determinar as aplicações estruturais do CRF utilizando a medida de resistência residual. A norma determina que para a substituição total ou parcial das armaduras contínuas as condições da Eq. 1 e Eq. 2 sejam atendidas.

$$f_{R1k} / f_{Lk} \geq 0,40 \quad \text{Eq. 1}$$

$$f_{R3k} / f_{R1k} \geq 0,50 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$f_{Lk}$ : Resistência característica do CRF à tração na flexão.

$f_{R1k}$ : Resistência residual característica do CRF à tração na flexão correspondente ao  $CMOD_1 = 0,5$  mm.

$f_{R3k}$ : Resistência residual característica do CRF à tração na flexão correspondente ao  $CMOD_3 = 2,5$  mm.

Para atingir essas propriedades mecânicas é necessário controlar os elementos da mistura e os métodos, definindo o tipo de fibra, um volume ótimo de fibras, relação água cimento adequada, dentre outros procedimentos. Os autores Bentur e Mindess (2007) sintetizaram os fatores de influência nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras da seguinte forma:

- Fibra: tipo, geometria, proporção, volume, orientação, distribuição;
- Matriz: Resistência, dimensão do agregado;
- Corpo de prova: tamanho, geometria, método de preparo, taxa de carregamento.

As normas e manuais de utilização contribuem para garantir a segurança na elaboração dos projetos e na execução das estruturas, favorecendo um aumento ainda maior da utilização das fibras adicionadas ao concreto. Dentre os tipos de fibras mais utilizados, as fibras de aço ganharam protagonismo nos últimos anos devido ao incremento

nas características mecânicas citadas anteriormente. A norma ABNT NBR 15530 (2019) estabelece requisitos de qualidade das fibras de aço para a adição no concreto, porém, a norma não sustenta o uso de fibras de aço recicladas.

### **2.1.2. Origem e extração das fibras de aço recicladas**

No Brasil há relatos de 2 materiais reciclados que podem dar origem às fibras de aço recicladas, seriam as chapas de aço descartadas das indústrias de eletrodomésticos e pneus inservíveis (CBL RECICLAGEM, 2021; MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS, 2018). A partir de buscas na internet, encontrou-se a empresa brasileira Locaville que produziu fibras de aço recicladas, eram fibras de aço com origem em chapas de aço descartadas da indústria de eletrodomésticos, elas eram utilizadas em misturas de concreto para pisos industriais, saíram de linha por dificuldades na compra da matéria prima, como informa a empresa Locaville (2021). Não se obteve outros relatos de empresas comercializando fibras de aço recicladas no Brasil.

Em 2007 a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP, que representa as indústrias de pneumáticos no Brasil, criou a RecicLANIP, que é responsável pela coleta e destinação correta dos pneus inservíveis no Brasil.

Diferentemente da dificuldade encontrada pela Locaville na obtenção do produto descartado, de acordo com o site da ANIP (2021), há mais de 1.000 pontos de coleta de pneus no território nacional, sendo a maior rede de coleta e destinação correta da América Latina. No ano de 2020 foram comercializados para a reposição no Brasil aproximadamente 41 milhões de unidades, e foram destinados corretamente o equivalente a mais de 42 milhões de unidades de passeio (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS, 2020; RECICLANIP, 2021).

A solicitação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais - IBAMA é que para cada pneu comercializado para fim de reposição seja descartado um pneu corretamente, portanto, os dados apresentados mostram que isso equivale ao cumprimento de mais de 100% da meta do IBAMA (2021).

No estudo desenvolvido por Floriani, Furlanetto e Sehnem (2016), que abordou o processo de coleta e reciclagem dos pneus inservíveis no Brasil, descreveu a estratégia da reciclagem da RecicLANIP que se apoia em 4 linhas de ação: estruturar, destinar, apoiar e desenvolver. Essa estratégia visa aumentar a cada ano a destinação correta de pneus inservíveis no Brasil. A Tabela 1 apresentada o ciclo de vida do pneu.

**Tabela 1: Ciclo de vida do pneu.**

<b>Fluxo</b>	<b>Descrição</b>
Fábrica	Responsável direto por toda a cadeia de suprimento do produto, inclusive sua logística reversa;
Loja	Trabalha de forma integrada, como elo para fechamento do ciclo e correta destinação;
Reforma	Oportunizando uma extensão da vida útil do pneu, com a recapagem e inserção deste novo agente ao processo;
Extração e separação de resíduos	Utilização de alguma tecnologia para a extração e separação dos materiais que compõe o pneu;
Destinação	Envolve a reutilização do produto extraído do pneu inservível de forma ambientalmente adequada.

Fonte: Adaptado de Floriani; Furlanetto; Sehnem, 2016.

Dentre as destinações ambientalmente adequadas para os resíduos de pneus estão: a utilização da borracha para servir como combustível para as indústrias de cimento e fonte de elementos metálicos, leito de drenagem em aterros, borracha para fabricação de solados de sapatos, borrachas de vedação, obras de contenção de encostas, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas, pisos industriais, tapetes para automóveis e a produção de asfalto-borracha (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS, 2021; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

Há no Brasil uma grande quantidade de pneus tendo descarte ambientalmente adequado, desse modo, as pesquisas sobre a utilização de fibras de aço extraídas de pneus inservíveis adicionadas ao concreto têm potencial de crescimento.

O objeto de origem da fibra e a forma de extração da fibra aço reciclada, determinam diversas características físicas, como rugosidade, variabilidade de diâmetro e variabilidade de comprimento. Essas características interferem diretamente no resultado final do compósito.

Os processos de extração das fibras de aço a partir de pneus inservíveis são os seguintes:

- Granulação: De acordo com o MMA e IBAMA (2017), a granulação é um processo que separa o aço da borracha por meio de peneiras com diferentes granulometrias e aproveita os dois materiais.
- Trituração: A trituração pode ser feita à temperatura ambiente, até a temperatura de 120°C, ou utilizando uma criocâmara para resfriamento. O processo é semelhante, de acordo com Lagarinhos e Tenório (2008), a

técnica consiste na redução do tamanho total do pneu, moagem e redução, e posteriormente, remoção magnética das fibras de aço. Quando o processo inclui a inserção do pneu na criocâmara para resfriamento, essa etapa é realizada após a primeira redução do tamanho do pneu. Na trituração utilizando a câmara criogênica, não há a necessidade de máquinas de trituração tão robustas e nem tanto gasto de energia, quando comparada à trituração à temperatura ambiente; o aço, o nylon e o poliéster são extraídos mais facilmente; porém, o que encarece esse processo é a necessidade do nitrogênio líquido (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). As fibras obtidas a partir da trituração possuem diâmetros, comprimentos e formas diferentes, e apresentam rugosidade na sua geometria (ZAMANZADEH; LOURENÇO; BARROS, 2015);

- Pirolise: De acordo com o MMA e IBAMA (2017), a pirólise é um processo de decomposição térmica da borracha conduzido com baixo ou nenhum oxigênio para não gerar combustão. O produto desse processo é a fibra de aço íntegra, sem borracha aderida, carbono preto e óleo (LIEW; AKBAR, 2020). Essa tecnologia de extração e de separação dos materiais que compõe o pneu ainda representa pouco mais de 1% de utilização no país, comparada às outras técnicas de processamento (MMA; IBAMA, 2017).

Comparando os processos de obtenção das fibras de aço, Liew e Akbar (2020) afirmam que as técnicas de trituração agregam maior valor ao produto final, pois apesar dessa extração de forma mecânica causar danos às fibras, foi verificado concretos com adição de FAR (fibras com geometria irregular) também resistem às tensões residuais, após a fissuração.

A forma de extração também tem muita influência na borracha aderida à fibra, na Figura 7 é possível observar essa diferença.

Não foi encontrado um estudo que calculasse e comparasse o custo dos diferentes métodos de extração das FAR.

**Figura 7: Fibras de aço recicladas extraídas por diferentes processos (a) Trituração criogênica (b) Trituração à temperatura ambiente (c) Pirólise (d) Granulação.**



Fonte: Adaptado de Liew, Akbar, 2020.

## **2.2 METODOLOGIA DA RSL**

A elaboração da RSL abordada nessa pesquisa seguiu as etapas de planejamento, com o preenchimento do protocolo; execução, com a aplicação da *string* nas bases de dados; e extração, com a sumarização das informações a partir da leitura dos documentos baixados.

Foi utilizado o software StArt, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa de Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos, como ferramenta para o desenvolvimento da Revisão Sistemática da Literatura. No software é possível executar, registrar e gerar dados de todas as etapas da RSL, como será apresentado nos tópicos a seguir.

### **2.2.1. Planejamento da RSL**

A RSL foi executada para responder as perguntas de pesquisa, avaliando a população, executando a intervenção, seguindo o controle, esperando obter os resultados para aplicar da forma como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2: Perguntas de pesquisa.**

<b>Perguntas de Pesquisa</b>	Qual a efetividade da utilização das fibras de aço recicladas no reforço do concreto?  Qual a influência do teor de adição de fibras de aço recicladas no comportamento mecânico do concreto?  As fibras de aço industriais adicionadas ao concreto, podem ser substituídas, total ou parcialmente, pelas fibras de aço recicladas?
<b>População</b>	Estudos sobre concreto reforçado com fibras de aço recicladas, sem restrição de período.
<b>Intervenção</b>	Trabalhos na área de engenharia civil, sobre concreto reforçado com fibras de aço recicladas.
<b>Controle</b>	Comparar a fibra de aço reciclada com a fibra de aço tradicional (industrializada).
<b>Resultados</b>	Compreender o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço recicladas a partir de pneus / Compreender a influência do teor de fibras nesse comportamento / Comparar o comportamento mecânico entre o CRFA e o CRFR.
<b>Aplicação</b>	Observar boas práticas para aplicar ao programa experimental que será desenvolvido posteriormente à RSL / Contribuir com pesquisas futuras na área de concreto reforçado com fibras de aço recicladas.

A Tabela 2 apresentada norteou as etapas seguintes de planejamento e a partir dessas definições foram escolhidas palavras-chave para montar a *string* de busca, sendo elas:

- a) "Fiber Reinforced Concrete";
- b) "Recycled steel fiber reinforced concrete";
- c) "Steel fibers";
- d) "Recycled steel fiber";
- e) "Steel fiber from waste tires";
- f) "Waste tires".

O critério de escolha das bases de busca foi ter artigos publicados sobre o tema da pesquisa e ser uma base de dados ampla e relevante. As bases de dados escolhidas foram:

- a) *Scielo*;
- b) *Science Direct*,
- c) *Engineering Village*.

Nas bases de busca foram selecionados apenas documentos em língua inglesa para que a RSL pudesse ser replicada por um número máximo de pesquisadores.

No protocolo também foram estabelecidos os critérios de inclusão e exclusão dos documentos, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3: Critérios de inclusão e exclusão.**

<b>Inclusão (I)</b>	<b>Exclusão (E)</b>
Trabalhos que avaliem o comportamento de concreto reforçado com fibras de aço recicladas de pneus a partir de ensaios experimentais	Trabalhos que não avaliem o comportamento de concreto reforçado com fibras de aço recicladas de pneus a partir de ensaios experimentais
Trabalhos em Inglês	Trabalhos que não sejam em Inglês.
Trabalhos que estejam integralmente disponíveis nas bases de dados.	Trabalhos que não estejam disponíveis integralmente nas bases de dados.

A seleção inicial foi feita com base no resumo e título dos estudos. Para serem aceitos foi necessário obedecer a todos os critérios de inclusão e para serem excluídos deve se enquadrar em um dos critérios de exclusão. Os tipos de documentos aceitos foram relatos de experimentos controlados e estudos primários.

Como critério de qualidade, foi estabelecido que para ser aceito o estudo deveria ter sido publicado em periódico ou anais de eventos com revisão por pares quando se referir a artigos e ter sido aprovado por banca examinadora quando se referir a trabalhos de conclusão de curso, mestrado ou doutorado.

No protocolo também foi estabelecido a sequência de execução da RSL, o método de execução de cada etapa, os responsáveis pela revisão e de que forma seria dada início à próxima etapa.

A aprovação da etapa de planejamento da RSL, com o preenchimento do protocolo (descrito nesse tópico) foi executada pelo autor principal desse estudo e revisado pelo orientador.

### **2.2.2. Execução**

Foram executadas a combinação das *strings* de busca em cada uma das bases de dados:

- a) "Recycled steel fibers";
- b) "recycled steel fiber reinforced concrete";
- c) "fiber reinforced concrete" AND "waste tires".

A partir da lista de estudos retornados, foi analisado o título de cada um dos estudos, descartando aqueles que claramente não estavam relacionados à estratégia de busca, ou que não preenchiam os Critérios de Inclusão, Critérios de Qualidade ou que estavam relacionados aos Critérios de Exclusão definidos. Estudos excluídos nesta fase não foram armazenados. Após essa análise prévia o segundo autor revisou o que foi feito pelo primeiro autor.

Posteriormente, foi analisado o resumo dos estudos. A partir desta leitura, foram avaliados os critérios de Inclusão, Exclusão e Qualidade novamente. Os estudos excluídos nesta etapa foram armazenados para posterior consulta na planilha de coleta de dados.

Como resultado da execução da RSL se obteve a lista completa dos documentos.

### **2.2.3. Extração**

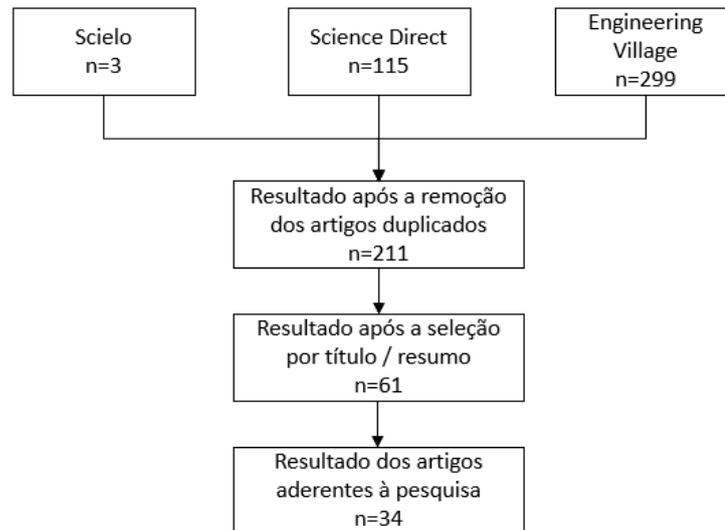
Na etapa da extração, foi lido por completo os estudos que foram selecionados na fase da execução, e foi avaliado a qualidade dos estudos e realizado a extração dos dados básicos; como: comprimento equivalente, dimensão, formato, borracha aderida, aplicação, volume de fibras, processo de extração, ano de publicação, resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão; de caracterização do estudo, bem como os dados específicos relacionados às perguntas de pesquisa, preenchendo a planilha de coleta de dados.

Após finalizada a extração dos dados, foi analisada a resistência do concreto reforçado com fibras de aço recicladas sob as ações de compressão, tração, flexão e cisalhamento.

## **2.3 RESULTADOS DA RSL**

A partir do planejamento, com o preenchimento do protocolo; execução da RSL, com a aplicação das *strings* nas bases de dados; e extração, com a sumarização dos resultados; obteve-se os resultados apresentados na Figura 8.

**Figura 8: Resultados obtidos na RSL.**

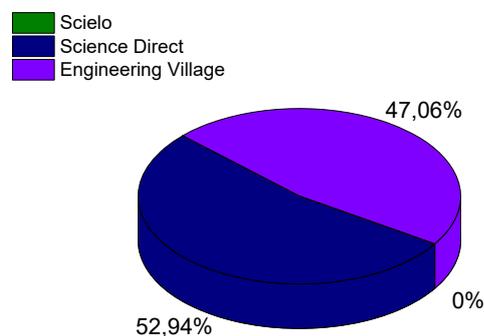


Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar, que a soma dos documentos obtidos nas bases de dados é 417; após a exclusão dos documentos duplicados, obteve-se o número de 211 documentos; ou seja, haviam 206 documentos duplicados. Dos 61 documentos selecionados por título e resumo apenas 34 eram aderentes à pesquisa, pois, apresentavam um programa experimental detalhado contemplando os ensaios de compressão, tração e flexão.

Os 34 documentos aderentes à pesquisa e utilizados na fase de extração estavam distribuídos nas bases de busca como mostra a Figura 9.

**Figura 9: Distribuição da quantidade de documentos selecionado por base de dados.**

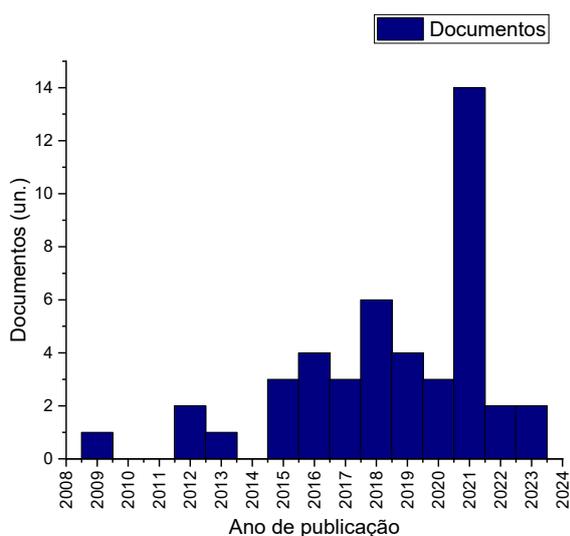


Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar que 53% dos documentos selecionados estavam na base de busca Science Direct, 47% na Engineering Village e que não houve documento selecionado na Scielo.

Quanto ao avanço do número de publicações sobre o tema da pesquisa ao longo dos anos, a Figura 10 apresenta a distribuição das publicações ao longo dos anos.

**Figura 10: Distribuição da quantidade de publicações por ano de publicação de documentos sobre o tema da pesquisa.**

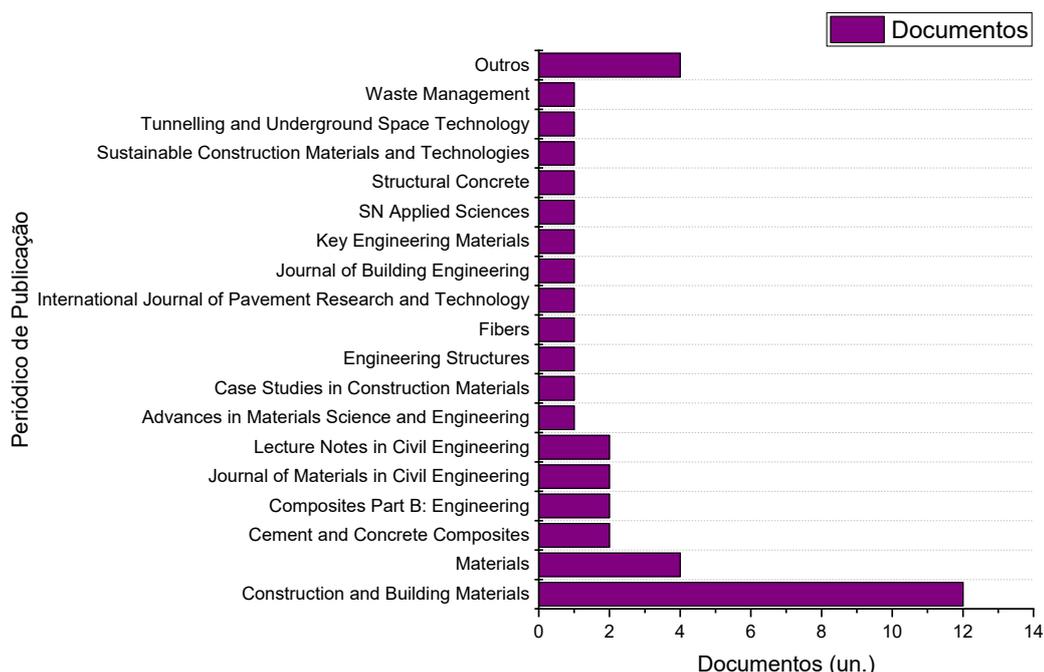


Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar que o gráfico apresenta crescimento de 76% de publicações no ano de 2021 comparada a média dos anos anteriores, porém, houve um decréscimo das publicações sobre o tema nos anos de 2022 e 2023.

A Figura 11 apresenta a distribuição dos documentos selecionados por periódico onde foram publicados. É possível observar os periódicos de maior importância para o tema da pesquisa. A quantidade de publicações no Construction and Building Materials representam 30% do total de documentos selecionados, se destacando dos demais periódicos. Os classificados como "outros", que aparecem na figura, são publicações de documentos em congressos.

**Figura 11: Relevância dos periódicos em número de publicações sobre o tema da pesquisa.**



Fonte: Arquivo próprio.

## 2.4 SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir dos documentos aderentes à pesquisa levantou-se dados referentes aos estudos experimentais elaborados pelos autores e as principais conclusões sobre seus respectivos resultados. Para a apresentação dos resultados experimentais compilou-se os dados nas Tabela 4, Tabela 6 e Tabela 7 que serão apresentadas a seguir, onde:

- SF: Sem Fibras;
- FAR: Fibra de Aço Reciclada;
- FAI: Fibra de Aço Industrial;
- SP: Aditivo super plastificante;
- l: Comprimento médio identificado nos documentos analisados;
- d: Diâmetro médio identificado nos documentos analisados;
- l/d: Fator Forma;
- I.D.: Identificação do tipo de fibra;
- a/c: Fator água/cimento;
- $f_c$ : Resistência do concreto à compressão;
- $f_{ct}$ : Resistência do concreto à tração;
- E: Módulo de elasticidade.
- $f_s$ : resistência do aço da fibra à tração

A RSL selecionou artigos que realizaram estudos experimentais de misturas híbridas, com adição de fibras de aço reciclada e fibras de aço industriais, pois esses estudos (no geral) relatam também os resultados das amostras de referência, com 100% da adição de fibras de aço recicladas e 0% de adição de fibras de aço industriais e o contrário. Devido à complexidade da análise das misturas híbridas, as tabelas com os valores das misturas e resultados sumarizados estarão contidos no Apêndice A dessa pesquisa.

Foram inseridos nessa planilha apenas resultados de corpos de prova de concreto que variaram o teor das fibras relatadas, pois diversos estudos os quais tinham diferentes tipos de agregados e diferentes adições ao cimento variaram esses componentes e mantiveram o teor das fibras, com isso os resultados experimentais variam. Nesse caso foi utilizado o valor de referência de cada estudo como base.

#### **2.4.1. Propriedades das fibras de aço recicladas**

A sumarização dos resultados experimentais referentes às propriedades das fibras de aço recicladas dos documentos aderentes à pesquisa está apresentada na Tabela 4: Características do concreto e das fibras utilizadas nos programas experimentais dos documentos selecionados na RSL.

**Tabela 4: Características do concreto e das fibras utilizadas nos programas experimentais dos documentos selecionados na RSL.**

Autor	Ano	Concreto					Características da fibra						
		$f_c$ (MPa)	a/c	SP	Abatimento (mm)	I.D.	Processo de extração	Formato	l (média mm)	d (média mm)	l/d	$f_s$ (MPa)	Qnt. (%/vol.)
Abd-Elrahman et al.	2023	168	0,28	Sim	111	FAR	Resfriamento	Lisa	12	0,60	20	-	0,500
		163	0,28	Sim	110	FAR	Resfriamento	Lisa	12	0,60	20	-	1,000
		162	0,28	Sim	108	FAR	Resfriamento	Lisa	12	0,60	20	-	1,500
		160	0,28	Sim	107	FAR	Resfriamento	Lisa	12	0,60	20	-	2,000
Yao et al.	2023	45,50	0,40	Sim	-	SF	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,000
		46,80	0,40	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,250
		48,30	0,40	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,500
		49,70	0,40	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,750
		47,70	0,43	Sim	-	SF	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,000
		49,80	0,43	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,250
		51,10	0,43	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,500
		52,20	0,43	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,750
		49,90	0,45	Sim	-	SF	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,000
		52,20	0,45	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,250
		53,90	0,45	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,500
		54,90	0,45	Sim	-	FAR	-	Frisada	21	0,23	91,30	-	0,750
Al-musawi et al.	2022	38,60	0,40	Sim	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		43,10	0,41	Sim	-	FAR	-	-	21	0,20	105	2600	0,570
		46,50	0,35	Sim	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		51,50	0,36	Sim	-	FAR	-	-	21	0,20	105	2600	0,570
Zeybek et al.	2022	30,00	0,60	Não	180	SF	-	Lisa	35	-	-	-	0,000
		34,00	0,60	Não	150	FAR	-	Lisa	35	-	-	-	1,000

		38,00	0,60	Não	80	FAR	-	Lisa	35	-	-	-	2,000
		43,00	0,60	Não	50	FAR	-	Lisa	35	-	-	-	3,000
<b>Fantilli, Orfeo e Caldentey</b>	<b>2021</b>	26,90	0,41	Sim	-	SF	Trituração	-	15	0,15	100	-	0,00
		36,40	0,41	Sim	-	FAR	Trituração	-	15	0,15	100	-	0,500
		37,50	0,41	Sim	-	FAR	Trituração	-	15	0,15	100	-	1,000
<b>Kumar et al.</b>	<b>2021</b>	35,52	0,45	Não	79,5	SF	-	-	30	0,50	60	-	0,000
		36,64	0,45	Não	79,5	FAR	-	-	30	0,50	60	-	0,500
		37,44	0,45	Não	79,5	FAR	-	-	30	0,50	60	-	1,000
		35,92	0,45	Não	79,5	FAR	-	-	30	0,50	60	-	1,500
<b>Isa, Pilakoutas e Guadagnini,</b>	<b>2021</b>	158,00	-	-	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		158,00	-	-	-	FAR	-	Frisada	11,6	0,25	46	-	2,000
		160,00	-	-	-	FAR	-	Frisada	11,6	0,25	46	-	3,000
		165,00	-	-	-	FAR	-	Frisada	11,6	0,25	46	-	4,000
<b>Sahraei, Omidinasab, e Abdalikia</b>	<b>2021</b>	38,50	0,42	Não	120	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		42,00	0,42	Não	80	FAR	-	-	40	0,25	160	1100	0,500
		43,50	0,42	Não	55	FAR	-	-	40	0,25	160	1100	1,000
<b>Sharghi et al.</b>	<b>2021</b>	52,20	0,35	Sim	120	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		62,00	0,37	Sim	120	FAR	-	-	20	0,20	100	1600	0,375
		64,30	0,37	Sim	120	FAR	-	-	20	0,20	100	1600	0,500
		65,30	0,37	Sim	100	FAR	-	-	20	0,20	100	1600	0,625
		65,90	0,37	Sim	100	FAR	-	-	20	0,20	100	1600	0,750
<b>Simalti e Singh</b>	<b>2021</b>	31,24	-	Sim	760	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		39,67	-	Sim	735	FAI	-	-	30	0,90	33	-	0,500
		40,50	-	Sim	725	FAI	-	-	30	0,90	33	-	1,000
		44,23	-	Sim	720	FAI	-	-	30	0,90	33	-	1,500
		33,45	-	Sim	740	FAR	Trituração	-	41,9	0,22	190	-	0,500
		34,83	-	Sim	730	FAR	Trituração	-	41,9	0,22	190	-	1,000

		35,93	-	Sim	720	FAR	Trituração	-	41,9	0,22	190	-	1,500
<b>Younis</b>	<b>2021</b>	-	0,50	Sim	74	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		-	0,50	Sim	70	FAR	-	lisa	30	0,25	120	1900	0,150
		-	0,50	Sim	59	FAR	-	lisa	30	0,25	120	1900	0,300
		-	0,50	Sim	49	FAR	-	lisa	30	0,25	120	1900	0,450
<b>Carrillo et al.</b>	<b>2020</b>	42,23	-	Não	240	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		41,43	-	Não	186	FAI	-	Gancho	50	1,01	50	-	0,190
		39,96	-	Não	77	FAI	-	Gancho	50	1,01	50	-	0,380
		37,76	-	Não	54	FAI	-	Gancho	50	1,01	50	-	0,760
		41,66	-	Não	201	FAR	-	lisa	31	0,23	135	-	0,190
		42,20	-	Não	107	FAR	-	lisa	31	0,23	135	-	0,380
		41,60	-	Não	42	FAR	-	lisa	31	0,23	135	-	0,760
<b>Golpasand, Farzam e Shishvan</b>	<b>2020</b>	28,60	0,43	Não	-	SF	-	-	30	0,85	35	-	0,000
		28,37	0,43	Não	-	FAR	-	Frisada	30	0,85	35	-	0,250
		28,10	0,43	Não	-	FAR	-	Frisada	30	0,85	35	-	0,500
		28,10	0,43	Não	-	FAR	-	Frisada	30	0,85	35	-	0,750
<b>Zhang e Gao</b>	<b>2020</b>	49,69	0,42	Não	52,5	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		52,46	0,42	Não	52,5	FAR	-	Frisada	35	1,00	35	1260	1,200
		54,59	0,42	Não	52,5	FAR	-	Frisada	35	1,00	35	1260	1,800
		54,64	0,42	Não	52,5	FAR	-	Frisada	35	1,00	35	1260	2,400
		57,69	0,42	Não	52,5	FAR	-	Frisada	35	1,00	35	1260	3,000
		61,62	0,42	Não	52,5	FAR	-	Frisada	35	1,00	35	1260	3,600
		51,55	0,42	Não	52,5	FAI	-	Gancho	36	1,00	36	990	0,500
		53,36	0,42	Não	52,5	FAI	-	Gancho	36	1,00	36	990	1,000
		56,85	0,42	Não	52,5	FAI	-	Gancho	36	1,00	36	990	1,500
		60,68	0,42	Não	52,5	FAI	-	Gancho	36	1,00	36	990	2,000
		61,99	0,42	Não	52,5	FAI	-	Gancho	36	1,00	36	990	2,500

<b>Frazão et al.</b>	2019	-	0,37	Sim	510	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		-	0,37	Sim	510	FAR	Trituração	Frisada	23	0,22	105	2570	0,750
<b>Mastali et al.</b>	2019	56,14	0,38	Sim	-	FAR	Trituração	-	50	0,15	333	-	0,500
		64,59	0,38	Sim	-	FAR	Trituração	-	50	0,15	333	-	1,000
<b>Yang et al.</b>	2019	135,50	0,18	Sim	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		145,10	0,18	Sim	-	FAI	-	Gancho	35	0,55	-	1100	1,220
		139,80	0,18	Sim	-	FAI	-	Gancho	35	1,00	-	900	1,220
		154,30	0,18	Sim	-	FAI	-	Gancho	30	1,00	-	1900	1,220
		141,30	0,18	Sim	-	FAR	Outros	Frisada	40	1,00	-	1250	1,220
		130,20	0,18	Sim	-	FAR	Queima	Frisada	40	1,10	-	1900	1,220
<b>Leone et al.</b>	2018	33,61	0,54	Sim	220	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		32,60	0,54	Sim	210	FAR	-	Frisada	13,94	0,25	56	-	0,460
		32,32	0,54	Sim	200	FAI	-	-	30	0,60	50	-	0,460
<b>Mastali et al.</b>	2018	51,05	0,38	Sim	650	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		79,31	0,38	Sim	650	FAI	-	Gancho	-	-	47	1300	1,500
		72,70	0,38	Sim	650	FAR	-	Ondulada	50	0,15	333	-	1,500
<b>Mastali et al.</b>	2018	51,08	0,38	Sim	600	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		79,49	0,38	Sim	600	FAI	-	-	-	-	47	1300	1,500
		72,81	0,38	Sim	600	FAR	-	-	50	0,15	333	-	1,500
<b>Najim, Saeb e Al-Azzawi</b>	2018	60,00	0,49	Sim	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		62,00	0,49	Sim	-	FAR	Trituração	Lisa	50	-	50	781,3	0,400
		62,50	0,49	Sim	-	FAR	Trituração	-	50	-	50	781,3	0,600
		65,00	0,49	Sim	-	FAR	Trituração	-	50	-	50	781,3	0,800
<b>Vistos et al.</b>	2018	42,59	0,51	Sim	175	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		39,01	0,51	Sim	175	FAI	-	-	33	0,55	60	1200	0,500
		37,37	0,51	Sim	175	FAR	Trituração	-	12	0,27	44	2235	0,500
<b>Baricevic et al.</b>	2017	60,40	0,46	Sim	187	FAI	-	Gancho	35	0,55	64	1100	0,250

		54,80	0,46	Sim	193	FAI	-	Gancho	35	0,55	64	1100	0,375
		57,70	0,46	Sim	187	FAR	Trituração	Frisada	10,62	0,18	59	2000	0,375
<b>Caggiano et al.</b>	<b>2017</b>	30,37	0,49	Sim	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		27,39	0,49	Sim	-	FAI	-	Gancho	33	0,55	60	1200	0,750
		22,10	0,49	Sim	-	FAR	Trituração	Frisada	26,17	0,25	105	-	0,750
<b>Rashid e Balouch</b>	<b>2017</b>	24,23	0,52	Não	101	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		25,30	0,52	Não	85	FAR	Queima	lisa	38	1,31	29	780	0,400
		25,97	0,52	Não	76	FAR	Queima	lisa	38	1,31	29	780	0,650
		26,50	0,52	Sim	77	FAR	Queima	lisa	38	1,31	29	780	1,000
<b>Leone et al.</b>	<b>2016</b>	34,03	0,53	Sim	225	SF	-	-	-	-	N.A.	-	0,000
		35,71	0,53	Sim	205	FAR	-	-	-	-	128	-	0,300
		34,32	0,53	Sim	200	FAI	-	-	-	-	50	-	0,300
<b>Mastali e Dalvand</b>	<b>2016</b>	58,44	0,44	Sim	632	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		62,33	0,44	Sim	612	FAR	-	Ondulada	40	0,15	267	-	0,250
		66,00	0,44	Sim	601	FAR	-	Ondulada	40	0,15	267	-	0,500
		68,34	0,44	Sim	581	FAR	-	Ondulada	40	0,15	267	-	0,750
<b>Peng et al.</b>	<b>2016</b>	135,50	0,18	Sim	250	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		145,10	0,18	Sim	250	FAI	-	Gancho	35	0,55	64	1100	0,375
		139,80	0,18	Sim	250	FAI	-	Gancho	35	1,00	35	900	0,375
		154,30	0,18	Sim	250	FAI	-	Gancho	30	1,00	30	1900	0,375
		141,30	0,18	Sim	250	FAR	Pirolise	Frisada	40	1,00	40	> 1250	0,375
		130,2	0,18	Sim	250	FAR	Pirolise	Frisada	40	1,10	36	1900	0,375
<b>Martinelli, Caggiano, e Xargay</b>	<b>2015</b>	42,59	0,51	Sim	175	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		39,01	0,51	Sim	175	FAI	-	Gancho	33	0,55	60	1200	0,500
		37,37	0,51	Sim	175	FAR	-	Frisada	12	0,27	44	-	0,500
<b>Peng et al.</b>	<b>2015</b>	135,50	0,18	Sim	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		145,10	0,18	Sim	-	FAI	-	Gancho	35	0,55	64	1100	0,750

		139,80	0,18	Sim	-	FAI	-	Gancho	35	1,00	35	900	0,750
		154,30	0,18	Sim	-	FAR	-	Frisada	30	1,00	30	1900	0,750
		141,30	0,18	Sim	-	FAR	-	Frisada	35	1,00	35	1900	0,750
<b>Zamazadeh, Lourenço e Barros</b>	<b>2015</b>	-	0,18	Sim	-	FAR	Criogênico	Frisada	-	-	-	-	0,560
		-	0,19	Sim	-	FAR	Criogênico	Frisada	-	-	-	-	0,750
		-	0,17	Sim	-	FAR	Criogênico	Frisada	-	-	-	-	1,125
		-	0,18	Sim	-	FAI	-	-	-	-	-	-	0,560
		-	0,19	Sim	-	FAI	-	-	-	-	-	-	0,750
		-	0,17	Sim	-	FAI	-	-	-	-	-	-	1,125
<b>Centonze, Leone e Aiello</b>	<b>2012</b>	31,63	0,53	Sim	215	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		39,00	0,53	Sim	220	FAR	Trituração	Frisada	31,4	0,24	131	-	0,230
		39,68	0,53	Sim	210	FAR	Trituração	Frisada	31,4	0,24	131	-	0,460
		29,01	0,53	Sim	205	FAI	-	-	40	0,60	67	-	0,460
<b>Centonze et al.</b>	<b>2012</b>	34,03	0,53	Sim	225	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		35,71	0,53	Sim	205	FAR	-	Frisada	-	-	-	-	0,300
		34,32	0,53	Sim	200	FAI	-	-	-	-	50	-	0,300
<b>Graeff et al.</b>	<b>2012</b>	-	0,35	Não	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		-	0,35	Não	-	FAR	-	Frisada	12,5	0,20	63	2000	0,586
		-	0,35	Não	-	FAR	-	Frisada	12,5	0,20	63	2000	1,758
		-	0,50	Não	-	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		-	0,50	Não	-	FAI	-	Cone	54	0,670	81	1100	0,643
		-	0,50	Não	-	FAR	-	Frisada	12,5	0,20	63	2000	0,643
		-	0,52	Não	-	FAR	-	Frisada	12,5	0,20	63	2000	1,916
<b>Aiello et al.</b>	<b>2009</b>	39,08	0,49	Sim	70	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
		40,42	0,49	Sim	50	FAR	Trituração	Frisada	26	0,26	101	2377	0,13
		32,24	0,50	Sim	40	FAR	Trituração	Frisada	26	0,26	101	2377	0,15
		34,87	0,50	Sim	20	FAR	Trituração	Frisada	26	0,26	101	2377	0,19

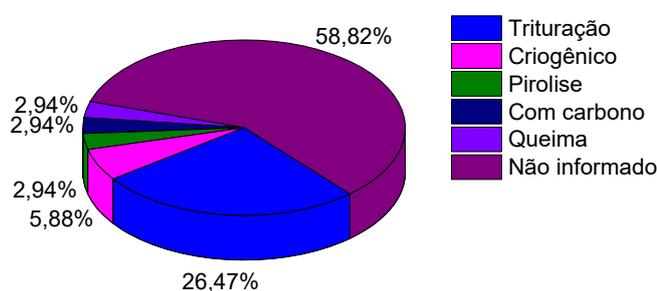
34,60	0,50	Sim	0	FAR	Trituração	Frisada	26	0,26	101	2377	0,26
33,36	0,51	Sim	20	FAR	Trituração	Frisada	26	0,26	101	2377	0,19
43,73	0,50	Sim	0	FAR	Trituração	Frisada	26	0,26	101	2377	0,26
32,07	0,54	Sim	240	SF	-	-	-	-	-	-	0,000
38,47	0,54	Sim	240	FAR	Trituração	Frisada	26	0,26	101	2377	0,230
37,58	0,54	Sim	190	FAR	Trituração	Frisada	26	0,26	101	2377	0,460
38,56	0,54	Sim	240	FAI	-	-	40	0,60	67	-	0,400

Fonte: Arquivo próprio.

A partir da análise dos documentos foi possível observar as propriedades das fibras de aço recicladas mais recorrentes como o formato, o método de reciclagem, método de separação e a resistência à tração direta.

Os processos de reciclagem e extração das fibras de aço dos pneus inservíveis relatados nos documentos analisados estão apresentados na Figura 12, sendo o processo de trituração o mais recorrente, seguido pelos processos criogênico e pirolise. As características e etapas dos processos de extração com carbono e de queima não foram descritos nos estudos nos quais foram citados.

**Figura 12: Processos de extração da fibra de aço reciclada por documento analisado.**



Fonte: Arquivo próprio.

O processo de extração das FAR dos pneus inservíveis por meio de trituração gera um material heterogêneo, com partículas de borracha, cordas e hastes com grandes espessuras ( $e > 5,0$  mm); materiais inadequados a serem inseridos no concreto. Parte dos documentos analisados na RSL apresentam metodologias de separação das fibras de aço úteis para a adição ao concreto, como mostra a Tabela 5.

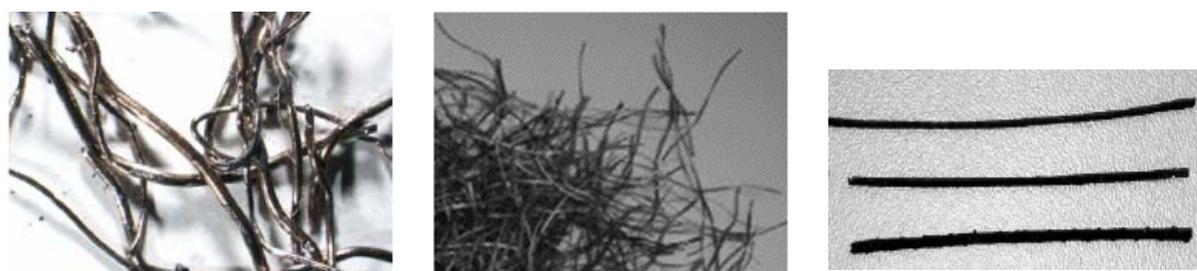
**Tabela 5: Métodos de separação das FAR apresentados nos documentos analisados na RSL**

Autor	Ano	Procedimento de Extração dos pneus	Separação	
			Método	Objetivo
Aiello et al.	2009	Trituração	Eletromagnética	Separar as fibras de aço das borrachas
Awolusi et al.	2019	Trituração	Corte manual	Obter o fator fôrma desejado
Baricevic, Bjegovic e Skazlic	2017	Trituração	Não realizou separação	Inserir a fibra conforme foi extraída
Caggiano et al.	2017	Trituração	Separação manual	Retirar pedaços de aço muito grandes
Centonze, Leone, Aiello	2012	Trituração	Eletromagnética	Separar as fibras de aço das borrachas
Frazão et al.	2019	Trituração	Eletromagnética	Separar as fibras de aço das borrachas
Isa et al.	2020	Trituração	Peneiramento mecânico	Separar as fibras de aço da borracha, das impurezas e das fibras de aço curtas
Martinelli, Caggiano e Xargay	2015	Trituração	Separação manual	Separar as fibras de aço das borrachas e hastes de aço

Após a separação das FAR úteis os documentos apresentam uma análise das características geométricas das FAR. Para isso, são realizados ensaios de caracterização prescritos de acordo com as normas regulamentadoras dos locais os quais foram desenvolvidas as pesquisas. Em geral foram relatados: o ensaio de tração direta no arame de aço, medição de comprimento, medição de diâmetro e cálculo do fator forma da fibra (comprimento dividido pelo diâmetro), e classificação do formato.

Nos documentos analisados observou-se que os principais termos utilizados para classificar as fibras em relação a seu formato são as fibras frisadas, corrugadas, onduladas, lisas ou com ganchos. As imagens das fibras correspondentes aos termos de classificação estão apresentadas na Figura 13.

**Figura 13: Diferentes formatos das fibras de aço recicladas relatados nos estudos classificados com: (a)Frisada (b)Ondulada (c)Lisa**



(a)

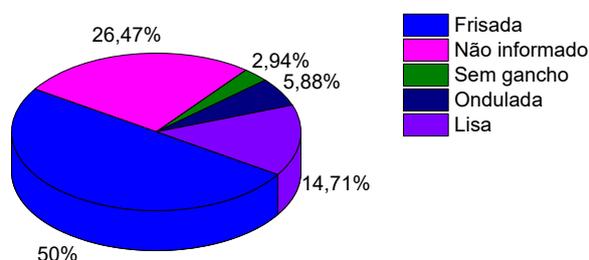
(b)

(c)

Fonte: (BARICEVIC; BJEGOVIC; SKAZLIC, 2017; MASTALI; DALVAND; SATTARIFARD; ILLIKAINEN, 2018; NAJIM; SAEB; AL-AZZAWI, 2018).

O formato da fibra de aço recicladas utilizadas de forma mais frequentes nos documentos estão apresentadas na Figura 14.

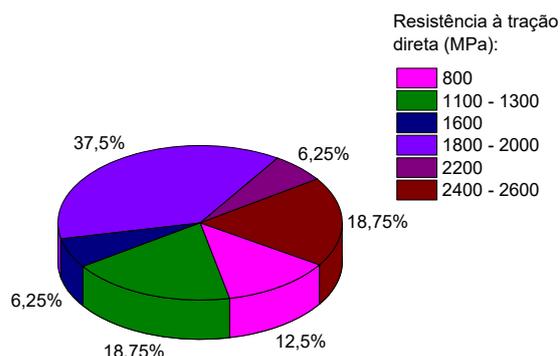
**Figura 14: Frequência do formato das fibras de aço recicladas.**



Fonte: Arquivo próprio.

A Figura 15 apresenta os resultados dos ensaios de tração direta nas fibras de aço recicladas por frequência de documento analisado. Os valores apresentados nos gráficos a seguir são valores médios de cada documento analisado, pois como as fibras são um material reciclado, elas variam significativamente nas dimensões e na resistência.

**Figura 15: Frequência de documentos analisados por resistência à tração direta das fibras de aço recicladas.**



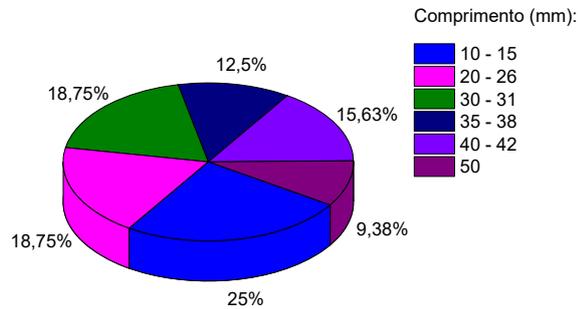
Fonte: Arquivo próprio.

Como pode ser observado na Figura 15 é possível ver uma variação de resistência das RSF que pode ser dividida em 3 grupos principais, as fibras na faixa de resistência de 1000 a 1300 MPa, representando 19% dos resultados; 1800 a 2000 MPa, representando 37% dos resultados; e 2400 a 2600 MPa, representando 19% dos resultados.

Com relação a variação da resistência à tração das fibras de aço recicladas a única menção à essa variação foi no estudo desenvolvido por (YANG; PENG; SHUI; *et al.*, 2019) que utilizou 2 tipos de fibras de aço recicladas para a elaboração dos CP's e destacou que as fibras de aço recicladas que continham borracha aderida e foram expostas à uma temperatura de 450°C para a extração da borracha apresentaram uma perda de desempenho à tração.

A Figura 16 apresenta os resultados da medição do comprimento das fibras nos documentos analisado. Nela é possível observar que existem 4 grupos de comprimento mais recorrentes nos documentos, a faixa de 10 à 15 mm, representando 25% dos resultados; a faixa de 20 à 26mm, representando 19% dos resultados; a faixa de 30 à 31mm, representando 19 % dos resultados; e a faixa de 40 à 42 mm, representando 16% dos resultados.

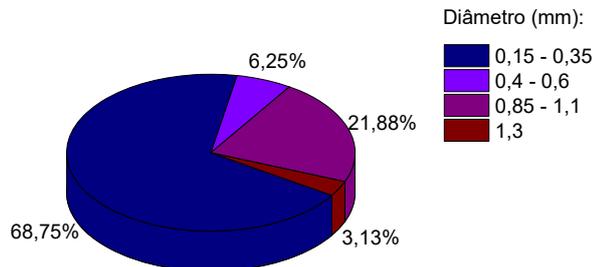
**Figura 16: Frequência de documentos analisados por comprimento das fibras de aço recicladas.**



Fonte: Arquivo próprio.

Elaborou-se o gráfico representado na Figura 17 que apresenta o diâmetro medido nas fibras de aço recicladas por frequência de documentos. É possível observar que a faixa de resultados entre 0,15 a 0,30 mm de diâmetro representa 67,74% dos resultados.

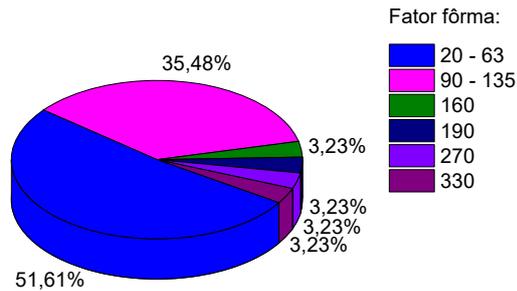
**Figura 17: Frequência de documentos analisados por diâmetro das fibras de aço recicladas.**



Fonte: Arquivo próprio.

A Figura 18 apresenta o valor do fator fôrma relatados nos documentos por frequência nos documentos. A faixa de valores de fator fôrma de 20 à 63 representam 51% dos documentos analisados; a outra faixa de valores mais recorrente está entre 90 e 135 de fator de fôrma, o que representa 35% dos documentos analisados.

**Figura 18: Frequência de documentos analisado por fator fôrma (l/d).**



Fonte: Arquivo próprio.

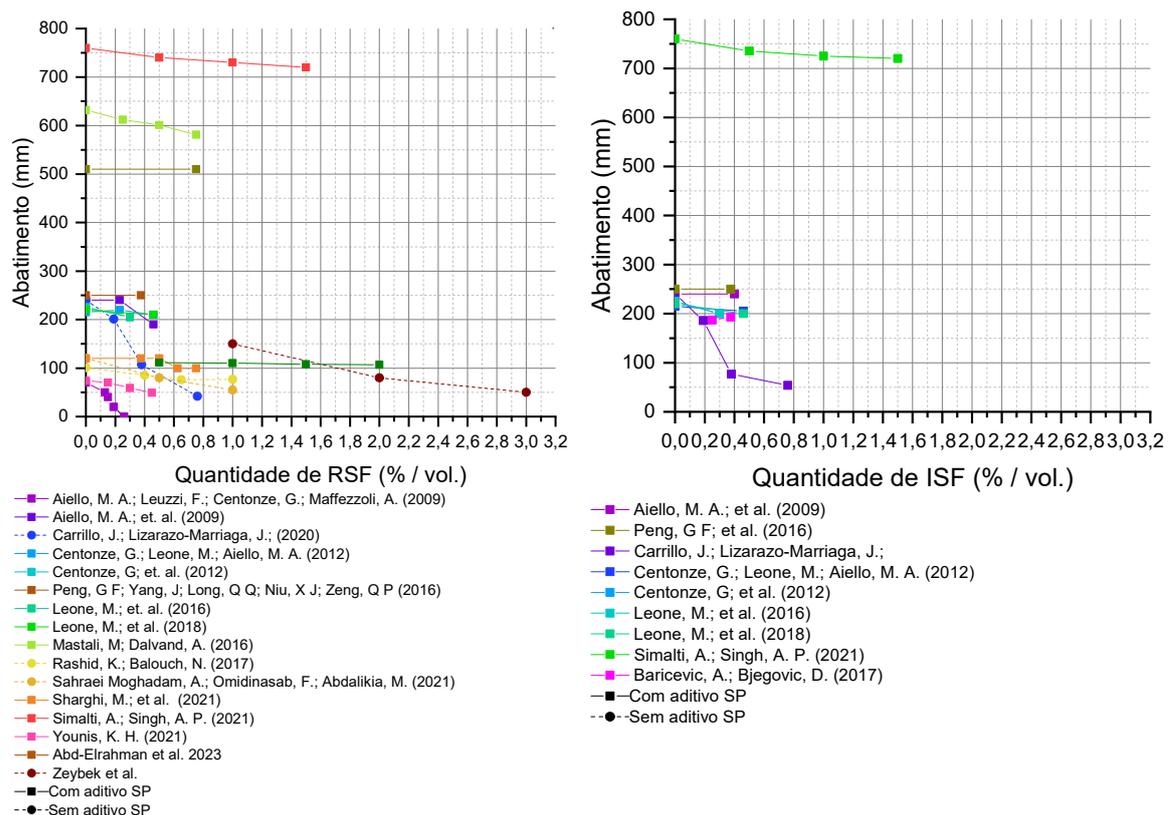
#### 2.4.2. Comportamento no estado fresco

O aumento da porcentagem de fibras de aço recicladas por volume de concreto diminui a trabalhabilidade da mistura quando comparada ao concreto sem adição de fibras (AIELLO et al., 2009; CARRILLO; LIZARAZO-MARRIAGA; LAMUS, 2020; CENTONZE; LEONE; AIELLO, 2012; LEONE et al., 2018; LEONE, Marianovella et al., 2016; RASHID; BALOUCH, 2017; SAHRAEI MOGHADAM; OMIDINASAB; ABDALIKIA, 2021; SIMALTI; SINGH, 2021). Houve redução de aproximadamente 5,5% do *slump flow* para as amostras de concreto com adição de 1,5% de fibras de aço recicladas em comparação com o concreto de referência no estudo de Simalti, Singh (2021). O estudo de Centonze, Leone e (2012) também observou perda na trabalhabilidade com adição de fibras e concluiu que a solução seria o ajuste na quantidade de aditivo superplastificante. Para não afetar a trabalhabilidade, outra solução é utilizar um baixo volume de fibras, como foi utilizado no estudo de Leone et al. (2018) e Leone et al. (2016), 0,3% e 0,46% de RSF por volume de concreto, respectivamente. Para utilizar maiores teores de fibras é importante ajustar o método de mistura, no estudo de Aiello et al. (2009) observou que a trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi atingida negativamente pela adição de fibras quando utilizado misturador convencional. Com misturador convencional foi possível adicionar 0,26% de fibras por volume, já com misturador planetário foi possível adicionar 0,46% de fibras por volume, sem a perda da trabalhabilidade.

Comparando o comportamento do concreto no estado fresco frente a adição das fibras de aço recicladas e das fibras de aço industriais, Aiello et al. (2009) apontaram uma diminuição mais acentuada na trabalhabilidade de concretos com adição de FAR. Carrillo, Lizarazo-Marriaga e Lamus (2020) observaram um comportamento semelhante de perda de trabalhabilidade, não sendo possível relacionar a adição de fibras de aço recicladas a um prejuízo na trabalhabilidade quando comparada a fibra de aço industrial. Já para Simalti e Singh (2021), a adição de fibras de aço recicladas afeta menos a trabalhabilidade da mistura.

A fim de compilar os resultados experimentais dos documentos analisado, elaborou-se as Figura 19 e Figura 20, com os dados referentes as FAR e FAI.

**Figura 19: Abatimento no ensaio de abatimento de tronco de cone dos estudos analisados por porcentagem de fibras por volume de concreto (a)Fibras de aço recicladas (FAR) (b)Fibras de aço industriais (FAI).**



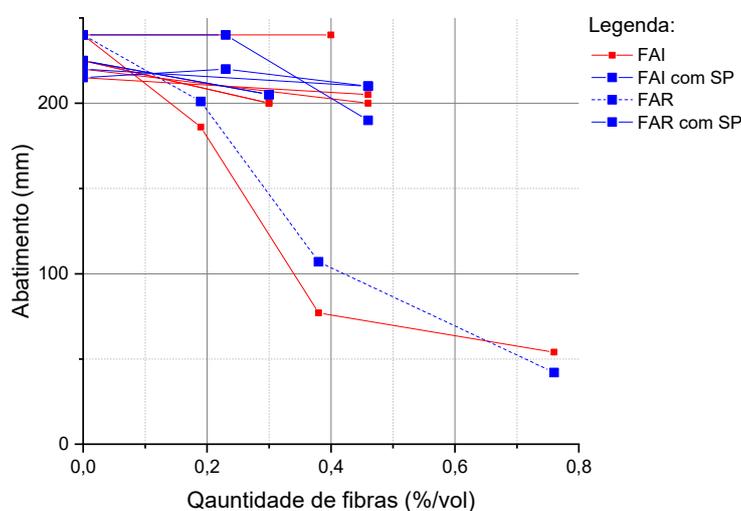
Fonte: Arquivo próprio.

As misturas com e sem aditivo foram compilados em um mesmo gráfico para possibilitar uma análise ampla dos resultados e facilitar a comparação. Os estudos com mistura de concreto sem aditivo foram identificados com símbolo de bola e linha tracejada. A

legenda identifica os resultados por documento analisado que apresentam os valores de abatimento para diversos teores de fibras.

Elaborou-se um gráfico ampliado, juntando-se os dados das fibras de aço industriais e das fibras de aço recicladas. O Gráfico apresentado na Figura 20 identifica os dados das fibras de aço industriais na cor vermelha, e os dados das fibras de aço recicladas na cor azul, novamente diferenciando misturas com adição de aditivo por linhas tracejadas.

**Figura 20: Abatimento obtido no ensaio de *Slump* dos documentos que analisaram FAI e FAR.**



Fonte: Arquivo próprio.

Na Figura 20 foram considerados os dados dos estudos de autores que realizaram ensaios em misturas de concretos com adição de fibras de aço recicladas e fibras de aço industriais (AIELLO et al., 2009; CARRILLO; LIZARAZO-MARRIAGA; LAMUS, 2020; CENTONZE; LEONE; AIELLO, 2012; LEONE et al., 2018; LEONE et al., 2016). Os estudos variaram o tipo de fibra e o percentual de adição de fibras para a mesma condição de fator a/c, teor de argamassa e o tipo de agregado.

Com isso, foi possível observar que até 0,4% de adição de fibras por volume 100% dos documentos analisados indicam que a fibra de aço reciclada obteve um abatimento maior que a fibra de aço industrial. Entre 0,4% e 0,6% de adição de fibras 66,6% dos documentos analisados apontaram que a FAR obteve um abatimento superior à FAI. Acima de 0,6%, 100% dos documentos analisados indicaram que a FAR obteve um abatimento menor do que a FAI.

### 2.4.3. Comportamento à compressão

O concreto com adição de fibras de aço recicladas possui capacidade resistente à compressão mais elevada que o concreto simples (CENTONZE; LEONE; AIELLO, 2012; KUMAR et al., 2021; NAJIM; SAEB; AL-AZZAWI, 2018; PENG; NIU; LONG, 2015; SIMALTI; SINGH, 2021; YOUNIS, 2021). A pesquisa de Caggiano et al. (2017) concluiu que a adição de fibras em baixo volume (0,75% de fibras por volume de concreto) proporciona um acréscimo na resistência à compressão do CRF entre 5% a 10% comparado ao concreto simples. Corroborando com o relatado anteriormente, os estudos de Kumar et al. (2021) e; Sahraei, Omidinasab e Abdalikia (2021) obtiveram um teor ótimo de 1% de fibras por volume de concreto com um acréscimo de 11% de resistência à compressão. Foi observado um acréscimo na resistência à compressão de cerca de 30% em amostras com 1,5% de adição de fibras no estudo de Simalti e Singh (2021a). De acordo com os autores Aiello et al. (2009), a melhoria na resistência à compressão se deve à capacidade das fibras em retardar a falha do FRC.

Para os autores Leone et al. (2016); Martinelli, Caggiano e Xargay (2015); Pajak et al. (2021) a resistência à compressão do concreto simples e do concreto com adição de fibras de aço recicladas foi praticamente inalterada. O documento de Leone et al. (2016) comparou o concreto simples com o concreto com baixo teor de fibra, 0,3%.

E de forma controversa, Baricevic, Bjegovic e Skazlic (2017); Leone et al. (2018) observam um decréscimo no valor de resistência à compressão com a adição de fibras de aço recicladas. O programa experimental de (BARICEVIC; BJEGOVIĆ; SKAZLIC, 2017) observou que adições acima de 0,65% do volume de concreto favorecem a perda de resistência à compressão devido ao ar aprisionado; e Leone et al. (2018) observaram também a perda da resistência à compressão do CRFAR ao comparar o concreto simples com amostras de 0,46% os autores relacionam o fato a tendência das fibras de se emaranharem.

Comparando a utilização de fibras de aço industriais e fibras de aço recicladas, os autores concluíram que o resultado de resistência à compressão é similar (AIELLO *et al.*, 2009; MASTALI; DALVAND; SATTARIFARD; ILLIKAINEN, 2018; SIMALTI; SINGH, 2021a). Já Carrillo, Lizarazo-Marriaga e Lamus (2020) concluíram que o concreto com adição de fibras de aço recicladas obteve um desempenho superior controlando a fissuração e mantendo a integridade do corpo de prova, sugerindo uma substituição da utilização das fibras de aço industriais por fibras de aço recicladas no caso de elementos estruturais sob ação de compressão.

Sob ações cíclicas de cargas compressivas, os autores Golpasand, Farzam e Shishvan (2020) concluíram, a partir dos estudos experimentais, que a presença de RSF aumenta a resistência do material no regime pós pico devido ao aumento da ductilidade.

A sumarização dos resultados experimentais dos documentos selecionados referentes aos ensaios de compressão e compressão diametral, estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6: Ensaios de compressão, tração e cisalhamento das FAI e FAR realizados nos programas experimentais dos documentos selecionados.**

Autor	Ano	I.D.	Qnt. (%/vol.)	Ensaio - Compressão				Ensaio – Compressão diametral		
				Norma	Tipo do CP	fc (MPa)	E (GPa)	Norma	Tipo do CP	fct (MPa)
<b>Abd-Elrahman et al.</b>	<b>2023</b>	FAR	0,500	BS EN 12390	Cúbico	168	57,03	ASTM C 496	Cilíndrico	18,48
		FAR	1,000	BS EN 12390	Cúbico	163	56,17	ASTM C 496	Cilíndrico	18,96
		FAR	1,500	BS EN 12390	Cúbico	162	56,00	ASTM C 496	Cilíndrico	19,30
		FAR	2,000	BS EN 12390	Cúbico	160	55,65	ASTM C 496	Cilíndrico	18,88
<b>Yao et al.</b>	<b>2023</b>	SF	0,000	GB/T 50081–2019	Cúbico	45,50	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,06
		FAR	0,250	GB/T 50081–2019	Cúbico	46,80	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,24
		FAR	0,500	GB/T 50081–2019	Cúbico	48,30	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,47
		FAR	0,750	GB/T 50081–2019	Cúbico	49,70	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,68
		SF	0,000	GB/T 50081–2019	Cúbico	47,70	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,19
		FAR	0,250	GB/T 50081–2019	Cúbico	49,80	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,47
		FAR	0,500	GB/T 50081–2019	Cúbico	51,10	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,73
		FAR	0,750	GB/T 50081–2019	Cúbico	52,20	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,93
		SF	0,000	GB/T 50081–2019	Cúbico	49,90	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,34
		FAR	0,250	GB/T 50081–2019	Cúbico	52,20	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,67
		FAR	0,500	GB/T 50081–2019	Cúbico	53,90	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	3,94
		FAR	0,750	GB/T 50081–2019	Cúbico	54,90	-	GB/T 50081–2019	Cúbico	4,14
<b>Al-musawi et al.</b>	<b>2022</b>	SF	0,000	BS EN 13892-2	-	38,60	-	-	-	-
		FAR	0,570	BS EN 13892-2	-	43,10	-	-	-	-
		SF	0,000	BS EN 13892-2	-	46,50	-	-	-	-
		FAR	0,570	BS EN 13892-2	-	51,50	-	-	-	-
<b>Zeybek et al.</b>	<b>2022</b>	SF	0,000	ASTM C39	Cilíndrico	30,00	-	ASTM C496-96	Cilíndrico	2,80
		FAR	1,000	ASTM C39	Cilíndrico	34,00	-	ASTM C496-96	Cilíndrico	3,20

	FAR	2,000	ASTM C39	Cilíndrico	38,00	-	ASTM C496-96	Cilíndrico	3,50	
	FAR	3,000	ASTM C39	Cilíndrico	43,00	-	ASTM C496-96	Cilíndrico	3,80	
<b>Fantilli, Orfeo e Caldentey</b>	<b>2021</b>	SF	0,00	-	Cilíndrico	26,90	-	-	-	
	FAR	0,500	-	Cilíndrico	36,40	-	-	-	-	
	FAR	1,000	-	Cilíndrico	37,50	-	-	-	-	
<b>Kumar et al.</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	TS3114 ISO 4012	Cúbico	35,52	-	TS3114 ISO 4012	Cilíndrico	3,35
	FAR	0,500	TS3114 ISO 4012	Cúbico	36,64	-	TS3114 ISO 4012	Cilíndrico	3,69	
	FAR	1,000	TS3114 ISO 4012	Cúbico	37,44	-	TS3114 ISO 4012	Cilíndrico	4,04	
	FAR	1,500	TS3114 ISO 4012	Cúbico	35,92	-	TS3114 ISO 4012	Cilíndrico	3,58	
<b>Isa, Pilakoutas e Guadagnini,</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	BS EN 12390-3	Cilíndrico	158,00	49,6	-	-	6,6
	FAR	2,000	BS EN 12390-3	Cilíndrico	158,00	50,5	-	-	14,0	
	FAR	3,000	BS EN 12390-3	Cilíndrico	160,00	51	-	-	18,2	
	FAR	4,000	BS EN 12390-3	Cilíndrico	165,00	52,6	-	-	26,0	
<b>Sahraei, Omidinasab, e Abdalikia</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	ASTM C39	Cúbico	38,50	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,05
	FAR	0,500	ASTM C39	Cúbico	42,00	-	ASTM C496	Cilíndrico	6,53	
	FAR	1,000	ASTM C39	Cúbico	43,50	-	ASTM C496	Cilíndrico	7,85	
<b>Sharghi et al.</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	EN 12390-3	Cúbico	52,20	25,4	ASTM C496	Cilíndrico	3,30
	FAR	0,375	EN 12390-3	Cúbico	62,00	26,9	ASTM C496	Cilíndrico	3,50	
	FAR	0,500	EN 12390-3	Cúbico	64,30	28,8	ASTM C496	Cilíndrico	3,60	
	FAR	0,625	EN 12390-3	Cúbico	65,30	30,8	ASTM C496	Cilíndrico	4,00	
	FAR	0,750	EN 12390-3	Cúbico	65,90	32,9	ASTM C496	Cilíndrico	4,20	
<b>Simalti e Singh</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	IS 516-1959	Cúbico	31,24	-	IS 516-1959	Cilíndrico	1,80
	FAI	0,500	IS 516-1959	Cúbico	39,67	-	IS 516-1959	Cilíndrico	2,10	
	FAI	1,000	IS 516-1959	Cúbico	40,50	-	IS 516-1959	Cilíndrico	2,44	
	FAI	1,500	IS 516-1959	Cúbico	44,23	-	IS 516-1959	Cilíndrico	3,25	
	FAR	0,500	IS 516-1959	Cúbico	33,45	-	IS 516-1959	Cilíndrico	1,84	
	FAR	1,000	IS 516-1959	Cúbico	34,83	-	IS 516-1959	Cilíndrico	2,11	

	FAR	1,500	IS 516-1959	Cúbico	35,93	-	IS 516-1959	Cilíndrico	2,64	
<b>Younis</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	-	-	-	BSEN 12390-6	Cilíndricos	2,76	
		FAR	0,150	-	-	-	BSEN 12390-6	Cilíndricos	3,04	
		FAR	0,300	-	-	-	BSEN 12390-6	Cilíndricos	3,21	
		FAR	0,450	-	-	-	BSEN 12390-6	Cilíndricos	3,28	
<b>Carrillo et al.</b>	<b>2020</b>	SF	0,000	NSR-10	Cilíndrico	42,23	-	NSR-10	Cilíndrico	2,90
		FAI	0,190	NSR-10	Cilíndrico	41,43	-	NSR-10	Cilíndrico	3,34
		FAI	0,380	NSR-10	Cilíndrico	39,96	-	NSR-10	Cilíndrico	2,65
		FAI	0,760	NSR-10	Cilíndrico	37,76	-	NSR-10	Cilíndrico	2,75
		FAR	0,190	NSR-10	Cilíndrico	41,66	-	NSR-10	Cilíndrico	3,05
		FAR	0,380	NSR-10	Cilíndrico	42,20	-	NSR-10	Cilíndrico	3,23
		FAR	0,760	NSR-10	Cilíndrico	41,60	-	NSR-10	Cilíndrico	3,53
<b>Golpasand, Farzam e Shishvan</b>	<b>2020</b>	SF	0,000	ASTM C39	Cilíndrico	28,60	17,85	ASTM C496	Cilíndrico	2,86
		FAR	0,250	ASTM C39	Cilíndrico	28,37	17,93	ASTM C496	Cilíndrico	3,12
		FAR	0,500	ASTM C39	Cilíndrico	28,10	17,87	ASTM C496	Cilíndrico	3,42
		FAR	0,750	ASTM C39	Cilíndrico	28,10	18,01	ASTM C496	Cilíndrico	3,68
<b>Zhang e Gao</b>	<b>2020</b>	SF	0,000	JTG E50-200	Cúbico	49,69	-	JTG E50-200	Cúbico	5,01
		FAR	1,200	JTG E50-200	Cúbico	52,46	-	JTG E50-200	Cúbico	5,75
		FAR	1,800	JTG E50-200	Cúbico	54,59	-	JTG E50-200	Cúbico	5,96
		FAR	2,400	JTG E50-200	Cúbico	54,64	-	JTG E50-200	Cúbico	6,25
		FAR	3,000	JTG E50-200	Cúbico	57,69	-	JTG E50-200	Cúbico	6,58
		FAR	3,600	JTG E50-200	Cúbico	61,62	-	JTG E50-200	Cúbico	6,80
		FAI	0,500	JTG E50-200	Cúbico	51,55	-	JTG E50-200	Cúbico	5,54
		FAI	1,000	JTG E50-200	Cúbico	53,36	-	JTG E50-200	Cúbico	6,18
		FAI	1,500	JTG E50-200	Cúbico	56,85	-	JTG E50-200	Cúbico	6,39
		FAI	2,000	JTG E50-200	Cúbico	60,68	-	JTG E50-200	Cúbico	6,53
		FAI	2,500	JTG E50-200	Cúbico	61,99	-	JTG E50-200	Cúbico	6,88

<b>Yang et al.</b>	<b>2019</b>	SF	0,000	GB/T 50081-2002	Cúbico	135,50	-	-	Cúbico	6,91
		FAI	1,220	GB/T 50081-2002	Cúbico	145,10	-	-	Cúbico	5,54
		FAI	1,220	GB/T 50081-2002	Cúbico	139,80	-	-	Cúbico	5,99
		FAI	1,220	GB/T 50081-2002	Cúbico	154,30	-	-	Cúbico	8,75
		FAR	1,220	GB/T 50081-2002	Cúbico	141,30	-	-	Cúbico	9,39
		FAR	1,220	GB/T 50081-2002	Cúbico	130,20	-	-	Cúbico	11,80
<b>Mastali et al.</b>	<b>2019</b>	FAR	0,500	ASTMC39	Cúbico	56,14	-	ASTMC496	Cilíndrico	6,37
		FAR	1,000	ASTMC39	Cúbico	64,59	-	ASTMC496	Cilíndrico	6,93
<b>Leone et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	UNI EN 1239	Cilíndrico	33,61	-	UNI EN 12390	-	4,06
		FAR	0,460	UNI EN 1239	Cilíndrico	32,60	-	UNI EN 12390	-	4,55
		FAI	0,460	UNI EN 1239	Cilíndrico	32,32	-	UNI EN 12390	-	4,50
<b>Mastali et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	ASTM C39/C39 M	Cúbico	51,05	-	ASTM C496	Cilíndrico	3,03
		FAI	1,500	ASTM C39/C39 M	Cúbico	79,31	-	ASTM C496	Cilíndrico	3,92
		FAR	1,500	ASTM C39/C39 M	Cúbico	72,70	-	ASTM C496	Cilíndrico	3,71
<b>Mastali et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	ASTM C39/C39 M	Cúbico	51,08	-	ASTM C496	Cilíndrico	3,40
		FAI	1,500	ASTM C39/C39 M	Cúbico	79,49	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,42
		FAR	1,500	ASTM C39/C39 M	Cúbico	72,81	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,16
<b>Najim, Saeb e Al-Azzawi</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	-	-	60,00	-	-	-	-
		FAR	0,400	-	-	62,00	-	-	-	-
		FAR	0,600	-	-	62,50	-	-	-	-
		FAR	0,800	-	-	65,00	-	-	-	-
<b>Vistos et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	EN-12390-3	Cúbico	42,59	-	-	-	-
		FAI	0,500	EN-12390-3	Cúbico	39,01	-	-	-	-
		FAR	0,500	EN-12390-3	Cúbico	37,37	-	-	-	-
<b>Rashid e Balouch</b>	<b>2017</b>	SF	0,000	-	-	24,23	-	-	-	-
		FAR	0,400	-	-	25,30	-	-	-	-
		FAR	0,650	-	-	25,97	-	-	-	-

		FAR	1,000	-	-	26,50	-	-	-	-
<b>Baricevic et al.</b>	<b>2017</b>	FAI	0,250	EN12390-3	-	60,40	42,7	-	-	-
		FAI	0,375	EN12390-3	-	54,80	39,9	-	-	-
		FAR	0,375	EN12390-3	-	57,70	42,3	-	-	-
<b>Caggiano et al.</b>	<b>2017</b>	SF	0,000	UNI 11039-2	Cúbico	30,37	-	-	-	-
		FAI	0,750	UNI 11039-2	Cúbico	27,39	-	-	-	-
		FAR	0,750	UNI 11039-2	Cúbico	22,10	-	-	-	-
<b>Leone et al.</b>	<b>2016</b>	SF	0,000	UNI EN 12390	Cilíndrico	34,03	-	UNI EN 12390	-	4,55
		FAR	0,300	UNI EN 12390	Cilíndrico	35,71	-	UNI EN 12390	-	4,73
		FAI	0,300	UNI EN 12390	Cilíndrico	34,32	-	UNI EN 12390	-	4,56
<b>Mastali e Dalvand</b>	<b>2016</b>	SF	0,000	ASTMC39	Cúbico	58,44	-	ASTMC496	Cilíndrico	3,56
		FAR	0,250	ASTMC39	Cúbico	62,33	-	ASTMC496	Cilíndrico	4,21
		FAR	0,500	ASTMC39	Cúbico	66,00	-	ASTMC496	Cilíndrico	4,48
		FAR	0,750	ASTMC39	Cúbico	68,34	-	ASTMC496	Cilíndrico	4,62
<b>Peng et al.</b>	<b>2016</b>	SF	0,000	GBJ 81-13	Cúbico	135,50	-	GBJ 81-9	Cúbico	6,91
		FAI	0,375	GBJ 81-14	Cúbico	145,10	-	GBJ 81-10	Cúbico	8,84
		FAI	0,375	GBJ 81-15	Cúbico	139,80	-	GBJ 81-11	Cúbico	8,99
		FAI	0,375	GBJ 81-16	Cúbico	154,30	-	GBJ 81-12	Cúbico	8,75
		FAR	0,375	GBJ 81-17	Cúbico	141,30	-	GBJ 81-13	Cúbico	9,39
		FAR	0,375	GBJ 81-18	Cúbico	130,2	-	GBJ 81-14	Cúbico	11,80
<b>Martinelli, Caggiano, e Xargay</b>	<b>2015</b>	SF	0,000	UNI-11039-2	Cúbico	42,59	-	-	-	-
		FAI	0,500	UNI-11039-3	Cúbico	39,01	-	-	-	-
		FAR	0,500	UNI-11039-6	Cúbico	37,37	-	-	-	-
<b>Peng et al.</b>	<b>2015</b>	SF	0,000	GBJ 81-8	Cúbico	135,50	-	GBJ 81-8	Cúbico	6,91
		FAI	0,750	GBJ 81-9	Cúbico	145,10	5,02	GBJ 81-8	Cúbico	8,84
		FAI	0,750	GBJ 81-10	Cúbico	139,80	5,24	GBJ 81-8	Cúbico	8,99
		FAR	0,750	GBJ 81-11	Cúbico	154,30	5,2	GBJ 81-8	Cúbico	8,75

		FAR	0,750	GBJ 81-12	Cúbico	141,30	4,99	GBJ 81-8	Cúbico	9,39
<b>Zamanzadeh, Lourenço e Barros</b>	<b>2015</b>	FAR	0,560	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	0,750	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	1,125	-	-	-	-	-	-	-
		FAI	0,560	-	-	-	-	-	-	-
		FAI	0,750	-	-	-	-	-	-	-
		FAI	1,125	-	-	-	-	-	-	-
<b>Centonze, Leone e Aiello</b>	<b>2012</b>	SF	0,000	UNI EN 12350	Cúbico	31,63	-	-	-	-
		FAR	0,230	UNI EN 12350	Cúbico	39,00	-	-	-	-
		FAR	0,460	UNI EN 12350	Cúbico	39,68	-	-	-	-
		FAI	0,460	UNI EN 12350	Cúbico	29,01	-	-	-	-
<b>Centonze et al.</b>	<b>2012</b>	SF	0,000	UNI EN 12390	Cúbico	34,03	-	UNI EN 12390	-	4,55
		FAR	0,300	UNI EN 12390	Cúbico	35,71	-	UNI EN 12390	-	4,73
		FAI	0,300	UNI EN 12390	Cúbico	34,32	-	UNI EN 12390	-	4,56
<b>Graeff et al.</b>	<b>2012</b>	SF	0,000	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	0,586	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	1,758	-	-	-	-	-	-	-
		SF	0,000	-	-	-	-	-	-	-
		FAI	0,643	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	0,643	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	1,916	-	-	-	-	-	-	-
<b>Aiello et al.</b>	<b>2009</b>	SF	0,000	UNI EN 12390	Cúbico	39,08	-	-	-	-
		FAR	0,13	UNI EN 12390	Cúbico	40,42	-	-	-	-
		FAR	0,15	UNI EN 12390	Cúbico	32,24	-	-	-	-
		FAR	0,19	UNI EN 12390	Cúbico	34,87	-	-	-	-
		FAR	0,26	UNI EN 12390	Cúbico	34,60	-	-	-	-
		FAR	0,19	UNI EN 12390	Cúbico	33,36	-	-	-	-

FAR	0,26	UNI EN 12390	Cúbico	43,73	-	-	-	-
SF	0,000	UNI EN 12390	Cúbico	32,07	-	-	-	-
FAR	0,230	UNI EN 12390	Cúbico	38,47	-	-	-	-
FAR	0,460	UNI EN 12390	Cúbico	37,58	-	-	-	-
FAI	0,400	UNI EN 12390	Cúbico	38,56	-	-	-	-

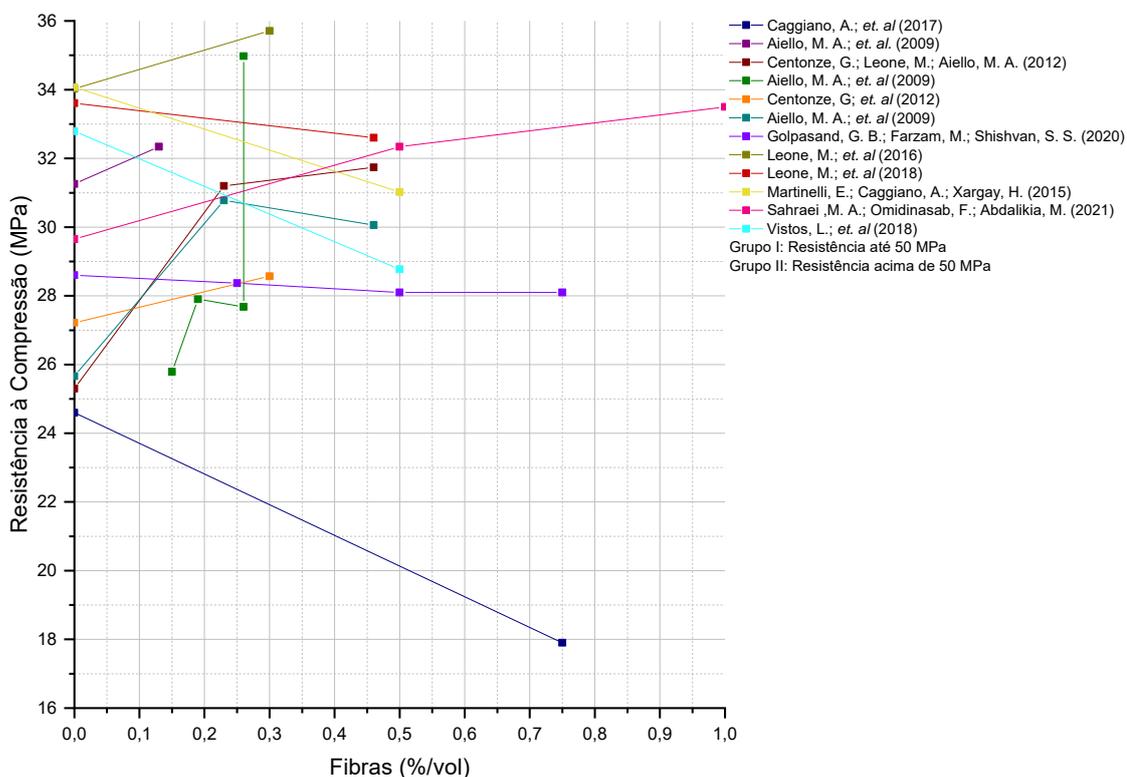
Fonte: Arquivo próprio.

Compilando os resultados experimentais dos documentos selecionados na RSL, foi possível elaborar os gráficos apresentados na Figura 21, e Figura 22 relacionando a resistência à compressão de CRFAR com o teor de fibras e a relação água cimento. A Figura 21 apresenta os resultados para concretos de classes até C50a, já a Figura 22 apresenta os resultados para concretos de classes superior a C50.

Como os artigos foram desenvolvidos em diferentes países foram utilizados diferentes procedimentos normativos para caracterização do material e por isso diferentes tipos de corpos de prova. Documentos que não citam o procedimento normativo adotado ou que utilizaram CP's retangulares e em formato de viga foram excluídos, sendo a comparação feita considerando apenas os documentos com CP's no formato cilíndricos e CP's cúbicos.

Para correlacionar os resultados dos ensaios com os dois tipos de CP's relatados, CP's cúbicos em CP's cilíndricos, foi utilizado os valores da tabela 7.2-1 do (FIB, 2012), que determina os fatores de correção para concreto de classes: C25, C30, C35, C40, C50, C55, C60, C70, C80, C90 e C100 (ou mais); em: 0,83; 0,81; 0,77; 0,8; 0,81; 0,83; 0,82; 0,8; 0,82; 0,84; 0,85; 0,86; respectivamente. Esses fatores de correção foram utilizados para multiplicar os valores de compressão dos CP's cúbicos.

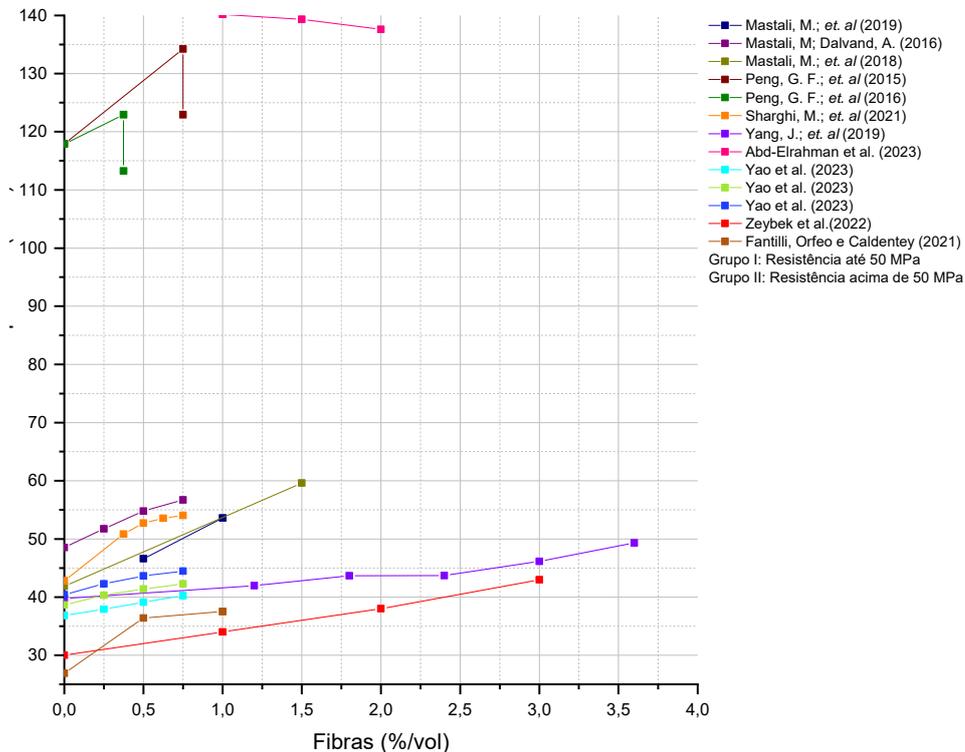
**Figura 21: Grupo I de resultados de resistência à compressão de CRFAR em função da quantidade de fibras de aço recicladas.**



Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 21 que 41,66% dos documentos analisados apresentam resultados de decréscimo no valor de resistência à compressão com a adição de fibras de aço recicladas, e 58,33% apresentam aumento no valor de resistência à compressão com adição de fibras de aço recicladas. Na Figura 22 100% dos documentos apresentaram resultados de aumento no valor de resistência à compressão com a adição de fibras de aço recicladas. Talvez seja possível relacionar o desempenho de CRFAR com o percentual de adição de fibras e com a classe de resistência já que para um mesmo valor de fator água/cimento, para concretos com menos de 50 MPa, a partir de 0,3% de adição de fibras por volume há uma estabilização ou queda do valor de resistência à compressão. Porém para concretos acima de 50 MPa, apresentados na Figura 22, é possível observar um aumento da resistência à compressão mesmo em concretos com alto teor de fibras.

**Figura 22: Grupo II de resultados de resistência à compressão de CRFAR (eixo y) em função da quantidade de fibras de aço recicladas (eixo x)**



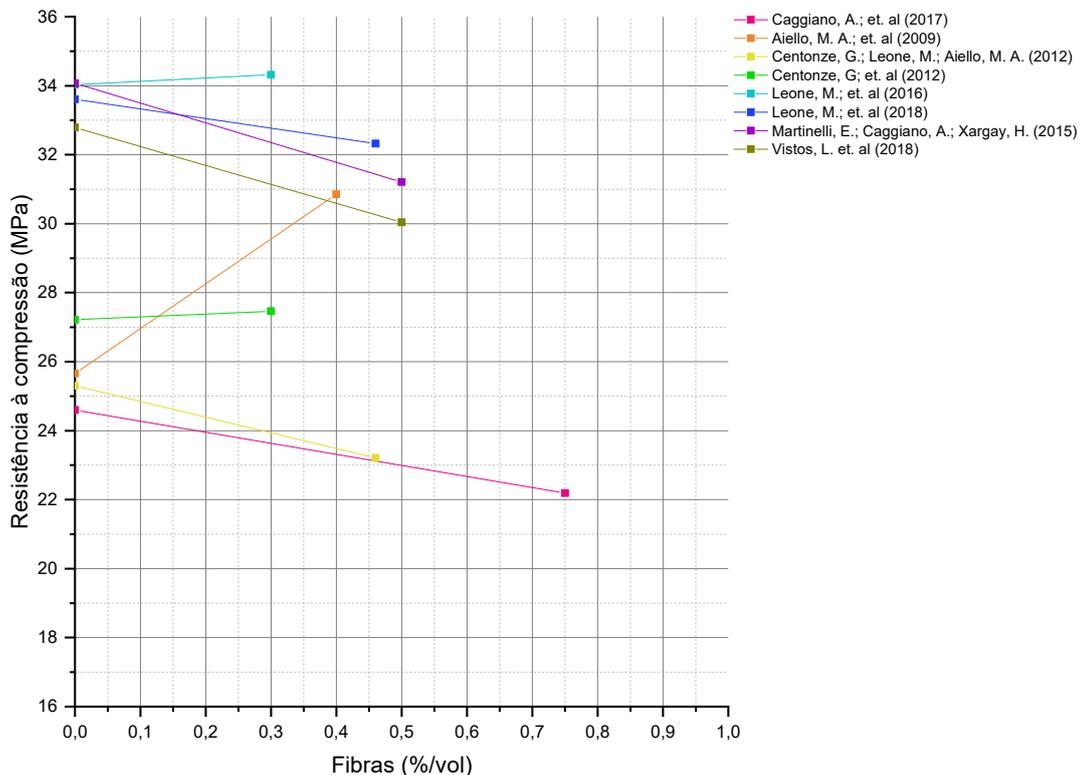
Fonte: Arquivo próprio.

Na Figura 22 é possível observar que os resultados de Peng et al. (2016); Peng, Gai Fei e Niu (2015); Yang, Peng e Shiu et al. (2019) relata dois valores de resistência à

compressão para um mesmo percentual de fibras, esses resultados são particularmente interessantes, pois nesses estudos experimentais os autores variam o tipo de fibra reciclada para um mesmo teor de adição na mistura. As principais diferenças entre os dois tipos de fibras utilizadas é o formato e a resistência.

Comparando o concreto com adição de fibras de aço recicladas e o concreto com adição de fibras de aço industriais, foram elaborados os gráficos apresentados na Figura 23 e Figura 24 relacionando a resistência à compressão do Concreto Reforçado com Fibra de Aço Industrial - CRFAI com o percentual de adição de fibras e com o fator água/cimento. A Figura 23 e Figura 24 apresentam os resultados para concretos de classes até C50 e para concretos de classes superior a C50, respectivamente.

**Figura 23: Grupo I de resultados de resistência à compressão de CRFAI (eixo y) em função da quantidade de fibras de aço recicladas (eixo x)**



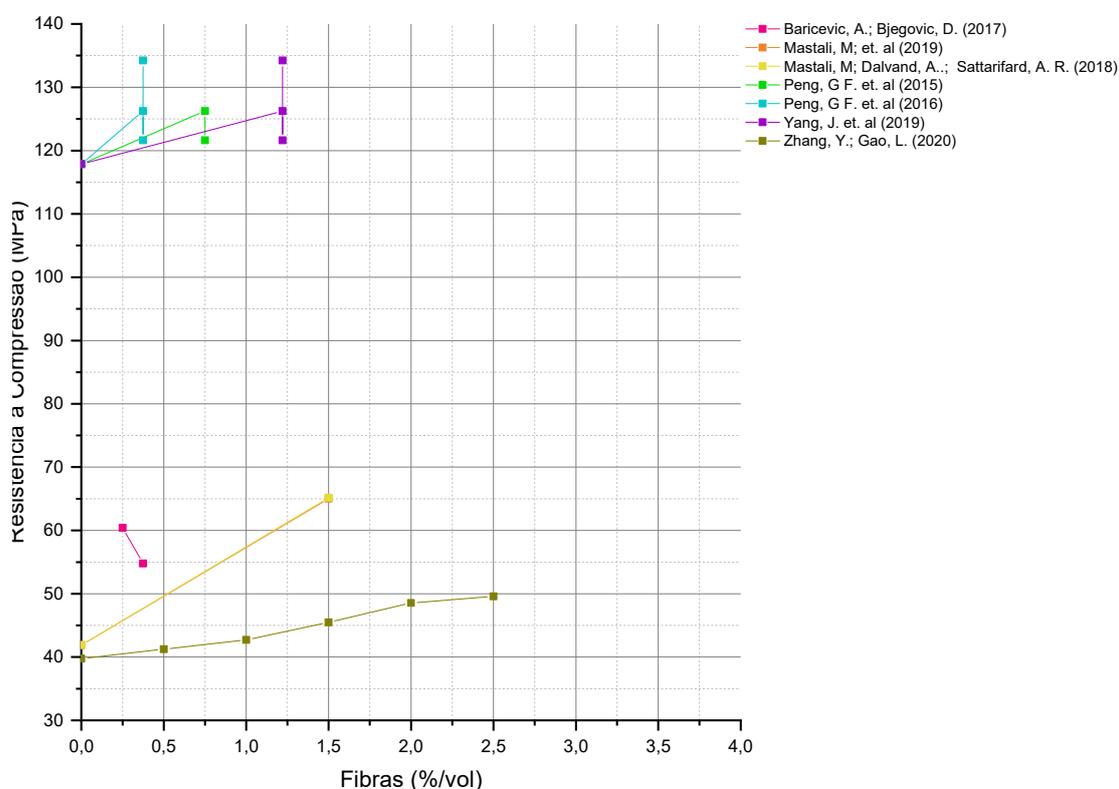
Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 23 que os resultados dos 8 documentos expostos com resistência normal, abaixo de 50 MPa, a maior parte (62,5%) apresenta decréscimo no valor de resistência à compressão com a adição de fibras de aço industriais, e 25% apresentam estabilização no valor de resistência à compressão com a adição das fibras. Dos estudos que sofreram diminuição do valor de resistência à compressão, todos tiveram 0,45% de

fibras de aço adicionadas ao concreto, ou mais. Ou seja, a diminuição da resistência à compressão parece estar relacionada com o volume de fibras adicionado.

Já na Figura 24, é possível observar que dos 8 documentos analisados, com concretos acima de 50 MPa, 71,42% obtiveram um valor de resistência à compressão elevado com a adição de fibras de aço ao concreto e 28,57% apresentaram um decréscimo no valor de resistência à compressão com a adição de fibras de aço.

**Figura 24: Grupo II de resultados de resistência à compressão de CRFAI (eixo y) em função da quantidade de fibras de aço recicladas (eixo x)**



Fonte: Arquivo próprio.

Com isso, é possível afirmar que para concretos de classe inferior à 50 MPa o concreto com adição de fibras de aço industriais obtém maiores valores de resistência à compressão do que o concreto com adição de fibras de aço recicladas; já para concretos com mais de 50 MPa, o concreto com adição de fibras de aço recicladas apresenta maiores valores de resistência à compressão.

#### **2.4.4. Comportamento à tração (ensaio de tração por compressão diametral)**

Diversos autores relatam que a adição de fibras de aço recicladas ao concreto proporciona um aumento da resistência à tração ao CRF em comparação com o concreto simples (KUMAR *et al.*, 2021; PENG, G F *et al.*, 2016; PENG, Gai Fei; NIU; LONG, 2015;

SAHRAEI MOGHADAM; OMIDINASAB; ABDALIKIA, 2021; SIMALTI; SINGH, 2021a, b; YANG; PENG; SHIU; *et al.*, 2019). Em consonância com isso, resultados demonstram que esse aumento é mais significativo para teores de fibra acima de 1% em volume (KUMAR *et al.*, 2021; SIMALTI; SINGH, 2021a). No programa experimental desenvolvido por Peng *et al.* (2015), que utilizou concreto de ultra alto desempenho e comparou com concreto simples, houve aumento de 25% a 30% na resistência à tração de amostras com adição de aproximadamente 2,3% de fibras por volume.

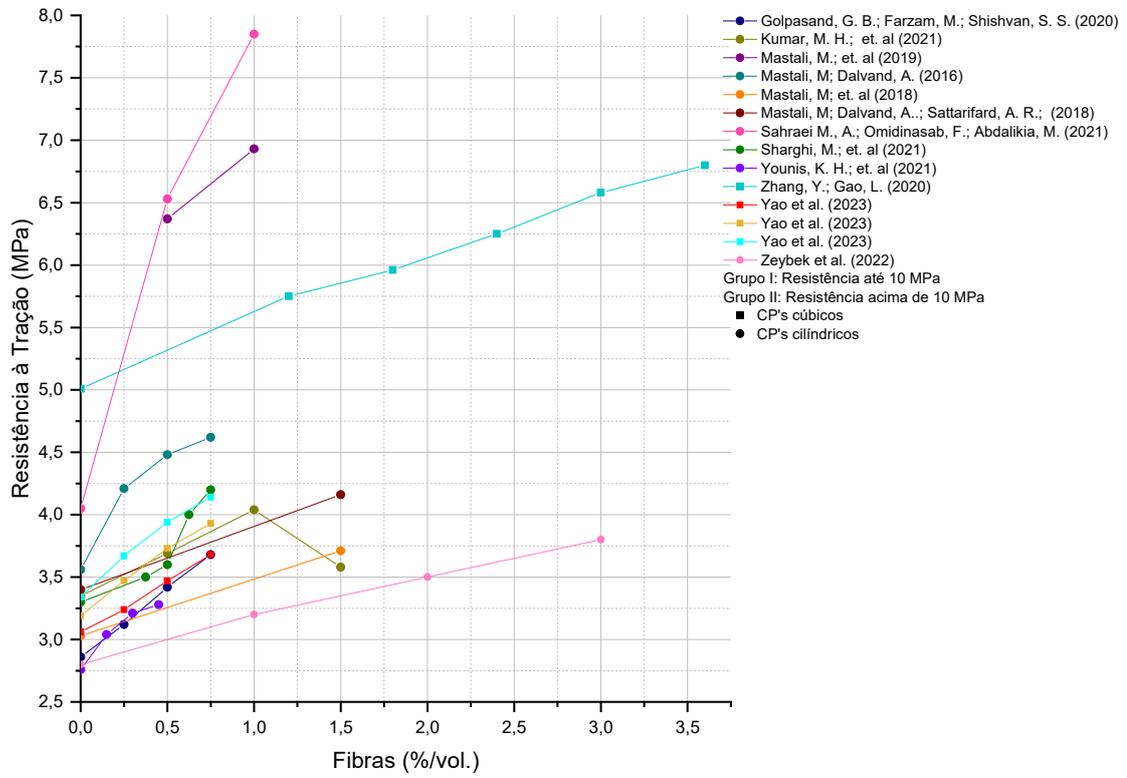
Por outro lado, há autores que relatam redução na resistência à tração como o caso do estudo de Leone *et al.* (2018). Os autores atribuem o caso, à probabilidade de ter ocorrido aglomerados de fibras na mistura de concreto gerando descontinuidades na matriz do corpo de prova, ocasionando a diminuição da resistência.

Comparando as fibras de aço industriais com as fibras de aço recicladas, os autores Simalti e Singh (2021a) concluíram que seus desempenhos à tração são similares.

Os ensaios de tração realizados no estudo de Carrillo, Lizarazo-Marriga e Lamus (2020), demonstraram que o concreto reforçado com fibras de aço recicladas obteve um desempenho mecânico inferior quando comparado ao concreto reforçado com fibras de aço industriais, que foi capaz de unir o concreto, enquanto as amostras com fibras de aço recicladas foram totalmente separadas.

A fim de comparar os resultados experimentais dos documentos selecionados na RSL elaborou-se os gráficos apresentados na Figura 25. A Figura 25 relaciona a resistência à tração de CRFAR com a quantidade de fibras adicionadas e com o teor água/cimento da mistura.

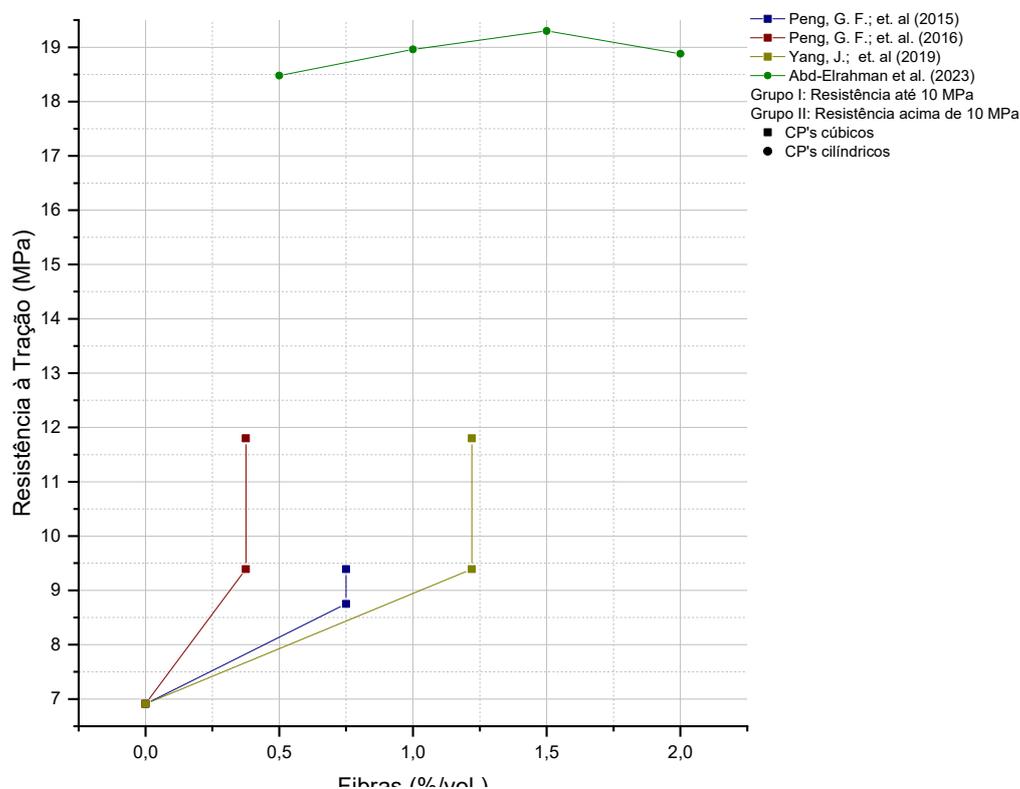
**Figura 25: Grupo I de Resistência à tração por compressão diametral de CRFAR por percentual de adição de fibras (eixo x) por fator água/cimento (eixo y).**



Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar nas Figura 25 e Figura 26, que apenas 7,69% dos documentos analisados apresentaram queda no valor de resistência à tração com o aumento do percentual de fibras. Os outros 92,31% dos documentos, apresentaram resultados indicando um aumento na resistência à tração com a adição de fibras de aço recicladas.

**Figura 26: Grupo II de Resistência à tração por compressão diametral CRFAR por percentual de adição de fibras (eixo x) por fator água/cimento (eixo y).**

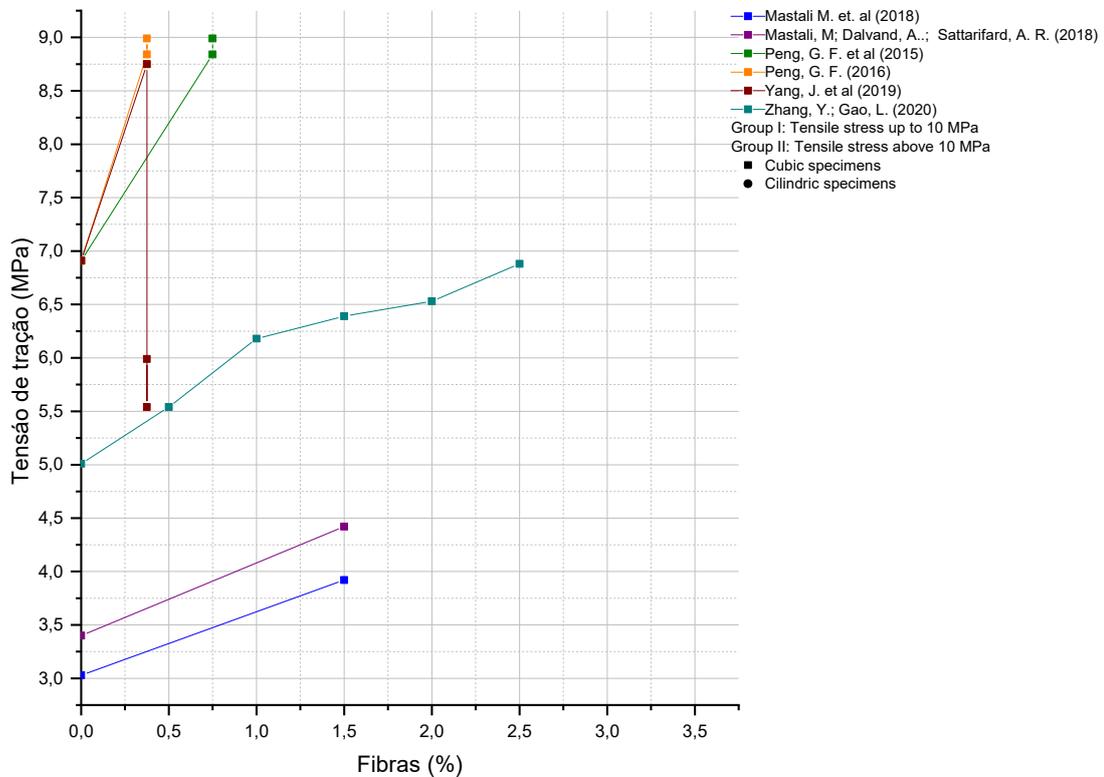


Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 27, que 16,6% dos documentos apresentam queda na resistência à tração com a adição de fibras de aço industriais. O documento de (YANG; PENG; SHUI; *et al.*, 2019) apresenta esse resultado, pois utilizou 3 tipos diferentes de fibras de aço industriais, as quais variavam-se o formato e a resistência; nesse documento, um tipo de fibra de aço adicionada ao concreto proporcionou uma resistência à tração mais elevada do que a observada no concreto simples. Os outros 83,4% apresentaram um aumento da resistência à tração com a adição de fibras.

Comparando o concreto com adição de fibras de aço recicladas e com fibras de aço industriais não é possível observar uma diferença significativa no comportamento à resistência à compressão, a adição dos dois tipos de fibra proporciona um comportamento mais dúctil do CRF.

**Figura 27: Resistência à tração por compressão diametral de CRFI por percentual de adição de fibras (eixo x) e por fator água/cimento (eixo y).**

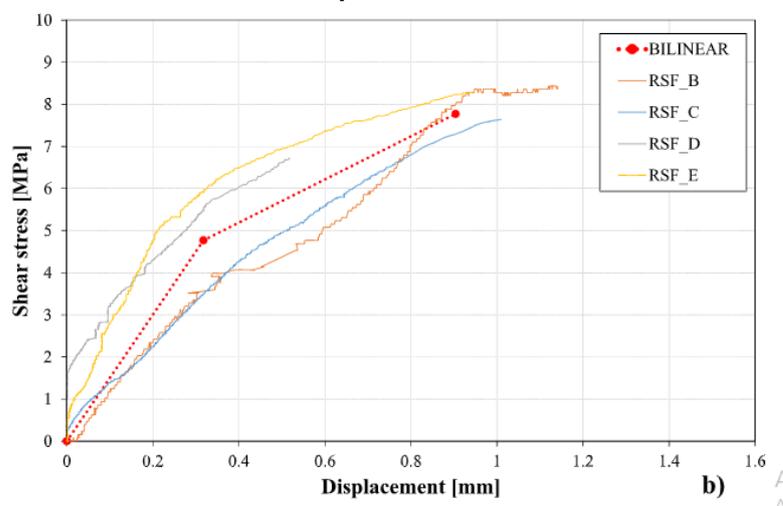


Fonte: Arquivo próprio.

#### 2.4.5. Comportamento ao cisalhamento

A Figura 28 apresenta uma curva de teste de cisalhamento de Leone et al. (2018), comparação entre tensão de cisalhamento idealizada e experimental – tendência de deslocamento para RCRSF.

**Figura 28: Comparação entre tendência de deslocamento-tensão de cisalhamento idealizada e experimental**



fonte: Leone et al. (2018).

Entre os 40 estudos analisados, apenas 4 apresentaram resultados de cisalhamento e as metodologias de teste destes estudos foram diferentes entre si. Dentre esses destaca-se que o estudo de Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015) não é experimental, mas sim uma correlação com os valores experimentais obtidos no ensaio de flexão de vigas de concreto armado; os autores concluem que a utilização de  $90 \text{ kg/m}^3$  de FSR proporcionou um aumento de 95%, 81% e 71% em termos de capacidade de cisalhamento. Rashid e Balouch (2017) desenvolveram o ensaio experimental com viga armada; a influência do pórtico no comportamento ao cisalhamento está fora do tema da pesquisa. O ensaio de cisalhamento direto realizado no programa experimental de Leone et al. (2018) foi modificado em relação à prescrição da norma JSCE-SF6 (1990), os autores observaram um aumento de 62,7% na comparação dos corpos de prova RSF com corpos de prova de concreto simples. Isa, Pilakoutas e Guadagnini (2021) realizaram o ensaio com a viga esculpida. Assim, o comportamento mecânico do concreto com fibras de aço recicladas sob ação de cisalhamento não pôde ser analisado devido ao baixo número de documentos abordando esse assunto, dentre os documentos aderentes a esta pesquisa.

#### **2.4.6. Comportamento à flexão**

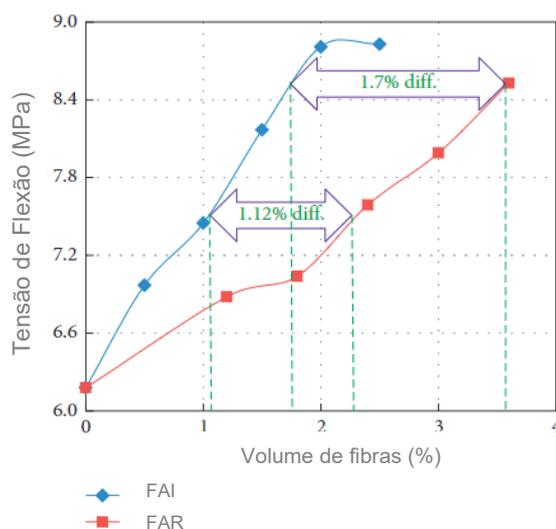
Grande parte dos estudos indicam que há melhoria no desempenho mecânico à flexão em concretos com adição de fibras de aço recicladas quando comparado ao concreto simples, sem adição de fibras (AL-MUSAWI *et al.*, 2022; KUMAR *et al.*, 2021; MARTINELLI; CAGGIANO; XARGAY, 2015; NAJIM; SAEB; AL-AZZAWI, 2018; PAJAK *et al.*, 2021; SAHRAEI MOGHADAM; OMIDINASAB; ABDALIKIA, 2021; SIMALTI; SINGH, 2021a; YOUNIS, 2021; ZHANG; GAO, 2020). Para (NAJIM; SAEB; AL-AZZAWI, 2018), houve ganho de resistência sob ação de flexão em todas as amostras testadas no estudo; com

1,3%, 1,97% e 2,63% de fibras por volume. Os autores Kumar et al. (2021), obtiveram o melhor desempenho à flexão com a adição de 1% de fibras por volume. Simalti e Singh (2021a), obtiveram um teor ótimo de 1,5%. No programa experimental desenvolvido por Centonze, Leone e Aiello (2012) e Sahraei, Omidinasab e Abdalikia (2021) foi observado que aumentar a concentração de fibras de aço recicladas por volume de concreto poderia aumentar a tenacidade do RSFRC em mais de 100%.

Alguns autores discordaram dos demais sobre o comportamento de concretos com adição de fibras de aço recicladas, de acordo com Simalti e Singh (2021b), não houve melhora significativa na resistência à flexão com a adição de fibras de aço recicladas quando comparada com o concreto simples; já no estudo desenvolvido por Mastali e Dalvand (2016), foi verificado que aumentar o volume de fibras ocasionou uma perda na tenacidade à flexão, provavelmente ocasionado pelo comprimento curto das FAR.

Comparando a adição de fibras de aço industriais e a adição de fibras de aço recicladas, Tate et al. (2020) e Yang, Peng e Shiu et al. (2019) concluíram que a FAR pode substituir a FAI sob ação de flexão; já Simalti, Singh (2021a, b) e Zhang e Gao (2020) concluíram que a FAI demonstrou um desempenho superior à FAR quando adicionadas ao concreto. A Figura 29 apresenta a resistência à flexão para os dois tipos de fibras obtidos a partir dos ensaios experimentais da pesquisa de Zhang e Gao (2020). Na Figura 29 é possível observar que é necessário um volume maior de fibras de aço recicladas para atingir a mesma resistência à flexão que é atingida com a fibra de aço industrial.

**Figura 29: Tensão de flexão para os dois tipos de fibras de aço adicionadas ao concreto.**



Fonte: Zhang e Gao (2020).

A sumarização dos resultados experimentais dos documentos selecionados na RSL referentes à tensão de flexão estão presentes na Tabela 7.

**Tabela 7: Ensaio de flexão realizado nos programas experimentais dos documentos selecionados na RSL.**

Autor	Ano	I.D.	Qnt. (%/vol.)	Ensaio – Flexão		
				Norma	Tipo do CP	Fctm (MPa)
Abd-Elrahman et al.	2023	FAR	0,500	ASTM C78	Prismático	21,56
		FAR	1,000	ASTM C78	Prismático	22,12
		FAR	1,500	ASTM C78	Prismático	23,52
		FAR	2,000	ASTM C78	Prismático	22,40
Al-musawi et al.	2022	SF	0,000	BS EN 13892-2	Prismático	5,40
		FAR	0,570	BS EN 13892-2	Prismático	8,70
		SF	0,000	BS EN 13892-2	Prismático	4,40
		FAR	0,570	BS EN 13892-2	Prismático	5,70
Zeybeck et al.	2022	SF	0,000	ASTM C78	Prismático	1,25
		FAR	1,000	ASTM C78	Prismático	1,95
		FAR	2,000	ASTM C78	Prismático	2,59
		FAR	3,000	ASTM C78	Prismático	3,30
Fantilli, Orfeo e Caldentey	2021	SF	0,00	EN 14651	Prismático	0,00
		FAR	0,500	EN 14651	Prismático	3,10
		FAR	1,000	EN 14651	Prismático	3,53
Baricevic et al.	2017	FAI	0,250	RILEM 2002	Prismático	4,60
		FAI	0,375	RILEM 2002	Prismático	5,10
		FAR	0,375	RILEM 2002	Prismático	4,40
Caggiano et al.	2017	SF	0,000	UNI EN 12390-3	Prismático	-
		FAI	0,750	UNI EN 12390-3	Prismático	3,26*
		FAR	0,750	UNI EN 12390-3	Prismático	3,68*
Isa, Pilakoutas e Guadagnini,	2021	SF	0,000	EN 14651	Prismático	6,60
		FAR	2,000	EN 14651	Prismático	14,00
		FAR	3,000	EN 14651	Prismático	18,20
		FAR	4,000	EN 14651	Prismático	26,00
		SF	0,000	UNI11039	Prismático	2,33*
		FAR	0,230	UNI11039	Prismático	2,70*
		FAR	0,460	UNI11039	Prismático	2,54*
		FAI	0,400	UNI11039	Prismático	2,97*
Centonze, Leone e Aiello	2012	SF	0,000	EFNARC	Prismático	3,35*
		FAR	0,230	EFNARC	Prismático	3,44*
		FAR	0,460	EFNARC	Prismático	2,84*
		FAI	0,460	EFNARC	Prismático	3,00*
Graeff et al.	2012	SF	0,000	-	Prismático	6,82
		FAR	0,580	-	Prismático	5,04
		FAR	1,578	-	Prismático	7,76

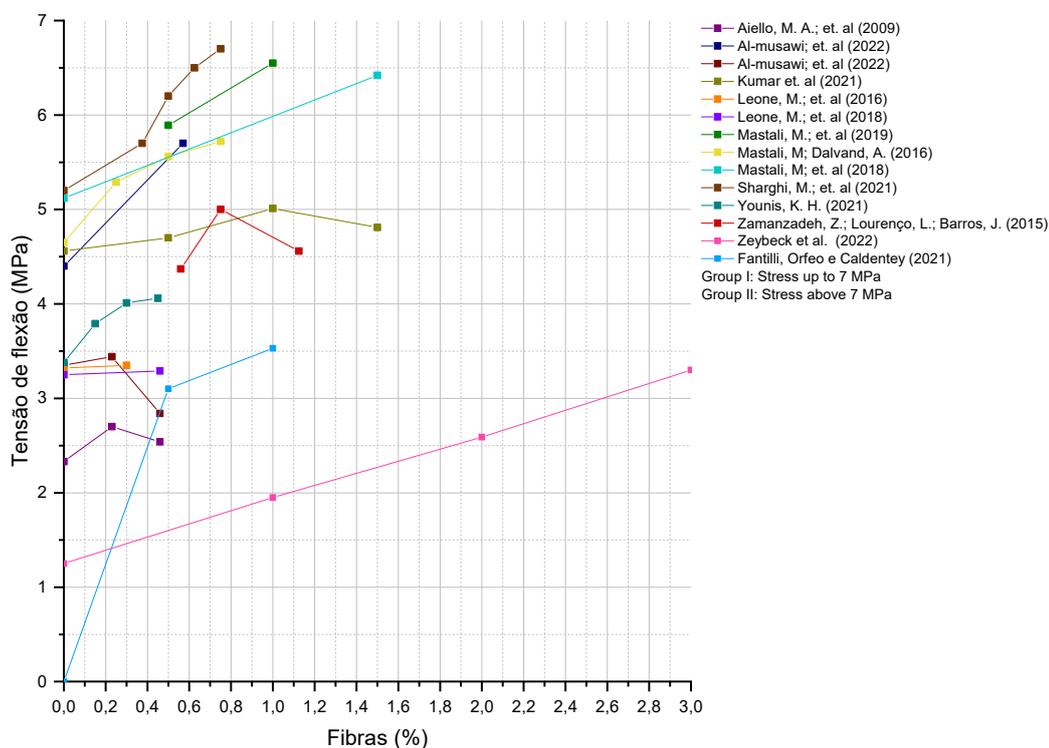
		SF	0,000	-	Prismático	6,37
		FAI	0,643	-	Prismático	8,08
		FAR	0,643	-	Prismático	6,75
		FAR	1,916	-	Prismático	7,84
<b>Kumar et al.</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	TS3114 ISO 4012	Prismático	4,56
		FAR	0,500	TS3114 ISO 4012	Prismático	4,70
		FAR	1,000	TS3114 ISO 4012	Prismático	5,01
		FAR	1,500	TS3114 ISO 4012	Prismático	4,81
<b>Leone et al.</b>	<b>2016</b>	SF	0,000	UNI 11039	Prismático	3,32*
		FAR	0,300	UNI 11039	Prismático	3,35*
		FAI	0,300	UNI 11039	Prismático	3,13*
<b>Leone et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	UNI 11039	Prismático	3,25*
		FAR	0,460	UNI 11039	Prismático	3,29*
		FAI	0,460	UNI 11039	Prismático	3,09*
<b>Martinelli, Caggiano, e Xargay</b>	<b>2015</b>	SF	0,000	UNI-11039-1	Prismático	-
		FAI	0,500	UNI-11039-1	Prismático	3,84*
		FAR	0,500	UNI-11039-1	Prismático	4,45*
<b>Mastali et al.</b>	<b>2019</b>	FAR	0,500	ASTMC78	Prismático	5,89
		FAR	1,000	ASTMC78	Prismático	6,55
<b>Mastali e Dalvand</b>	<b>2016</b>	SF	0,000	ASTMC78	Prismático	4,65
		FAR	0,250	ASTMC78	Prismático	5,29
		FAR	0,500	ASTMC78	Prismático	5,56
		FAR	0,750	ASTMC78	Prismático	5,72
<b>Mastali et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	ASTMC78	Prismático	5,12
		FAI	1,500	ASTMC78	Prismático	7,00
		FAR	1,500	ASTMC78	Prismático	6,42
<b>Mastali et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	ASTMC78	Prismático	6,50
		FAI	1,500	ASTMC78	Prismático	8,84
		FAR	1,500	ASTMC78	Prismático	8,10
<b>Rashid e Balouch</b>	<b>2017</b>	SF	0,000	-	Prismático	12,75
		FAR	0,400	-	Prismático	15,10
		FAR	0,650	-	Prismático	17,37
		FAR	1,000	-	Prismático	21,03
<b>Sahraei, Omidinasab, e Abdalikia</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	ASTM C1609	Prismático	6,00
		FAR	0,500	ASTM C1609	Prismático	9,70
		FAR	1,000	ASTM C1609	Prismático	12,90
<b>Sharghi et al.</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	ASTM C1609	Prismático	5,20
		FAR	0,375	ASTM C1609	Prismático	5,70
		FAR	0,500	ASTM C1609	Prismático	6,20
		FAR	0,625	ASTM C1609	Prismático	6,50
		FAR	0,750	ASTM C1609	Prismático	6,70
<b>Vistos et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	UNI-11039-1&2	Prismático	-

		FAI	0,500	UNI-11039-1&2	Prismático	3,84*
		FAR	0,500	UNI-11039-1&2	Prismático	4,45*
<b>Younis K. H.</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	BS EN 12390-5	Prismático	3,38
		FAR	0,150	BS EN 12390-5	Prismático	3,79
		FAR	0,300	BS EN 12390-5	Prismático	4,01
		FAR	0,450	BS EN 12390-5	Prismático	4,06
<b>Zamanzadeh, Lourenço e Barros</b>	<b>2015</b>	FAR	0,560	CEB-FIP 2010	Prismático	4,37
		FAR	0,750	CEB-FIP 2010	Prismático	5,00
		FAR	1,125	CEB-FIP 2010	Prismático	4,56
		FAI	0,560	CEB-FIP 2010	Prismático	5,14
		FAI	0,750	CEB-FIP 2010	Prismático	6,62
		FAI	1,125	CEB-FIP 2010	Prismático	5,99
<b>Zhang e Gao</b>	<b>2020</b>	SF	0,000	JTG E50-200	Prismático	6,17
		FAR	1,200	JTG E50-200	Prismático	6,87
		FAR	1,800	JTG E50-200	Prismático	7,04
		FAR	2,400	JTG E50-200	Prismático	7,58
		FAR	3,000	JTG E50-200	Prismático	7,98
		FAR	3,600	JTG E50-200	Prismático	8,51
		FAI	0,500	JTG E50-200	Prismático	6,97
		FAI	1,000	JTG E50-200	Prismático	7,45
		FAI	1,500	JTG E50-200	Prismático	8,17
		FAI	2,000	JTG E50-200	Prismático	8,80
		FAI	2,500	JTG E50-200	Prismático	8,83
<b>*Limite de proporcionalidade da tensão de flexão em ensaios com a medição do deslocamento do tipo CTOD.</b>						

Fonte: Arquivo próprio.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 7 elaborou-se as Figura 30 e Figura 31, que apresentam os resultados de tensão de flexão de concretos com adição de fibras de aço recicladas por volume de fibras. Os resultados foram divididos em dois gráficos com a finalidade de ajustar a escala dos gráficos e apresentar os resultados da melhor forma.

**Figura 30: Tensão de flexão de concretos com fibras de aço recicladas por porcentagem de fibras**

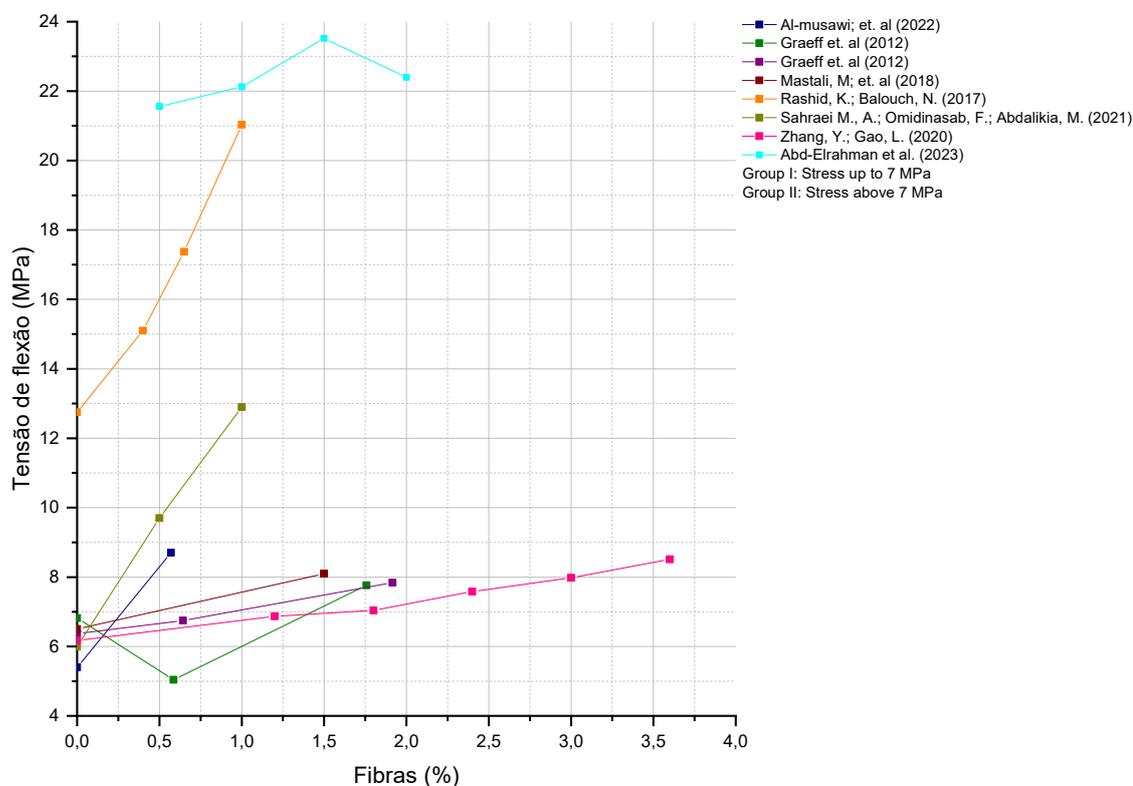


Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 30, que até a adição de 1,5 % de fibras por volume 75% dos documentos apresentaram um comportamento com mais tenacidade frente aos esforços de flexão; 16,6% não tiveram o comportamento alterado com a adição de fibras e 8,3% apresentaram diminuição da tenacidade com a adição de fibras; provavelmente os resultados incomuns devem-se ao fato de problemas na confecção dos corpos de prova. Avaliando estudos que adicionaram mais de 1,5% de fibras, 60% apresentaram diminuição na tenacidade com adições acima desse volume, 20% apresentaram estabilidade no comportamento e 20% apresentaram aumento da tenacidade.

Com relação ao fator água/cimento, os documentos que elaboraram traços com mais de 0,45 da relação de a/c, 100% apresentaram estabilização ou queda de tenacidade em diferentes teores de adição de fibras.

**Figura 31: Tensão de flexão de concretos com fibras de aço recicladas (eixo z) por porcentagem de fibras (eixo x) e por fator água/cimento (eixo y).**

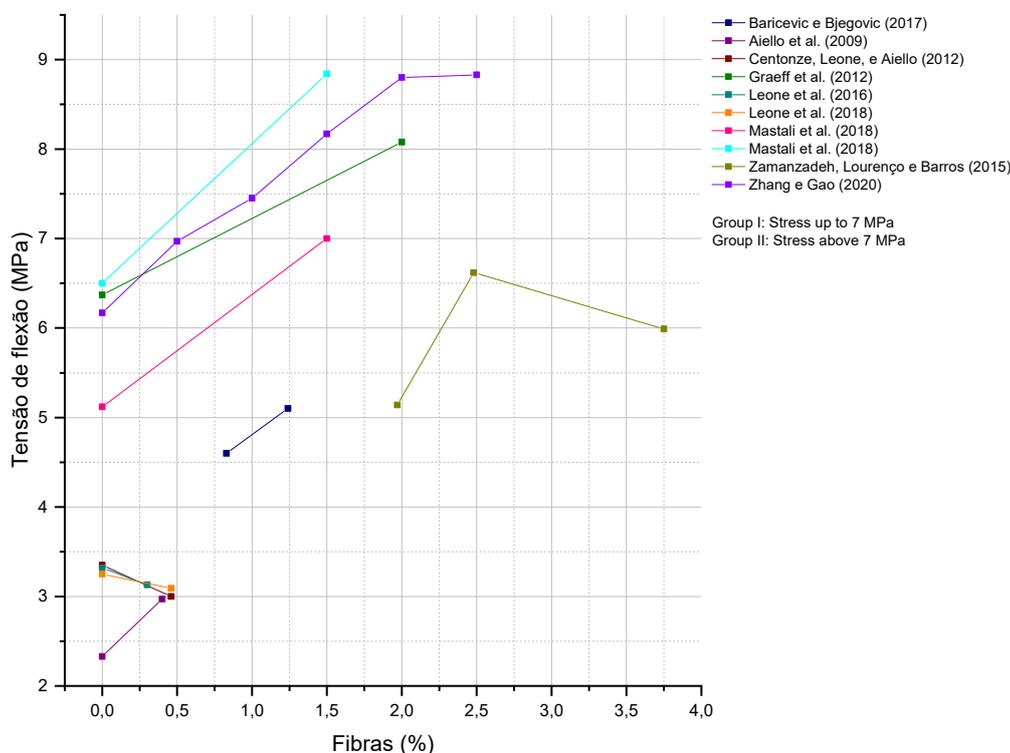


Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 31, que 66,6% dos documentos analisados apresentam comportamento de maior tenacidade com qualquer percentual de fibra adicionado e 33,3% apresentam estabilização ou diminuição da tenacidade.

Para comparar os resultados de tensão de flexão em concretos com adição de fibras de aço industriais e concretos com adição de fibras de aço recicladas, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 32 que expõe os resultados de tensão de flexão de concretos com adição de fibras de aço industriais.

**Figura 32: Tensão de flexão para concretos com adição de fibras de aço industriais por percentual de adição de fibras**



Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 32, que até 2% de adição de fibras por volume, 90% dos documentos apresentaram maior tenacidade e 10% apresentaram redução na tenacidade; para adições maiores que 2% de fibras por volume, 100% apresentaram queda na tenacidade.

Com o exposto, comparando as FAR com as FAI adicionadas ao concreto, em volumes inferiores à 1,5 e 2,0% de adição de fibras, a FAI contribui com mais tenacidade do que a fibra de aço reciclada; já para concretos com altos teores de fibra, entre 2,0 e 3,5%, a FAR apresenta um comportamento com maior tenacidade comparada com a FAI.

#### 2.4.7. Pós fissuração

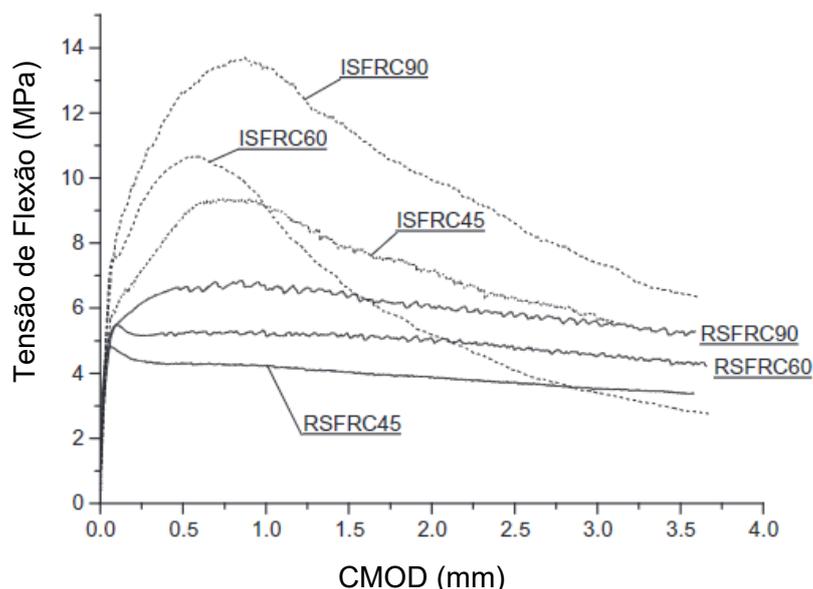
Há consenso que na pós fissuração, o concreto com adição de fibras de aço recicladas apresenta um comportamento caracterizado por tenacidade e ductilidade quando comparado ao concreto simples, frágil (AIELLO *et al.*, 2009; CAGGIANO *et al.*, 2017; CENTONZE; LEONE; AIELLO, 2012b; GAO, 2018; LEONE, M. *et al.*, 2018; MASTALI *et al.*, 2019; NAJIM; SAEB; AL-AZZAWI, 2018; PENG, Gai Fei; NIU; LONG, 2015; ZAREI; ROOHOLAMINI; OZBAKKALOGLU, 2021).

Comparando concretos elaborados com fibras de aço industriais e fibras de aço recicladas, para parte dos autores o comportamento é similar (AIELLO *et al.*, 2009; CAGGIANO *et al.*, 2017; CENTONZE; LEONE; AIELLO, 2012a; ZAMANZADEH; LOURENÇO; BARROS, 2015b). De acordo com o estudo de Aiello *et al.* (2009), a geometria irregular da fibra de aço reciclada é um fator que contribui para a aderência no concreto, quando comparada com a fibra de aço com geometria regular, industrial.

Já Carrillo, Lizarazo-Marriaga e Lamus (2020) concluíram, que o comportamento pós fissuração de concretos com adição de fibras de aço recicladas foi inferior aos resultados obtidos com concretos com fibras e aço industriais e atribuem esse resultado ao fato de os ganchos existentes nas fibras de aço industriais permitirem uma melhor ancoragem.

No programa experimental desenvolvido pelos autores Zamanzade, Lourenço e Barros (2015), foi observado que para os mesmos teores de adição de fibras, 2,0%, 2,5% e 3,75%, as fibras de aço industriais apresentaram um comportamento *hardening* sob ação de flexão, já as vigas com adição de fibras de aço recicladas apresentaram um comportamento *softening*, como mostra a Figura 33. Indicando que as ISF tiveram um desempenho melhor no início da fissuração e as RSF mantiveram um comportamento mecânico constante ao longo do carregamento.

**Figura 33: Comparação do comportamento à flexão de vigas com adição de ISF e RSF.**



Fonte: (ZAMANZADEH; LOURENÇO; BARROS, 2015b).

Tentando compreender o comportamento na pós fissuração de CRFAR e CRFAI, os autores Graeff *et al.* (2012) e Younis (2021) observaram que as fibras de aço recicladas são mais efetivas em restringir as micro e médias fissuras, enquanto as fibras de aço industriais são mais eficientes em restringir as macros fissuras. Baricevic, Bjegovic e Skazlic (2017)

desenvolveram um estudo onde analisaram, de forma experimental, a substituição de parte do volume das fibras de aço industriais por fibras de aço recicladas e concluíram que a RSF contém um número insuficiente de fibras que podem participar ativamente da ponte de transferência de tensões no estágio de grande fissuração, por conta da sua variação de tamanhos, por isso, tem mais influência sobre a resistência residual  $f_{R1}$  do que a resistência residual  $f_{R3}$ .

Sob ciclos repetidos de tensão de flexão para a análise do comportamento à fadiga do CRF, comparando o CRFAR e o concreto simples, os autores Graeff et al. (2012) concluíram que o CRFAI pode suportar níveis de tensão mais elevados do que o concreto simples ou, para o mesmo nível de tensão, resiste por mais tempo. Para atingir esse desempenho, um volume ótimo de fibras por volume foi observado pelos autores, segundo eles, uma adição 2% de fibras por volume de concreto.

A sumarização dos resultados experimentais referentes às resistências residuais obtidas a partir do ensaio de flexão estão apresentados na Tabela 8. Devido ao pequeno número de documentos que realizaram a análise das resistências residuais, os resultados não foram segmentados por norma base para a execução, por isso, pode ocorrer variabilidade dos resultados devido às diferentes metodologias comparadas.

Como falado anteriormente na introdução da RSL, há duas formas de medir o deslocamento (ou abertura da fissura) posicionando o medidor de deslocamentos em 2 locais distintos da ranhura, de forma CMOD e de forma CTOD. Para cada tipo de medição existe um valor de deslocamento que indica a resistência residual correspondente. Por isso, essas informações estão tabeladas em duas colunas distintas.

**Tabela 8: Resultado de resistências residuais obtidas no ensaio de flexão dos documentos selecionados na RSL.**

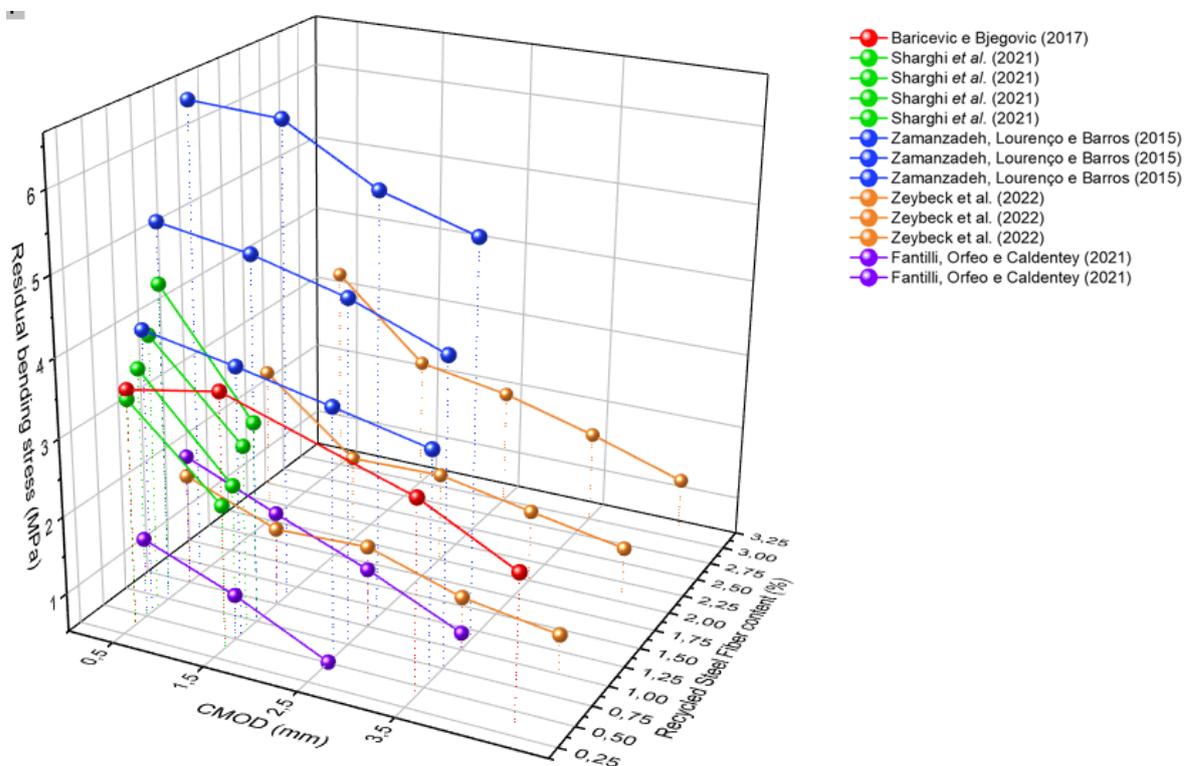
Autor	Ano	I.D.	Qty. (%/vol.)	Ensaio - Flexão								
				Norma	Tipo do CP	CMOD					CTOD	
						FR1 0,5mm (MPa)	FR2 1,5mm (MPa)	FR3 2,5mm (MPa)	FR4 3,5mm (MPa)	FR5 4,5mm (MPa)	Feq 0-0,6 (MPa)	Feq 0,6-3 (MPa)
<b>Zeybeck et al.</b>	<b>2022</b>	SF	0,000	ASTM C78	Prismático	0,87	-	-	-	-	-	-
		FAR	1,000	ASTM C78	Prismático	1,95	1,51	1,56	1,19	1,01	-	-
		FAR	2,000	ASTM C78	Prismático	2,59	1,65	1,68	1,45	1,23	-	-
		FAR	3,000	ASTM C78	Prismático	3,30	2,25	2,04	1,71	1,32	-	-
<b>Fantilli, Orfeo e Caldentey</b>	<b>2021</b>	SF	0,00	EN-14651	Prismático	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	0,500	EN-14651	Prismático	1,53	1,08	0,51	-	-	-	-
		FAR	1,000	EN-14651	Prismático	2,21	1,72	1,26	0,72	-	-	-
<b>Baricevic e Bjegovic</b>	<b>2017</b>	FAI	0,830	RILEM 2002	Prismático	1,47	0,83	-	0,59	0,44	-	-
		FAI	1,240	RILEM 2002	Prismático	2,54	2,36	-	1,59	1,09	-	-
		FAR	1,240	RILEM 2002	Prismático	3,55	3,77	-	3,00	2,38	-	-
<b>Caggiano et al.</b>	<b>2017</b>	SF	0,000	UNI EN 12390-3	Prismático	-	-	-	-	-	-	-
		FAI	0,750	UNI EN 12390-3	Prismático	-	-	-	-	-	3,46	4,34
		FAR	0,750	UNI EN 12390-3	Prismático	-	-	-	-	-	3,74	4,01
<b>Aiello et al.</b>		SF	0,000	UNI11039	Prismático	-	-	-	-	-	0,22	0,00
		FAR	0,230	UNI11039	Prismático	-	-	-	-	-	1,32	1,07
		FAR	0,460	UNI11039	Prismático	-	-	-	-	-	2,52	1,93
		FAI	0,400	UNI11039	Prismático	-	-	-	-	-	3,28	3,01
<b>Centonze, Leone e Aiello</b>	<b>2012</b>	SF	0,000	EFNARC	Prismático	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	0,230	EFNARC	Prismático	-	-	-	-	-	2,59	1,99
		FAR	0,460	EFNARC	Prismático	-	-	-	-	-	3,58	2,61
		FAI	0,460	EFNARC	Prismático	-	-	-	-	-	2,41	2,79
<b>Leone et al.</b>	<b>2016</b>	SF	0,000	UNI 11039	Prismático	-	-	-	-	-	-	-

		FAR	0,300	UNI 11039	Prismático	-	-	-	-	-	2,21	1,92
		FAI	0,300	UNI 11039	Prismático	-	-	-	-	-	2,60	2,25
<b>Leone et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	UNI 11039	Prismático	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	0,460	UNI 11039	Prismático	-	-	-	-	-	2,01	2,09
		FAI	0,460	UNI 11039	Prismático	-	-	-	-	-	2,00	2,30
<b>Martinelli, Caggiano e Xargay</b>	<b>2015</b>	SF	0,000	UNI-11039-1	Prismático	-	-	-	-	-	-	-
		FAI	0,500	UNI-11039-1	Prismático	-	-	-	-	-	3,27	2,78
		FAR	0,500	UNI-11039-1	Prismático	-	-	-	-	-	2,67	1,37
<b>Sharghi et al.</b>	<b>2021</b>	SF	0,000	ASTM C1609	Prismático	-	-	-	-	-	-	-
		FAR	1,280	ASTM C1609	Prismático	3,43	2,35	-	-	-	-	-
		FAR	1,700	ASTM C1609	Prismático	3,72	2,50	-	-	-	-	-
		FAR	2,130	ASTM C1609	Prismático	4,05	2,90	-	-	-	-	-
		FAR	2,550	ASTM C1609	Prismático	4,6	3,10	-	-	-	-	-
<b>Vistos et al.</b>	<b>2018</b>	SF	0,000	UNI-11039-1&2	Prismático	-	-	-	-	-	-	-
		FAI	0,500	UNI-11039-1&2	Prismático	-	-	-	-	-	3,27	2,78
		FAR	0,500	UNI-11039-1&2	Prismático	-	-	-	-	-	2,67	1,37
<b>Zamanzadeh, Lourenço e Barros</b>	<b>2015</b>	FAR	0,560	CEB-FIP 2010	Prismático	4,16	3,94	3,69	3,43	-	-	-
		FAR	0,750	CEB-FIP 2010	Prismático	5,36	5,17	4,86	4,41	-	-	-
		FAR	1,125	CEB-FIP 2010	Prismático	6,62	6,56	5,90	5,55	-	-	-
		FAI	0,560	CEB-FIP 2010	Prismático	8,61	8,36	6,83	5,64	-	-	-
		FAI	0,750	CEB-FIP 2010	Prismático	10,43	7,39	4,86	3,40	-	-	-
		FAI	1,125	CEB-FIP 2010	Prismático	12,37	12	9,71	7,38	-	-	-

Com base nos resultados apresentado na Tabela 8 elaborou-se os gráficos apresentados nas Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37. As Figura 34 e Figura 36 apresentam as resistências residuais medidas de forma CMOD; as Figura 35 e Figura 37 apresentam as resistências residuais medidas de forma CTOD. Os documentos analisados foram separados por cor.

A Figura 34 apresenta os resultados de tensão de flexão das resistências residuais do concreto com adição de fibras de aço recicladas com deslocamentos medidos por CMOD, por percentual de adição de fibras.

**Figura 34: Tensão de flexão das resistências residuais de concretos com adição de fibras de aço recicladas (eixo z) por deslocamento CMOD (eixo x) e por percentual de fibras (eixo y).**

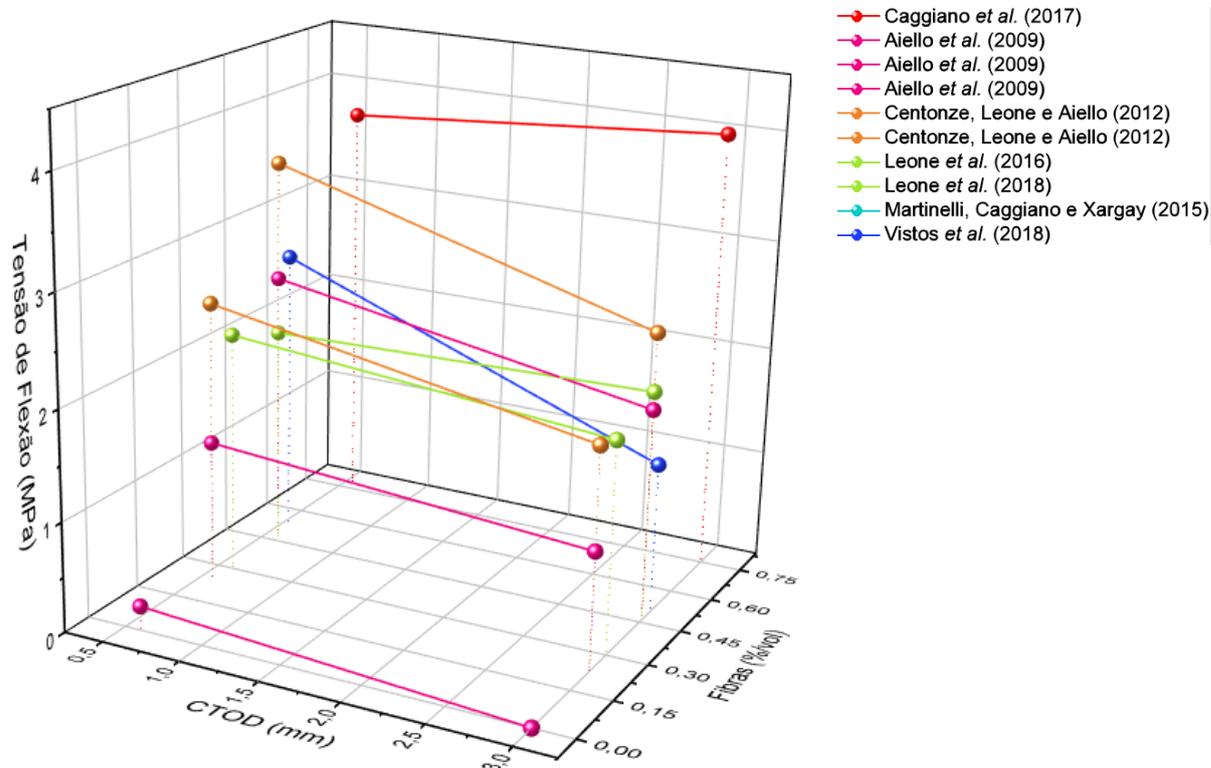


Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 34 que a adição de menos de 1,0% de fibras proporciona uma queda mais acentuada da tenacidade da resistência residual, do que traços com mais adição de fibras. Esse comportamento é nítido em 75% dos documentos analisados.

A Figura 35 apresenta os resultados do comportamento do concreto com adição de fibras de aço recicladas com deslocamentos medidos por CTOD.

**Figura 35: Tensão de flexão das resistências residuais de concretos com adição de fibras de aço recicladas (eixo z) por deslocamento CTOD (eixo x) e por percentual de fibras (eixo y).**



Fonte: Arquivo próprio.

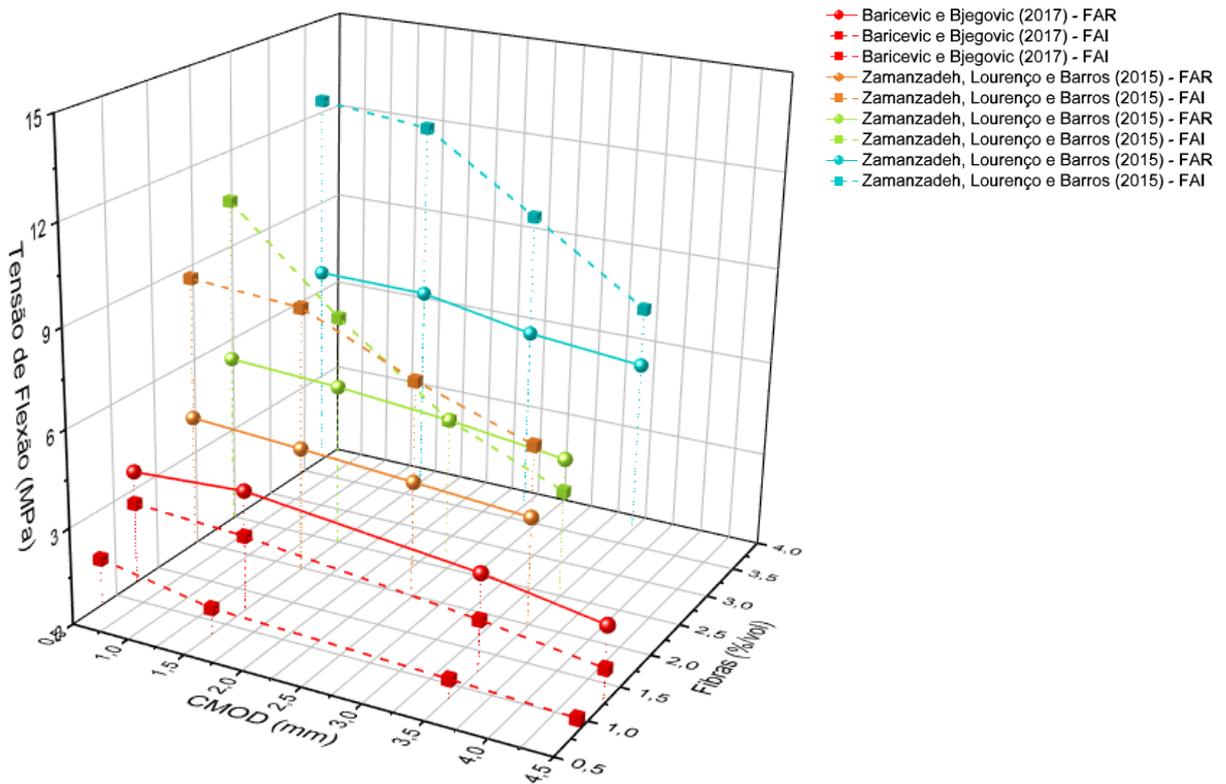
É possível observar na Figura 35, que 20% dos documentos apresentam um decréscimo mais acentuado da resistência residual 1 para a resistência residual 2.

A Figura 36 apresenta os resultados do comportamento do concreto com adição de fibras de aço recicladas comparada com fibras de aço industriais, com deslocamentos medidos por CMOD. Para realizar essa comparação foram utilizados dois estudos que testaram a adição dos dois tipos de fibras, com uma mesma mistura de concreto e com mesmos teores de adição.

Comparando a adição de fibras de aço recicladas e de fibras de aço industriais, é possível observar que o comportamento pós fissuração de concretos de ultra alta resistência com adição de fibras é diferente de concretos com resistência normal com adição de fibras. Para concretos com resistência normal, um mesmo percentual de adição de fibras de aço industriais e fibras de aço recicladas proporciona uma resistência mais elevada em todas as resistências residuais do concreto com adição de fibras de aço recicladas. Esse comportamento é invertido quando se observa o concreto de ultra alta resistência. A possível causa para esse fenômeno é a fissuração do concreto de ultra alta resistência

ocorrer em uma resistência mais elevada do que no concreto simples; a transferência de tensões através das fibras, nesse caso, exige da fibra de aço uma resistência maior e uma ancoragem na interface fibra/matriz mais efetiva.

**Figura 36: Comparação das resistências residuais de concretos com adição de fibras de aço recicladas e concretos com adição de fibras de aço industriais (eixo z) por deslocamento CMOD (eixo x) e por percentual de fibras (eixo y).**



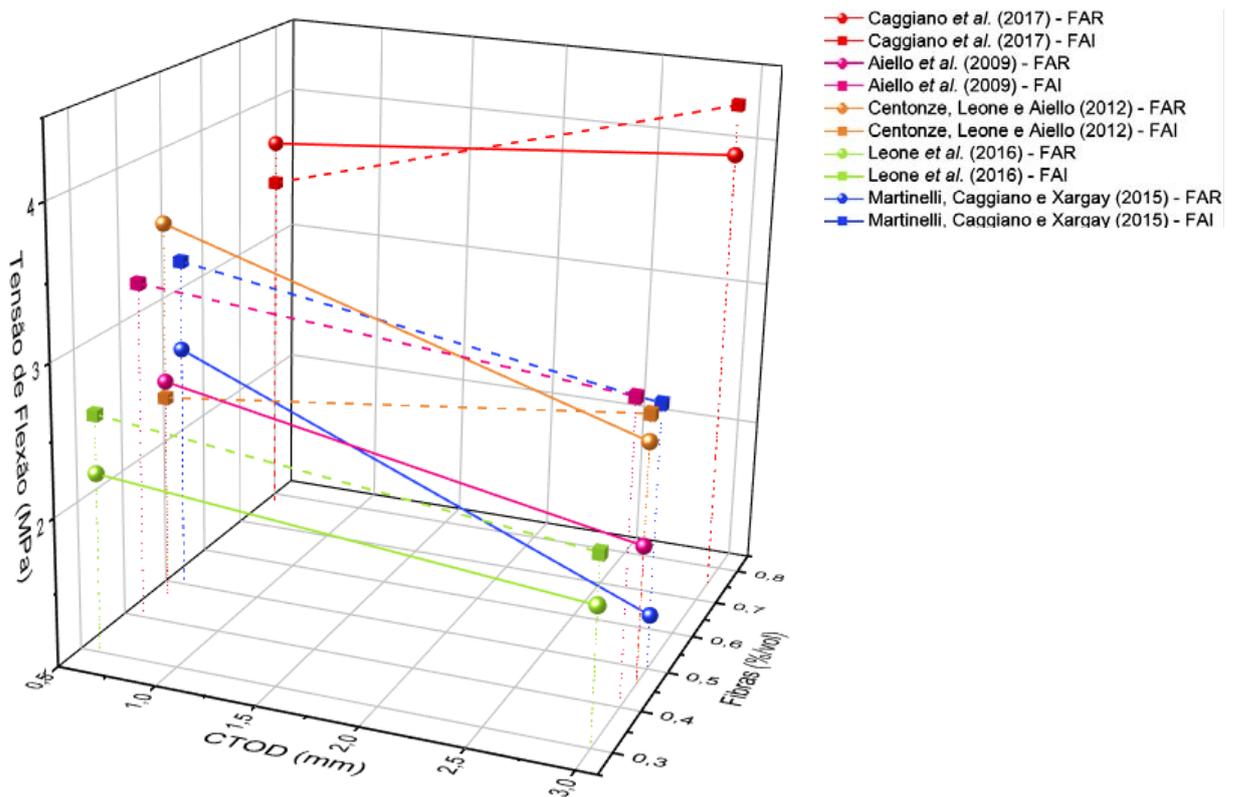
Fonte: Arquivo próprio.

Na Figura 36, 25% dos resultados apresentam o concreto com adição de fibras de aço recicladas com comportamento mais resistente durante a pós fissuração do que o concreto reforçado com fibras de aço industriais, e 75% dos resultados apresentam o concreto reforçado com fibras de aço industriais com comportamento mais resistente durante a pós fissuração quando comparado ao concreto com adição de fibras de aço recicladas.

A Figura 37 apresenta os resultados de resistência residual à flexão de concretos com adição de fibras de aço recicladas e fibras de aço industriais para os deslocamentos de 0,6 e 3 mm medidos de forma CTOD e por percentual de fibras. Na apresentação dos resultados priorizou-se adicionar resultados de concretos com FAR e FAI que continham o mesmo percentual de fibras, ou percentuais bem próximos, para fins comparativos.

Na tabulação dos resultados observou-se que Vistos et al., (2018) e Martinelli, Caggiano e Xargay (2015) apresentaram os mesmos resultados experimentais, por isso, foram considerados apenas os resultados de 1 documento.

**Figura 37: Comparação das resistências residuais de concretos com adição de fibras de aço recicladas e concretos com adição de fibras de aço industriais (eixo z) por deslocamento CTOD (eixo x) e por percentual de fibras (eixo y).**



Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 37 que 60% dos resultados apresentaram um comportamento mais dúctil do concreto reforçado com fibras de aço industriais na medição das 2 resistências residuais e 40% dos resultados apresentaram pouca diferença no declínio da primeira medição de resistência residual para a segunda medição; o declínio discrepante foi observado no estudo de (MARTINELLI; CAGGIANO; XARGAY, 2015).

Ainda sobre a Figura 37, 40% apresentaram inversão de comportamento. Na medição da primeira resistência residual o concreto com adição de fibras de aço recicladas se mostrou com mais resistência, já na segunda medição o concreto com adição de fibras de aço industriais assumiu essa posição.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo desenvolveu uma Revisão Sistemática da Literatura sobre o comportamento mecânico de vigas de concreto com adição de fibras de aço recicladas a partir de pneus e com a sumarização dos resultados apresentados dos estudos selecionados.

A partir dos dados obtidos na RSL, foi possível concluir

1. As duas bases de dados, dentre as pesquisadas, que mais se destacaram em publicações sobre o tema da pesquisa foram: Science Direct e Engineering Village.
2. Houve um aumento significativo no número de publicações sobre o tema no ano de 2021, sendo possível projetar uma tendência alta no número de publicações sobre o tema para os próximos dois anos, pelo menos.
3. Se destacou como periódico mais relevante sobre o tema da pesquisa o periódico Construction and Building Materials.

Com relação aos resultados obtidos a partir da análise do conteúdo dos artigos, foi possível concluir:

1. Há perda da trabalhabilidade do CRF no estrado fresco quando comparado com concreto sem adição de fibras. Comparando a adição de FAR e FAI, em baixos volumes (menos de 0,45%), as FAR comprometem menos a trabalhabilidade da mistura; já em adições acima de 0,45% o comportamento se inverte, indicando um menor comprometimento da trabalhabilidade com a adição das FAI.
2. Não há consenso sobre o comportamento do concreto reforçado com fibras de aço recicladas sob ação de compressão, porém os autores concluíram que as FAR têm a capacidade de retardar a falha do material, possibilitando atingir maiores tensões de compressão e que para um resultado efetivo é necessário que a adição de fibras ocorra em um percentual ótimo e que a mistura seja executada de forma a garantir uma trabalhabilidade adequada. Os resultados experimentais apresentados também indicam uma potencial contribuição das fibras de aço recicladas para proporcionar um comportamento mais dúctil do compósito, visto que mais da metade dos documentos analisados indicaram melhoria na ductilidade.
3. As fibras de aço recicladas adicionadas ao concreto proporcionam um comportamento à tração mais resistente obtido a partir do ensaio de tração por compressão diametral. As conclusões dos autores foram confirmadas com a análise dos resultados experimentais que apresentou mais de 90% de resultados indicando a melhoria dessa propriedade mecânica.
4. O comportamento ao cisalhamento do CRFAR não pôde ser analisado, pois foram poucos documentos que realizaram ensaios para verificar essa propriedade, e

nenhum pôde ser comparado, pois a metodologia de cada ensaio era diferente entre si.

5. A adição de fibras de aço recicladas tem a capacidade de melhorar o desempenho mecânico sob ação de flexão e na pós fissuração. Comparando o concreto simples e o concreto com adição de fibras o comportamento estrutural é alterado de comportamento frágil para comportamento dúctil.
6. Comparando a adição de fibras de aço recicladas e fibras de aço industriais ao concreto, há resultados controversos nos estudos analisados sobre o comportamento à flexão. Alguns autores indicam que a melhoria no comportamento mecânico à flexão da RSF na pós fissuração seja inferior e outra parte dos autores afirmam que a fibra de aço industrial utilizada no SFRC pode ser total ou parcialmente substituída pela fibra de aço reciclada sem perda no desempenho mecânico, sendo a resistência à flexão na pós fissuração uma das melhores contribuições da fibra de aço adicionada ao concreto. Esse resultado controverso pode ser explicado com os estudos de (BARICEVIC; BJEGOVIC; SKAZLIC, 2017; GRAEFF *et al.*, 2012) que observaram que a RSF contém um número insuficiente de fibras que podem participar ativamente da ponte de transferência de tensões no estágio de grande fissuração, sendo mais efetiva no controle da micro e média fissura, com isso, tendo maior influência na resistência residual  $f_{R1}$ . Portanto, a análise do comportamento à flexão na pós fissuração pode depender do nível de fissuração e da resistência residual analisada. Resultado semelhante foi observado ao elaborar os gráficos com os resultados experimentais dos autores.

## 3. Programa Experimental

---

O programa experimental dessa pesquisa foi desenvolvido com a finalidade de analisar o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço recicladas e para isso foi realizada a comparação com o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço industriais e com o concreto simples, sem adição de fibras.

Nesse capítulo é descrita a metodologia de separação das fibras de aço recicladas úteis para a adição no concreto; da caracterização dos materiais constituintes do CRF; a caracterização das FAR e das FAI; definição do traço do concreto e produção do CRF; e por fim, é apresentada a análise do comportamento mecânico do CRF submetendo os corpos de prova aos ensaios no estado fresco e no estado endurecido.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais serão apresentados em forma de gráficos e tabelas.

Ao final do capítulo estão apresentadas as conclusões dos resultados observados experimentalmente.

### 3.1 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido em 3 etapas: separação das FAR úteis e caracterização das FAR, caracterização dos materiais constituintes do CRF; e análise do comportamento mecânico do CRFAR para o qual as variáveis de estudo são:

- a) Teor de fibras; 0,3% e 0,6% de fibras em volume;
- b) Tipo de fibras de aço: reciclada e industrial;
- c) Solicitações: compressão, tração diametral e flexão com análise das tensões residuais.

A Tabela 9 apresenta o resumo dos CPs e ensaios realizados nessa pesquisa.

**Tabela 9: Traços e ensaios executados para a caracterização do CRF**

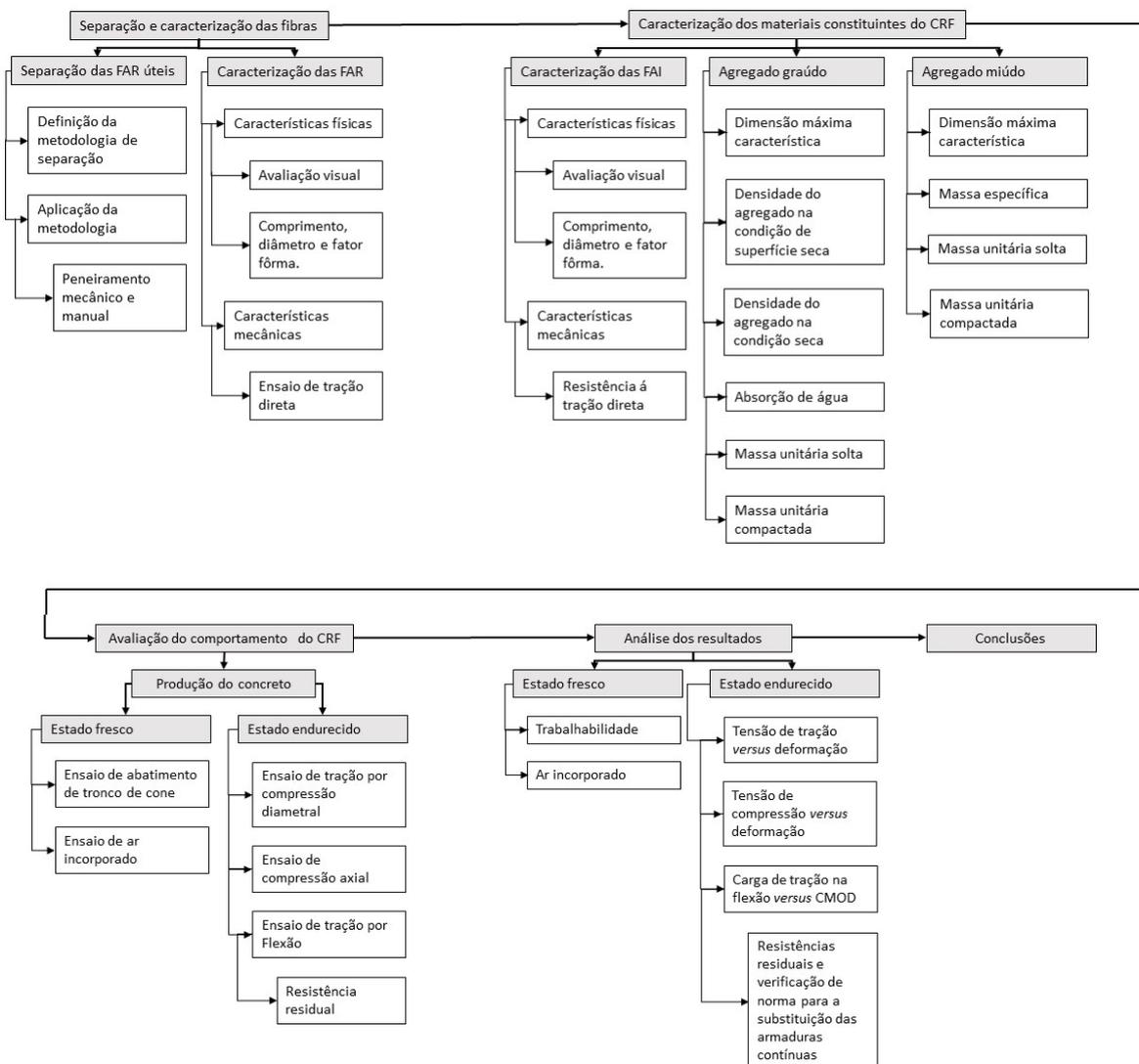
Traços	Compressão	Tração	Flexão	Ar Incorporado	Slump	
	nº CPs	nº CPs	nº CPs	Teste	Teste	
REF	Sem fibras	3	3	4	1	1
FAR 0,3%	0,3% volume de fibras recicladas	3	3	4	1	1
FAR 0,6%	0,6% volume de fibras recicladas	3	3	4	1	1
FAI 0,3%	0,6% volume de fibras industriais	3	3	4	1	1
FAI 0,6%	0,6% volume de fibras industriais	3	3	4	1	1
<b>Total</b>		<b>15</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Tipo do CP / Recipiente</b>		<b>Cilíndrico</b>	<b>Cilíndrico</b>	<b>Prismático</b>		
<b>Dimensão (cm)</b>		<b>10 x 20</b>	<b>10 x 20</b>	<b>15 x 15 x 55</b>		

Fonte: Arquivo próprio.

Foram testados 5 traços de concreto, como indicado na Tabela 9, e para cada traço foram moldados 6 CP's cilíndricos, 3 para o ensaio de compressão, 3 para o ensaio de tração; e, 4 CP's prismáticos para o ensaio de flexão; também foram realizados ensaios de ar incorporado e *Slump* para analisar o comportamento do concreto no estado fresco.

A Figura 38 apresenta o organograma das atividades desenvolvidas nesse programa experimental.

**Figura 38: Organograma de atividades do Programa Experimental**



Fonte: Arquivo próprio.

## 3.2 METODOLOGIA

Apresenta-se a metodologia para cada uma das partes do programa experimental. Essa metodologia serve como um guia para garantir a replicabilidade e a validade dos resultados obtidos.

### 3.2.1 Separação e caracterização da amostra útil de fibras de aço recicladas

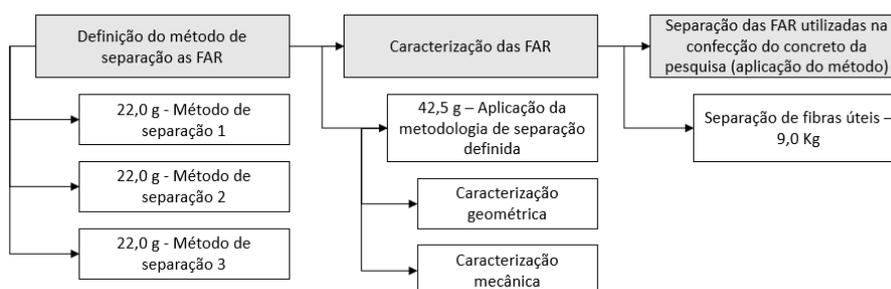
As fibras de aço recicladas foram obtidas a partir do aço extraído de pneus no processo de reciclagem. Esse material foi doado pela empresa indústria CBL Comércio e

Reciclagem de Borracha Ltda, que tem sede em São Bernardo do Campo - SP (<https://cblreciclagem.com.br/produtos/>).

O material proveniente do processo de reciclagem é bastante heterogêneo e contém arrames de grande diâmetro ( $e > 5,0$  mm), pedaços de borracha, cordas e poeiras, os quais não são adequados como reforço do concreto. Desta forma, foi necessário separar o material útil de forma mais simples possível, sem grandes interferências, a fim de que o processo de separação fosse viável industrialmente.

Primeiramente, realizou-se ensaios experimentais a fim de definir uma metodologia de separação das FAR úteis; posteriormente, aplicou-se a metodologia escolhida a fim de realizar a caracterização das FAR e separar as fibras úteis para a adição no concreto confeccionado na pesquisa, como mostra o organograma apresentado na Figura 39.

**Figura 39: Sequência de definição e aplicação da metodologia de separação das FAR**



Fonte: Arquivo próprio.

Nesta pesquisa optou-se por utilizar como base o mesmo método descrito por Isa et al. (2020), por trazer uma descrição clara da metodologia utilizada em seu trabalho, e que poderia ser replicada industrialmente para a separação de um grande volume de fibras. A fim de obter-se a melhor metodologia possível para o material desta pesquisa, foram também testados outros métodos que são modificações do método de Isa et al. (2020), como apresentado na Tabela 10, cada um destes métodos foi aplicado em uma porção de 22,0 g e para as FAR úteis obtidas foram coletados valores de comprimento e diâmetro para posterior análise da distribuição na amostra e escolha do método mais adequado a pesquisa.

**Tabela 10: Metodologias utilizadas para a definição do método de separação utilizado na pesquisa**

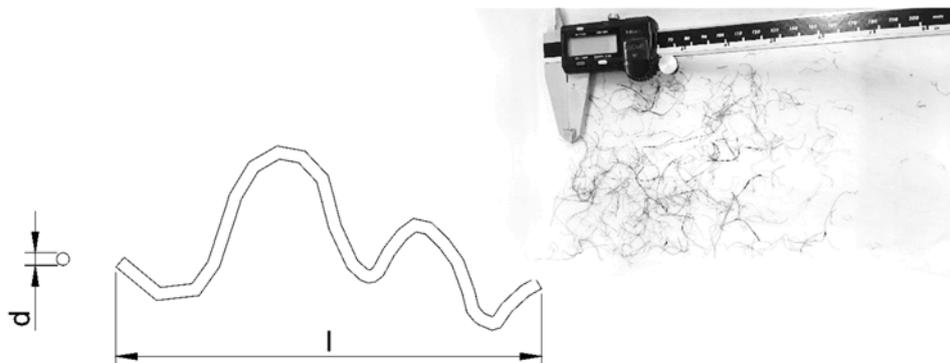
	<b>Descrição</b>	<b>Fonte</b>
<b>Método de separação 1</b>	Peneiramento na peneira com dimensão de # 1 mm; o que foi passante, peneirar novamente na peneira # 1 mm; o que foi retido, peneirar novamente na peneira de # 1mm; o material passante nas duas etapas, descartar; o material retido nas duas etapas, descartar; o material retido e passante, ou passante e retido, deve ser misturado efetuado um novo peneiramento na peneira # 0,6 mm; deve ser utilizado o material retido na #0,6mm e o passante deve ser descartado.	Isa et al. (2020)
<b>Método de separação 2</b>	Peneiramento mecânico por 5 min. na sequência de peneiras de dimensões: #6,3mm, #4,8mm, #2,4mm, #1,1mm e #0,6mm; e posteriormente, separar para a utilização o material retido na peneira #0,6mm, descartando o passante da #0,6mm e o retido na peneira #1,1mm e nas peneiras de maior abertura	Adaptado de Isa et al. (2020)
<b>Método de separação 3</b>	Peneiramento mecânico por 5 min. na sequência de peneiras: #6,3mm, #4,8mm, #2,4mm, #1,1mm. Descartar todo o material retido nas peneiras #1,1mm e de maiores aberturas e utilizar o material passante para peneiramento mecânico por 3 seg. na peneira #0,6mm., utilizar o material retido na peneira #0,6mm e descartar o material passante	Adaptado de Isa et al. (2020)

Fonte: Arquivo próprio.

Após a escolha do método oficial da pesquisa, efetuou-se a caracterização geométrica e mecânica para uma porção maior de fibras. O método 3 foi escolhido e, posteriormente, aplicado para realizar a separação de uma porção de 42,50g de material reciclado, esse procedimento resultou em 10,50g de fibras úteis para serem caracterizadas, perfazendo um total de 1991 unidades de fibras<sup>1</sup>. Efetuou-se a medição do diâmetro “d” e comprimento “l” de cada unidade e fibra com um paquímetro, como mostra o esquema da Figura 40. A partir dessas medidas obteve-se o fator fôrma “l/d”, bem como a frequência e a média das dimensões analisadas.

<sup>1</sup> Quantidade de fibras definida seguindo o realizado em outros estudos, como o estudo de Leone et al. (2018), que utilizou 1200 fibras, Caggiano et. al (2017) e Frazão, Barros e Bogas (2021), que selecionaram 2000 fibras para a caracterização. Já Simalti e Singh (SIMALTI; SINGH, 2021b) utilizaram 150 fibras para realizar a caracterização, obtendo resultado similar aos demais.

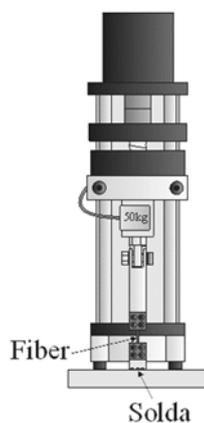
**Figura 40: Esquema para a identificação das características geométricas das fibras de aço recicladas e imagem da realização do ensaio**



Fonte: Arquivo próprio.

Com relação a caracterização mecânica, avaliou-se a resistência à tração direta utilizando o equipamento denominado como aparato portátil de arrancamento de fibra, demonstrado na Figura 41, e com os parâmetros obtidos a partir desse ensaio, foi avaliado se a fibra atende aos requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 15530 (2019).

**Figura 41: Equipamento de realização de ensaio de tração direta em fibras de aço.**



Fonte: Arquivo próprio.

Foram ensaiadas 6 unidades de fibras de aço recicladas a velocidade de 0.005 mm/s e foi determinada a tensão de tração máxima, a tensão de tração média entre os 6 exemplares de fibras analisados e o desvio padrão.

### 3.2.2 Caracterização dos demais materiais constituintes do CRF

O cimento utilizado na pesquisa foi do tipo CPV-ARI da marca Holcim. O Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana da UFSCar determinou a massa específica desse cimento em  $3,16 \text{ g/cm}^3$

O aditivo super plastificante utilizado é o SP CQ Flow 37, que foi doado pela Camargo Química. Com densidade de  $1,02$  a  $1,10 \text{ g/cm}^3$  e com dosagem sugerida de  $0,5$  a  $1,0\%$  spc.

Foram desenvolvidos CRF utilizando também fibras de aço industrializadas, cujas as características geométricas e mecânicas foram obtidas através das informações disponibilizadas pelo fabricante Dramix 3D. A fibra de aço industrializada utilizada nesse estudo (Figura 42) é do tipo 45/30 BL, com gancho. O fabricante especifica as características físicas resumidas na Tabela 11.

Figura 42: FAI utilizada no estudo



Tabela 11: Características físicas das FAI apresentadas pelo fabricante

Tipo	Comprimento – l (mm)	Diâmetro – d (mm)	Fator (l/d)	fôrma	Resistência à tração (Mpa)
Com gancho	30	0,62	45		1270

Fonte: adaptado de ARCELORMITTAL; BELGO BEKAERT ARAMES (2023)

Além das fibras, os agregados fazem parte da composição do CRF. Para a caracterização do agregado graúdo foram realizados ensaios para a determinação das características como: distribuição granulométrica e dimensão máxima característica, de acordo com a ABNT NBR 17054 (2022); densidade do agregado na condição de superfície seca e densidade do agregado na condição seca, de acordo com a NBR 16917 (2021).

O resumo das características do agregado graúdo está apresentado na Tabela 12.

**Tabela 12: Resumo das propriedades do agregado graúdo**

Propriedades do agregado graúdo	
Dimensão máxima característica	12,5 mm
Densidade do agregado na condição de superfície seca ( $P_{sss}$ )	2,89 g/cm <sup>3</sup>
Densidade do agregado na condição seca ( $P_s$ )	2,82 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	2,17 %
Massa unitária solta	1479,33 kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária compactada	1602,50 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Arquivo próprio.

Para a caracterização do agregado miúdo foram realizados os ensaios para a determinação das características como: distribuição granulométrica e dimensão máxima característica, de acordo com a ABNT NBR 17054 (2022); massa específica, de acordo com BNT NBR 9776 (2017); massa unitária solta e massa unitária compactada, de acordo com a norma ABNT NBR 16972 (2021).

O resumo das características do agregado miúdo está apresentado na Tabela 13.

**Tabela 13: Resumo das propriedades do agregado miúdo**

Propriedades do agregado miúdo	
Dimensão máxima característica	2,4 mm
Massa específica	2,61 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária solta	1587,44 kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária compactada	1672,89 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Arquivo próprio.

### 3.2.3 Metodologia para caracterização do CRF

Para a caracterização do CRF, primeiramente foi realizada a determinação do traço para obter um concreto com resistência à compressão alvo de 40 MPa. Considerou-se o traço desenvolvido no estudo de Gerin (2020) como base, com algumas adaptações para atingir a trabalhabilidade e homogeneidade adequadas para a moldagem dos CP's com adições de fibras. A Tabela 14 indica os traços avaliados. Foram utilizados os materiais: cimento CPV-ARI, água, brita 0 como agregado graúdo, areia média como agregado miúdo, FAR e aditivo super plastificante

**Tabela 14: Traços do concreto testados**

I.D.	Quantidade dos materiais								a/c adm
	Cimento CP-ARI	Água	Brita 0	Areia média (seca)	FAR		SP (densidade média 1,06 g/cm <sup>3</sup> )		
	Kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	%/vol	Kg/m <sup>3</sup>	%/vol.	
<b>Traço do estudo de Gerin (2020)</b>	351,70	239,15	907,38	851,11	0	0	0	0	0,68
<b>Teste 1</b>	351,70	239,15	907,38	851,11	0	0	0,253	0,072	0,68
<b>Teste 2</b>	351,70	239,15	907,38	851,11	23,6	0,3	0,253	0,072	0,68

Fonte: Arquivo próprio.

Destaca-se que o percentual de adição de 0,3% de FAR foi estabelecido experimentalmente, durante a mistura de concreto na betoneira de tombamento de 175 L. Para estabelecer esse percentual os critérios considerados foram: boa consistência e mobilidade da mistura; não haver a formação de aglomerados de fibras; não haver a segregação durante a mistura.

Anteriormente foi testado o traço de 0,3% e 1,0%. Observou-se que o traço com 0,3% tinha boa trabalhabilidade, porém, com 1,0% observou-se emaranhados de fibras durante a mistura na betoneira, e a moldagem foi dificultada. Assim, optou-se por utilizar o traço de 0,3% de fibra e um valor intermediário entre 0,3 e 1,0%, sendo 0,6%. O traço com 1,0% não foi ensaiado, pois ao desmoldar observou-se que havia nichos de concretagem devido ao emaranhado de fibras, como mostra a Figura 43.

**Figura 43: Traço com 1,0% de adição de FAR com nicho de concretagem**



Fonte: Arquivo próprio.

Foram confeccionados 5 CP's cilíndricos por traço com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento; e foi verificada a trabalhabilidade por meio do *Slump Test* bem como a resistência à compressão por meio do ensaio de compressão simples, como mostra a Tabela 15.

**Tabela 15: Número de CP's confeccionados e ensaios realizados**

ID	Slump test	Ensaio de compressão axial (7 dias)	Ensaio de compressão axial (87 dias)
Gerin (2020)	1	2	3
Teste 1	1	2	3
Teste 2	1	2	3

Fonte: Arquivo próprio.

Com base nas informações obtidas definiu-se os traços definitivos da pesquisa, como mostra a Tabela 1 Tabela 19. Para efeito de comparação foi estabelecida a variação de percentual de adição de fibras de 0,3% e 0,6%. Sendo 0,3% o percentual de adição de fibras que causou a mínima interferência nos critérios citados anteriormente e 0,6% o percentual de adição que causou a máxima interferência na trabalhabilidade do concreto sem inviabilizar a moldagem. Para viabilizar a adição de 0,6% de fibras no concreto o SP foi ajustado para 0,1%, ainda dentro das recomendações do fabricante.

**Tabela 16: Traços finais da pesquisa**

I.D.	Quantidade dos materiais e Mistura								
	Cimento	Água	Brita 0	Areia (seca)	Fibras		SP (densidade média 1,06 g/cm³)		a/c
	Kg/m³	l/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg / m³	% / vol. de conc.	Kg / m³	% / massa de cim.	adm
REF	351,70	239,15	907,38	851,11	0,00	0,00	0,35	0,10	0,68
FAR 0,3%	351,70	239,15	907,38	851,11	23,55	0,30	0,35	0,10	0,68
FAR 0,6%	351,70	239,15	907,38	851,11	47,10	0,60	0,35	0,10	0,68
FAI 0,3%	351,70	239,15	907,38	851,11	23,55	0,30	0,35	0,10	0,68
FAI 0,6%	351,70	239,15	907,38	851,11	47,10	0,60	0,35	0,10	0,68

Fonte: Arquivo próprio.

Após a definição do traço oficial da pesquisa foram confeccionados 30 CP's cilíndricos e 20 CP's prismáticos. A mistura de concreto foi realizada na betoneira com capacidade para 175 L. Primeiramente os materiais foram separados e pesados. Posteriormente eles foram inseridos na betoneira na sequência:

1. Agregado graúdo: brita 0;
2. 80% da água;
3. Cimento: CP V - ARI;
4. Agregado miúdo: areia média;
5. Aditivo: Super plastificante;
6. Adição (quando houver): FAR ou FAI;

7. 20% da água.

A moldagem foi executada utilizando espátulas e colher de pedreiro.

A fôrma prismática foi fabricada com placas de MDF e parafusos fazendo o fechamento, com dimensões de 15x15x55 cm, de forma que fosse possível retirar os parafusos, desmontar a forma, e desmoldar o CP de forma fácil, sem causar fissuras nas quinas.

A fôrma do CP cilíndrico foi a convencional, de plástico, com dimensões de 10x20 cm.

Foi utilizado óleo mineral como desmoldante para os dois tipos de CP's.

O adensamento de todos os corpos de prova foi realizado utilizando uma mesa vibratória (Figura 44). A vibração ocorreu 2 vezes, a primeira foi logo após o enchimento de metade da fôrma, a segunda ocorreu após o preenchimento total da fôrma. Os excessos foram retirados com o auxílio de uma colher de pedreiro.

**Figura 44: Fôrmas prismáticas e cilíndricas na mesa vibratória para adensamento**



Fonte: Arquivo próprio.

Os CP's foram desmoldados após 24h e foram armazenados em uma sala sem controle de temperatura, com lona plástica no chão e por cima dos CP's. Não foi executada cura úmida por não haver um tanque que coubesse a quantidade de CP's elaborados na pesquisa. A Figura 45 apresenta os CP's confeccionados na pesquisa, em fase de cura.

**Figura 45: CP's da pesquisa em fase de cura**



Fonte: Arquivo próprio.

O CRF foi caracterizado no estado fresco por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone e no estado endurecido por meio do ensaio de tração por compressão diametral, ensaio de compressão axial, ensaio de tração por flexão com dados de resistência residual.

Os ensaios executados no programa experimental para a caracterização do CRF e a quantidade de CP's elaborados estão apresentados na Tabela 9.

Os resultados foram analisados, tabelados e posteriormente serão apresentados em forma de gráficos.

#### *3.2.3.1. Metodologia dos ensaios no estado fresco*

O ensaio de Abatimento de tronco de cone (Slump Test) foi executado de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR NM 67 (2019), como mostra a Figura 46.

**Figura 46: Ensaio de abatimento de tronco de cone**



Fonte: Arquivo próprio.

O ensaio de ar incorporado foi realizado pelo método pressiométrico, normatizado pela ASTM C231 (2010). Para isso, foi utilizado aparelho medidor de ar incorporado, com capacidade aproximada de 8L da marca Projetest, com nanômetro com escala da 0 a 100%, como mostra a Figura 47.

**Figura 47: Aparelho de ar incorporado da marca Projetest**



Fonte: Arquivo próprio.

### 3.2.3.2. Metodologia dos ensaios no estado endurecido

O ensaio de compressão axial foi executado de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018) utilizando a máquina de ensaio universal EMIC (Figura 48), com aplicação de deslocamento axial, a velocidade de 0,45 MPa/s.

**Figura 48: Máquina de ensaios universais executando ensaio de compressão axial**



Fonte: Arquivo próprio.

O ensaio de compressão diametral (tração indireta) foi executado de acordo com a ABNT NBR 7222 (2011). no qual o CP é posicionado na horizontal na máquina de ensaios universais, EMIC, como mostra a Figura 49. O ensaio foi realizado sem controle de deslocamento, a uma velocidade de 0,05 MPa/s e foi registrado deslocamento por força aplicada. O deslocamento obtido foi o deslocamento do pistão.

**Figura 49: Máquina de ensaios universais executando ensaio de compressão diametral (tração)**



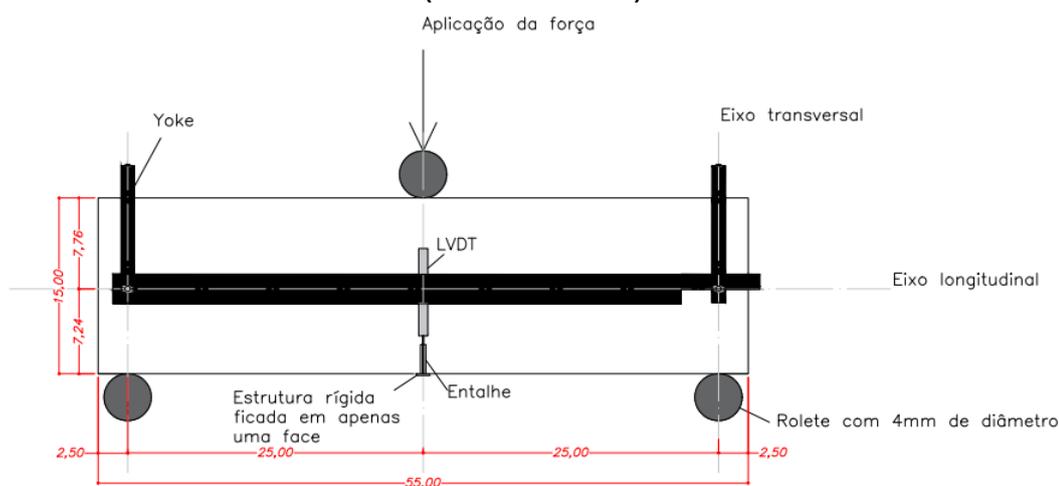
Fonte: Arquivo próprio.

O ensaio de flexão em 3 pontos foi executado de acordo com a norma ABNT NBR 16940 (2021). Para isso foram utilizados: um suporte de LVDT denominado “yoke”; 2

LVDTs; e 3 roletes com dimensão de 40 mm de diâmetro, como mostra o esquema do ensaio na

Figura 50.

**Figura 50: Esquema do ensaio de flexão em 3 pontos realizado no programa experimental (medidas em cm)**



Fonte: Arquivo próprio.

Primeiramente, os CP's prismáticos foram medidos pelo seu comprimento total, a altura foi medida em 3 pontos e a largura foi medida em 3 pontos; foram feitas marcações dos centros e dos locais onde deveriam ficar posicionados os roletes durante o ensaio de flexão (Figura 51).

O corpo de prova prismático foi entalhado no centro por toda a sua largura, com as dimensões de 25 mm de profundidade e 5 mm de espessura. As dimensões do entalhe estão apresentadas no Apêndice F.

O ensaio foi executado na máquina de ensaios universais, EMIC (Figura 51), a velocidade de 0,2 mm/min e foi medido o deslocamento do pistão (ciclo aberto). Obteve-se o registro de deslocamento vertical de cada LVDT pela carga aplicada. Esses dados foram transformados para CMOD por resistência à flexão e CMOD por resistência à flexão residual.

**Figura 51: Máquina de ensaios universais executando ensaio de flexão**



Fonte: Arquivo próprio.

A transformação de deslocamento vertical medido por meio do LVDT para CMOD se deu pela relação de equivalência expressa pela equação:

$$\delta = 0,85 \times CMOD + 0,04 \quad \text{Eq.08}$$

Onde:  $\delta$  = Deslocamento vertical (mm); CMOD = Deslocamento linear medido pelo transdutor (mm)

E obteve-se o resultado de  $CMOD_1 = 0,5\text{mm}$  equivalente ao  $\delta = 0,47\text{mm}$ ,  $CMOD_2 = 1,5\text{mm}$  equivalente ao  $\delta = 1,32\text{mm}$ ,  $CMOD_3 = 2,5\text{mm}$  equivalente ao  $\delta = 2,17\text{mm}$ ,  $CMOD_4 = 3,5\text{mm}$  equivalente ao  $\delta = 3,02\text{mm}$ .

A resistência à flexão no limite de proporcionalidade foi calculada a partir da equação:

$$f_l = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad \text{Eq. 09}$$

Onde:  $f_l$  = Limite de proporcionalidade (MPa);  $F_L$  = Carga correspondente ao limite de proporcionalidade (N);  $l$  = Comprimento do vão (mm);  $b$  = Largura do corpo de prova (mm);  $h_{sp}$  = Distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova (mm).

A resistência residual à tração na flexão foi calculada por meio da equação:

$$f_{R,i} = \frac{3F_i l}{2bh_{sp}^2} \quad \text{Eq.10}$$

Onde:  $f_{R,i}$  = Resistência residual à tração na flexão correspondente ao CMOD =  $CMOD_1$  (com  $i = 1, 2, 3, 4$ ) (MPa);  $F_i$  = Carga correspondente ao CMOD =  $CMOD_1$  (com  $i = 1, 2, 3, 4$ ) (MPa);  $l$  = Comprimento do vão (mm);  $b$  = Largura do corpo de prova (mm);  $h_{sp}$  = Distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova (mm).

### 3.3 RESULTADOS

#### 3.3.1 Separação das fibras de aço recicladas úteis

A caracterização das fibras que foram utilizadas na pesquisa, e que serão apresentadas a seguir, são consideradas por Bentur e Mindess (2007) como o maior fator de influência no comportamento do CRF no estado endurecido. Os autores resumem a influência das fibras adicionadas ao concreto, às interações fibra-matriz:

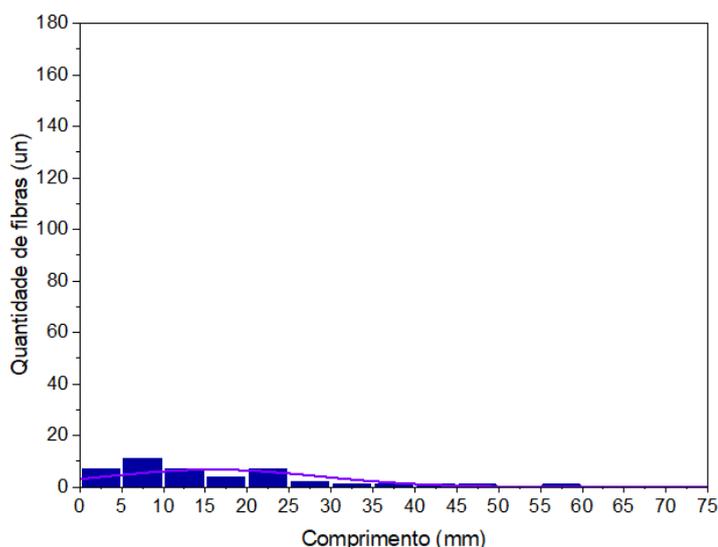
- Adesão física e mecânica;
- Fricção;
- Ancoragem mecânica

Esses aspectos serão abordados com detalhes ao longo desse item.

A Tabela 10, apresentada anteriormente, descreve as metodologias de separação das FAR que terão seus resultados discutidos ao longo desse item.

Ao tentar aplicar a metodologia 1 na forma como foi apresentada, observou-se que as fibras se emaranhavam mais do que em seu estado natural interferindo no material passante pela peneira #1. O histograma do comprimento das FAR selecionadas a partir da metodologia 1 é apresentado na Figura 52.

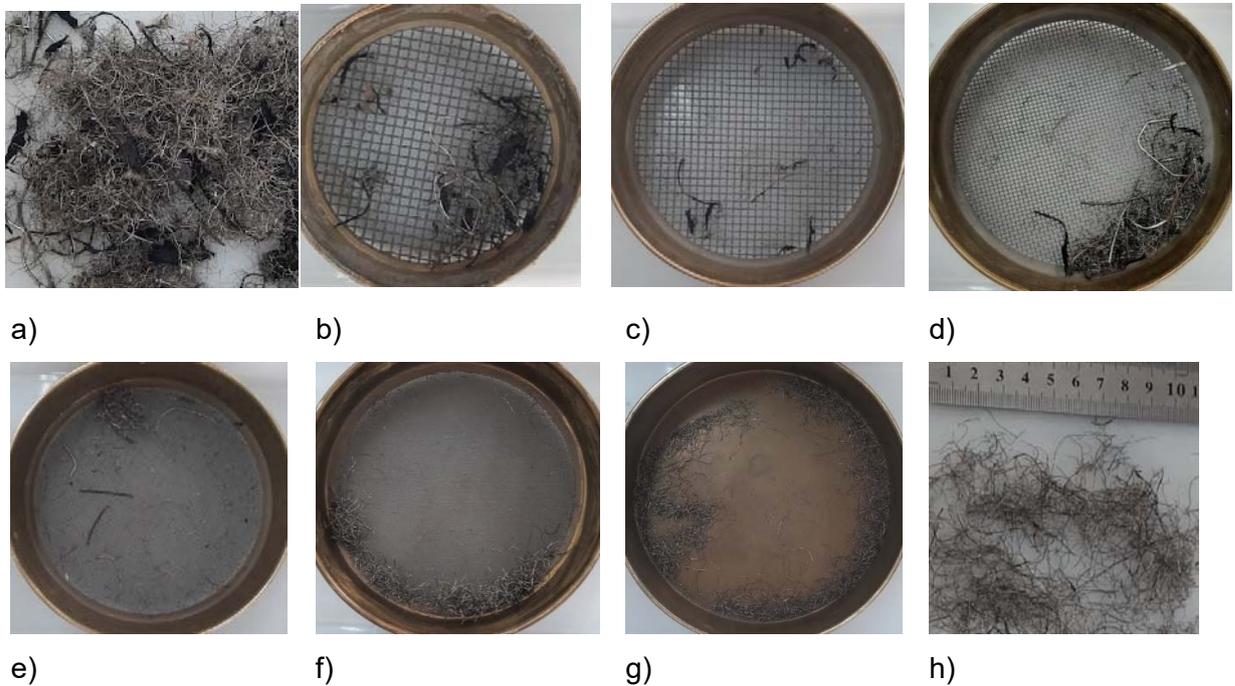
**Figura 52: Histograma do comprimento das FAR selecionadas pelo método 1**



Fonte: Arquivo próprio.

A Figura 53 apresenta o resultado do método 2 de separação. É possível observar a porção separada manualmente e utilizada no peneiramento, o material retido em cada peneira e o material aproveitado.

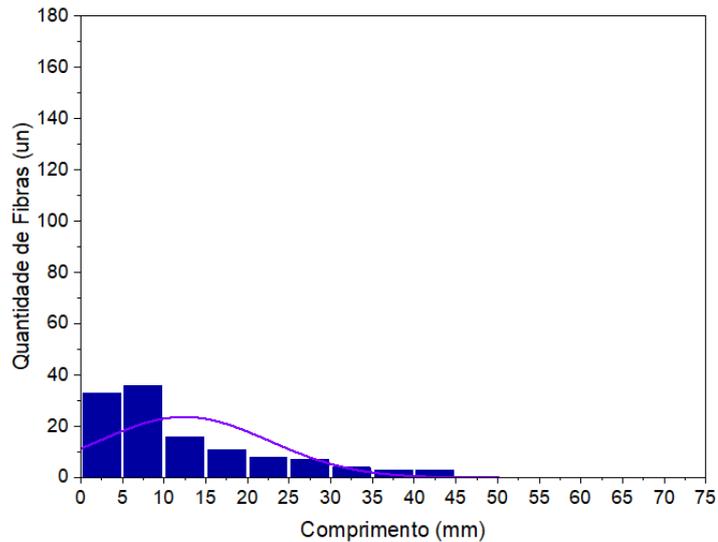
**Figura 53: Metodologia de peneiramento 2 a) produto da reciclagem b) peneira #6,3mm c) peneira #4,8mm d) peneira #2,4mm e) peneira #1,1mm f) peneira #0,6mm g) material passante na #0,6mm h) material retido peneira #0,6mm e classificado como útil nessa metodologia**



Fonte: Arquivo próprio.

O histograma do comprimento das fibras selecionadas a partir dessa metodologia é apresentado na Figura 54: Histograma do comprimento das FAR selecionadas pelo método. É possível observar que o material considerado útil nessa metodologia possui fibras com comprimento maior que 12,5mm, porém apresenta muitas fibras pequenas, menores que 10mm.

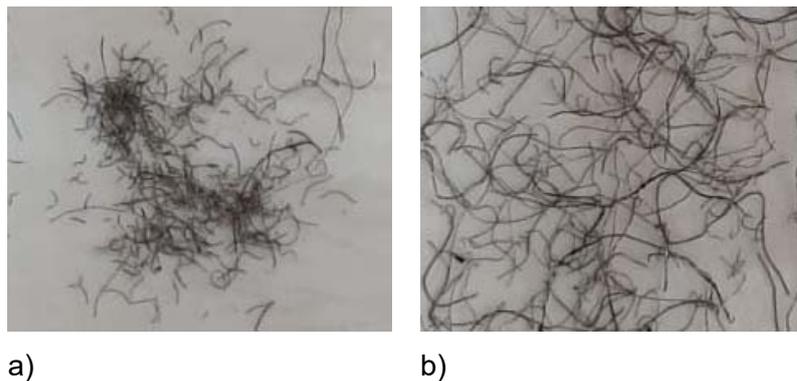
**Figura 54: Histograma do comprimento das FAR selecionadas pelo método 2**



Fonte: Arquivo próprio.

Para a separação das fibras utilizando o método 3 foi realizado o peneiramento de uma porção de material reciclado por 5 minutos em uma sequência de peneiras, posteriormente, um peneiramento manual por 3 segundos. O resultado desse método de separação está apresentado na Figura 55 e na Figura 56.

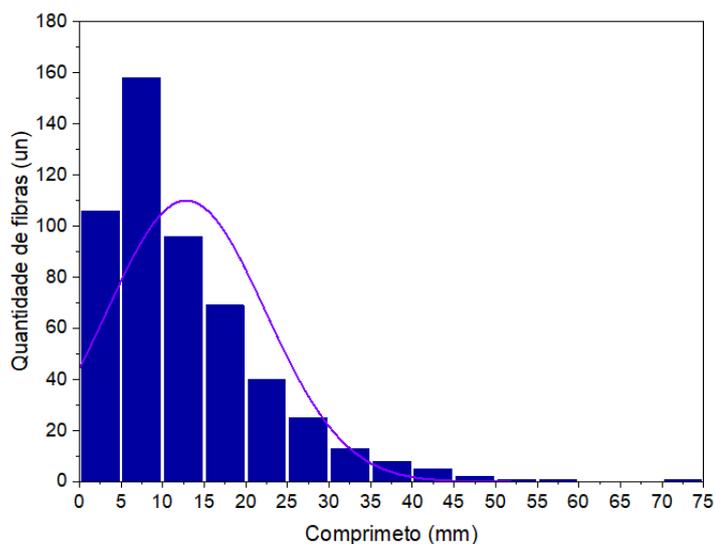
**Figura 55: Metodologia de peneiramento 3 a) material passante na peneira #0,6mm b) material retido na peneira #0,6mm**



Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 55 que houve uma boa separação entre as fibras de menor comprimento e as fibras de maior comprimento. O histograma do comprimento das FAR selecionadas a partir dessa metodologia é apresentado na Figura 56. É possível observar que o comprimento de fibras mais recorrente é de 5-10 mm.

**Figura 56: Histograma do comprimento das FAR selecionadas pelo método 3**



Fonte: Arquivo próprio.

A Tabela 17 apresenta os dados das metodologias de seleção de FAR úteis para a pesquisa e a partir dessa análise foi possível definir o método oficial de separação. A frequência apresentada na tabela é a maior frequência apresentada em cada histograma.

**Tabela 17: Comparação entre métodos de seleção de FAR úteis.**

	Porção inicial (g)	Porção utilizada (g)	Unidades de fibras úteis	Comprimento médio (mm)	Comprimento Frequente (mm)	Fibras > 12 mm (%)
<b>Método 1</b>	21,14	0,42	43	15,89	6 - 8	51,16
<b>Método 2</b>	22,16	1,02	121	12,40	2 - 4	37,19
<b>Método 3</b>	22,16	3,8	525	12,83	4 - 6	41,14

Fonte: Arquivo próprio.

A fim de selecionar o procedimento mais adequado para separação das fibras recicladas levou-se em consideração os seguintes fatores:

- Tempo de peneiramento e execução da metodologia;
- Quantidade de produto resultado da separação;
- Efetividade do método para separar as fibras úteis do restante do material, evitando o desperdício;
- Qualidade do produto;
- Percentual de fibras úteis para a influência no comportamento estrutural (fibras com mais de 12,5 mm de comprimento).

Considerando esses fatores e as informações presentes na Tabela 17, determinouse o método 3 como o método oficial de seleção de FAR dessa pesquisa. O método 3 proporcionou a seleção das fibras com comprimento médio de 12,83mm, 41% das fibras selecionadas possuem comprimento maior que 12mm. Resultados semelhantes ao do método 3, com relação ao comprimento médio das fibras e comprimento de maior frequência, estão apresentados na Tabela 18.

**Tabela 18: Resultado similares ao método 3 de comprimento médio e comprimento frequente de FAR de estudos de outros autores**

Autores	ano	Comprimento médio (mm)	Comprimento Freq. (mm)
Martinelli, E. et al.	2015	12,00	9 - 15
Leone, M.; et al.	2018	13,94	10 - 15
Graeff, A. G. et al.	2012	12,50	-
Isa, M. N. et al.	2021	11,60	9 - 15
Baricevic, A. E Bjegovic, D.	2017	10,62	8 - 7
Pajak, M. et al.	2021	13,20	-
Vistos, L. et al.	2018	12,00	9 - 15

Fonte: Arquivo próprio.

Nenhum método de seleção das FAR, testados nessa pesquisa, mostrou-se eficaz para separar fibras com o tamanho recomendado por de Figueiredo (2011), para uma efetiva participação na transferência de tensões após o início da fissuração, que seria de 2 vezes a dimensão máxima do agregado, nesse caso, 25mm.

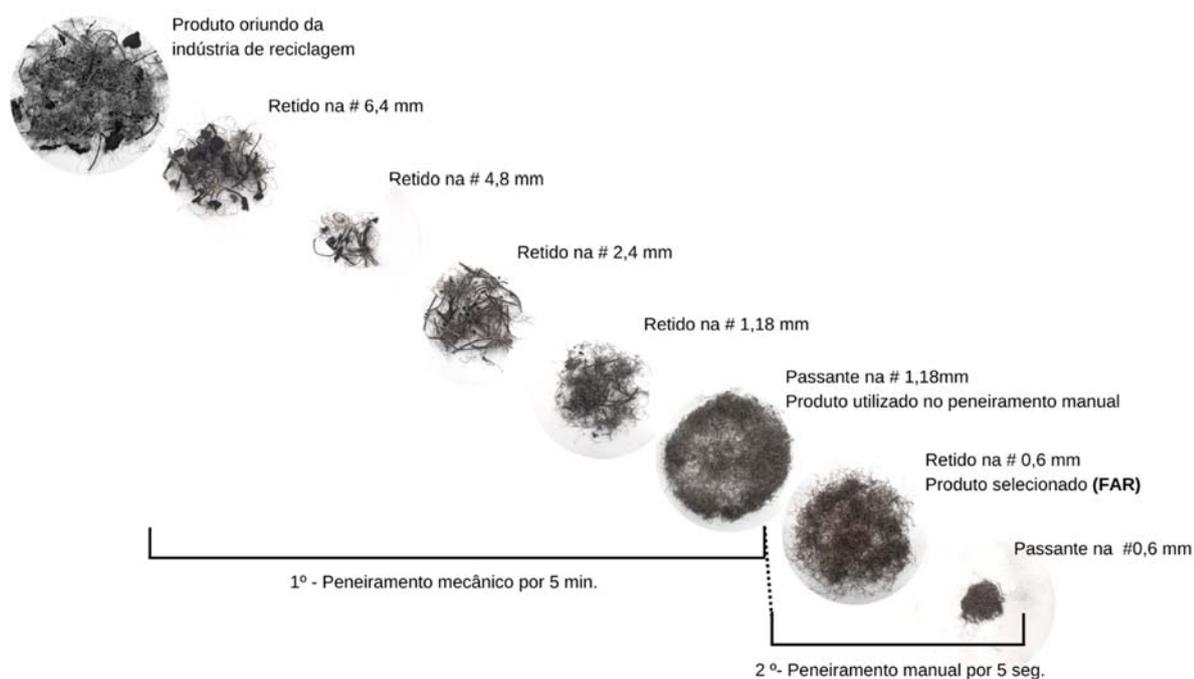
Para atender a recomendação seria necessário, aumentar o tamanho da peneira no processo de separação das fibras úteis ou reduzir o tamanho do agregado. Aumentar o diâmetro da malha da peneira não seria viável, pois peneiras com dimensões maiores retiveram partículas de borracha junto como as fibras. A outra hipótese seria reduzir a dimensão do agregado, porém, seria utilizada uma solução incomum na construção civil, com agregado graúdo menores do que a brita 0.

### **3.3.2 Caracterização geométrica e mecânica das FAR**

As fibras obtidas pelo método de separação 3 (método escolhido para a pesquisa) foram caracterizadas por meio dos seguintes procedimentos: medição do diâmetro, comprimento, determinação do fator de forma e determinação da resistência a tração direta.

Conforme apresentado na metodologia, uma porção de 42,5 g de material reciclado foi utilizado para o procedimento de caracterização e resultou na FAR cuja distribuição geometria conforme apresentado na Figura 57.

**Figura 57: Amostras de FAR retidas nas peneiras após a separação e as FAR selecionadas**

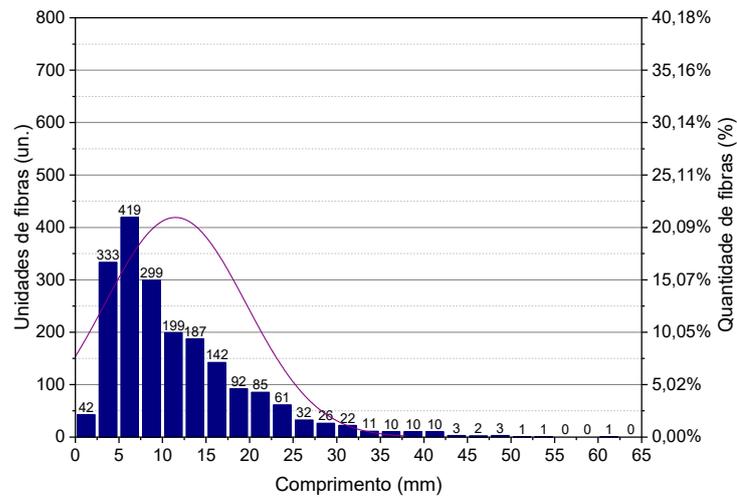


Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar que do volume inserido nas peneiras houve um grande volume de FAR úteis para a pesquisa e selecionadas.

As Figuras Figura 58, Figura 59 e Figura 60 apresentam o histograma das características geométricas das FAR. A Figura 58 apresenta o comprimento e a Figura 59 apresenta o diâmetro e a Figura 60 apresenta o fator fôrma. As informações geométricas das FAR estão resumidas na Tabela 19.

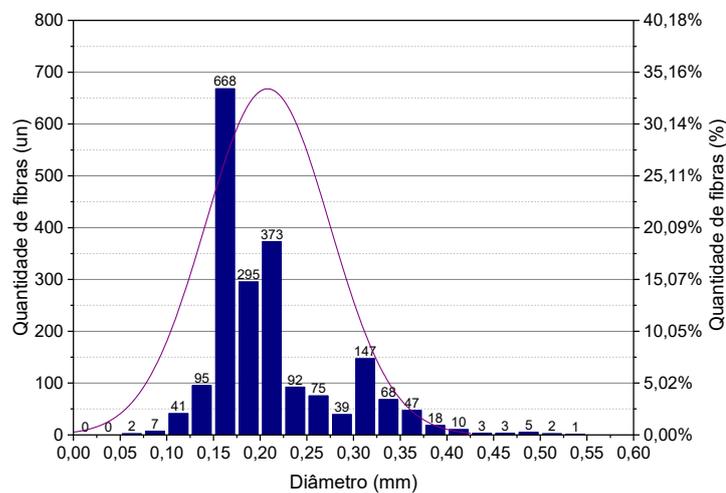
**Figura 58: Gráfico de distribuição da quantidade de fibras por comprimento**



Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar que a maior frequência de comprimento das FAR é de 5,0mm – 7,5mm. A média é 11,48 mm e a mediana é 9,06 mm.

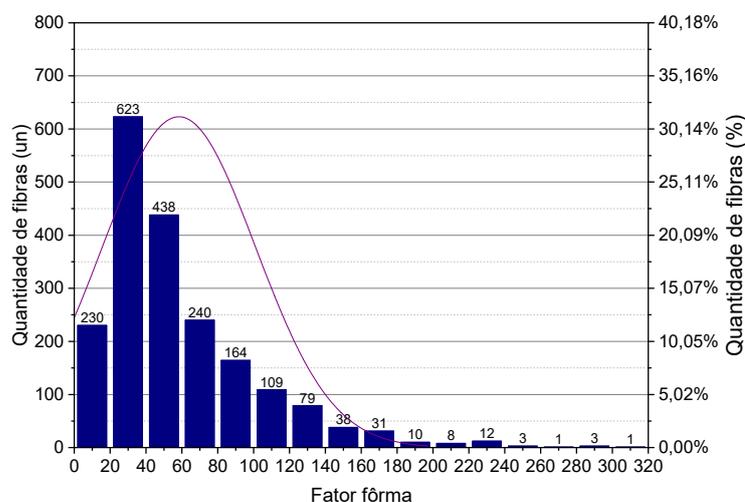
**Figura 59: Gráfico de distribuição da quantidade de fibras por diâmetro**



Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar que a maior frequência de diâmetro das FAR é entre 0,15 mm – 0,175 mm. A média é 0,21 mm, a mediana é 0,19 mm.

**Figura 60: Gráfico de distribuição da quantidade de fibras por fator fôrma**



Fonte: Arquivo próprio.

Na Figura 60 é possível observar que o fator fôrma de maior frequência está no intervalo de 20 – 40 adm. A média é 58,30 e a mediana é 45,40.

**Tabela 19: Características geométricas das FAR**

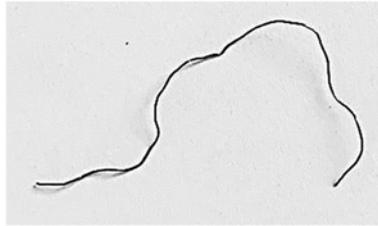
	Comprimento - l (mm)	Diâmetro - d (mm)	Fator fôrma - l/d
<b>Máximo</b>	61,64	0,53	328,33
<b>Mínimo</b>	1,65	0,06	5,65
<b>Frequência (histograma)</b>	5,0 – 7,5	0,15 – 0,17	20 - 40
<b>Média</b>	11,48	0,21	58,30
<b>Mediana</b>	9,06	0,19	45,40

Fonte: Arquivo próprio.

Comparando a média de comprimento encontrada durante a seleção do método de separação das FAR (Tabela 17) com a média de comprimento encontrada após a caracterização geométrica das FAR (Tabela 19) ; a caracterização das FAR apresenta um valor ligeiramente menor do que a encontrada durante a definição do método de separação; porém, por realizar-se uma análise mais ampla durante a caracterização geométrica, é possível dizer que o valor de média de comprimento em 11,48 mm representa melhor o montante utilizado.

Portanto, a FAR utilizada nessa pesquisa pode ser definida como de formato corrugado, irregular, com variação de diâmetro ao longo de seu comprimento, com presença de corda e borracha aderida. A Figura 61 é um exemplar da fibra de aço utilizada no estudo.

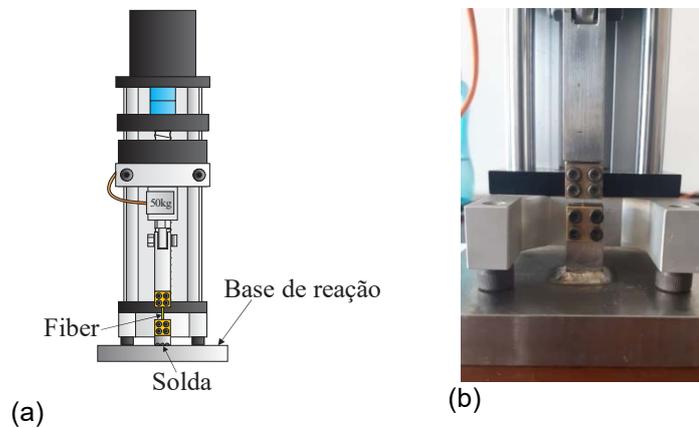
**Figura 61: FAR utilizada no estudo**



Fonte: Arquivo próprio.

O ensaio de tração direta foi realizado utilizando o aparato para ensaio de arrancamento de fibra desenvolvido por Krahl et. al. (KRAHL *et al.*, 2020); como mostra a Figura 62. O ensaio foi realizado a velocidade de 0.005 mm/s de deslocamento.

**Figura 62: Ensaio de tração da FAR a) esquema do aparato de ensaio de tração direta b) ensaio de tração direta sendo realizado na FAR utilizada na pesquisa**



Fonte: Arquivo próprio.

A partir do ensaio de tração direta obteve-se os resultados apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20: Resultados de ensaio de tração direta da FAR**

Ensaio de tração direta			
I.D.	Tensão de tração (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão
Fibra 1	4047,32		
Fibra 2	666,76		
Fibra 3	1236,14	1525,94	1309,78
Fibra 4	735,14		
Fibra 5	1784,51		

<b>Fibra 6</b>	685,76
----------------	--------

Fonte: Arquivo próprio.

A fibra de aço reciclada utilizada nessa pesquisa não passou por processo de altas temperaturas, com isso os resultados obtidos correspondem com o esperado, com base nos estudos de outros autores, como o relatado por Zhang e Gao (2020), Aiello et. al (2009), Frazão, Barros e Bogas (2021) que apontam que a resistência à tração direta das FAR fica em torno de 1500 a 2500 MPa.

Há relatos, que quando submetida à elevada temperatura durante o processo de extração da borracha; as fibras têm sua resistência mecânica à tração direta reduzida, como relatado no estudo de Rashid e Balouch (2017), que obteve um resultado de 780 MPa e Najim, Saeb e Al-Azzawi (2018), que obteve um valor de 781,73 MPa de resistência à tração direta nas fibras testadas.

### 3.3.3 Caracterização do CRF no estado fresco e no estado endurecido

Nesse item serão apresentados os resultados referentes ao comportamento do concreto no estado fresco e no estado endurecido.

#### 3.3.3.1. *Trabalhabilidade e ar incorporado*

A Tabela 21 apresenta os resultados de ensaios do concreto para analisar o seu comportamento no estado fresco.

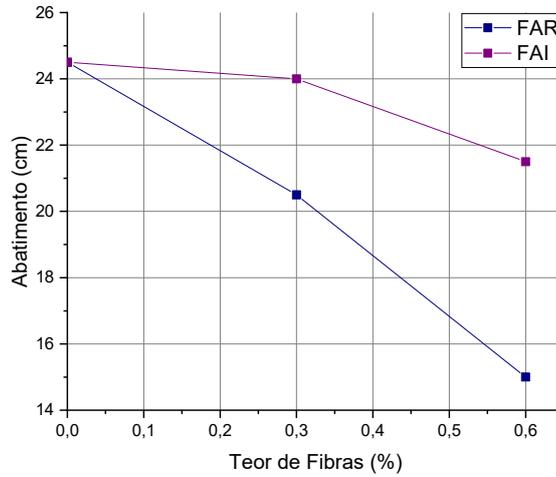
**Tabela 21: Resultados de ensaios do concreto no estado fresco**

I.D.	Abatimento de tronco de cone		Ar incorporado	
	Abatimento (cm)	Varição com relação ao REF	Teor de ar (%)	Varição com relação ao REF
REF	24,5		0,95	
FAR 0,3%	20,5	-4,0	1,30	0,35
FAR 0,6%	15,0	-9,5	1,45	0,50
FAI 0,3%	24,0	-0,5	1,20	0,25
FAI 0,6%	21,5	-3,0	1,70	0,75

Fonte: Arquivo próprio.

Com base nessa tabela foram elaborados os gráficos apresentados nas Figura 63 e Figura 64 que comparam o comportamento de concretos com FAI e com FAR adicionadas.

**Figura 63: Gráfico de abatimento de tronco de cone por teor de fibras adicionadas ao concreto**

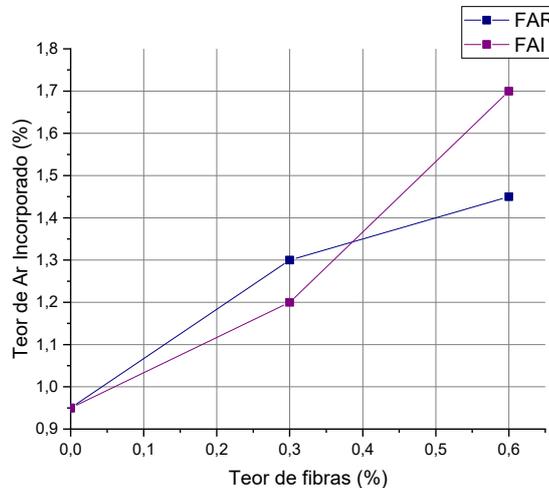


Fonte: Arquivo próprio.

Tanto a adição de FAR e quanto a adição de FAI causam a diminuição do abatimento de tronco de cone durante o ensaio de *Slump test*. Analisando os traços com FAR, com 0,3% de adição houve uma queda de 16,32 % no abatimento; já com 0,6% de adição houve uma queda do abatimento de 38,77%, com relação ao traço de referência. Analisando as FAI, com 0,3% de adição houve uma queda de 2,04% no abatimento; já com 0,6% de adição houve uma queda de 12,24% com relação ao traço de referência.

Comparando o comportamento de concretos com FAI e FAR, é possível dizer que as FAI afetam menos o abatimento do concreto fresco. Com adição de 0,3% de fibras, as FAI obtêm um abatimento 14,28% maior do que as FAR, quando a adição é de 0,6%, as FAI apresentam um abatimento 26,53% maior do que as FAR.

**Figura 64: Gráfico de Ar Incorporado por Teor de fibras adicionadas ao concreto**



Fonte: Arquivo próprio.

Na Figura 64 é possível observar que, apesar da perda da trabalhabilidade indicada anteriormente na análise do abatimento, no ensaio de ar incorporado, a adição de FAR não prejudicou a qualidade do concreto no que tange a porosidade, indicada nesse ensaio.

Comparando as FAR e FAI, com adição de 0,3%, as FAI apresentaram um teor de ar incorporado 0,1% menor do que as FAR; já com adição de 0,6% esse comportamento se inverteu e as FAR obtiveram um teor de ar incorporado 0,25% menor.

### 3.3.3.2. Resistência à compressão axial

A Figura 65 apresenta os CP's após o ensaio de compressão axial. É possível observar que no concreto sem adição de fibras o local da fratura é nítido. Já nos CP's confeccionados com concreto com 0,3% de FAR e com concreto com 0,3% de FAI não apresentam um local de ruptura nítido, é possível observar o local de ruptura, porém, existem múltiplas fissuras próximas. Os CP's confeccionados com concreto com 0,6% de FAR e com concreto com 0,6% de FAI também não apresentam local de ruptura nítido, nesse caso, a aparência é de esmagamento.

**Figura 65: CP's após ensaio de compressão axial a) REF b) 0,3% FAR c) 0,3% FAI d) 0,6% FAR e) 0,6% FAI**



Fonte: Arquivo próprio.

A Tabela 22 apresenta o resumo dos resultados da pesquisa experimental referentes ao ensaio de compressão axial.

**Tabela 22: Resumo dos resultados da pesquisa experimental referente ao ensaio de compressão axial.**

Resumo dos Resultados da pesquisa - Ensaio de Compressão								
I.D.	Idade (dias)	Quant. de CP's	Dimensão do CP			Resistência		
			Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da base (mm <sup>2</sup> )	Força máx. (KN)	Resist. à compressão (MPa)	Coef. De variação
REF	28	3	101,23	197,78	8048,11	283509,73	35,23	2,19
FAR 0,3%	28	3	101,40	194,87	8075,43	259246,06	31,92	2,53
FAR 0,6%	28	3	101,58	199,19	8103,33	251588,51	31,05	1,47
FAI 0,3%	28	3	101,78	197,26	8136,34	244517,47	30,06	0,55
FAI 0,6%	28	3	101,75	198,18	8131,54	233586,54	28,73	7,91

Fonte: Arquivo próprio.

Os resultados experimentais demonstraram que houve uma redução da resistência à compressão axial com a adição de fibras, sendo elas industriais ou recicladas.

A adição de 0,3% de FAI causou uma perda na resistência máxima de 14,67%, quando comparada ao traço de referência. A adição de 0,6% de FAR provocou um prejuízo na resistência máxima de 11,86 %, já o mesmo percentual de adição de FAI proporcionou uma perda de 18,45 % com relação ao concreto de referência. Comparando as FAR e as FAI, a adição de FAR causaram um menor prejuízo no valor de resistência à compressão axial máxima, no traço FAI 0,3% o valor foi 6,59% menor que no traço FAR 0,3%.

### 3.3.3.3. Resistência à tração por compressão diametral

Após o ensaio de tração por compressão diametral foram registradas imagens dos CP's rompidos de cada traço ensaiado, como mostra a Figura 66.

**Figura 66: CP's após ensaio de tração por compressão diametral a) REF b) 0,3% FAR c) 0,6% FAR d) 0,3% FAI e) 0,6% FAI**



Fonte: Arquivo próprio.

A análise da Figura 66 demonstra que as fibras se aderiram a matriz de concreto e formaram pontes, de tal forma, que impediu a propagação da trinca e surgiram múltiplas fissuras. Esse comportamento também foi constatado por Mastali e Dalvand (2016).

A Tabela 23 apresenta o resumo dos resultados da pesquisa experimental referentes ao ensaio de tração por compressão diametral.

**Tabela 23: Resumo dos resultados da pesquisa experimental referente ao ensaio de tração por compressão diametral**

Resumo dos Resultados da pesquisa - Ensaio de Tração								
I.D.	Idade (dias)	Quant. de CP's	Dimensão do CP			Resistência		
			Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da base (mm <sup>2</sup> )	Força máx. (KN)	Resist. à Tração (MPa)	Coef. de Variação (%)
REF	28	3	101,24	201,29	8049,17	93863,20	2,93	1,89
FAR 0,3%	28	3	101,35	201,87	8067,21	123733,27	3,85	2,85
FAR 0,6%	28	3	101,74	198,34	8129,94	143963,30	4,54	1,79
FAI 0,3%	28	3	101,65	198,22	8115,57	107107,47	3,39	9,38
FAI 0,6%	28	3	101,57	201,16	8102,00	121098,80	3,78	2,54

Fonte: Arquivo próprio.

A adição de 0,3% de FAR proporciona um acréscimo na resistência de ruptura de 31,29 %, já a adição de 0,3% de FAI proporcionam um aumento na resistência de 15,69 %, quando comparados com o concreto de referência. Com o aumento do percentual de adição para 0,6% de FAR, ocorre um acréscimo na resistência de ruptura de 54,95 %, já a adição de 0,6% de FAI, ocasionam um incremento de 29,01 %, quando comparados com o traço de referência.

Comparando as FAR e FAI, quando adicionado 0,3% de FAR e 0,3% de FAI, as FAR provocam um aumento de 15,60 % na resistência a tração do concreto em relação as FAI; quando adicionado 0,6% de FAR e 0,6% de FAI, as FAR proporcionam um aumento 25,94 % em relação as FAI.

Esses resultados indicam que a adição de fibras atuou como ponte de transferência de tensões mantendo a resistência do corpo de prova mesmo após a perda da resistência por tração do concreto. Porém, o aumento de resistência é de no máximo 50%. Esses resultados convergem com as considerações de Bentur e Mindess (2007) sobre o assunto, que adições em baixos teores de fibras ( $v < 1,5\%$  por volume) proporcionam pouco incremento nos resultados de resistência a tração do CRFA.

#### 3.3.3.4. Resistência à Flexão

O ensaio de tração na flexão traz informações importantes como: tensão máxima de flexão, resistências residuais, classificação do comportamento. Neste sentido, o panorama de fissuração dos CPs após a realização do ensaio é apresentado na Figura 67. Observa-se que as fissuras que provocaram a ruptura do CP coincidem com o entalhe executado. No concreto de referência a fratura foi completa, já nos concretos reforçado com fibras é possível observar que a fissura não se estende até a face superior do CP, onde foi aplicada a força, demonstrando que as fibras aderiram à matriz de concreto e funcionaram como pontes de transferência de tensão entre as faces do concreto fissurado, restringindo a propagação de fissura.

É possível observar também, na Figura 67, que nos concretos com adição de 0,3%, sendo FAR ou FAI, houve o surgimento de múltiplas fissuras, já com adição de 0,6% de FAR ou FAI, houve o surgimento de uma única fissura, porém, mais espessa.

**Figura 67: CP's prismáticos após ruptura por tração a) REF b) 0,3% FAR c) 0,6% FAR d) 0,3% FAI e) 0,6% FAI**



A Tabela 24 apresenta um resumo dos resultados obtidos no ensaio de flexão, com a média para cada traço elaborado.

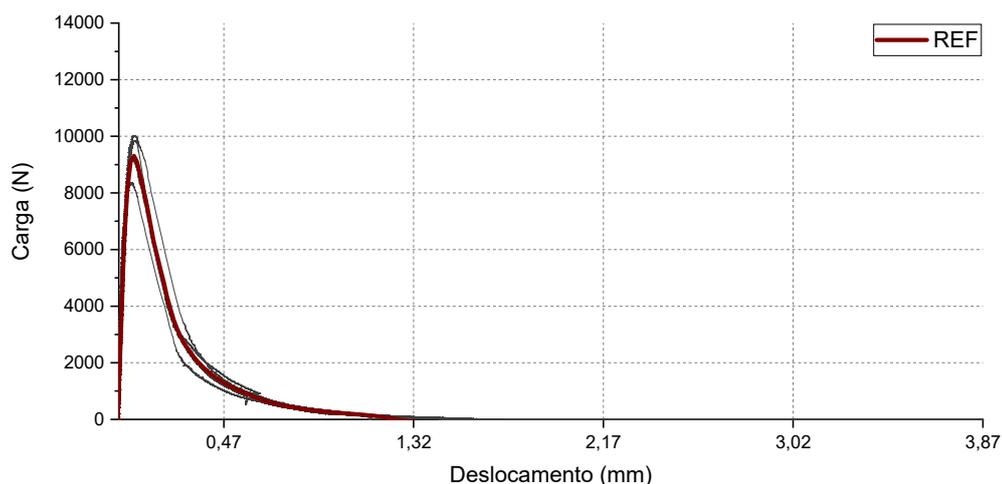
**Tabela 24: Resumo dos resultados da pesquisa experimental referente ao ensaio flexão**

Resumo dos Resultados da pesquisa - Ensaio de Flexão								
I.D.	Idade (dias)	Quant. de CP's	Dimensão do CP			Resistência		
			Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Força máx. (KN)	Resist. à flexão (MPa)	Desvio Padrão
REF	29	4	148,48	151,64	553,75	9392,50	3,00	0,29
FAR 0,3%	30	4	149,06	150,06	552,50	10301,75	3,31	0,17
FAR 0,6%	28	4	147,34	153,55	554,00	10813,00	3,41	0,40
FAI 0,3%	27	4	146,70	153,03	553,75	9584,25	3,03	0,17
FAI 0,6%	27	4	146,80	152,15	553,25	10465,33	3,32	0,15

Fonte: Arquivo próprio.

As Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71, Figura 72 apresentam as curvas Força vs. Deslocamento na flexão de cada traço elaborado. As linhas cinzas representam cada CP ensaiado e a linha colorida com maior espessura representa a curva média daquele traço.

**Figura 68: Curva de carga por deslocamento obtida no ensaio de flexão para o traço de referência (REF)**

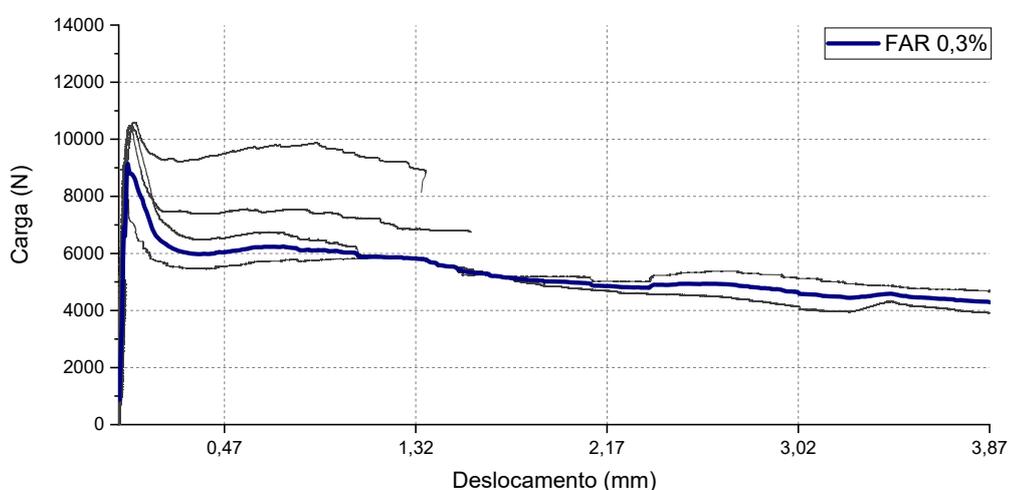


Fonte: Arquivo próprio.

A curva de Força vs. Deslocamento na Flexão apresentada na Figura 68, está de acordo com o esperado para um concreto simples, sem adição de fibras. É possível observar que a falha acontece e não há resistência residual.

Na Figura 69, a curva apresentada é uma curva típica para baixos teores de adição de fibras de aço, com comportamento *softening*. De acordo com a classificação apresentada por Bentur e Mindess, (2007), o modo de falha pode ser classificado como falha catastrófica.

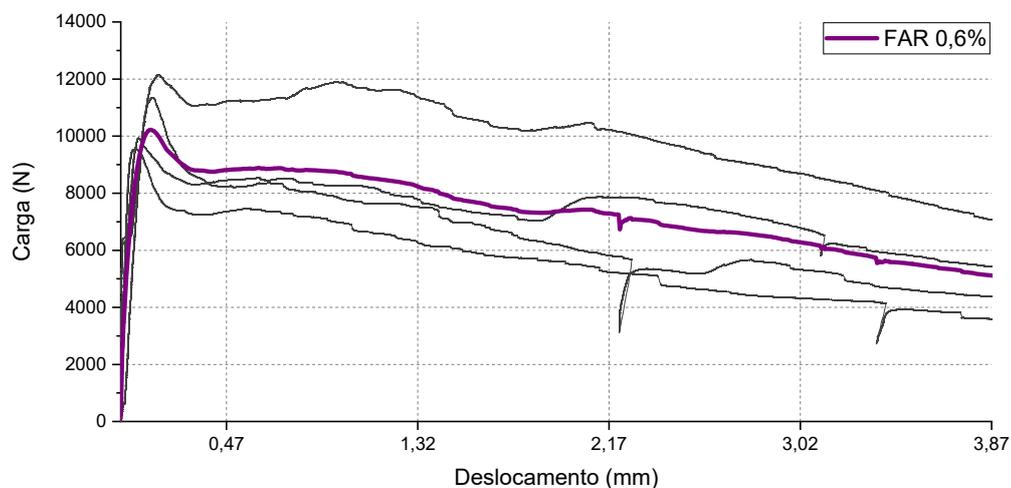
**Figura 69: Curva de carga por deslocamento obtida no ensaio de flexão para o traço com adição de 0,3% de FAR (FAR 0,3%)**



Fonte: Arquivo próprio.

Na Figura 69, é possível observar que dois dos CP's ensaiados apresentam um interrompimento da curva, esse interrompimento foi um erro inesperado no ensaio, a EMIC parou a aplicação de deslocamento. O script utilizado nesses CP's e nos demais CP's da pesquisa, foi o mesmo, portanto, não foi encontrada uma explicação para o ocorrido.

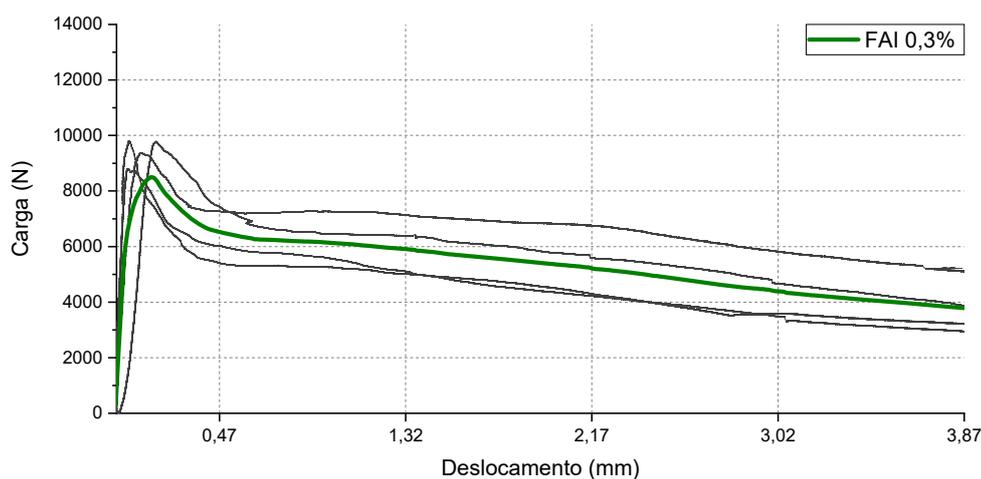
**Figura 70: Curva de carga por deslocamento obtida no ensaio de flexão para o traço com adição de 0,6% de FAR (FAR 0,6%)**



Fonte: Arquivo próprio.

A curva apresentada na Figura 70 é uma curva típica de teores próximos ao teor ótimo de fibras, ainda é um comportamento *softening*, porém com modo de falha progressivo, de acordo com Bentur e Mindess (2007).

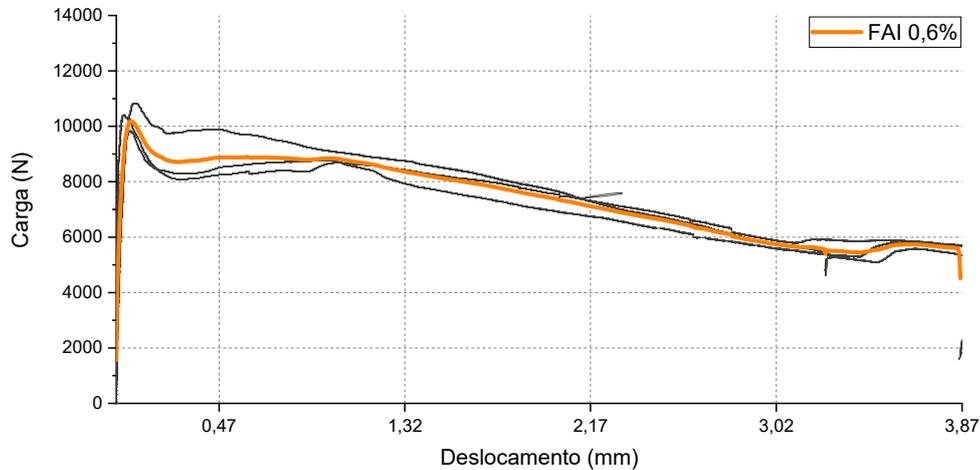
**Figura 71: Curva de carga por deslocamento obtida no ensaio de flexão para o traço com adição de 0,3% de FAI (FAI 0,3%)**



Fonte: Arquivo próprio.

É possível observar na Figura 71, que a curva de Força vs. Deslocamento à Flexão apresentada, possui um comportamento *softening*, com modo de falha progressivo, de acordo com Bentur e Mindess (2007).

**Figura 72: Curva de carga por deslocamento obtida no ensaio de flexão para o traço com adição de 0,6% de FAI (FAI 0,6%)**



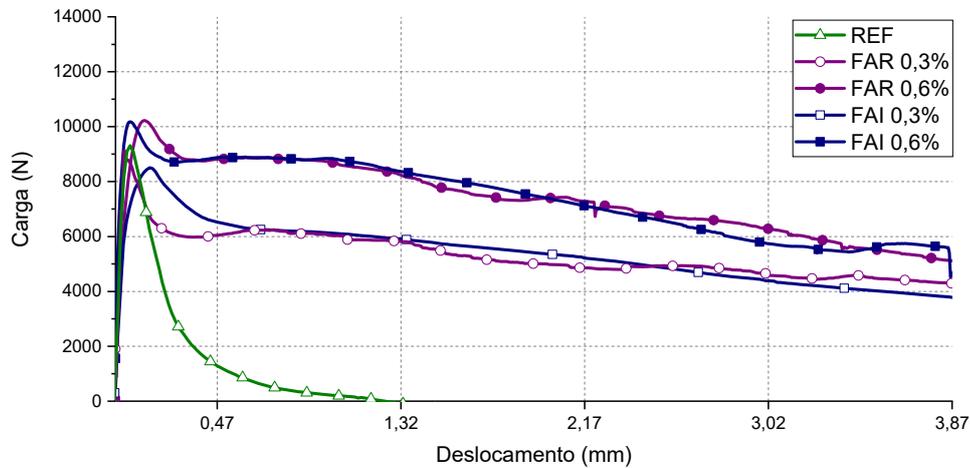
Fonte: Arquivo próprio.

Na Figura 72 apresentada, é possível observar que o comportamento da curva de Força vs. Deslocamento à Flexão ainda é *softenig*, porém se aproxima de um teor ótimo de adição de fibras. De acordo com Bentur e Mindess (2007), o modo de falha é progressivo.

Comparando as Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72 é possível observar que as FAI apresentam uma menor variabilidade de comportamento, quando comparamos a curva de cada CP com a curva média do traço. Já as FAR apresentam uma variabilidade maior entre os CP's com o mesmo traço, com relação ao comportamento médio. Esse fato pode ser atribuído à distribuição heterogênea das fibras no compósito.

A Figura 73 apresenta as curvas médias de Força vs. Deslocamento à Flexão dos 5 traços desenvolvidos nesse programa experimental.

**Figura 73: Curvas médias dos 5 traços desenvolvidos na pesquisa**



Fonte: Arquivo próprio.

Analisando a Figura 73 é possível dizer que a adição de fibras ao concreto aumenta a resistência à flexão do compósito, quando comparado com o concreto de referência, sem adição de fibras.

A adição de 0,3% de FAR ao concreto proporciona um aumento de 10,33% na tensão de ruptura quando comparada com concreto de referência, já a adição de 0,3% de FAI proporciona um aumento de apenas 0,33%. A adição de 0,6% de FAR promove um aumento de 13,66% na tensão máxima de ruptura, já a adição de 0,6% de FAI, provoca um aumento de 10,66%.

Comparando as FAR com as FAI é possível dizer que para um mesmo volume de fibras, o comportamento à flexão dos compósitos é semelhante. Ao adicionar 0,3% de fibras, a FAR apresenta um desempenho 10% maior se comparado com as FAI, porém o comportamento das curvas é igual. Ao adicionar 0,6% de fibras, as FAR promovem um desempenho 3% maior na resistência máxima de ruptura, uma diferença irrisória, dessa forma, o comportamento pode ser considerado similar.

É importante ressaltar, que o método de medição do comprimento das FAR e o método de cálculo do percentual de adição das FAR, podem criar um equívoco na comparação do comportamento à flexão entre o CRF com adição de FAR e do CRF com adição de FAI. Na medição do comprimento da FAR é medido o comprimento equivalente, porém, a fibra é retorcida, ou seja, quanto solicitada à tração ela se alonga e seu comprimento real se torna maior do que o medido. Outra questão é o percentual de adição das FAR, por possuir um diâmetro menor do que as FAI, são adicionadas mais unidades de FAR ao se adicionar o mesmo percentual de fibras.

Os resultados apresentados, comparando o comportamento mecânico sob tração na flexão entre FAR e FAI, corroboram com a RSL apresentada nesse estudo, que indicam a possibilidade de substituição total ou parcial das FAI por FAR no CRFA (TATE ET AL., 2020; YANG, PENG E SHIU ET AL., 2019).

### 3.3.3.5. Resistência residual

A Tabela 25 apresenta o resumo dos resultados do ensaio de flexão.

**Tabela 25: Resumo dos resultados do ensaio de flexão destacando as resistências residuais**

Resumo dos Resultados da pesquisa - Ensaio de Flexão - Resistências residuais								
I.D.	Idade (dias)	Quant. de CP's	Tensão de tração residual (MPa)				f <sub>R,3</sub> /f <sub>R,1</sub>	f <sub>R,1</sub> /f <sub>LOP</sub>
			f <sub>R,1</sub>	f <sub>R,2</sub>	f <sub>R,3</sub>	f <sub>R,4</sub>		
REF	29	4	0,42	0,02	0,00	0,00	0,0	0,1
FAR 0,3%	30	4	2,38	2,25	1,57	1,48	0,7	0,7
FAR 0,6%	28	4	2,91	2,71	2,41	2,07	0,8	0,9
FAI 0,3%	27	4	2,18	1,97	1,74	1,47	0,8	0,7
FAI 0,6%	27	4	2,96	2,79	2,37	1,91	0,8	0,9

Fonte: Arquivo próprio.

Todos os traços com adição de fibras apresentam um comportamento softening, ou seja, não há incremento de carga após atingir o limite de proporcionalidade. Outra forma de definir esse comportamento é por observar o decréscimo de resistências residuais, ao comparar a f<sub>R2</sub> com a f<sub>R1</sub>, e a f<sub>R3</sub> com a f<sub>R2</sub>.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 25, quando a adição é de 0,3%, os CP's de CRF com adição FAR apresentam uma queda na resistência residual de 5,46%, na f<sub>R2</sub> comparada com a f<sub>R1</sub>; os CP's de CRF com adição FAI apresentam um decréscimo na resistência residual de 9,63%. A diminuição da resistência residual de flexão f<sub>R3</sub> comparada com a f<sub>R2</sub>, nos CP's de CRF com adição FAR é de 30,22%, já os CP's de CRF com adição FAI apresentam uma queda de 11,67%.

Quando a adição é de 0,6%, o decréscimo da resistência residual de flexão f<sub>R2</sub> comparada com a f<sub>R1</sub>, é de 6,87% nos CP's de CRF com adição FAR e de 5,74 nos CP's de CRF com adição FAI. Na comparação entre a resistência residual de flexão f<sub>R3</sub> com a f<sub>R2</sub>, a diminuição é de 11,07% nos CP's de CRF com adição FAR e de 15,05% nos CP's de CRF com adição FAI.

A Tabela 25 apresenta o cálculo das relações mínimas entre as resistências residuais para a substituição total ou parcial da armadura convencional das estruturas de concreto: a f<sub>R,3</sub> sobre a f<sub>R,1</sub> deve ser maior ou igual a 0,4, e a f<sub>R,1</sub> sobre a f<sub>LOP</sub> deve ser maior

ou igual a 0,5. Conforme é apresentado, todos os traços com adição de fibras, atendem às relações mínimas de resistência estabelecidas na NBR 16935 (2021), indicando a possibilidade de uso estrutural.

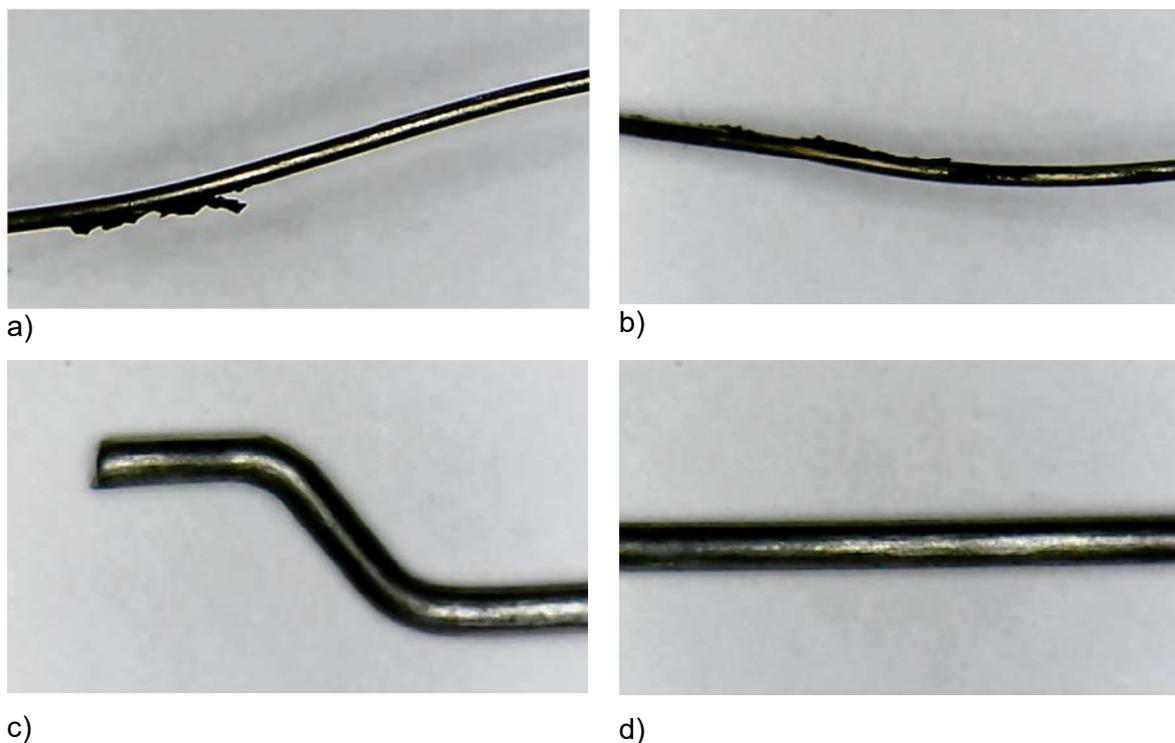
### 3.3.4 Comparação entre as fibras industriais e recicladas

Utilizando um microscópio digital foi possível observar a superfície dos dois tipos de fibras utilizado nessa pesquisa, a Figura 74 apresenta as imagens a) e b) referentes à superfície da FAR e as imagens c) e d) apresentam a superfície da fibra de aço industrial.

É possível observar que a FAR possui borracha aderida em sua superfície, apesar de a olho nu parecer possuir superfície lisa. Também é possível observar que a FAI possui superfície lisa, com pequenas ranhuras paralelas ao eixo longitudinal, provavelmente oriundas de seu processo de fabricação.

Diversos autores, como Baricevic, Bjegovic e Skazlic (2017), relacionam a borracha aderida na superfície da FAR com uma melhor aderência entre fibra-matriz de concreto.

**Figura 74: Superfície das fibras de aço utilizadas na pesquisa a) e b) FAR, c) e d) FAI**



Fonte: Arquivo próprio.

A Tabela 26 apresenta um resumo das principais características físicas e mecânicas das FAR e FAI.

**Tabela 26: Resumo das principais características das FAR e FAI**

I.D.	Formato	Superfície	Comprimento - l (mm)	Diâmetro - d (mm)	Fator Forma (l/d)	Tensão de tração (MPa)
FAR	Frisada / Irregular	Borracha aderida	11,48	0,21	58,30	1525,93
FAI	Gancho	lisa	30,00	0,62	45,00	1270,00

Fonte: Arquivo próprio.

Após realizar a análise da superfície das fibras e das características geométricas e mecânicas das fibras, foi possível concluir:

1. Avaliando as características geométricas das FAR e das FAI e sua influência no comportamento mecânico do concreto no estado fresco, Bentur e Mindess (2007) fazem considerações sobre o fator forma. Segundo eles, quanto maior o fator forma, menor a trabalhabilidade. Dessa forma, as FAI possuiriam vantagem nesse quesito quando comparada às FAR. Esse fato foi observado pelos autores da RSL e nos resultados experimentais dessa pesquisa.
2. Examinando a relação entre a geometria das fibras utilizadas nessa pesquisa e o comportamento do CRF à compressão, quanto maior o fator forma, maior a resistência à compressão (BENTUR; MINDESS, 2007). Ainda sobre a geometria, Aiello et. al (2009) e Frazão, Barros e Bogas (2019) consideram que o formato irregular da FAR contribui para uma melhor aderência entre fibra-matriz de concreto. Esse fato foi observado nos resultados experimentais ao analisar a figura após a ruptura do CRFR.
3. Analisando a resistência a tração, de acordo com Figueiredo (2011), quanto maior a resistência a tração da fibra, maior a capacidade resistente residual do compósito. Dessa forma, as FAR apresentam vantagem com relação a FAI. Esse fato foi observado no programa experimental.
4. Considerando o comportamento mecânico à flexão, e à flexão na pós-fissuração, de concretos reforçados com fibras, de acordo com Figueiredo (2011), quanto maior a seção transversal, maior o atrito entre a fibra e o concreto, por possuir maior área; nesse caso, a FAI possuiria uma vantagem em relação das FAR, ao avaliar a resistência residual à flexão. Comparando o fator forma, de acordo com Figueiredo (2011) e Bentur e Mindess (2007), as fibras são dosadas por volume, com isso, as fibras de maior fator forma, estarão em mais unidades na seção de ruptura, o que pode proporcionar uma maior resistência residual, desde que não ultrapasse o comprimento crítico; nesse caso, a FAR apresentaria um comportamento mecânico, na resistência

residual à flexão do concreto, aumentado com relação as FAI. Com relação ao comprimento, quando maior o comprimento, maior é a região de contato entre a fibra e a matriz de concreto, proporcionando maior resistência residual, desde que não ultrapasse o comprimento crítico e recomenda-se que o comprimento seja igual ou superior a dimensão máxima do agregado (FIGUEIREDO, 2011). Nesse caso, a fibras de maior comprimento é a FAI, obtendo vantagem com relação as FAR. A dimensão máxima do agregado graúdo é 12,5 mm; as FAI atendem a condição de comprimento de duas vezes o comprimento máximo dos agregados, as FAR não atendem. Portanto avaliando a influência da geometria das fibras no comportamento à flexão, é possível concluir que as FAI utilizadas na pesquisa possuem vantagem com relação às FAR.

5. A superfície da FAR possui borracha aderida, enquanto a superfície da FAI é lisa possuindo apenas pequenas ranhuras provavelmente oriundas de seu processo de fabricação. Dessa forma, a FAR possui certa vantagem na aderência fibra-matriz (BARICEVIC; BJEGOVIC; SKAZLIC, 2017; LIEW; AKBAR, 2020).

### 3.3.5 Custo dos materiais

O custo dos materiais para a cidade de São Carlos – SP, no ano de 2023, estão apresentados na Tabela 27.

**Tabela 27: Custo dos materiais utilizados na mistura de concreto**

Local	Custo dos materiais						
	Cimento	Água	Brita 0	Areia (seca)	Fibras de Aço Recicladas	Fibras de Aço Industriais	SP
	R\$/kg	R\$/L	R\$/kg	R\$/kg	R\$/kg	R\$/kg	R\$/kg
São Carlos - SP	1,10	0,0047	2,57	2,88	1,10	24,00	8,24

Fonte: Arquivo próprio.

A diferença de custo entre os traços de concreto elaborados nessa pesquisa, se dá pelo acréscimo de fibra e pelo tipo de fibra adicionado. Ao adicionar 0,3% de FAR o aumento de custo é de 0,50 %, ao adicionar 0,3% de FAI o aumento de custo é de 11,12%; o custo das FAR é 10,62% menor do que o custo das FAI. Ao adicionar 0,6% de FAR o incremento no custo é de 1,0%, e ao adicionar 0,6% de FAI o aumento de custo é de 22,24%; o custo das FAR é 21,24% menor do que das FAI, para esse teor de adição. Com

isso, é possível concluir que a substituição de um material manufaturado por um material reciclado gera economia de custos para o setor da construção civil.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa experimental desenvolvido nessa pesquisa avalia o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço recicladas extraídas de pneus inservíveis, comparando com o concreto com adição de fibras de aço industriais. Para realizar essa análise foram ensaiados 15 CP's cilíndricos à tração, 15 CP's cilíndricos à compressão axial e 20 CP's prismáticos à tração na flexão. Foram determinados 5 traços variando-se o tipo de fibra e o teor de fibra.

A Tabela 28 apresenta o resumo dos resultados do programa experimental desenvolvido.

**Tabela 28: Resumo dos resultados do programa experimental**

Resumo dos resultados da pesquisa										
I.D.	Compressão (MPa)	Tração (MPa)	Flexão (MPa)		Flexão Residual (MPa)				$f_{R,3}/f_{R,1}$	$f_{R,1}/f_{LOP}$
			$f_{LOP}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$			
REF	35,23	2,93	3,00	0,42	0,02	0,00	0,00	0,0	0,1	
FAR 0,3%	31,92	3,85	3,31	2,38	2,25	1,57	1,48	0,7	0,7	
FAR 0,6%	31,05	4,54	3,41	2,91	2,71	2,41	2,07	0,8	0,9	
FAI 0,3%	30,06	3,39	3,03	2,18	1,97	1,74	1,47	0,8	0,7	
FAI 0,6%	28,73	3,78	3,32	2,96	2,79	2,37	1,91	0,8	0,9	

Fonte: Arquivo próprio.

A partir dos resultados apresentados foi possível concluir:

1. Há perda da trabalhabilidade com a adição de fibras ao concreto. As FAR apresentaram maior influência na perda da trabalhabilidade do que as FAI.
2. A adição de fibras ao concreto favorece a porosidade da mistura, porém o tipo de fibra não influenciou na quantidade de ar incorporado;
3. A adição de fibras de FAR ou FAI no concreto proporciona um decréscimo na resistência à compressão.
4. A adição de fibras ao concreto proporciona aumento da resistência à tração por compressão diametral, além de retardar o decréscimo de resistência no pós-pico.
5. O traço de CRF com adição de FAR 0,6% apresentou o melhor comportamento mecânico sob tração na flexão, quando analisada a tensão máxima de flexão ( $f_{LOP}$ ).

6. Sob tração na flexão todos os traços com adição de fibras, sendo 0,3% ou 0,6% de FAR ou FAI, apresentaram um comportamento *softening*, não foi observado incremento de carga após o limite de proporcionalidade.
7. Analisando o decréscimo das resistências residuais  $f_{R2}$  para a  $f_{R3}$ , ao adicionar 0,3% de FAR, ou 0,3% de FAI, a queda foi similar.
8. Todos os traços com adição de fibras, atendem às relações mínimas de resistência estabelecidas na NBR 16935 (2021), indicando a possibilidade de uso estrutural.
9. De modo geral, é possível dizer que o comportamento mecânico das FAR é similar ao comportamento mecânico das FAI quando adicionadas ao concreto em baixos teores ( $v < 1,0\%$ ). Indicando viabilidade da substituição total ou parcial das FAI por FAR.

## 4. Conclusões

---

Comparando as considerações finais apresentadas na RSL com a considerações finais obtidas a partir dos resultados do programa experimental desenvolvido nessa pesquisa, foi possível concluir:

1. O material reciclado requer uma separação para que possa se tornar fibras de aço recicladas úteis para adição ao concreto. Nessa pesquisa foi determinado um método de peneiramento mecânico que pode ser replicado industrialmente.
2. Há perda da trabalhabilidade com a adição de fibras ao concreto. O programa experimental demonstrou que as FAR influenciam mais na diminuição da trabalhabilidade do que as FAI. Os resultados da RSL não apresentam um consenso sobre qual tipo de fibra têm maior influência na trabalhabilidade do concreto fresco.
3. A adição de fibras ao concreto favorece o ar incorporado da mistura, porém, para esse estudo, o aumento não foi significativo (1,7%) a ponto de indicar algum ajuste no traço. Com adição de 0,6% de fibras ao concreto, as FAR obtiveram um teor de ar incorporado 0,25% menor do que as FAR. Essa diferença é considerada irrisória. Os documentos analisados na RSL não desenvolveram ensaios de ar incorporado, portanto, o resultado do programa experimental não pôde ser comparado com a RSL.
4. Na RSL apresentada não há consenso sobre o comportamento do CRF sob tensão de compressão em concretos com adição de FAR. O programa experimental realizado apontou um decréscimo da resistência à compressão máxima do CRF quando comparado com o concreto de referência. Ao comparar as FAR com as FAI, as FAR influenciam menos na diminuição da resistência à compressão do que as FAI.
5. O programa experimental apontou que a adição de fibras ao concreto proporciona aumento da resistência à tração por compressão diametral, além de retardar o decréscimo de resistência no pós-pico. Esse resultado corrobora com a conclusão dos autores apresentada na RSL.
6. O comportamento sob tensão de tração na flexão foi similar entre FAR e FAI, mesmo com teor de adição de fibras menor do que o indicado como de influência significativa para a resistência à flexão na RSL (>1,0%).
7. A partir da RSL realizada levantou-se a hipótese da queda brusca das resistências residuais  $f_{R2}$  para  $f_{R3}$  no CRF com adição de FAR devido ao número insuficiente de fibras com o comprimento suficiente para participar da

transferência de tensões quando as fissuras atingem uma espessura maior, no estágio da  $f_{R3}$  e  $f_{R4}$ . Essa conclusão não foi ratificada nesse programa experimental.

8. Por meio da análise física e mecânica das FAR, bem como, a comparação dos concretos com adição de FAR e FAI nos estados fresco e endurecido, é possível indicar o uso da FAR como reforço no concreto. Essa conclusão foi ratificada ao analisar o cálculo das relações mínimas entre as resistências residuais para a substituição total ou parcial da armadura convencional das estruturas de concreto, o concreto com adição de FAR atende aos critérios estabelecidos na NBR 16935 (2021), indicando a possibilidade de uso estrutural.

Após a realização dessa pesquisa exploratória foi possível identificar nichos de conhecimento que merecem atenção para pesquisas futuras:

1. Desenvolver um método de medição do comprimento real das FAR de forma eficiente e viável para a replicação em outras pesquisas;
2. Análise da durabilidade do concreto com adição das FAR. Investigar a interação entre os materiais naturais que compõem o concreto, com a FAR;
3. Avaliar a performance do concreto com adição de FAR em ambientes corrosivos;
4. Análise da interação entre a FAR e a barra de aço, em concreto armado. Avaliar a interação por meio de ensaio de arrancamento de barra;
5. Avaliar o impacto ambiental da utilização das FAI e comparar com as FAR. Comparar a pegada de carbono desses materiais, considerando todas as fases, desde a produção até o descarte;
6. Padronização e diretrizes claras para a aplicação de fibras de aço recicladas no concreto. Viabilizando o desenvolvimento de normas técnicas, considerando diferentes tipos de fibras e suas proporções ideais em diversas aplicações estruturais.

# Referências bibliográficas

---

ABD-ELRAHMAN, Mahmoud H.; AGWA, Ibrahim Saad; ELSAKHAWY, Yara; RIZK, Mostafa S. Effect of utilising ferrosilicon and recycled steel fibres on ultra-high-strength concrete containing recycled granite. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 18, 1 jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01903>.

AIELLO, M. A.; LEUZZI, F.; CENTONZE, G.; MAFFEZZOLI, A. Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. **Waste Management**, vol. 29, nº 6, p. 1960–1970, jun. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002>.

AL-MUSAWI, Hajir; HUANG, Haidong; DI BENEDETTI, Matteo; GUADAGNINI, Maurizio; PILAKOUTAS, Kypros. Effect of shrinkage on rapid hardening plain and recycled steel fibre concrete overlays. **Cement and Concrete Composites**, vol. 125, nº Elsevier, p. 104246, 3 set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104246>.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R-96: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete**. Farmington Hills, 2002.

ARCELORMITTAL; BELGO BEKAERT ARAMES. Aços Longos Dramix. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NM 53. **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NR 9775. **Agregados - Determinação Da Massa Específica Chapman**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7222. **Argamassa e Concreto - Determinação da Resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NM 67. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16935. **Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras: Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16940. **Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 18 fev. 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. Destino Ambientalmente Correto | ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. 2021. **Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos**. Disponível em: <https://www.anip.org.br/destinacao-ambientalmente-correta/>. Acessado em: 19 maio 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Relatório de Vendas Totais**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.anip.org.br/>.

BARICEVIC, Ana; BJEGOVIĆ, Dubravka; SKAZLIC, Marijan. Hybrid Fiber-Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 29, nº 6, p. 06017005, jun. 2017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001906](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001906).

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2º ed. New York: Taylor & Francis, 2007.

CAGGIANO, Antonio; FOLINO, Paula; LIMA, Carmine; MARTINELLI, Enzo; PEPE, Marco. On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 147, p. 286–295, 30 ago. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160>.

CARRILLO, Julian; LIZARAZO-MARRIAGA, Juan; LAMUS, Fabian. Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Either Industrial or Recycled Fibers from Waste Tires. **Fibers and Polymers**, vol. 21, nº 9, p. 2055–2067, 1 set. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-1076-1>.

CBL RECICLAGEM. Produtos. 2021.

CENTONZE, G; LEONE, M; AIELLO, M A. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. **Construction and Building Materials**, vol. 36, p. 46–57, 2012a. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088>.

CENTONZE, G.; LEONE, M.; AIELLO, M. A. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. **Construction and Building Materials**, vol. 36, p. 46–57, nov. 2012b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088>.

FANTILLI, Alessandro P.; ORFEO, Benedetta; CALDENTEY, Alejandro P. The deflection of reinforced concrete beams containing recycled steel fibers. **Structural Concrete**, vol. 22, nº 4, p. 2089–2104, 1 ago. 2021. <https://doi.org/10.1002/suco.202000729>.

FIB. **Fib Model Code for Concrete Structures 2010**. Ernst & Sohn. 2012.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. **Concreto Reforçado com Fibras**. 2011. 248 f. Tese – Universidade de São Paulo, 2011.

FLORIANI, Marco A.; FURLANETTO, Vinicius C.; SEHNEM, Simone. Descarte sustentável de pneus inservíveis. **Navus - Revista de Gestão e Tecnologia**, vol. 6, p. 37–51, 2016. <https://doi.org/10.22279/navus.2016.v6n2.p37-51.347>.

FRAZÃO, Cristina; BARROS, Joaquim; BOGAS, J. Durability of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete in Chloride Environment. **Fibers**, vol. 7, nº 12, p. 111, 16 dez. 2019. <https://doi.org/10.3390/fib7120111>.

FRAZÃO, Cristina; BARROS, Joaquim; BOGAS, José Alexandre. Influence of the chloride attack on the post-cracking behavior of recycled steel fiber reinforced concrete. **Materials**, vol. 14, nº 5, p. 1–26, 1 mar. 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14051279>.

FRAZÃO, Cristina; DÍAZ, Belén; BARROS, Joaquim; BOGAS, J. Alexandre; TOPTAN, Fatih. An experimental study on the corrosion susceptibility of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete. **Cement and Concrete Composites**, vol. 96, p. 138–153, 1 fev. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.011>.

GALI, Sahith; SHARMA, Drishan; SUBRAMANIAM, Kolluru V. L. Influence of Steel Fibers on Fracture Energy and Shear Behavior of SCC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 30, nº 11, p. 04018295, nov. 2018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002496](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002496).

GAO, Lingling. Toughness Test of Waste Tires Steel Fiber Reinforced Concrete. 381., 16 ago. 2018. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Institute of Physics Publishing, 16 ago. 2018. vol. 381, . <https://doi.org/10.1088/1757-899X/381/1/012048>.

GERIN, Mayara Turi. **COMPORTEAMENTO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS COM CONCRETO DE RESÍDUOS DE CONCRETO SUBMETIDOS A COMPRESSÃO AXIAL CENTRADA: EFEITO DO TEOR DE SUBSTITUIÇÃO E DA FORMA DE APLICAÇÃO DA FORÇA**. 2020. Dissertação – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

GOLPASAND, Gholamreza Baghban; FARZAM, Masood; SHISHVAN, Siamak Soleymani. Behavior of recycled steel fiber reinforced concrete under uniaxial cyclic compression and biaxial tests. **Construction and Building Materials**, vol. 263, 10 dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120664>.

GRAEFF, Angela Gaio; PILAKOUTAS, Kypros; NEOCLEOUS, Kyriacos; PERES, Maria Vania N.N. Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. **Engineering Structures**, vol. 45, p. 385–395, dez. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.030>.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS. Meta De Destinação. 2021. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/agente-reductor-liquido-automotivo-arla-32/126-emissao-e-residuos/residuos/pneus/932-meta-de-destinacao>. Acessado em: 19 maio 2021.

ISA, M. N.; PILAKOUTAS, Kypros; GUADAGNINI, Maurizio. Shear behaviour of E-UHPC containing recycled steel fibres and design of E-UHPC screw piles. **Construction and Building Materials**, vol. 304, 18 out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124555>.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Método de teste de resistência ao cisalhamento de concreto reforçado com fibra de aço**. Japão: [s. n.], 1990.

KRAHL, Pablo Augusto; PEREIRA, Margot Fabiana; DALFRÉ, Gláucia Maria; SIQUEIRA, Gustavo Henrique. A novel approach to characterize the direct shear pullout behavior of single hooked steel fibers. **Cement and Concrete Composites**, vol. 113, nº May, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103685>.

KUMAR, Mavoori Hitesh; MAHANTA, Nihar Ranjam; SAMANTARAY, Sandeep; KUMAR, Nagarampalli Manoj. Combined effect of waste glass powder and recycled steel fibers on mechanical behavior of concrete. **SN Applied Sciences**, vol. 3, nº 3, 1 mar. 2021. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04353-6>.

LAGARINHOS, Carlos Alberto F.; TENÓRIO, Jorge Alberto S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polimeros**, vol. 18, nº 2, p. 106–118, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000200007>.

LEONE, M.; CENTONZE, G.; COLONNA, D.; MICELLI, F.; AIELLO, M. A. Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour. **Construction and Building Materials**, vol. 161, p. 141–155, 10 fev. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101>.

LEONE, Marianovella; CENTONZE, Giuseppe; COLONNA, Daniele; MICELLI, Francesco; AIELLO, Maria Antonietta. Experimental Study on Bond Behavior in Fiber-Reinforced Concrete with Low Content of Recycled Steel Fiber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 28, nº 9, p. 04016068, set. 2016. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001534](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001534).

LIEW, K. M.; AKBAR, Arslan. The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 232, p. 117232, 2020. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.117232. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117232>.

LOCAVILLE. Email. 2021.

MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS. Fibra de aço reciclado auxilia na ecoeficiência do mercado de construção no Brasil. 2018.

MARTINELLI, Enzo; CAGGIANO, Antonio; XARGAY, Hernan. An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial/Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 94, p. 290–298, 30 jul. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.007>.

MASTALI, M.; DALVAND, A. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC). **Construction and Building Materials**, vol. 125, p. 196–209, 30 out. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.046>.

MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. R.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; ILLIKAINEN, M. Characterization and optimization of hardened properties of self-consolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers. **Composites Part B: Engineering**, vol. 151, p. 186–200, 15 out. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.021>.

MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. R.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J. G.; ILLIKAINEN, M. A comparison of the effects of pozzolanic binders on the hardened-state properties of high-strength cementitious composites reinforced with waste tire fibers. **Composites Part B: Engineering**, vol. 162, p. 134–153, 1 abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.100>.

MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. R.; ILLIKAINEN, M. Development of eco-efficient and cost-effective reinforced self-consolidation concretes with hybrid industrial/recycled steel fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 166, p. 214–226, 30 mar. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.147>.

MMA, Ministério do Meio Ambiente; IBAMA, Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de Pneumáticos - Resolução Conama nº 416/09**. Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/ibama-relatorio-pneumaticos-2017-nov.pdf>.

NAJIM, Khalid B.; SAEB, Abdulrahman; AL-AZZAWI, Zaid. Structural behaviour and fracture energy of recycled steel fibre self-compacting reinforced concrete beams. **Journal of Building Engineering**, vol. 17, p. 174–182, 1 maio 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.02.014>.

PAJAK, Małgorzata; KRYSTEK, Małgorzata; ZAKRZEWSKI, Mateusz; DOMSKI, Jacek. Laboratory investigation and numerical modelling of concrete reinforced with recycled steel fibers. **Materials**, vol. 14, nº 8, 2 abr. 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14081828>.

PENG, G F; YANG, J; LONG, Q Q; NIU, X J; ZENG, Q P. Comparison between Ultra-High-Performance Concretes with Recycled Steel Fiber and Normal Industrial Steel Fiber. 7 ago. 2016. **Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and**

**Technologies.** Las Vegas: [s. n.], 7 ago. 2016. Disponível em: <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>.

PENG, Gai Fei; NIU, Xu Jing; LONG, Qian Qian. Experimental study of strengthening and toughening for recycled steel fiber reinforced ultra-high performance concrete. 629–630., 2015. **Key Engineering Materials** [...]. [S. l.]: Trans Tech Publications Ltd, 2015. vol. 629–630, p. 104–111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.104>.

RASHID, Khuram; BALOUCH, Nosheen. Influence of steel fibers extracted from waste tires on shear behavior of reinforced concrete beams. **Structural Concrete**, vol. 18, nº 4, p. 589–596, 1 ago. 2017. <https://doi.org/10.1002/suco.201600194>.

RECICLANIP. Início - RecicLANIP. 2021. **Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos**. Disponível em: <https://www.reciclanip.org.br/>. Acessado em: 19 maio 2021.

SAHRAEI MOGHADAM, Amirhosein; OMIDINASAB, Fereydoon; ABDALIKIA, Mehdi. The effect of initial strength of concrete wastes on the fresh and hardened properties of recycled concrete reinforced with recycled steel fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 300, 20 set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124284>.

SIMALTI, Ashish; SINGH, A. P. Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 266, 10 jan. 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121102>.

SIMALTI, Ashish; SINGH, A. P. Fresh and Mechanical Properties of Recycled Steel Fiber Reinforced Self-consolidating Concrete. 90., 2021b. **Lecture Notes in Civil Engineering** [...]. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. vol. 90, p. 271–279. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51354-2\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51354-2_24).

TATE, Steven M.; HAMID, Hiwa F.; DURHAM, Stephan A.; CHORZEPA, Mi G. Investigation into recycled rubber aggregates and steel wire fiber for use in concrete subjected to impact loading. **Infrastructures**, vol. 5, nº 10, p. 1–25, 1 out. 2020. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5100082>.

VISTOS, L.; GALLADINI, D.; XARGAY, H.; CAGGIANO, A.; FOLINO, P.; MARTINELLI, E. Hybrid industrial/recycled SFRC: Experimental analysis and design. **Lecture Notes in Civil Engineering**, vol. 10, p. 98–112, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78936-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78936-1_8).

YANG, Juan; PENG, Gai Fei; SHUI, Guo Shuang; ZHANG, Gui. Mechanical properties and anti-spalling behavior of ultra-high performance concrete with recycled and industrial steel fibers. **Materials**, vol. 12, nº 5, 1 mar. 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12050783>.

YANG, Juan; PENG, Gai-Fei; SHIU, Guo-Shuang; ZHANG, Gui. Mechanical properties and anti-spalling behavior of ultra-high performance concrete with recycled and

industrial steel fibers. **Materials**, vol. 12, n° MDPI, p. 783–799, 7 mar. 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12050783>.

YAO, Yanbin; WU, Bojian; ZHANG, Wenjiao; FU, Ying; KONG, Xiangqing. Experimental investigation on the impact properties and microstructure of recycled steel fiber and silica fume reinforced recycled aggregate concrete. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 18, 1 jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02213>.

YOUNIS, Khaleel H. Metakaolin modified recycled aggregate concrete containing recycled steel fibers. 45., 2021. **Materials Today: Proceedings** [...]. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021. vol. 45, p. 4689–4694. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.120>.

ZAMANZADEH, Ziaaddin; LOURENÇO, Lúcio; BARROS, Joaquim. Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear. **Construction and Building Materials**, vol. 85, p. 195–207, 2015a. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.070>.

ZAMANZADEH, Ziaaddin; LOURENÇO, Lúcio; BARROS, Joaquim. Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear. **Construction and Building Materials**, vol. 85, p. 195–207, 15 jun. 2015b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.070>.

ZAREI, A.; ROOHOLAMINI, H.; OZBAKKALOGLU, T. Evaluating the Properties of Concrete Pavements Containing Crumb Rubber and Recycled Steel Fibers Using Response Surface Methodology. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00049-7>.

ZEYBEK, Özer; ÖZKILIÇ, Yasin Onuralp; ÇELİK, Ali İhsan; DEIFALLA, Ahmed Farouk; AHMAD, Mahmood; SABRI SABRI, Mohanad Muayad. Performance evaluation of fiber-reinforced concrete produced with steel fibers extracted from waste tire. **Frontiers in Materials**, vol. 9, 17 nov. 2022. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1057128>.

ZHANG, Yancong; GAO, Lingling. Influence of Tire-Recycled Steel Fibers on Strength and Flexural Behavior of Reinforced Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 2020, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6363105>.

## APÊNDICE A – Características do CRF com mistura híbrida de fibras

Autor	Ano	Concreto			Características da fibra										
					FAI					FAR					
					fc (MPa)	a/c	Aditivo SP	Abatimento (mm)	d (mm)	l (mm)	l/d	fs (MPa)	Qnt. (%/vol.)	l (mm)	d (mm)
Baricevic e Bjegovic	2017	54,50	0,46	Sim	192	0,55	35	64	1100	0,410	10,62	0,18	59	-	1,240
		52,80	0,46	Sim	185	0,55	35	64	1100	0,410	10,62	0,18	59	-	2,070
		46,60	0,46	Sim	187	0,55	35	64	1100	0,410	10,62	0,18	59	-	3,310
		49,90	0,46	Sim	93	0,55	35	64	1100	0,410	10,62	0,18	59	-	4,140
		54,10	0,46	Sim	188	0,55	35	64	1100	0,830	10,62	0,18	59	-	1,660
Caggiano <i>et al.</i>	2017	28,78	0,49	Sim	-	0,55	33	60	1200	0,375	26,17	0,25	105	-	0,375
		27,39	0,49	Sim	-	0,55	33	60	1200	0,375	26,17	0,25	105	-	0,625
		25,94	0,49	Sim	-	0,55	33	60	1200	0,375	26,17	0,25	105	-	0,875
Martinelli, Caggiano e Xargay	2015	36,52	0,51	Sim	175	0,55	33	60	1200	0,375	12	0,27	44	-	0,125
		36,74	0,51	Sim	175	0,55	33	60	1200	0,250	12	0,27	44	-	0,250
Mastali <i>et al.</i>	2018	76,35	0,38	Sim	650	-	-	47	1300	0,500	50	0,15	333	-	1,000
		61,99	0,38	Sim	650	-	-	47	1300	0,750	50	0,15	333	-	0,750
		65,86	0,38	Sim	650	-	-	47	1300	1,000	50	0,15	333	-	0,500
Mastali <i>et al.</i>	2018	79,25	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	1,350	50	0,15	333	-	0,150
		78,06	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	1,200	50	0,15	333	-	0,300
		76,15	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	1,050	50	0,15	333	-	0,450
		75,19	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	0,900	50	0,15	333	-	0,600
		74,24	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	0,750	50	0,15	333	-	0,750
		74,00	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	0,600	50	0,15	333	-	0,900
		73,52	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	0,450	50	0,15	333	-	1,050

		73,28	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	0,300	50	0,15	333	-	1,200
		72,57	0,38	Sim	600	-	-	47	1300	0,150	50	0,15	333	-	1,350
<b>Vistos et al.</b>	<b>2018</b>	36,52	0,51	Sim	175	0,55	33	60	1200	0,375	12	0,27	44	2235	0,125
		36,74	0,51	Sim	175	0,55	33	60	1200	0,250	12	0,27	44	2235	0,250

Fonte: Arquivo próprio.

## APÊNDICE B – Ensaio de compressão e tração de CRF com mistura híbrida de fibras

Autor	Ano	Ensaio - Compressão				Ensaio - Tração		
		Norma	Tipo do CP	fc (MPa)	E (GPa)	Norma	Tipo do CP	R ct (MPa)
Baricevic e Bjegovic	2017	EN12390-3	-	54,50	41,7	-	-	-
		EN12390-3	-	52,80	38,7	-	-	-
		EN12390-3	-	46,60	36,2	-	-	-
		EN12390-3	-	49,90	35,2	-	-	-
		EN12390-3	-	54,10	39,5	-	-	-
Caggiano <i>et al.</i>	2017	UNI 11039-2	Cúbico	28,78	-	-	-	-
		UNI 11039-2	Cúbico	27,39	-	-	-	-
		UNI 11039-2	Cúbico	25,94	-	-	-	-
Martinelli, Caggiano e Xargay	2015	UNI-11039-4	Cúbico	36,52	-	-	-	-
		UNI-11039-5	Cúbico	36,74	-	-	-	-
Mastali <i>et al.</i>	2018	ASTM C39/C39 M	Cúbico	76,35	-	ASTM C496	Cilíndrico	3,83
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	61,99	-	ASTM C496	Cilíndrico	3,79
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	65,86	-	ASTM C496	Cilíndrico	3,74
Mastali <i>et al.</i>	2018	ASTM C39/C39 M	Cúbico	79,25	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,40
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	78,06	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,38
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	76,15	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,33
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	75,19	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,27
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	74,24	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,25
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	74,00	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,23
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	73,52	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,23
		ASTM C39/C39 M	Cúbico	73,28	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,22

		ASTM C39/C39 M	Cúbico	72,57	-	ASTM C496	Cilíndrico	4,20
<b>Vistos et al.</b>	<b>2018</b>	EN-12390-3	Cúbico	36,52	-	-	-	-
		EN-12390-3	Cúbico	36,74	-	-	-	-

Fonte: Arquivo próprio.

## APÊNDICE C – Ensaio de flexão de CRF com mistura híbrida de fibras

Autor	Ano	Ensaio - Flexão									
		Norma	Tipo do CP	CMOD					CTOD		
				Fctm (MPa)	FR1 (MPa)	FR2 (MPa)	FR3 (MPa)	FR4 (MPa)	F <sub>lf</sub> (MPa)	F <sub>eq 0-0,6</sub> (MPa)	F <sub>eq 0,6-3</sub> (MPa)
Baricevic e Bjegovic	2017	RILEM 2002	Prismático	4,90	2,49	1,86	1,24	0,88	-	-	-
		RILEM 2002	Prismático	4,90	3,12	2,61	1,94	1,40	-	-	-
		RILEM 2002	Prismático	4,40	3,05	2,32	1,81	1,42	-	-	-
		RILEM 2002	Prismático	5,90	5,8	4,47	3,32	2,49	-	-	-
		RILEM 2002	Prismático	4,70	3,47	3,23	2,41	1,85	-	-	-
Caggiano <i>et al.</i>	2017	UNI EN 12390-3	Prismático	-	-	-	-	-	3,93	4,07	4,36
		UNI EN 12390-3	Prismático	-	-	-	-	-	3,83	4,04	4,13
		UNI EN 12390-3	Prismático	-	-	-	-	-	4,22	4,60	4,84
Martinelli, Caggiano e Xargay	2015	UNI-11039-1	Viga	-	-	-	-	-	3,42	2,57	2,19
		UNI-11039-1	Viga	-	-	-	-	-	4,24	2,64	2,07
Mastali <i>et al.</i>	2018	ASTMC78	Prismático	6,75	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	5,98	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	6,48	-	-	-	-	-	-	-
Mastali <i>et al.</i>	2018	ASTMC78	Prismático	8,81	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	8,65	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	8,60	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	8,47	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	8,36	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	8,26	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	8,15	-	-	-	-	-	-	-
		ASTMC78	Prismático	8,13	-	-	-	-	-	-	-

		ASTMC78	Prismático	8,15	-	-	-	-	-	-	-
<b>Vistos et al.</b>	<b>2018</b>	UNI-11039-1&2	Viga	-	-	-	-	-	3,42	2,57	2,19
		UNI-11039-1&2	Viga	-	-	-	-	-	4,24	2,64	2,07

Fonte: Arquivo próprio.

## APÊNDICE D – Dados de laboratório do ensaio de compressão axial realizado no programa experimental

I.D.	Idade	Altura (mm)	Diâmetro a 1/3 h (mm)	Diâmetro a 2/3 h (mm)	Diâmetro médio (mm)	Força máx. (N)	Resist. à compressão (MPa)
CP 01 - REF	28 dias	197,6	100,21	101,59	100,9	287173,03	35,91
CP 02 - REF	28 dias	198,73	100,62	102,37	101,495	278208,09	34,39
CP 03 - REF	28 dias	197,01	101,02	101,56	101,29	285148,06	35,39
CP 01 - FAR 0,3%	28 dias	196,49	99,89	101,69	100,79	*	*
CP 02 - FAR 0,3%	28 dias	196,3	101,07	101,83	101,45	262598,09	32,49
CP 03 - FAR 0,3%	28 dias	191,82	102,06	101,86	101,96	255894,03	31,34
CP 01 - FAR 0,6%	28 dias	200,5	101,93	101,41	101,67	254183,63	31,31
CP 02 - FAR 0,6%	28 dias	200,38	101,8	101,36	101,58	247341,95	30,52
CP 03 - FAR 0,6%	28 dias	196,69	101,45	101,5	101,475	253239,94	31,32
CP 01 - FAI 0,3%	28 dias	197,68	101,77	101,4	101,585	244805,81	30,21
CP 02 - FAI 0,3%	28 dias	197,53	101,91	101,35	101,63	243980,09	30,08
CP 03 - FAI 0,3%	28 dias	196,56	102,34	101,92	102,13	244766,50	29,88
CP 01 - FAI 0,6%	28 dias	196,92	101,86	101,92	101,89	223592,72	27,42
CP 02 - FAI 0,6%	28 dias	198,86	101,79	101,53	101,66	222472,11	27,41
CP 03 - FAI 0,6%	28 dias	198,76	101,91	101,5	101,705	254694,78	31,35

Fonte: Arquivo próprio.

## APÊNDICE E – Dados de laboratório do ensaio de tração realizado no programa experimental

---

I.D.	Idade	Altura (mm)	Diâmetro a 1/3 h (mm)	Diâmetro a 2/3 h (mm)	Diâmetro médio (mm)	Força máx. (N)	Resist. à tração (MPa)
CP 04 - REF	28 dias	201,01	100,98	100,68	100,83	94466,10	2,97
CP 05 - REF	28 dias	202,33	101,44	101,43	101,44	92480,50	2,87
CP 06 - REF	28 dias	200,54	101,69	101,19	101,44	94643,00	2,96
CP 04 - FAR 0,3%	28 dias	201,88	100,25	101,50	100,88	122520,90	3,83
CP 05 - FAR 0,3%	28 dias	202,41	101,80	101,60	101,70	121341,30	3,75
CP 06 - FAR 0,3%	28 dias	201,32	101,43	101,51	101,47	127337,60	3,97
CP 04 - FAR 0,6%	28 dias	198,19	101,81	101,48	101,65	146250,40	4,62
CP 05 - FAR 0,6%	28 dias	198,32	102,10	101,45	101,78	141355,10	4,46
CP 06 - FAR 0,6%	28 dias	198,52	102,10	101,51	101,81	144284,40	4,55
CP 04 - FAI 0,3%	28 dias	197,63	101,62	101,72	101,67	96884,30	3,07
CP 05 - FAI 0,3%	28 dias	198,74	101,81	101,57	101,69	117586,20	3,71
CP 06 - FAI 0,3%	28 dias	198,29	101,69	101,50	101,60	106851,90	3,38
CP 04 - FAI 0,6%	28 dias	202,06	101,20	101,29	101,25	122206,30	3,81
CP 05 - FAI 0,6%	28 dias	200,32	101,94	101,38	101,66	117271,70	3,67
CP 06 - FAI 0,6%	28 dias	201,11	101,94	101,65	101,80	123818,40	3,85

Fonte: Arquivo próprio.

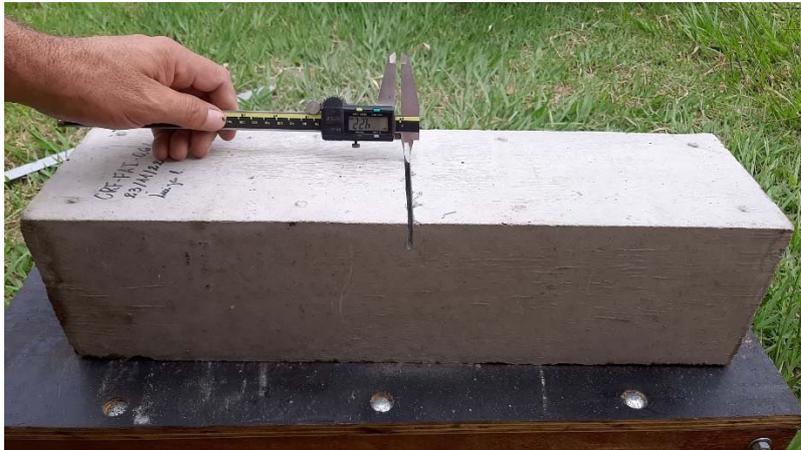
## APÊNDICE F – Dados de laboratório do ensaio de flexão realizado no programa experimental

I.D.	Idade	Altura média (mm)	Largura média (mm)	Comprimento (mm)	Tensão de flexão máxima a flop (MPa)	Tensão de flexão residual fR,1 (MPa)	Tensão de flexão residual fR,2 (MPa)	Tensão de flexão residual fR,3 (MPa)	Tensão de flexão residual fR,4 (MPa)
CP 01 - REF	28 dias	147,21	153,13	553	2,90	0,40	0,00	0,00	0,00
CP 02 - REF	28 dias	147,39	153,03	555	2,65	0,33	0,03	0,00	0,00
CP 03 - REF	28 dias	151,51	147,47	552	3,31	0,44	0,02	0,00	0,00
CP 04 - REF	28 dias	147,80	152,95	555	3,13	0,50	0,02	0,00	0,00
CP 01 - FAR 0,3%	28 dias	146,86	151,25	553	3,40	3,19	3,01	-	-
CP 02 - FAR 0,3%	28 dias	152,55	148,59	552	3,07	1,73	1,82	1,57	1,60
CP 03 - FAR 0,3%	28 dias	148,61	152,48	552	3,33	2,41	2,22	-	-
CP 04 - FAR 0,3%	28 dias	148,24	147,94	553	3,45	2,19	1,95	1,57	1,37
CP 01 - FAR 0,6%	28 dias	147,92	154,75	554	3,01	2,38	2,02	1,69	1,40
CP 02 - FAR 0,6%	28 dias	147,66	153,94	553	3,58	2,68	2,45	1,90	1,73
CP 03 - FAR 0,6%	28 dias	147,01	153,18	553	3,15	2,80	2,57	2,60	2,24
CP 04 - FAR 0,6%	28 dias	146,78	152,35	556	3,89	3,77	3,81	3,44	2,92
CP 01 - FAI 0,3%	28 dias	146,17	153,79	554	3,12	2,48	2,14	1,87	1,56
CP 02 - FAI 0,3%	28 dias	148,36	153,81	554	2,80	1,94	1,65	1,36	1,12
CP 03 - FAI 0,3%	28 dias	145,56	152,46	554	3,01	2,48	2,43	2,30	1,98
CP 04 - FAI 0,3%	28 dias	146,71	152,05	553	3,18	1,81	1,68	1,44	1,20
CP 01 - FAI 0,6%	28 dias	146,15	152,07	553	-	-	-	-	-
CP 02 - FAI 0,6%	28 dias	146,76	152,75	553	3,32	2,75	2,80	2,43	1,96
CP 03 - FAI 0,6%	28 dias	146,99	152,59	554	3,48	3,29	2,91	2,42	1,91
CP 04 - FAI 0,6%	28 dias	147,30	151,21	553	3,17	2,85	2,64	2,25	1,86

Fonte: Arquivo próprio.

**APÊNDICE G – Imagens do entalhe executado nos CP's prismáticos**

---



**APÊNDICE H – Figuras do ensaio de granulometria dos agregados**

---

