



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**

**PEDRO JOSÉ SILVA DO MONTE**

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE MATRIZES DE CONCRETO  
COM ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS, ATRAVÉS DO ENSAIO DE  
RESISTÊNCIA RESIDUAL**

**RECIFE**

**2024**

**PEDRO JOSÉ SILVA DO MONTE**

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE MATRIZES DE CONCRETO  
COM ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS, ATRAVÉS DO ENSAIO DE  
RESISTÊNCIA RESIDUAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Engenharia Civil  
**Orientador:** Prof. Dr. Tibério Wanderley  
Correia de Oliveira Andrade

**RECIFE**

**2024**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Monte, Pedro José Silva do.

Estudo comparativo de desempenho entre matrizes de concreto com adição de fibras metálicas, através do ensaio de resistência residual / Pedro José Silva do Monte. - Recife, 2024.

63 : il., tab.

Orientador(a): Dr. Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade  
(Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, , 2024.

Inclui referências.

1. Concreto. 2. Fibras de aço. 3. Resistência residual à tração. I. Andrade, Dr. Tibério Wanderley Correia de Oliveira. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

PEDRO JOSÉ SILVA DO MONTE

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE MATRIZES DE CONCRETO  
COM ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS, ATRAVÉS DO ENSAIO DE  
RESISTÊNCIA RESIDUAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 18/04/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

\_\_\_\_\_  
Profº. Dr. Rubens Alves Dantas (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

\_\_\_\_\_  
Eng. Civil Rodrigo Antonio Pereira de Moraes - CREA N° 181366835-3  
TECOMAT Engenharia





*Dedico essa monografia a Deus e a minha família.*

## **AGRADECIMENTO**

Concluindo o curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco, venho agradecer a todos que fizeram parte dessa história. Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus que foi meu alicerce durante esses anos de curso.

Aos meus pais, Gilberto e Veracy, que foram fundamentais nesta caminhada sendo minha base nos bons e maus momentos e dando todo o apoio necessário para que possa concluir minha graduação. Agradeço por todo o suporte, paciência e por me apoiar em todas as decisões.

A minha esposa, Mirela, que me auxiliou em vários momentos dessa trajetória e por toda sua paciência e companheirismo.

Ao meu professor orientador, Tibério Wanderley que sempre atencioso aceitou trabalhar este tema comigo, também viabilizou este trabalho junto com toda equipe da Tecomat que abriu as portas dos seus laboratórios cedendo toda sua infraestrutura e equipe técnica.

Agradeço a Romário Lima da Belgo Bekaert Arames que disponibilizou as fibras Dramix® necessárias para execução dos ensaios.

Por fim, agradeço a todo o corpo docente do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que fez parte dessa trajetória comigo.

## RESUMO

Sendo o material de construção mais utilizado no mundo, o concreto é objeto de estudo a fim de otimizar, melhorar e buscar os melhores processos para seu uso durante a construção civil. Com base neste contexto, o uso de fibras vem para melhorar uma de suas principais deficiências como material, sua baixa resistência à tração, tenacidade e capacidade de deformação. Com toda essa variedade presente no mercado é gerado nos consumidores um problema na escolha de fibra e qual volume de fibra é mais adequado para a sua aplicação. O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência de diferentes fibras metálicas em altos teores no desempenho mecânico de concretos em relação à resistência residual à tração na flexão. Para tanto, foi utilizado o ensaio de resistência residual à tração na flexão de corpos de prova prismáticos com o uso de três tipos de fibras com três teores distintos de 40 kg/m<sup>3</sup>, 60 kg/m<sup>3</sup> e 80 kg/m<sup>3</sup> que correspondem a 0,50%, 0,75% e 1,00%, respectivamente. Os resultados mostraram uma perda na trabalhabilidade no ensaio de abatimento de até 2,5% a cada kg/m<sup>3</sup> de fibra adicionado, esta perda por outro lado gerou um ganhos mínimos de resistência residual de 12,20% entre cada teor utilizado e 46,50% a cada unidade de fator de forma incrementada.

**Palavras-chave:** Concreto; Fibras de aço; Resistência residual à tração;

## **ABSTRACT**

Being the most widely used building material in the world, concrete is the subject of study in order to optimize, improve, and seek the best processes for its use in civil construction. In this context, the use of fibers aims to improve one of its main weaknesses as a material, which is its low tensile strength, toughness, and deformation capacity. With all this variety available in the market, consumers face a problem in choosing the right fiber and the appropriate fiber volume for their application. The general objective of this work is to evaluate the influence of different metallic fibers at high contents on the mechanical performance of concretes regarding residual flexural tensile strength. For this purpose, the residual flexural tensile strength test was used on prismatic specimens using three types of fibers with three different contents of 40 kg/m<sup>3</sup>, 60 kg/m<sup>3</sup>, and 80 kg/m<sup>3</sup>, corresponding to 0.50%, 0.75%, and 1.00%, respectively. The results showed a loss in workability in the slump test of up to 2.5% for every kg/m<sup>3</sup> of fiber added; however, this loss resulted in minimal gains in residual strength of 12.20% between each content used and 46.50% for each unit of aspect ratio increment.

**Keywords:** Concrete; Steel fibers; Residual tensile strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de Tensões ao longo de uma fibra .....	20
Figura 2 - Tipos de fibras.....	21
Figura 3 - Fibras de aço utilizadas em CRF .....	22
Figura 4 - Esquema de concentração de tensões .....	25
Figura 5 - CRF com diferentes teores em relação ao seu volume crítico.....	26
Figura 6 - Esquema de realização do ensaio de tração à flexão NBR - 16940.....	27
Figura 7 - Diagrama de carga versus CMOD .....	28
Figura 8 - Betoneira 400 litros .....	36
Figura 9 - Abatimento do tronco de cone.....	37
Figura 10 - Espalhamento do Concreto .....	37
Figura 11 - Adensamento em mesa vibratória.....	38
Figura 12 - Ensaio de resistência à tração na flexão .....	38
Figura 13 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 45/35 BL com 40kg/m <sup>3</sup> .....	42
Figura 14 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 45/35 BL com 60kg/m <sup>3</sup> .....	43
Figura 15 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 45/35 BL com 60kg/m <sup>3</sup> .....	43
Figura 16 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 65/35 BG com 40kg/m <sup>3</sup> .....	44
Figura 17 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 65/35 BG com 60kg/m <sup>3</sup> .....	46
Figura 18 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 65/35 BG com 80kg/m <sup>3</sup> .....	45
Figura 19 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 80/60 BG com 40kg/m <sup>3</sup> .....	45

Figura 20 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 80/60 BG com 60kg/m <sup>3</sup> .....	46
Figura 21 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 80/60 BG com 80kg/m <sup>3</sup> .....	46
Figura 22 - Comparativo das fibras de aço dosadas a 40kg/m <sup>3</sup> .....	56
Figura 23 - Comparativo das fibras de aço dosadas a 60kg/m <sup>3</sup> .....	56
Figura 24 - Comparativo das fibras de aço dosadas a 80kg/m <sup>3</sup> .....	57
Figura 25 - Comparativo dos resultados com teor de fibra de 40kg/m <sup>3</sup> .....	59
Figura 26 - Comparativo dos resultados com teor de fibra de 60kg/m <sup>3</sup> .....	59
Figura 27 - Comparativo dos resultados com teor de fibra de 80kg/m <sup>3</sup> .....	60

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Abatimento médio em cada teor de fibra.....	54
Gráfico 02 - Espalhamento médio em cada teor de fibra.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre grupos e tipos de fibra.....	23
Tabela 2 – Relatório de ensaio do cimento CP V - ARI Nacional.....	30
Tabela 3 – Características físicas do agregado graúdo.....	31
Tabela 4 – Características físicas do agregado miúdo.....	32
Tabela 5 – Características do aditivo Sikament - 101 SM.....	33
Tabela 6 – Características do Sika ViscoCrete - 6500 SM.....	33
Tabela 7 – Características das Fibras Dramix.....	34
Tabela 8 – Traços utilizados para cada fibra utilizada.....	35
Tabela 9 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 45/35 BL com 40kg/m <sup>3</sup> .....	47
Tabela 10 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 45/35 BL com 60kg/m <sup>3</sup> .....	47
Tabela 11 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 45/35 BL com 80kg/m <sup>3</sup> .....	48
Tabela 12 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 65/35 BG com 40kg/m <sup>3</sup> .....	48
Tabela 13 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 65/35 BG com 60kg/m <sup>3</sup> .....	49
Tabela 14 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 65/35 BG com 80kg/m <sup>3</sup> .....	49
Tabela 15 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 80/60 BG com 40kg/m <sup>3</sup> .....	50
Tabela 16 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 80/60 BG com 60kg/m <sup>3</sup> .....	50
Tabela 17 – Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 80/60 BG com 80kg/m <sup>3</sup> .....	51
Tabela 18 – Resultados do abatimento e espalhamento do concreto fresco da fibra Dramix® 45/35 BL .....	51
Tabela 19 – Resultados do abatimento e espalhamento do concreto fresco da fibra Dramix® 65/35 BG.....	52

Tabela 20 – Resultados do abatimento e espalhamento do concreto fresco da fibra Dramix® 80/60 BG.....	52
--	----

## LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CRF	Concreto reforçado com fibras

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
2.1 Objetivos Geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
3.1 FIBRAS.....	19
3.1.1 Fibras de aço.....	22
3.2 CONCRETO.....	23
3.3 INTERAÇÃO FIBRA-CONCRETO.....	24
3.4 RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	26
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
4.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	29
4.2 MATERIAIS.....	29
4.2.1 Cimento.....	30
4.2.2 Água.....	30
4.2.3 Agregados.....	31
4.2.3.1 Agregado Graúdo.....	31
4.2.3.2 Agregado Miúdo.....	32
4.2.4 Aditivos.....	32
4.2.5 Fibras de Aço.....	34
4.3 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS.....	34
4.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	35
4.4.1 Mistura dos materiais.....	35
4.4.2 Verificação de abatimento e espalhamento e massa específica da mistura.....	36
4.4.3 Moldagem dos corpos de prova.....	38
4.4.4 Ensaio de resistência residual à tração na flexão (NBR 16490).....	39
4.4.4.1 Limite de proporcionalidade (LOP).....	40
4.4.4.2 Resistência residual à tração na flexão.....	40
4.4.4.3 Ensaio.....	41
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>42</b>
5.1 Resultados.....	42
5.1.1 Resultados dos ensaios de resistência residual à tração na flexão.....	42
5.1.2 Resultados dos limites de proporcionalidade e resistências residuais.....	47
5.1.3 Resultados dos abatimento do tronco de cone e espalhamento do concreto...	51
5.2 Análises.....	52
5.2.1 Análises do concreto fresco.....	52
5.2.1.1 Análise da consistência pelo abatimento do tronco de cone e espalhamento do concreto fresco.....	52

5.2.2 Análises dos resultados de resistência residual à tração na flexão.....	54
5.2.2.1 Análise do da interação fibra matriz.....	54
5.2.2.2 Resistência residual à tração na flexão.....	57
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos materiais mais utilizados pela humanidade é o concreto. Amplamente utilizado na construção civil, é composto por água, cimento Portland, areia, agregados e podendo ou não conter aditivos em sua composição.

Desde a pré-história as grandes civilizações, como a romana, já utilizaram materiais ligantes a base de cal e pozolana e que com a adição de areia, pedregulhos e água foram gerados os primeiros concretos conhecidos pela raça humana. (Metha & Monteiro, 2008).

Anteriormente, as antigas civilizações construíram seus monumentos com rochas, das quais necessitavam de um transporte bastante difícil entre a jazida até o local da construção, pois estas rochas eram os únicos materiais que o homem possuía capaz de suportar os esforços das grandes edificações. Porém com a utilização do concreto foi possível criar um material com características similares às rochas com facilidade de transporte, manuseio e a capacidade de gerar os formatos mais variados.

Com concreto, apesar de sua alta resistência a compressão, possui uma baixa resistência a tração que gerava diversos problemas para seu uso. Com base nesta deficiência surgiu a tecnologia do concreto armado, que nada mais é que a usar o aço dentro do concreto nas regiões dos elementos estruturais em os esforços de tração são induzidos, garantindo o seu uso nestas situações.

O ato de armar o concreto é um processo complexo que pode gerar problemas patológicos nas construções, principalmente o da corrosão de armaduras devido o posicionamento incorreto dos vergalhões dentro da área de cobrimento das peças estruturais, bem como o desperdício de matérias no ato de corte e dobra dos vergalhões em adequação ao projeto e estrutural, além do tempo necessário durante todo o processo e armar uma estrutura.

Um meio de melhorar estas deficiências mecânicas é com o uso de fibras. As fibras nada mais são do que pequenos elementos adicionados à massa do concreto possuem o comprimento muito maior que suas dimensões transversais. Com o avanço da tecnologia se notou que ao adicionar fibras de aço ao concreto era possível aumentar substancialmente o aumento da sua tenacidade, ou seja, uma forma mais simples de reforçar a estrutura como um todo, adicionando

simplesmente uma certa dosagem desse material de forma homogênea durante a mistura dos materiais para confecção do concreto.

Com o aumento exponencial do uso deste material no Brasil atrelado com suas diversas aplicações no setor da construção civil, foi necessário a publicação de normas brasileiras que orientassem o uso de fibras no concreto. Até a introdução dessas normas para avaliação do desempenho estrutural dos concretos reforçados com fibras, o emprego desse material no Brasil até recentemente se dava de forma empírica, o que gerou uma lacuna em dados científicos que auxiliassem os profissionais da construção civil numa escolha mais eficiente de qual fibra de aço usar, além da dosagem necessária deste material para sua aplicação resistência almejada

Com base nisso, esse trabalho irá analisar os efeitos de diferentes tipos de fibras aço aplicadas em alto teores ao concreto, variando de 0,50% a 1,00%, e compará-las com base nos ensaios de resistência residual à tração na flexão em corpos de prova prismáticos, analisando o aumento da tenacidade que cada teor de fibra provoca em uma matriz, além influência da geometria da fibra metálica neste aumento tornando assim a sua aplicação mais assertiva e otimizada.

## **2 OBJETIVOS**

### ***2.1 Objetivos Geral***

Avaliar a influência de diferentes fibras metálicas no desempenho de concretos em relação à resistência residual à tração na flexão.

### ***2.2 Objetivos específicos***

- Avaliar de forma técnica a influência de adições adequadas de diferentes tipos de fibras metálicas no reforço de concreto;
- Avaliar o impacto na trabalhabilidade de concreto reforçado com fibras metálicas em diferentes dosagens e diferentes tipos de fibra;

- Analisar a influência dos fatores de forma das fibras metálicas no ganho de resistência residual à tração na flexão em concreto de 28 dias;

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nos itens deste capítulo serão apresentados as fundamentações teóricas necessárias para compreensão deste trabalho, bem como os materiais usados na produção.

#### **3.1 FIBRAS**

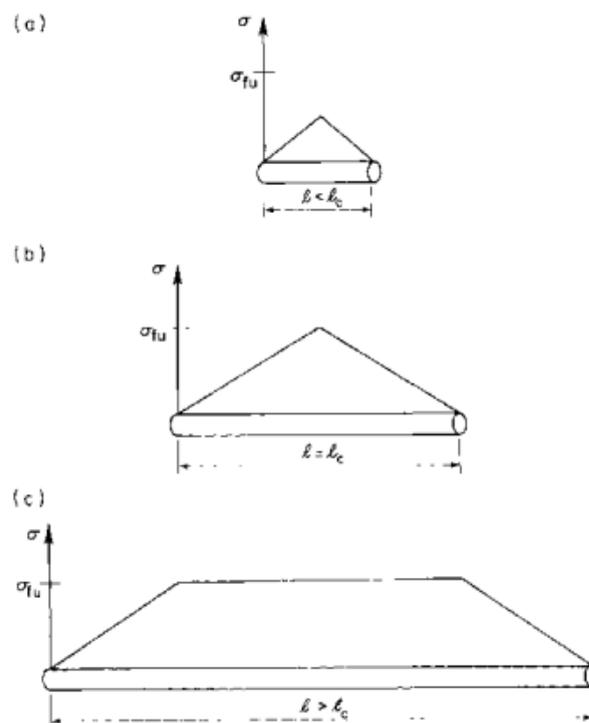
As fibras vêm sendo utilizadas pela humanidade desde a antiguidade, como mostra registro de fibras de asbesto utilizados para a produção de potes de argila e de palha e para tijolos de barro (Metha & Monteiro, 2008). As fibras nada mais são que elementos descontínuos que possuem o comprimento bem maior que sua maior seção transversal (FIGUEREDO, 2011), que adicionados no concreto o reforça minimizando suas limitações como a tenacidade e capacidade de deformação.

As fibras, como dito anteriormente, possuem elevado comprimento em relação ao seu diâmetro e a razão entre comprimento da fibra pelo diâmetro do círculo cuja área equivalente à da seção transversal é o parâmetro chamado fator de forma ou relação de esbeltez. Este parâmetro indica que ao diminuir a seção transversal de uma fibra ou aumentar seu comprimento, conseqüentemente maior será seu fator de forma ( $\lambda$ ), e quanto maior este fator maior será o comportamento de resistência residual do concreto após a fissuração do concreto (Figueiredo, 2011).

Deste modo o comprimento da fibra influencia no aumento das características do compósito cimentício, principalmente no ganho de tenacidade e resistência residual à tração. Mesmo que as fibras não impeçam a formação de fissuras, uma vez que o processo de fissuração decorre das propriedades do compósito como característica praticamente inevitável (VASCONCELOS, 2012). Ou seja, quanto maior o fator de forma das fibras utilizadas em um compósito melhor será o desempenho mecânico e o seu comportamento pós fissuração. (CARCERES ET AL., 2015).

Porém, não se pode aumentar de forma indefinida o comprimento da fibra pois, isto não traz ganhos de resistência de pós-fissuração de forma infinita. As fibras possuem um comprimento crítico ( $L_c$ ) que segundo (Bentur & Mindess, 2007) é comprimento da fibra necessário para o acúmulo de uma tensão na fibra seja igual à sua resistência como mostra a Figura 1. Quando a fibra tem um comprimento menor que o crítico, a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento embutido na matriz não é o suficiente para produzir uma tensão que supere a resistência da fibra (Figueiredo, 2000).

Figura 1 - Distribuição de Tensões ao longo de uma fibra



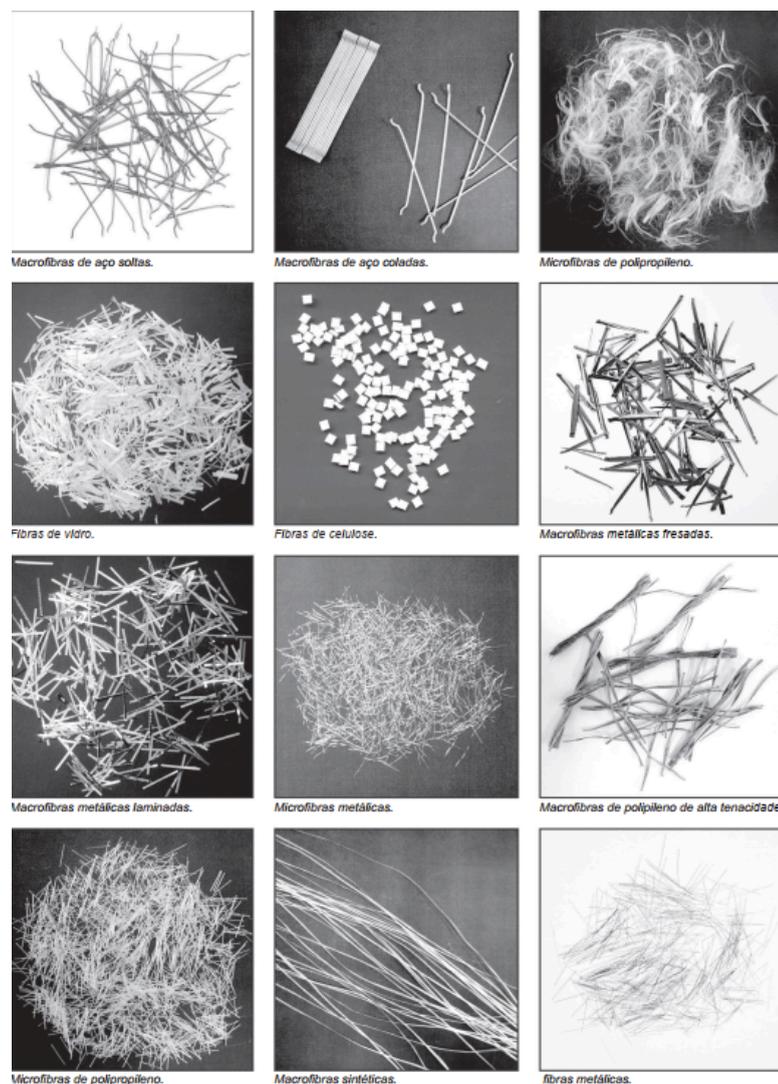
Fonte: (Bentur & Mindess, 2007)

De acordo com Carnio (2009), vem sendo utilizadas vários tipos de fibra no com suas características próprias entre elas as quais são diferenciadas umas entra

as outras pelo seu processo de fabricação e composição química, características mecânicas, resistências a meios abrasivos e fator de forma.

Com base nestes fatores as fibras são classificadas em macrofibras, que são aquelas utilizadas para reforço do concreto, e em microfibras, utilizadas para atenuar fissuração da matriz cimentícia proveniente de tensões induzidas com retração plástica do concreto. Uma outra maneira de classificar as fibras é em relação ao seu material de origem que podem ser: metálicas, naturais e poliméricas e isto afeta diretamente no seu módulo de elasticidade e conseqüentemente na sua aplicação, conforme (Antonio Gallovich Sarzalejo et al., 2017). A figura 2 exemplifica diferentes tipos de fibras conforme as classificações citadas anteriormente.

Figura 2 - Tipos de fibras

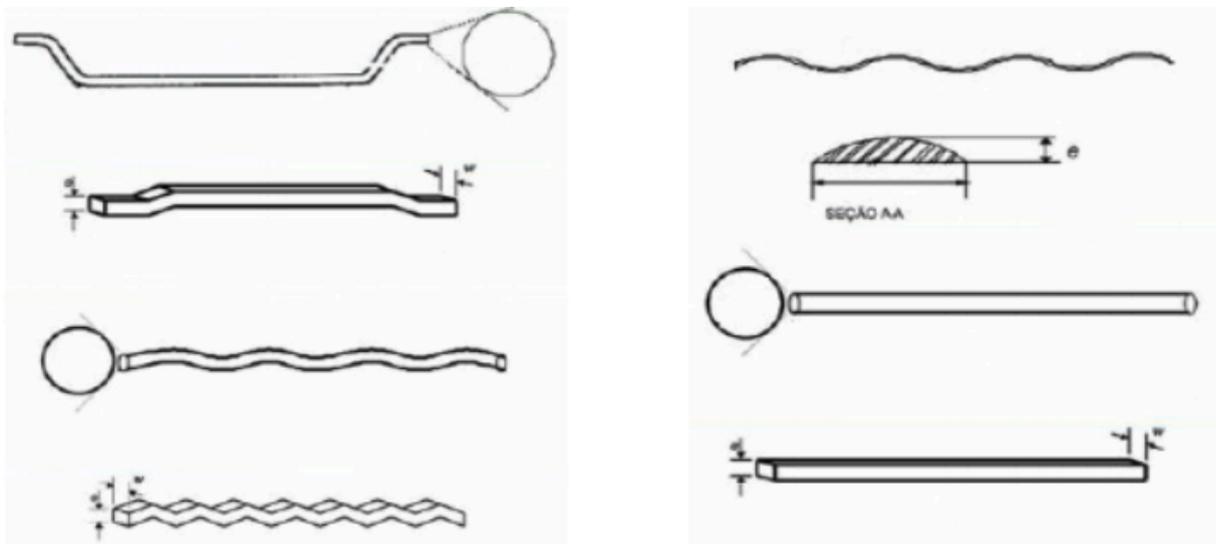


Fonte: (Antonio Gallovich Sarzalejo et al., 2017)

### 3.1.1 Fibras de aço

Dentre as macrofibras metálicas as mais utilizadas são as fibras de aço, devido a sua alta resistência à tração e elevado módulo de elasticidade. São encontradas no mercado em comprimentos e geometrias variadas e sendo regidas pela NBR 15530 (ABNT, 2019). As fibras de aço são elementos descontínuos produzidos com uma variedade gama de dimensões e formatos de tipos de aço (FIGUEREDO, 2000), sendo sua geometria mostradas na figura 3

Figura 3 - Fibras de aço utilizadas em CRF



Fonte: (Carnio, 2009).

Segundo norma NBR 15530 (ABNT, 2019) a classificação as fibras de aço em tipos de perfis e em grupos baseados em suas características geométricas e seu material base usado para a fabricação respectivamente, sendo eles:

- **Tipo A:** Fibra de aço com ancoragens na extremidade;
- **Tipo C:** Fibra de aço corrugada;
- **Tipo R:** Fibra de aço reta.

Os tipos de perfis em que fibras de aço são classificados pela norma fazem referência ao mecanismo de aderência da fibra ao concreto, sendo elas com

ancoragem nas pontas, corrugadas ou retas. Já em termos de material base das fibras a norma divide elas em cinco grupos como mostra a tabela 1, em que cada um deles pode possuir em si mesmo fibras de tipos diferentes, sendo os grupos:

- **Grupo I:** Arames trefilados a frio;
- **Grupo II:** Chapas Cortadas;
- **Grupo III:** Arames trefilados a frio e escarificados;
- **Grupo IV:** Fibras produzida por fusão;
- **Grupo V:** Usinadas a partir de blocos de aço;

Tabela 1 – Relação entre grupos e tipos de fibra

<b>Grupos</b>	<b>Tipos</b>
I	A, C, R
II	A, C, R
III	C
IV	C
V	C

### **3.2 CONCRETO**

Os registros históricos mostram os romanos como a primeira grande civilização da antiguidade a utilizarem o concreto como material estrutural para construção de seus aquedutos, pontes e edifícios.

Segundo, (Falcão, BAUER, 2008) a história do concreto pode ser dividida em, pelo menos, quatro períodos. O primeiro, que se iniciou na antiguidade e cujas descobertas estavam relacionadas com os ligantes hidráulicos. O segundo, quando ocorreram as primeiras mesclas de calcário e argila até a obtenção do cimento. O

terceiro período foi marcado pelo entendimento da relação entre os componentes básicos do concreto: cimento com a água, agregado graúdo e miúdo. O último período, que perdura até a atualidade, foi a participação da indústria química na composição do concreto por meio das adições e dos aditivos.

Segundo (Metha & Monteiro, 2008), o concreto é o material de construção mais utilizados no mundo devido a três motivos principais sendo eles: a sua resistência à deterioração no contato com água, a facilidade com que elementos em concreto podem ser moldados, assumindo formas variadas, e por último é seu baixo custo de produção e manutenção comparado a outros materiais estruturais.

O concreto é obtido através da mistura entre cimento Portland, agregados e água, contendo ou não aditivos. Esta mistura precisa ser dosada entre os diferentes materiais a fim de possuir as características almejadas, sendo a principal a sua elevada resistência a esforços de compressão. Porém o concreto possui uma resistência à tração direta bem inferior à compressão, em média de 7% a 11% (Metha & Monteiro, 2008). Um dos principais fatores que influenciam nesta baixa resistência são as fissuras que se formam ou já estão presentes no concreto, que prejudicam muito mais o material quando solicitado à tração (Figueiredo, 2011).

### **3.3 INTERAÇÃO FIBRA-CONCRETO**

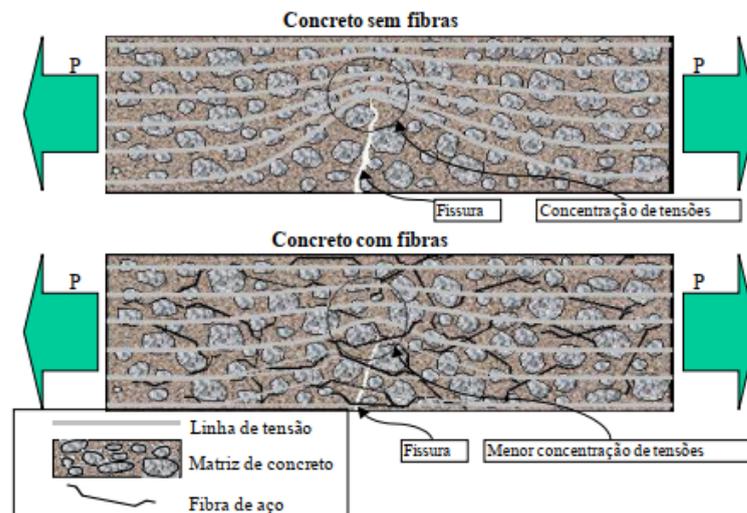
Em concretos reforçados com fibras uma propriedade fundamental para seu estudo e avaliação é a tenacidade. Segundo (Figueiredo, 2011) tenacidade é a capacidade de um material de absorver energia absorvida à medida que sofre um esforço até a sua ruptura.

No concreto reforçado com fibras, as fibras ficam dispersas e homogêneas por toda uma peça e não apenas em locais isolados das peças de concreto, como é o caso do aço no concreto armado.

No concreto simples, quando há a formação de fissuras, ocorre um desvio das linhas de tensão fazendo com que a fissura funcione como uma barreira à propagação de tensões e apareça uma concentração de tensão na extremidade das fissuras (JÚNIOR, 2021). As fibras atuam neste processo como ponte de transferência de tensões, reforçando o concreto com a diminuição da concentração de tensões e redistribuindo os esforços.

É mostrado na Figura 4 que quando um concreto é submetido a uma carga  $P$  de tração e com linhas de tensão de cor cinza. No decorrer da fissuração o concreto rompe de forma abrupta mostrando seu comportamento frágil, devido às barreiras de tensão impostas pelas fissuras. Mas logo abaixo mostra justamente o efeito das pontes de transferências causadas pelas fibras diminuindo as concentrações e dissipando a energia, fazendo que as tensões não se concentrem em um ponto, e tornando assim o concreto que um material não mais tão frágil a solicitações de tração.

Figura 4 - Esquema de concentração de tensões



Fonte: (Figueiredo, 2000).

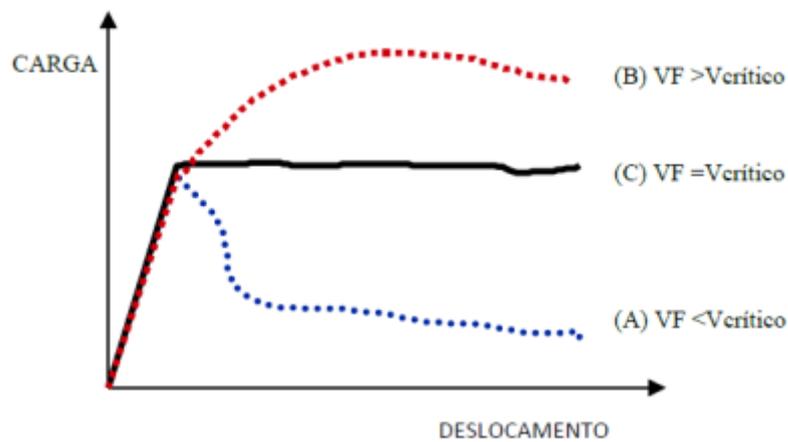
Um outro aspecto de interação da fibra com o concreto é o volume de fibras ou teor de fibras ( $V_f$ ) que é o parâmetro que classifica os compósitos com fibra a partir de seu comportamento após a fissuração. Naaman (2000) propôs duas classes de matrizes reforçadas com fibras:

- *Strain-softening*: quando há uma perda progressiva na resistência após a fissuração da matriz;
- *Strain-hardening*: quando há aumento de resistência após a fissuração da matriz;

Com base nestas características dos compósitos é possível definir um volume crítico ( $V_c$ ), que nada mais é que o volume de fibras que mantém a mesma capacidade resistente para o compósito após a fissuração. Ou seja, abaixo do

volume a matriz mantém um comportamento softening e acima do  $V_c$  o compósito apresenta um comportamento hardening. Na figura 5 é possível visualizar em um gráfico carga x deslocamento com o CRF apresentando seu comportamento diante de seu volume de fibras.

Figura 5 - CRF com diferentes teores em relação ao seu volume crítico



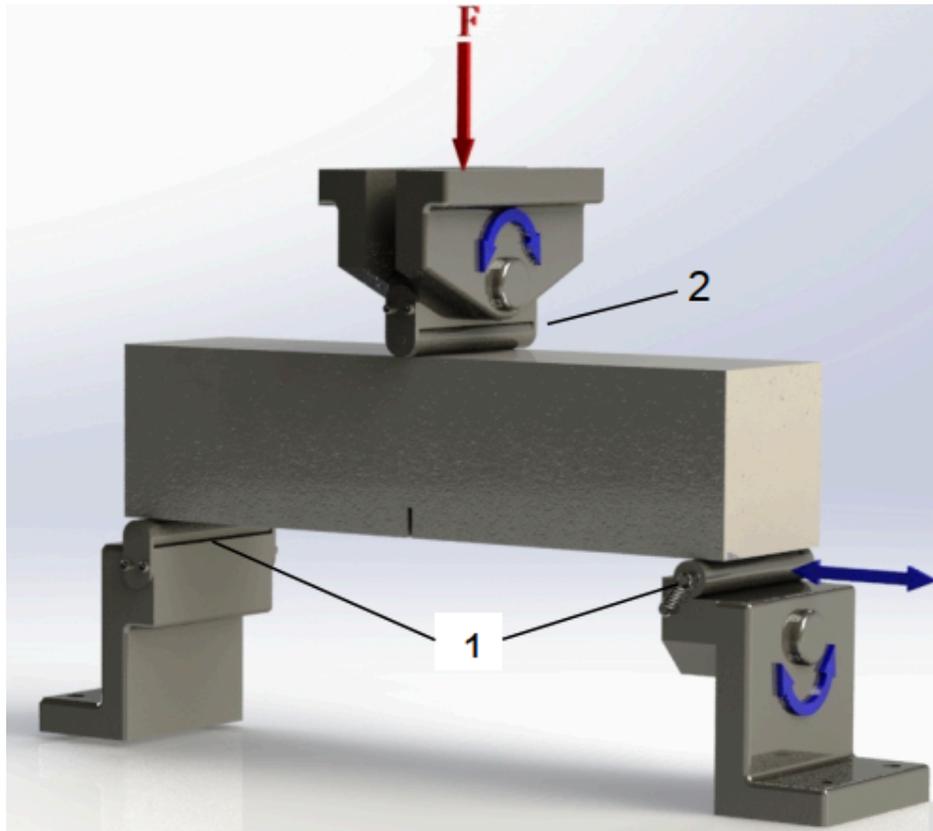
Fonte: (Figueiredo, 2000).

### 3.4 RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Dentre os ensaios normatizados e empregados no Brasil para medir a tenacidade de uma matriz reforçada com fibras, o ensaio de resistência residual à tração na flexão NBR - 16940 (ABNT, 2021), que determina as resistências à tração na flexão de corpos de prova prismáticos por meio de resistências residuais.

O ensaio consiste na aplicação de uma força vertical sobre um corpo de prova prismático de dimensões nominais (largura e altura) de 150mm e comprimento entre 550 mm e 700 mm. O corpo de prova é apoiado sobre roletas de apoio que devem ser capazes de rotacionar livremente em seu próprio eixo como mostra em esquema na Figura 6.

Figura 6 - Esquema de realização do ensaio de tração à flexão NBR - 16940

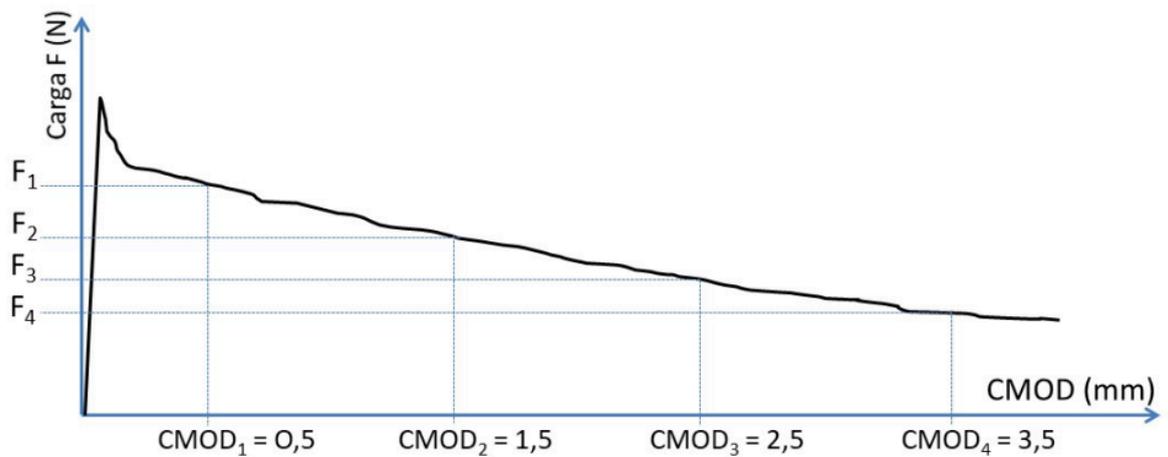


Fonte: (ABNT, 2021).

Para a realização deste ensaio é necessário a realização de um entalhe, com o concreto já endurecido, de no máximo 5mm de espessura no centro da face inferior do corpo e tendo a distância entre o topo do corpo e o topo do entalhe uma altura de até 126mm. Este entalhe é necessário para a instalação de um transdutor deslocamento, equipamento eletrônico necessário para medição da abertura do entalhe (CMOD).

Com transdutor instalado se inicia a aplicação da força  $F$  que provoca um esforço de tração na face superior do corpo de prova e assim aumentando o valor do CMOD. Com o aumento do valor do CMOD que vem com o aumento da força, é possível medir e registrar a resistência residual à tração na flexão do material em níveis de deslocamento (CMOD) como ilustra a figura 7.

Figura 7 - Diagrama de carga versus CMOD



Fonte: (ABNT, 2021).

Alguns fatores como: adensamento, homogeneidade do material da mistura e uniformidade da moldagem dos corpos de prova, podem ser complicadores para a realização do ensaio de determinação da tenacidade em prismas. Esses fatores estão relacionados e influenciam os resultados, e isto compromete tanto a repetibilidade quanto a reprodutibilidade do mesmo (GUIMARÃES; FIGUEIREDO, 2002).

Além dos fatores citados acima, uma outra problemática que também deve ser levada em consideração ao se trabalhar com concretos reforçados com fibras que são os teores empregados na dosagens. Teores elevados, acima de 1%, diminuem significativamente a fluidez da matriz dificultando a sua moldagem. E também se deve ter cuidado com a formação dos denominados ouriços que são aglomerados de fibras que se unem em formato esférico. Devido a esta problemática, as aplicações estruturais utilizam teores de até 0,50% e em casos excepcionais em até 1,00%.

Um exemplo disto são as fibras de aço utilizadas em pavimentos, com teores variando entre 0,25% e 0,50% que apesar de não aumentarem significativamente a resistência à tração do concreto geram um aumento significativo da sua tenacidade (Carnio, 2009).

## **4 METODOLOGIA**

Neste capítulo são abordados os materiais e a metodologia experimental que foi adotada para a realização desta pesquisa, expondo de forma detalhada as etapas do programa experimental, como meta de atender o que foi proposto nos objetivos estabelecidos no primeiro capítulo.

### **4.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Este trabalho teve como iniciativa a elaboração de uma análise do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço em teores distintos de fibra e com tipos diferentes de fibra. Esta análise tem como intuito identificar como a variação dos parâmetros citados acima influenciam as propriedades mecânicas do concreto. Tendo isto em mente, elaborou-se um programa experimental que foi dividido nas etapas seguintes:

- Seleção dos materiais necessários que serão utilizados e como serão definidos os traços contendo as fibras de aço em três teores diferentes;
- Preparação dos corpos de prova prismáticos necessários para realização dos ensaios;
- Execução dos ensaios de resistência residual à tração na flexão nos corpos de prova prismáticos, utilizando a norma NR 16940 (ABNT, 2021);

As dosagens e preparação dos corpos-de-prova deste programa experimental foram realizadas no laboratório de dosagem de materiais da Tecomat situados no Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP. Já os ensaios laboratoriais de determinação resistência residual tração foram realizados no laboratório central da Tecomat.

### **4.2 MATERIAIS**

A seguir serão listados os materiais necessários para confecção de concretos para a realização deste ensaio, e eles são utilizados amplamente na confecção de concretos de alta resistência inicial na região.

#### 4.2.1 Cimento

O cimento utilizado pela pesquisa foi produzido pela empresa Nacional e foi utilizado do tipo CP V – ARI ), já que é o cimento que apresenta menor variação de suas características, pelo fato de não conter adição de escórias e apresentar um teor de clínquer elevado. Na tabela 2 abaixo se encontram suas características físicas e químicas.

Tabela 2 - Relatório de ensaio do cimento CP V - ARI Nacional

Ensaio Físicos		Ensaio Químicos	
Blaine	4.523 cm <sup>2</sup> /g	Resíduo Insolúvel	1,60%
Início de pega	171 min	Perda ao Fogo	3,72%
Fim de pega	231 min	Óxido de Magnésio	2,44%
Resistência 3 dias	39,6 MPa	Trióxido de Enxofre	4,08%
Resistência 7 dias	44,9 MPa	Óxido de Sódio	0,08%
Massa específica aparente	3,07 g/cm <sup>3</sup>	Óxido de Potássio	1,20%
Finura pela peneira 75 µm	0,02%	Equivalente Alcalino	0,87%

Fonte: (Nacional, 2024).

#### 4.2.2 Água

A água utilizada foi obtida através da rede pública de responsabilidade da COMPESA para a distribuição de água na cidade do Recife/PE.

### 4.2.3 Agregados

Foram utilizados agregados provenientes de jazidas locais comumente utilizados para a produção de concretos na região metropolitana do Recife para realização do estudo.

#### 4.2.3.1 Agregado Graúdo

Neste estudo foi utilizado o agregado graúdo de diâmetro máximo 19mm, tendo a sua caracterização realizada conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), sendo a composição granulométrica e outros parâmetros mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Características físicas do agregado graúdo.

Características físicas	
Módulo de Finura	6,84
Dimensão Máxima Característica	19 mm
Massa Específica	2,79 g/cm <sup>3</sup>
Massa Unitária	1585 kg/m <sup>3</sup>
Material Pulverulento	0,58 %
Torrões de Argila	– %
Impurezas Orgânicas	0 %
Absorção	0,3 %

Fonte: (Tecomat, 2024).

#### 4.2.3.2 Agregado Miúdo

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009) os agregados miúdos são os grãos que passam pela peneira com abertura de malha 4,5 mm, a tabela 4 traz as características físicas do agregado miúdo utilizado.

Tabela 4 - Características físicas do agregado miúdo

Características físicas	
Módulo de Finura	1,33
Dimensão Máxima Característica	0,6 mm
Massa Específica	2,64 g/cm <sup>3</sup>
Massa Unitária	1550 kg/m <sup>3</sup>
Material Pulverulento	2,69 %
Torrões de Argila	– %
Impurezas Orgânicas	0 %
Absorção	0,5 %

Fonte: (Tecomat, 2024).

#### 4.2.4 Aditivos

Para melhorar a trabalhabilidade e a dispersão de partículas de cimento na argamassa e as fibras de forma homogênea foram utilizados dois tipos de aditivos. O primeiro aditivo utilizado foi um redutor de água o Sikament – 101 SM que é um aditivo líquido que aumenta a trabalhabilidade e aumenta o tempo de pega da mistura. A tabela 5 mostra as características físico-químicas deste material.

Tabela 5- Características do aditivo Sikament - 101 SM

Características do Sikament - 101 SM	
Aspecto / Cor	Líquido Castanho
Densidade	1,07 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Valor do pH	7,4 ± 1,0
Teor de íons cloreto	Isento

Fonte: (Sika, 2022).

Um outro aditivo utilizado é o Sika ViscoCrete 6500, com suas especificações mostradas na tabela abaixo, que é um aditivo líquido superplastificante de terceira geração. Este aditivo é bastante utilizado na indústria da construção civil como um todo, desde pré-fabricados, obras de infraestrutura e em concretos de alta resistência inicial que é o caso do objeto deste estudo. A tabela 6 mostra as características deste material.

Tabela 6 - Características do Sika ViscoCrete - 6500 SM

Características do Sika ViscoCrete - 6500 SM	
Aspecto / Cor	Líquido Marrom
Densidade	1,08 ± 0,02 kg/cm <sup>3</sup>
Valor do pH	4,5 ± 1,0
Teor de íons cloreto	Isento

Fonte: (Sika, 2022).

### 4.2.5 Fibras de Aço

Foram utilizadas para a realização deste estudo fibras de aço produzidas pela Arcelormittal e Belgo Bekaert Arames. As fibras Dramix são produzidas a partir de aço trefilado cuja a frio cuja matéria prima é o fio máquina da ArcelorMittal (Dramix, 2018).

Ao todo foram utilizados três tipos de fibras sendo ambas pertencentes ao tipo A e ao grupo 1, sendo elas: Dramix 3D 45/ 35 BL, Dramix 3D 65/ 35 BG e Dramix 3D 80/ 60 BL. A tabela a seguir mostra as suas características físicas.

Tabela 7 – Características das Fibras Dramix

<b>Tipo</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Diâmetro</b>	<b><math>\lambda</math></b>
Dramix 3D 45/ 35 BL	35mm	0,75mm	45
Dramix 3D 65/ 35 BG	35mm	0,55mm	65
Dramix 3D 80/ 60 BL	60mm	0,75mm	80

Fonte: (Dramix, 2018).

### 4.3 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS

As dosagens das matrizes de concreto reforçadas com fibras para a produção desta pesquisa foram obtidas com base no método IPT/EPUSP, onde esta metodologia considera que o parâmetro mais importante é sua relação de água/cimento e definindo assim a relação dos outros materiais, garantindo assim a resistência do compósito e a trabalhabilidade da mistura.

Com a finalidade de melhorar a trabalhabilidade, ajustes laboratoriais foram feitos ao longo do experimento através da mudança no teor de argamassa e adição de aditivos. A relação água / cimento foi constante em todos os traços e foi de 0,46 e com abatimento do tronco de cone, também em todos os traços, definido em 80mm

± 20mm. Após a mistura inicial com abatimento 80mm, foi adicionado o superplastificante, sendo fixando uma espalhamento de 550mm a 650mm. Foram confeccionados ao todo nove traços diferentes sendo eles compostos com cada uma das três fibras com teores de 40kg/m<sup>3</sup>, 60kg/m<sup>3</sup> e 80kg/m<sup>3</sup>. A tabela 8 mostra os traços que foram utilizados neste experimento.

Tabela 8 – Traços utilizados para cada fibra utilizada

<b>Materiais</b>	<b>40kg/m<sup>3</sup></b>	<b>60kg/m<sup>3</sup></b>	<b>80kg/m<sup>3</sup></b>
Dramix 3D 45/ 35 BL	1;1,68;1,51;0,46	1;1,73;1,53;0,46	1;1,73;1,53;0,46
Dramix 3D 65/ 35 BG	1;1,73;1,53;0,46	1;1,73;1,53;0,46	1;1,73;1,53;0,46
Dramix 3D 80/ 60 BL	1;1,81;1,53;0,46	1;1,81;1,53;0,46	1;1,83;1,56;0,46

Fonte: (Autor, 2024).

#### **4.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

A seguir será detalhada a produção dos compósitos utilizados neste experimento e os ensaios realizados neste trabalho.

##### **4.4.1 Mistura dos materiais**

Com base nos materiais e traços informados foram confeccionados quatro corpos de provas para cada traço, com os compósitos para execução dos ensaios visando sempre o passo a passo correto para que não houvesse nenhum tipo de distorção nos resultados.

As matrizes foram misturadas com o auxílio mecânico de uma betoneira de 400 litros e os materiais foram adicionadas em 3 etapas. Inicialmente foi adicionada a areia junto com brita e homogeneizada, seguinte foi adicionado o cimento com água e aditivo redutor de água, por fim foram adicionados às fibras e o aditivo

superplastificante de tipo 3. Entre cada etapa foi dado um tempo de aproximadamente de 2 minutos para homogeneização da mistura.

Todos os materiais antes de ser lançado na betoneira mostrada na figura 8 foram pesados em uma balança para garantir que os traços sejam respeitados.

Figura 8 - Betoneira 400 litros



Fonte: (Autor, 2024).

#### ***4.4.2 Verificação de abatimento e espalhamento e massa específica da mistura***

Durante o processo de mistura foram feitas verificações do abatimento do concreto com base na NBR NM 67:1998 para avaliação do traço e se a necessidade de algum ajuste que garanta os parâmetros do traço pré-definido e a homogeneidade da mistura, para isso foram realizados durante a mistura o ensaio de abatimento do tronco de cone e ao final foram feitos ensaios de determinação de espalhamento pelo método do cone de Abrams. A figura 9 mostra o ensaio de abatimento e a figura 10 mostra o ensaio de espalhamento.

Figura 9 - Abatimento do tronco de cone



Fonte: (Autor, 2024).

Figura 10 - Espalhamento do concreto



Fonte: (Autor, 2024).

#### 4.4.3 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova prismáticos foram moldados em moldes metálicos e curados conforme a NBR 5738:2015. Para cada traço foram moldados quatro corpos de prova para se obter a resistência residual à tração na flexão.

Os corpos de prova prismática possuem dimensões de 150 mm de altura, 150 mm de largura e 550 mm de comprimento, sendo a desforma dos prismas realizada 24 horas após o adensamento.

A moldagem foi feita com enchimento das formas em duas etapas. A primeira, com preenchimento de concreto na forma na metade da altura da forma, adensando na mesa vibratória como ilustra a figura 11. Após essa etapa, era preenchido o restante do molde utilizando o mesmo procedimento

Os corpos de prova foram curados submersos em tanque logo após a desforma dos corpos de prova e retirados 27 dias depois da moldagem para execução do entalhe para o ensaio, sendo o ensaio realizado aos 28 dias de idade.

Figura 11 - Adensamento em mesa vibratória



Fonte: (Autor, 2024).

#### 4.4.4 Ensaio de resistência residual à tração na flexão (NBR 16490)

Antes da realização do ensaio, os prismas de concreto devem ser preparados, sendo que essa preparação consiste em medir as dimensões, marcar nos prismas linhas de referência para apoio dos cutelos de suporte, executar o entalhe e colar 02 plaquinhas metálicas para fixação dos clips.

O entalhe é um corte transversal realizado no prisma do concreto, com 25mm de altura e 5mm de espessura, localizado no centro do prisma e que, no ensaio, vai ficar localizado na sua face inferior. As duas plaquinhas são colocadas nessa face, uma em cada lado do entalhe, no eixo longitudinal do prisma, servindo de apoio para os clips /transdutor que medem o deslocamento linear em milímetros.

Figura 12 - Ensaio de resistência residual à tração na flexão



Fonte: (Autor, 2024).

Este ensaio fornece a relação entre a força, em (N), aplicada sobre o corpo de prova prismático, a partir do rolete de aplicação de carga no centro do prisma, e a abertura do entalhe, em mm, ao longo do incremento de força durante o ensaio. No ensaio são obtidos os parâmetros de limite de proporcionalidade (LOP) e as resistências residuais à tração na flexão para  $f_{R,i}$ .

#### 4.4.4.1 Limite de proporcionalidade (LOP)

O LOP é calculado através da expressão abaixo:

$$FR_i = \left( \frac{3FL \times c}{2bhsp^2} \right)$$

Onde:

fL é o LOP, expresso em newtons por milímetro quadrado (N/mm<sup>2</sup>);

FL é a carga correspondente ao LOP, expresso em (N);

C é o comprimento entre os cutelos de apoio em (mm);

b é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

hsp é a distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

FL é a carga máxima alcançada no gráfico tensão x deslocamento linear no intervalo de deslocamento de 0 a 0,05 mm.

#### 4.4.4.2 Resistência residual à tração na flexão

Antes da ruptura da matriz cimentícia, o concreto reforçado com fibra possui um gráfico tensão x deslocamento linear, e nessa fase as fibras não estão absorvendo esforços de tração.

Após a ruptura da matriz, abre-se uma fissura no concreto e as fibras que estão cortando essa fissura começam a trabalhar, transferindo os esforços de tração, mantendo a estabilidade do concreto.

A medida que o ensaio prossegue, existe uma resistência residual, pós fissuração, devido a atuação das fibras, com a fissura se propagando e abrindo, o que reflete no aumento progressivo do deslocamento linear, que é medido pelo sistema clip/transdutor.

As resistências residuais à tração na flexão são calculadas utilizando a mesma expressão utilizada para se obter o limite de proporcionalidade (LOP), sendo

que a carga adotada é a correspondente a CMOD específicos no diagrama Cargas x CMOD, mostrado na figura 07. Os CMOD's são 1, 2, 3 e 4, que correspondem aos deslocamentos lineares de 0,5mm, 1,5mm, 2,5mm e 3,5mm no gráfico.

Esses parâmetros de LOP, as resistências residuais  $f_{R,1}$ ,  $f_{R,2}$ ,  $f_{R,3}$  e  $f_{R,4}$  as relações entre ( $f_{R,1}/f_{R,2}$ ;  $f_{R,1}/f_{R,3}$ ; etc) são as especificações fornecidas pelos projetistas para os concretos reforçados com fibras e são os parâmetros, além de outros para a elaboração das dosagem.

#### **4.4.4.3 Ensaio**

O ensaio foi realizado em uma prensa EMIC DL 600, servo controlada, operando em circuito fechado de controle de velocidade, com controle da taxa de aumento CMOD, conforme a exigência definida pela NBR 19940 (ABNT, 2021).

A norma determina que a taxa de aumento de CMOD seja constante no ensaio, devendo assumir uma velocidade de 0,05mm/min até um CMOD de 0,1mm. A partir desse CMOD de 0,1mm até um CMOD de 4 mm, que seria o término do ensaio, essa taxa deve ter uma velocidade de 0,2mm/min. Só com prensas que operam em circuito fechado de controle de velocidade é possível obter essas taxas constantes.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISE

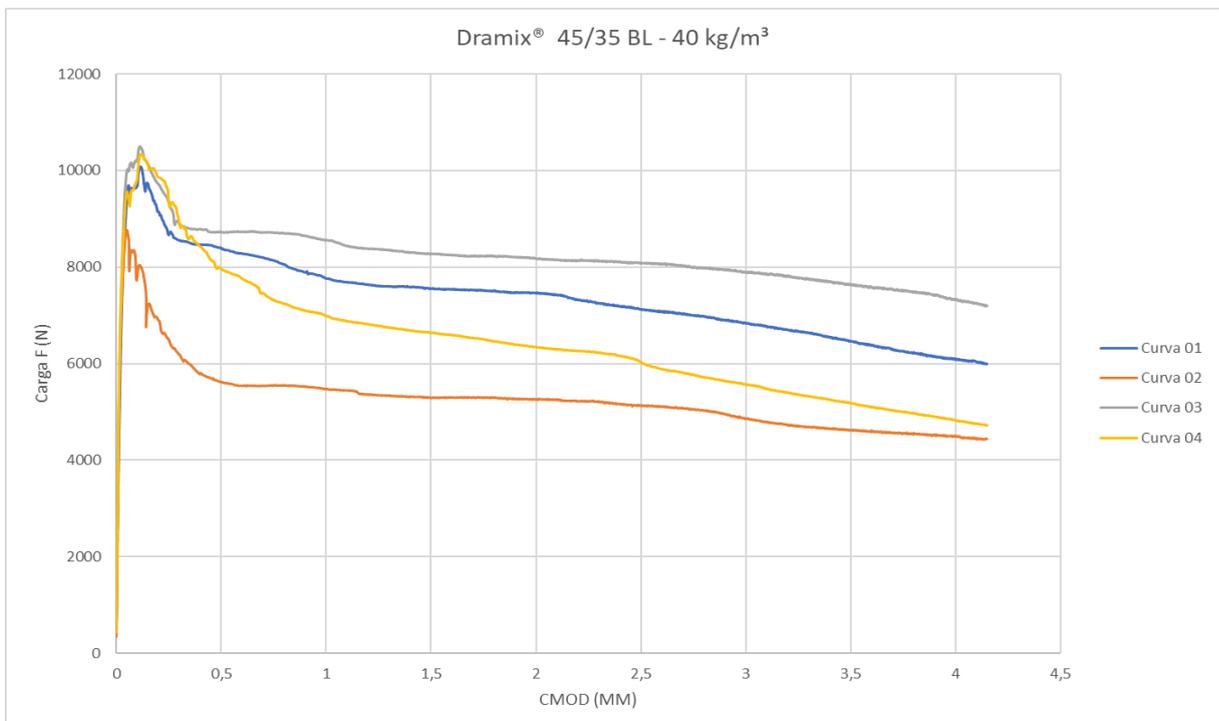
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios e propriedades do concreto em estado fresco e os resultados obtidos através da resistência residual à tração na flexão.

### 5.1 Resultados

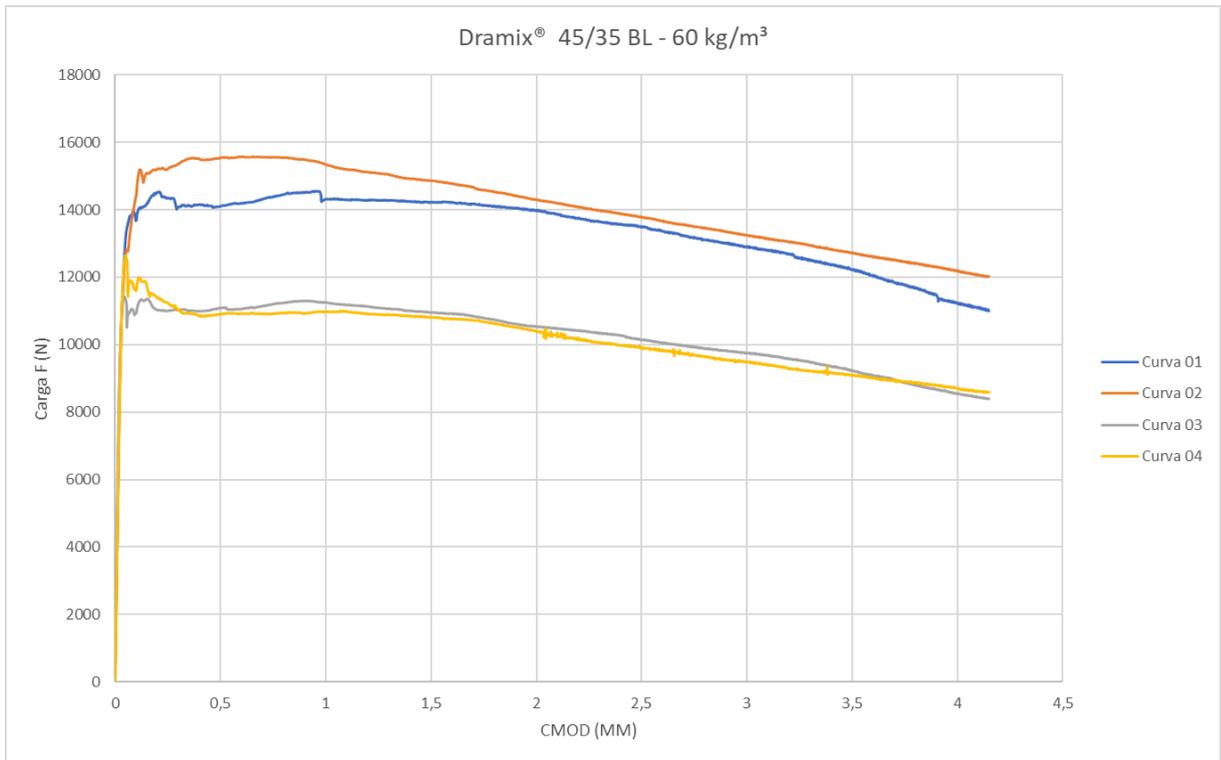
#### 5.1.1 Resultados dos ensaios de resistência residual à tração na flexão

Neste tópico abaixo serão mostrados pela figura de 13 a 21 os resultados obtidos através dos ensaios com os quatro corpos de prova moldados para os três tipos de fibra utilizados, os resultados apresentados serão em forma de diagrama de carga versus CMOD contendo as curvas para cada corpo de prova e para cada dosagem e tipo de fibras.

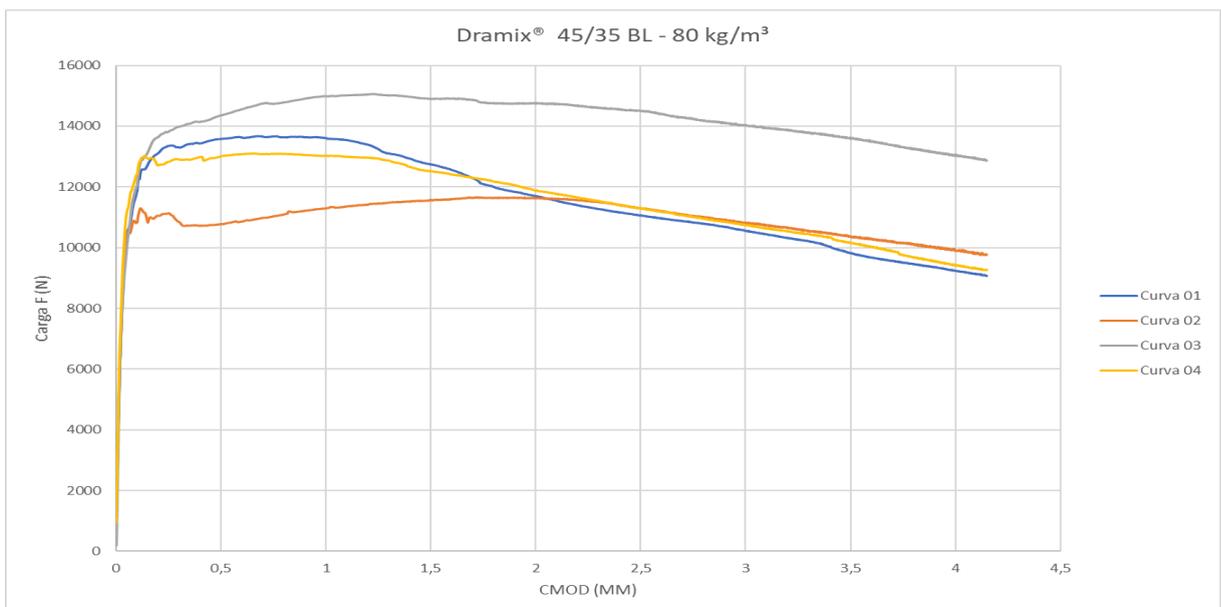
Figura 13 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 45/35 BL com 40kg/m<sup>3</sup>



Fonte: (Autor, 2024).

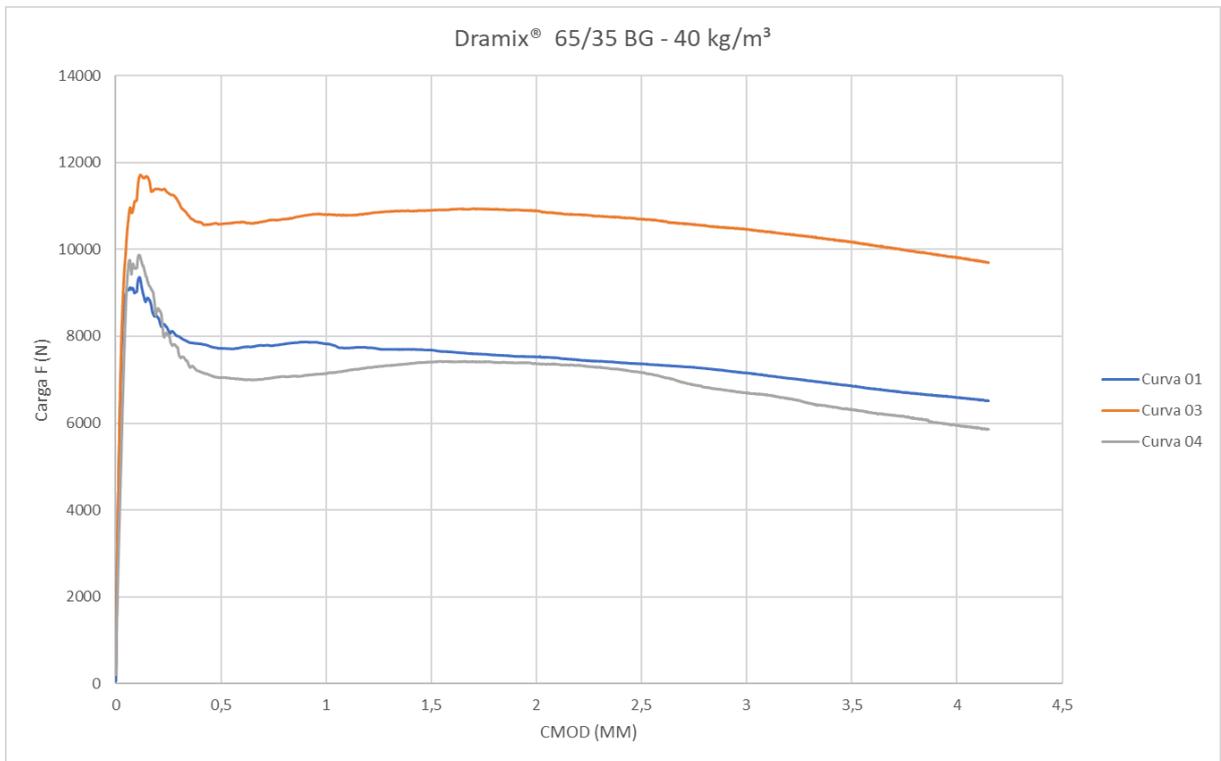
Figura 14 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 45/35 BL com 60kg/m<sup>3</sup>

Fonte: (Autor, 2024).

Figura 15 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 45/35 BL com 80kg/m<sup>3</sup>

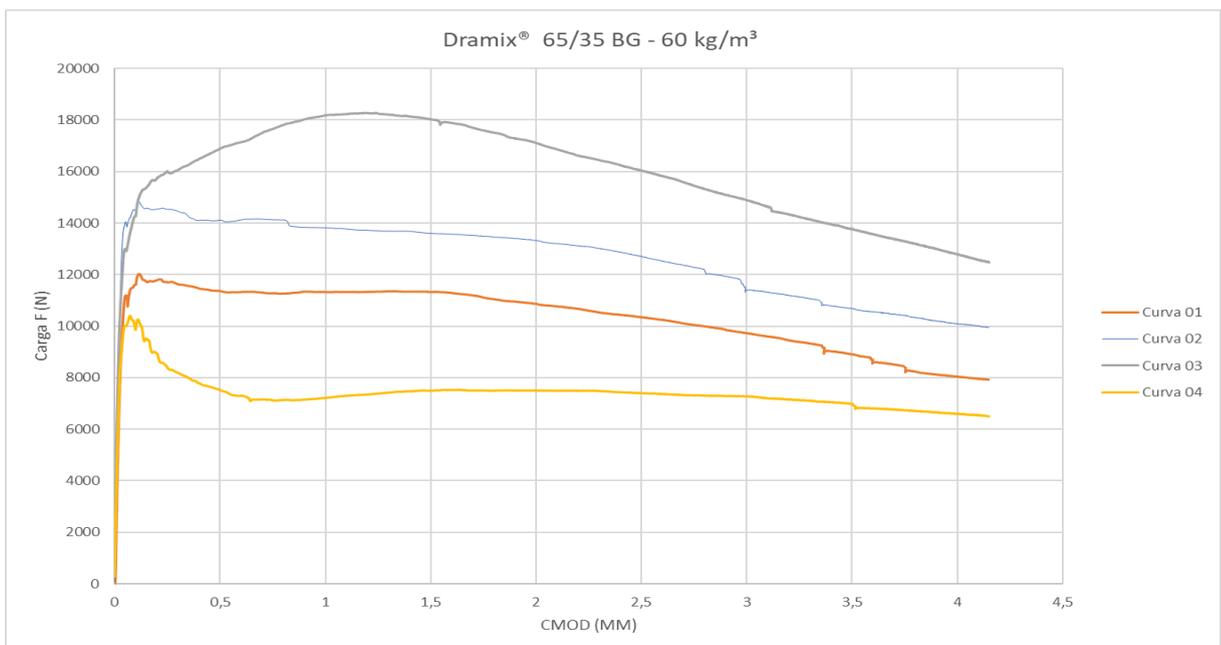
Fonte: (Autor, 2024)

Figura 16 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 65/35 BG com 40kg/m<sup>3</sup>



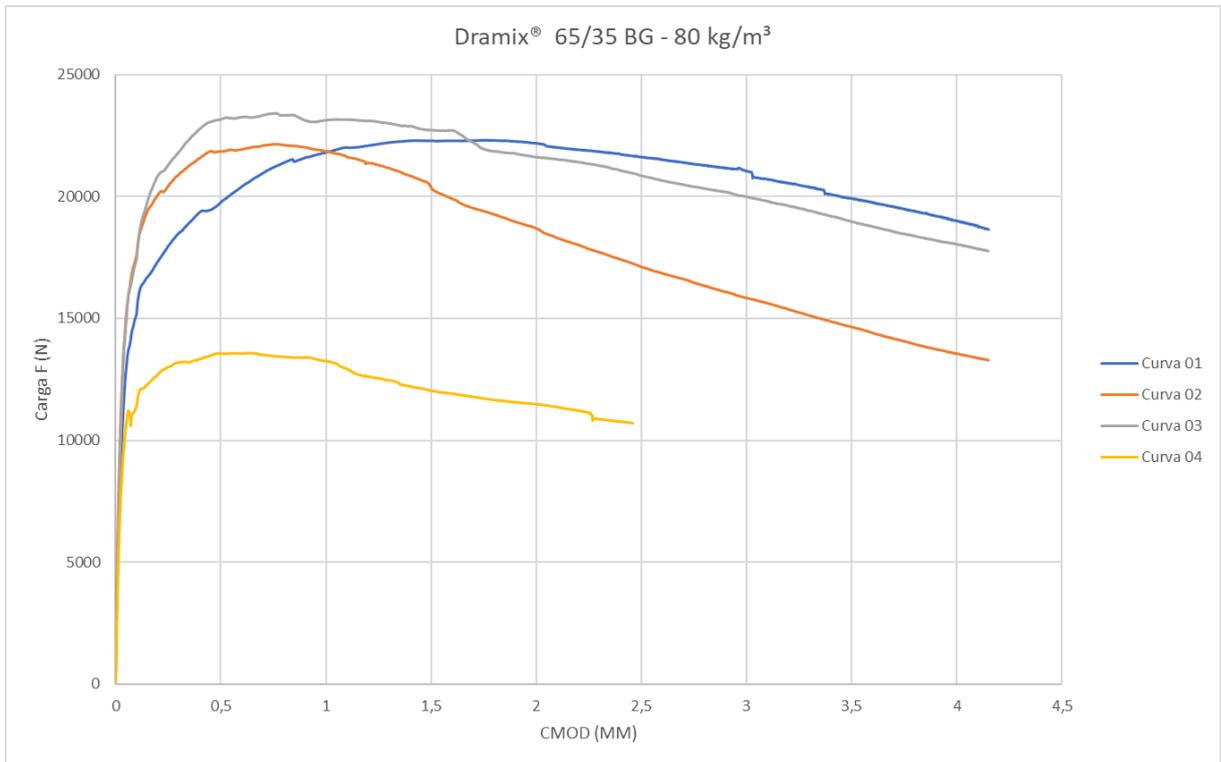
Fonte: (Autor, 2024)

Figura 17 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 65/35 BG com 60kg/m<sup>3</sup>



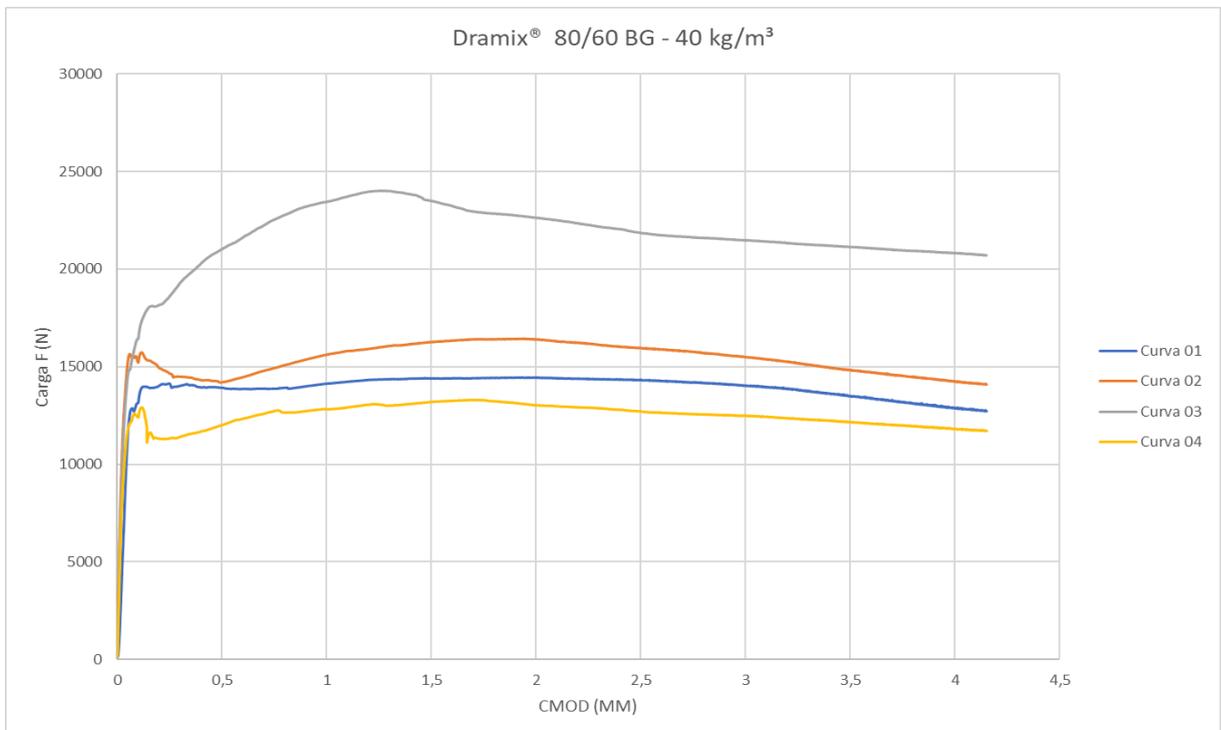
Fonte: (Autor, 2024)

Figura 18 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 65/35 BG com 80kg/m<sup>3</sup>

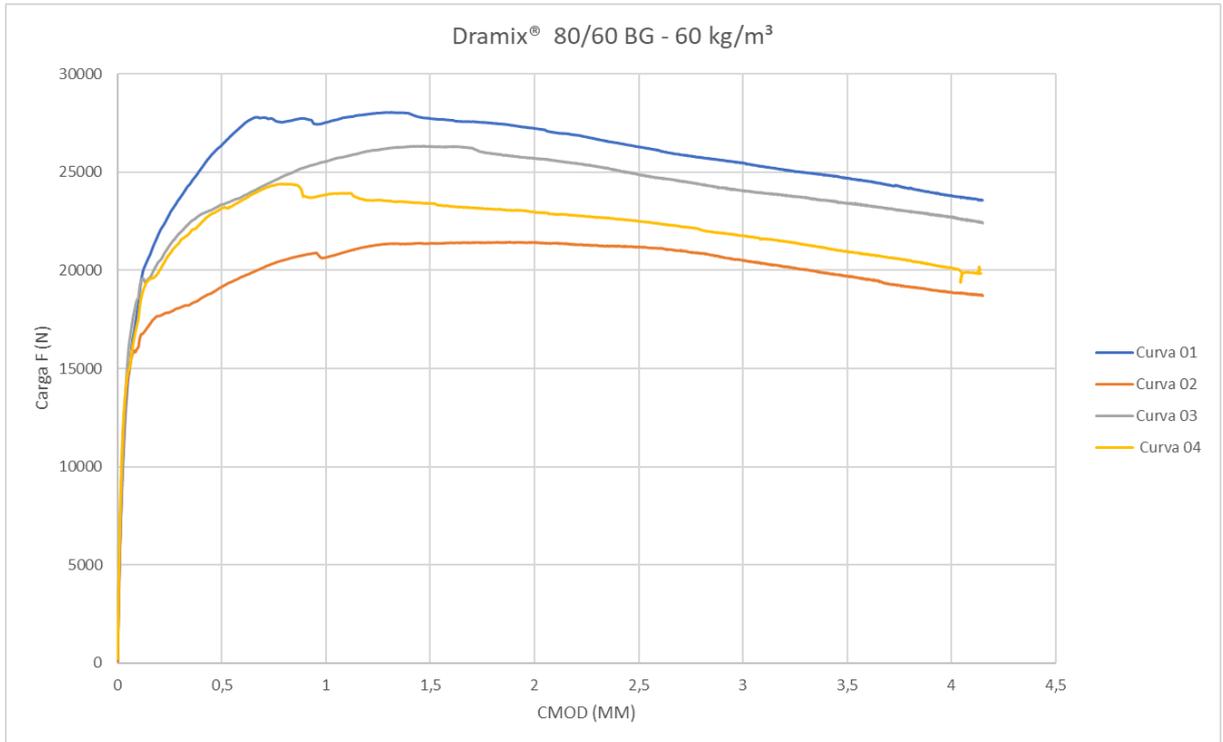


Fonte: (Autor, 2024).

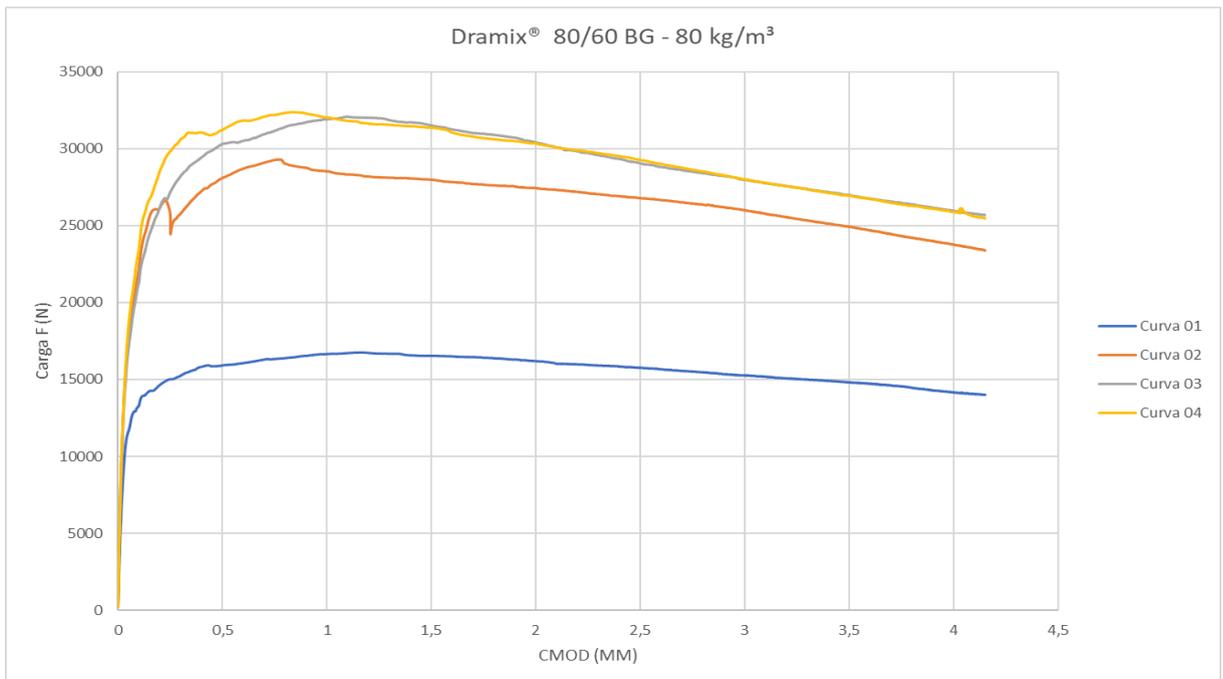
Figura 19 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 80/60 BG com 40kg/m<sup>3</sup>



Fonte: (Autor, 2024).

Figura 20 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 80/60 BG com 60kg/m<sup>3</sup>

Fonte: (Autor, 2024).

Figura 21 - Resultados de resistência residual à tração da fibra Dramix® 80/60 BG com 80kg/m<sup>3</sup>

Fonte: (Autor, 2024)

### 5.1.2 Resultados dos limites de proporcionalidade e resistências residuais

Neste tópico abaixo serão mostrados as tabelas de 9 a 17 com os resultados da obtidos a partir da equação 01 com os valores dos limites de proporcionalidade e resistências residual dos quatros corpos de prova para cada traço utilizado.

Tabela 9 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 45/35 BL com 40kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	3,22	2,81	3,23	3,31	2,42	1,4	7%
fR1	2,68	1,79	2,79	2,54	2,45	0,45	18%
fR2	2,41	1,69	2,65	2,12	2,22	0,41	19%
fR3	2,27	1,64	2,58	1,89	2,1	0,42	20%
fR4	2,04	1,47	2,42	1,63	1,89	0,43	23%
fR1/fl	0,83	0,64	7,94	0,77	2,54	-	-
fR3/fl	0,7	0,58	7,36	0,57	2,3	-	-
fR3/fR1	0,85	0,91	0,93	0,75	0,86	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 10 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 45/35 BL com 60kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	4,37	3,73	4,82	4,19	4,28	0,45	11%
fR1	4,35	3,45	4,60	4,42	4,21	0,45	11%
fR2	4,05	3,71	4,77	3,99	4,13	0,45	11%
fR3	3,52	3,59	4,62	3,59	3,83	0,53	14%
fR4	3,09	3,27	4,32	3,20	3,47	0,57	16%
fR1/fl	0,99	0,92	0,95	1,06	0,98	-	-
fR3/fl	0,8	0,96	0,96	0,86	0,895	-	-
fR3/fR1	0,8	0,96	0,96	0,86	0,895	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 11 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 45/35 BL com 80kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	4,66	4,98	3,65	4,04	4,33	0,6	14%
fR1	4,52	4,98	3,55	3,49	4,14	0,73	18%
fR2	4,55	4,49	3,5	3,45	4	0,6	15%
fR3	4,29	4,38	3,23	3,16	3,76	0,66	18%
fR4	3,85	4,03	2,91	2,88	3,42	0,61	18%
fR1/fl	0,97	1	0,97	0,86	0,95	-	-
fR3/fl	0,92	0,88	0,88	0,78	0,87	-	-
fR3/fR1	0,95	0,88	0,91	0,9	0,91	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 12 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 65/35 BG com 40kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	2,99	5,95	3,75	3,16	3,96	1,36	34%
fR1	2,47	5,35	3,39	2,26	3,36	1,41	42%
fR2	2,45	5,43	3,49	2,37	3,44	1,43	42%
fR3	2,35	5,15	3,41	2,27	3,3	1,34	41%
fR4	2,17	4,39	3,23	1,99	2,95	1,11	38%
fR1/fl	0,82	0,9	0,9	0,71	0,84	-	-
fR3/fl	0,78	0,87	0,91	0,72	0,82	-	-
fR3/fR1	0,95	0,96	1,01	1,01	0,98	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 13 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 65/35 BG com 60kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	3,85	4,75	5,85	3,33	4,44	1,11	25%
fR1	3,63	4,51	5,42	2,39	3,99	1,29	32%
fR2	3,62	4,35	5,7	2,4	4,02	1,38	34%
fR3	3,29	4,02	5,08	2,36	3,69	1,15	31%
fR4	2,75	3,38	4,34	2,18	3,16	0,92	29%
fR1/fl	0,94	0,95	0,93	0,72	0,88	-	-
fR3/fl	0,85	0,85	0,87	0,71	0,82	-	-
fR3/fR1	0,91	0,89	0,94	0,99	0,93	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 14 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 65/35 BG com 80kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	7,14	7,09	7,49	4,35	6,52	1,46	22%
fR1	6,36	6,99	7,43	4,34	6,28	1,37	22%
fR2	7,13	6,44	7,27	3,83	6,17	1,6	26%
fR3	6,9	5,41	6,63	3,42	5,59	1,58	28%
fR4	6,32	4,61	6	3,42	5,09	1,34	26%
fR1/fl	0,89	0,99	0,99	1	0,97	-	-
fR3/fl	0,97	0,76	0,88	0,79	0,85	-	-
fR3/fR1	1,08	0,77	0,89	0,79	0,89	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 15 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 80/60 BG com 40kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	4,63	5,26	7,69	4,26	5,46	1,54	28%
fR1	4,44	4,55	6,76	3,86	4,90	1,27	26%
fR2	4,6	5,21	7,48	4,23	5,38	1,46	27%
fR3	4,57	5,09	6,96	4,05	5,17	1,27	25%
fR4	4,28	4,7	6,74	3,87	4,90	1,27	26%
fR1/fl	0,96	0,87	0,88	0,91	0,91	-	-
fR3/fl	0,99	0,97	0,91	0,95	0,96	-	-
fR3/fR1	1,03	1,12	1,03	1,05	1,06	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 16 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 80/60 BG com 60kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	5,36	9,37	10,27	10,36	8,84	2,36	27%
fR1	5,1	9,02	9,71	10,03	8,46	2,28	27%
fR2	5,28	8,93	10,05	10,01	8,57	2,25	26%
fR3	5,02	8,54	9,24	9,3	8,02	2,03	25%
fR4	4,71	7,9	8,56	8,55	7,43	1,84	25%
fR1/fl	0,95	0,96	0,95	0,97	0,96	-	-
fR3/fl	0,94	0,91	0,9	0,9	0,91	-	-
fR3/fR1	0,98	0,95	0,95	0,93	0,95	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 17 - Resultados para determinação dos ensaios NBR 16940 para a fibra Dramix® 80/60 BG com 80kg/m<sup>3</sup>

Resistências por amostra (Mpa)					Ponderações		
Resistências	1	2	3	4	Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
fL	8,98	6,86	8,43	7,81	8,02	0,91	11%
fR1	8,5	6,16	7,49	7,43	7,39	0,96	13%
fR2	8,86	6,84	8,41	7,46	7,89	0,92	12%
fR3	8,37	6,76	7,92	7,17	7,55	0,72	10%
fR4	7,85	6,25	7,45	6,66	7,05	0,73	10%
fR1/fl	0,95	0,9	0,89	0,95	0,92	-	-
fR3/fl	0,93	0,98	0,94	0,92	0,94	-	-
fR3/fR1	0,98	1,1	1,06	0,97	1,03	-	-

Fonte: (Autor, 2024)

### 5.1.3 Resultados dos abatimento do tronco de cone e espalhamento do concreto

Neste tópico abaixo serão mostrados as tabelas 17 , 18 e 19 com os resultados do abatimento do tronco de cone e espalhamento do concreto executados durante a moldagem dos corpos de prova.

Tabela 18 - Resultados do abatimento e espalhamento do concreto fresco da fibra Dramix® 45/35 BL

Teor (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)
40	100	630
60	110	510
80	90	410

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 19 - Resultados do abatimento e espalhamento do concreto fresco da fibra Dramix® 65/35 BG

Teor (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)
40	80	520
60	110	585
80	100	500

Fonte: (Autor, 2024)

Tabela 20 - Resultados do abatimento e espalhamento do concreto fresco da fibra Dramix® 80/60 BG

Teor (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)
40	80	630
60	110	610
80	150	660

Fonte: (Autor, 2024)

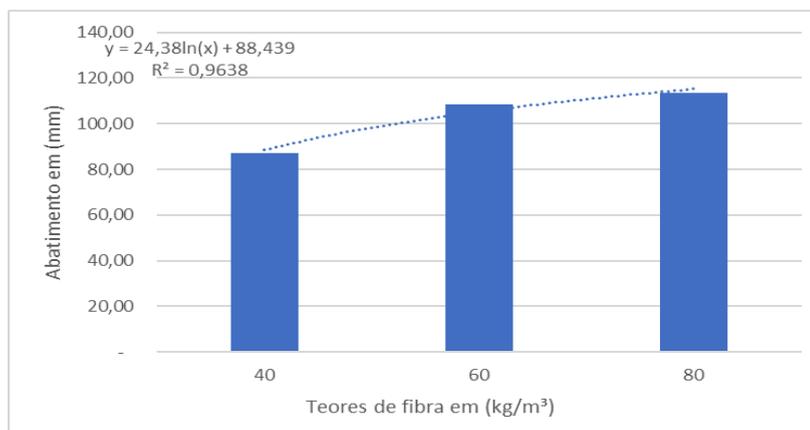
## 5.2 Análises

Nos tópicos abaixo serão analisados os resultados dos ensaios com o concreto fresco e os ensaios de resistência residual à tração na flexão.

### 5.2.1 Análises do concreto fresco

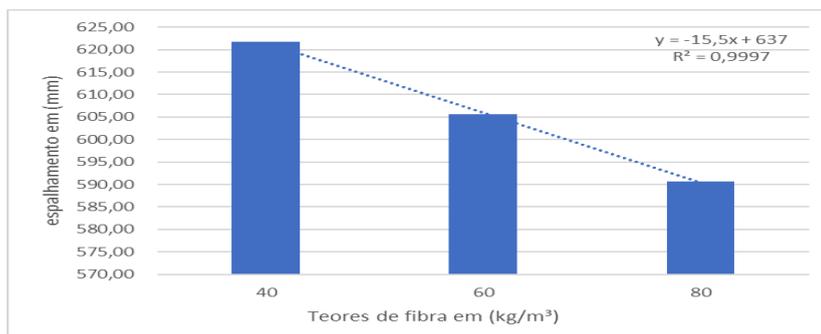
#### 5.2.1.1 Análise da consistência pelo abatimento do tronco de cone e espalhamento do concreto fresco

Gráfico 01 - Abatimento médio em cada teor de fibra



Fonte: (Autor, 2024).

Gráfico 02 - Espalhamento médio em cada teor de fibra



Fonte: (Autor, 2024).

Os Gráficos 01 e 02 apresentam os valores médios do ensaio de abatimento do tronco de cone e espalhamento para os teores de fibra de aço de 40 kg/m<sup>3</sup>, 60 kg/m<sup>3</sup> e 80 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Pelo gráfico 01 é possível notar que quando se aumentou o teor de fibras, que ao contrário do que se era esperado, que era a diminuição do abatimento do, foi justamente constatado o oposto.

Visto que para se ter trabalhabilidade e a formação de um compósito homogêneo, e sem a formação de ouriços, houve a necessidade da adição de mais aditivo redutor de água com o aumento da dosagem das fibras. Como a adição do aditivo é realizada intuitivamente durante a mistura, é difícil conseguir um mesmo abatimento de referência.

Caso não se adicionasse mais aditivo progressivamente em relação às misturas com a quantidade de fibra de 40kg, o abatimento iria cair também progressivamente, devido ao travamento que as fibras promovem, dificultando a mobilidade do concreto fresco.

Caso não se adicionasse aditivo redutor de água, a solução técnica seria a adição cada vez maior de água para o aumento progressivo da quantidade de fibra. Caso se adicionasse água sem o aumento proporcional de cimento, as propriedades após o endurecimento da matriz cimentícia iriam alterar negativamente, devido ao aumento da relação água/cimento, que para todas as dosagens estudadas foi de 0,46, conforme pode ser visto na tabela 17.

Portanto foi observado um aumento progressivo do consumo de água do concreto por m<sup>3</sup>, à medida que se aumentou o consumo de todos os tipos de fibras estudadas, como era de se esperar.

Esse mesmo comportamento foi obtido com a adição do superplastificante, porém neste caso existiu um agravante, que foi com o aumento do uso de aditivo para garantirmos a fluidez na matriz, começou-se a se desenvolver o fenômeno da exsudação e inviabilizando ganhos de espalhamento. Pelo contrário, com a exsudação ocorreu a perda de fluidez pela segregação da água em relação aos materiais secos, isto é, cimento, agregado miúdo e graúdo.

As matrizes tiveram uma diminuição linear no espalhamento de aproximadamente de 1,25% a cada quilo de fibra adicionado por metro cúbico de concreto.

### *5.2.2 Análises dos resultados de resistência residual à tração na flexão*

#### **5.2.2.1 Análise do da interação fibra matriz**

Analisando as curvas das figuras 13 a 21 geradas pelo equipamento de “carga x cmod”, com as curvas dos quatro corpos de provas por dosagem, é possível notar que, apesar do alto teor fibras, foi apresentado comportamentos, softening nas fibras Dramix® 45/35 BL e Dramix® 65/35 BG nos teores de 40kg/m<sup>3</sup>, já nas outras situações foi constatado um comportamento hardening nas matrizes ensaiadas devido ao alto teor de fibras dosados. No caso das fibras Dramix® 80/60 BG, mesmo com teor de 40kg/m<sup>3</sup>, esta fibra teve um comportamento do tipo hardening devido ao seu elevado fator de forma em comparação com as outras que neste teor tiveram o comportamento softening.

Um fator que deve ser ressaltado para execução destes ensaios foi a variabilidade dos resultados entres corpos de prova moldados de uma mesma matriz. Esta variabilidade se deve ao fato que por mais que o concreto utilizado possuía uma característica fluida após a adição do aditivo superplastificante as

fibras não se dispersam de forma homogênea e igual nos corpos de prova, apesar de possuírem a mesma dosagem.

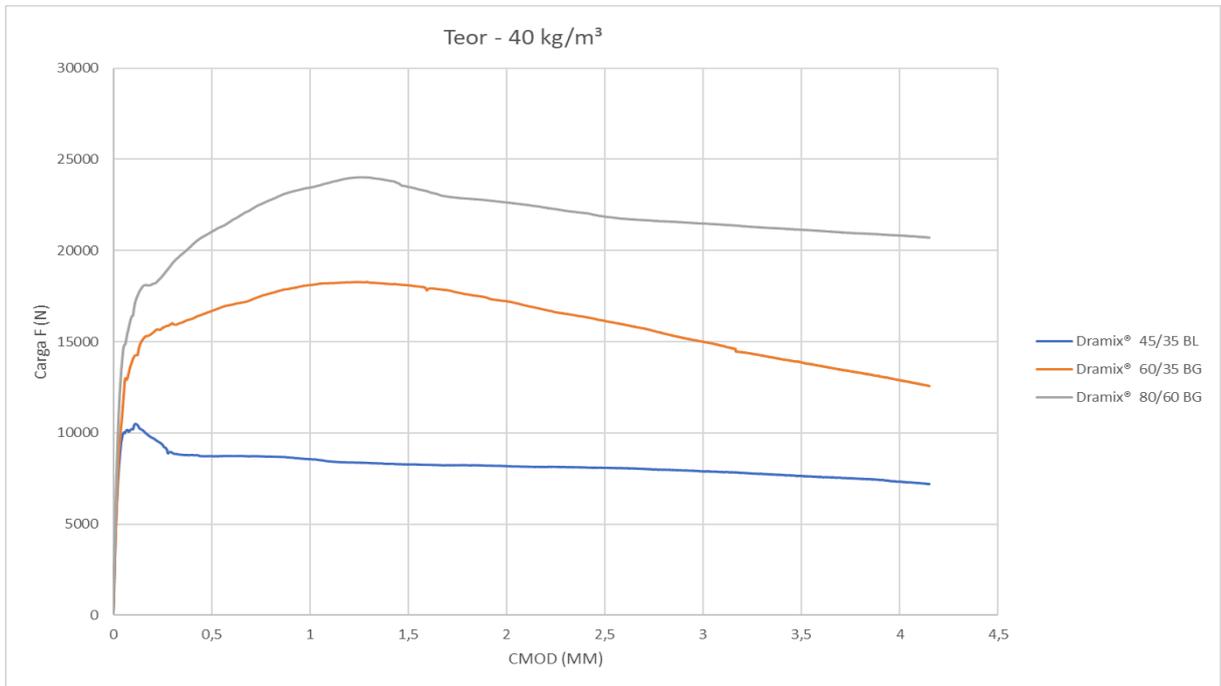
Uma outra problemática ocorreu com as fibras com maior fator de forma utilizada, que possui a maior distribuição atualmente no mercado, sendo elas os últimos traços a serem ensaiados no laboratórios. Estas fibras em particular foram bastante difíceis de se realizar a moldagem devido ao excesso de formação dos denominados ouriços, que nada mais são do que a aglutinação de um volume considerável de fibras durante a misturas dos materiais na betoneira, formando verdadeiras bolas de fibras que não se dispersam de forma homogênea na mistura.

Embora os ensaios sigam rigorosamente as recomendações da norma NBR 16940 (ABNT, 2021), a metodologia de moldagem e preparação dos corpos de prova apresentaram algumas falhas, gerando a formação dos ouriços. Isso é especialmente evidente ao avaliar concretos com altas concentrações de fibras, e isto é um ponto que deve ser reavaliado numa futura atualização da norma.

Este fenômeno provocou que alguns dos quatro corpos de prova de cada teor desta fibra utilizado para os ensaios tivesse seus resultados descartados devido a baixa resistência apresentada provocada pela não homogeneidade das fibras na matriz, fazendo assim com que as fibras não desempenhasse seu papel de ponte de tensões e aumentando a tenacidade do concreto.

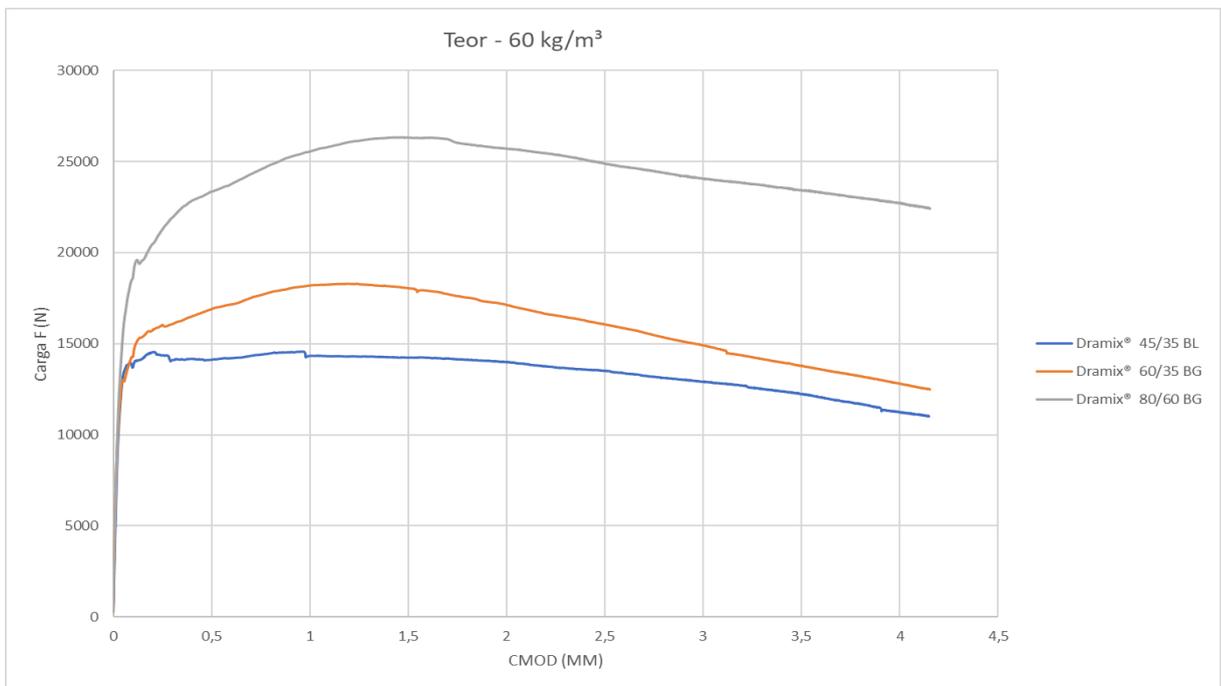
De maneira comparativa, as figuras 22, 23 e 24 abaixo mostram através de uma curva mediana, para cada teor utilizado, que as fibras que obtiveram os maiores resultados de tenacidade são aquelas que possuem o maior fator de forma. Por exemplo, a fibra Dramix 80/60 BG que possuem um fator de forma superior a Dramix 60/35 BG será a matriz com uma resistência residual maior devido ao seu maior fator de forma e este comportamento segue para fibra Dramix 45/35. Ou seja, o fator de forma é o fator principal para o aumento da tenacidade de uma matriz cimentícia, quando comparadas com a fibra em mesmo teor.

Figura 22 - Comparativo das fibras de aço dosadas a 40kg/m<sup>3</sup>

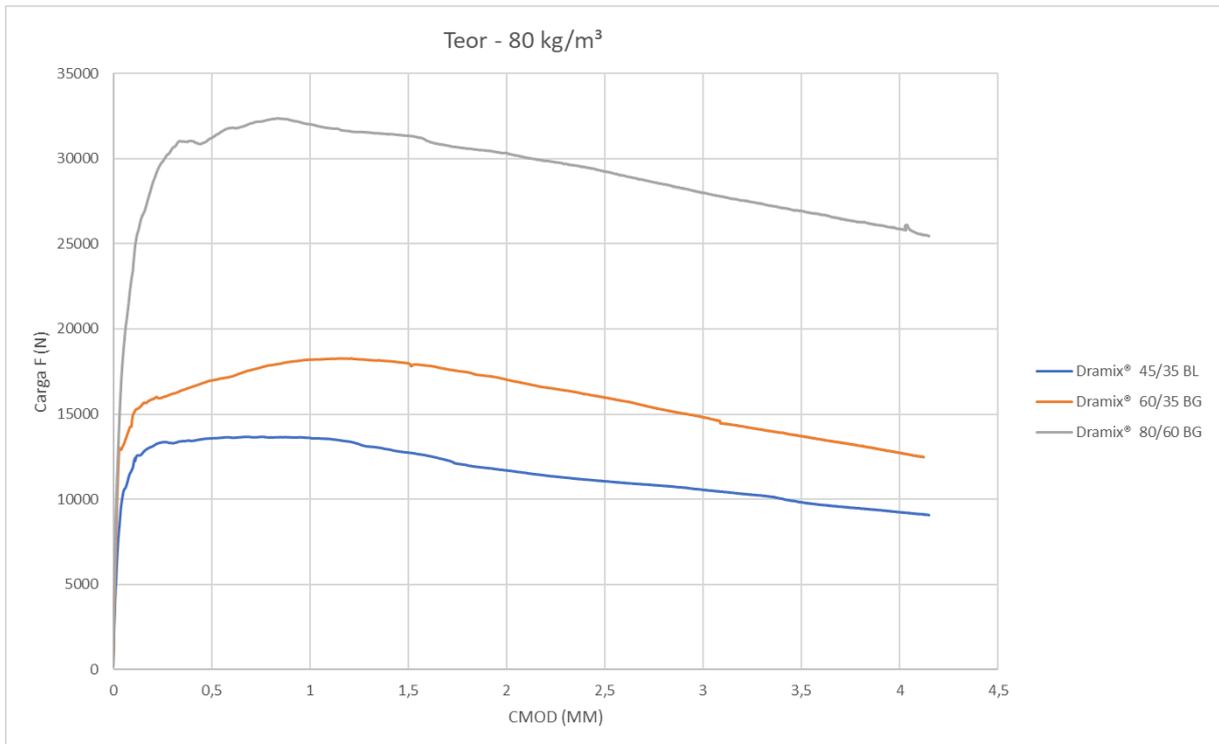


Fonte: (Autor, 2024).

Figura 23 - Comparativo das fibras de aço dosadas a 60kg/m<sup>3</sup>



Fonte: (Autor, 2024).

Figura 24 - Comparativo das fibras de aço dosadas a 80kg/m<sup>3</sup>

Fonte: (Autor, 2024).

### 5.2.2.2 Resistência residual à tração na flexão

As figuras 25, 26 e 27 abaixo mostram os resultados de resistências residuais e o limite de proporcionalidade obtidos através da equação 01.

Foram ensaiadas inicialmente as fibras Dramix® 45/35 BL em todos os seus três teores, em um segundo momento foram ensaiadas as matrizes contendo as fibras Dramix® 65/35 BG e por fim as fibras Dramix® 80/60 BG.

As fibras que variam em 20 unidades de fator de forma entre Dramix® 45/35 BL e a Dramix® 65/35 BG e de 15 unidades de fator de forma entre a Dramix® 65/35 BG e a Dramix® 80/60 BG. sendo um acréscimo de aproximadamente 62,50% entre a Dramix® 45/35 BL e a Dramix® 65/35 BG utilizada é de 23,10% de incremento de fator de forma entre a segunda e terceira fibra.

Analisando os resultados da figuras citadas acima, o LOP entre a primeira e a segunda fibra utilizada é visto que existe um ganho considerável de resistência máxima em todos os teores de fibras ensaiados, com ganho mínimo de 43,30% no

teor 40 kg/m<sup>3</sup>, chegando até um ganho de 78,10% ao analisar o teor de 80 kg/m<sup>3</sup> de fibra.

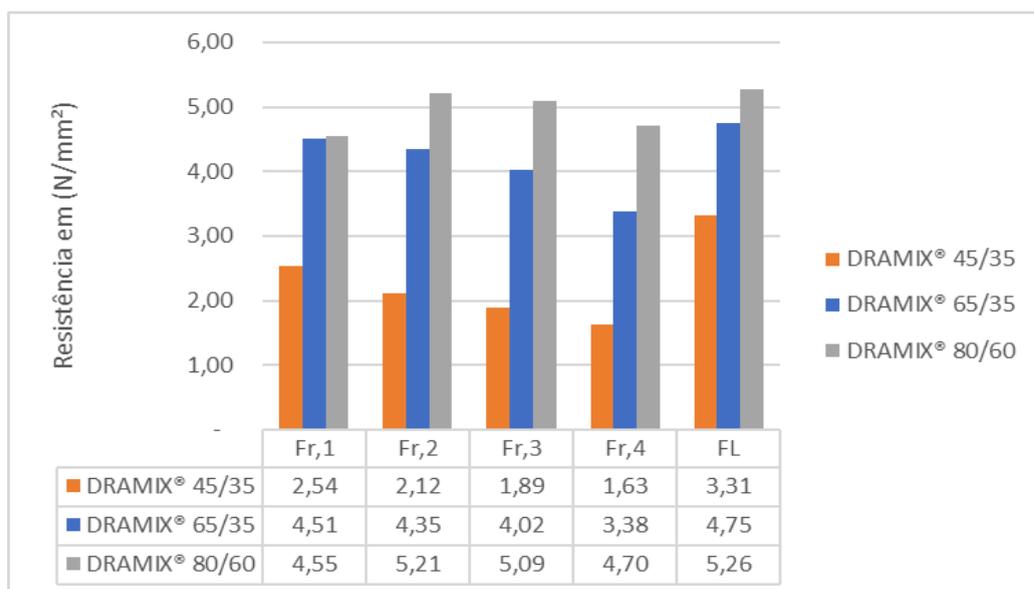
Já os resultados de resistências residuais mostram que em todos os CMODs avaliados os ganhos de resistência permaneceram todos os cenários acima do ganho dos registrados no LOP, com média de aumento da resistência em 75,75%.

Outro ponto analisado é o fato que as fibras Dramix® 45/35 BL e a Dramix® 65/35 BG possuem o mesmo comprimento porém, a segunda fibra que possui um diâmetro menor e conseqüentemente um fator de forma maior, e isso levou a ter os maiores valores de resistência residual, evidenciando que o fator de forma é critério principal para o aumento da resistência residual entre as fibras.

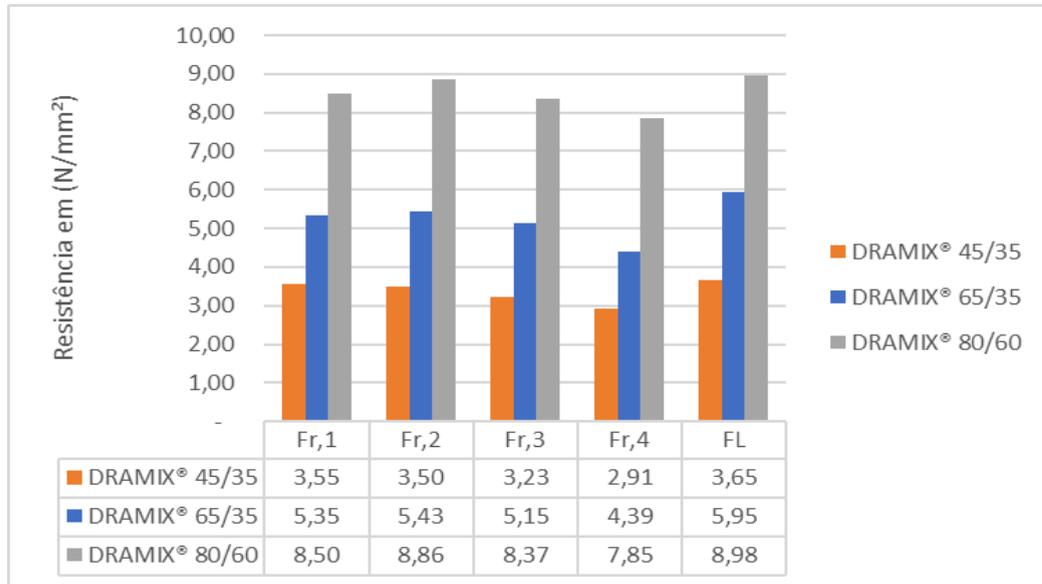
Este comportamento se repete ao se analisar as fibras Dramix® 65/35 BG e a Dramix® 80/60 BG, com variação de LOP de no mínimo 10,73%. Isso revela que a resistência máxima não aumenta de forma linear com o aumento do fator de forma em todos os cenários, como ocorrido entre a primeira e a segunda fibra.

Na análise figuras abaixo revelam que as resistências residuais nos diferentes CMODs demonstram cenários nos quais fibras com diferentes fatores de forma apresentam resistências semelhantes a um teor de 40 kg/m<sup>3</sup>. No entanto, ao ultrapassar este teor, as fibras começam a se divergirem em suas resistências residuais, destacando-se aquelas com maiores fatores de forma.

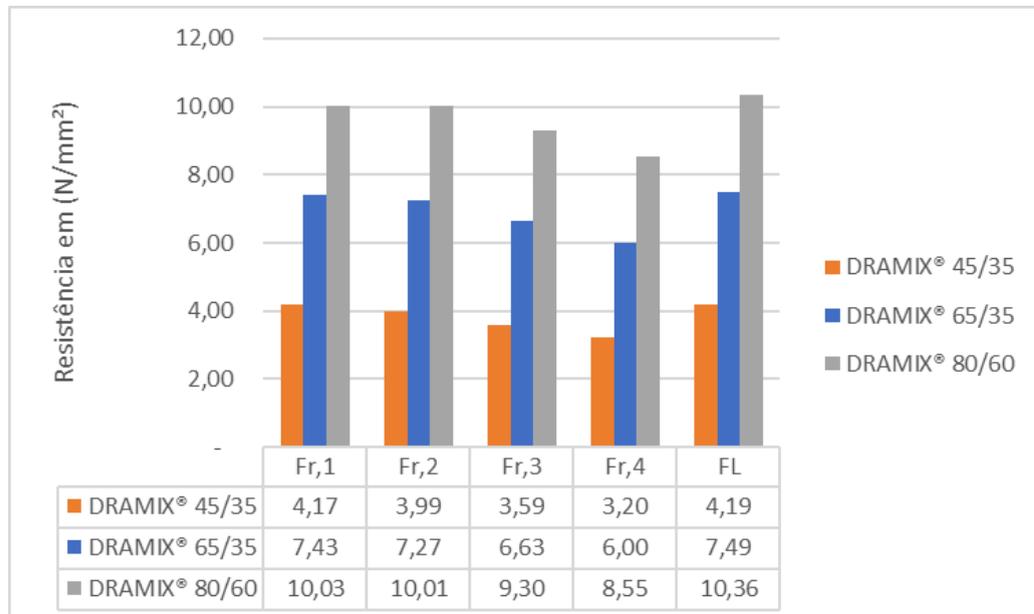
Figura 25 - Comparativo dos resultados com teor de fibra de 40kg/m<sup>3</sup>



Fonte: (Autor, 2024).

Figura 26 - Comparativo dos resultados com teor de fibra de 60kg/m<sup>3</sup>

Fonte: (Autor, 2024).

Figura 27 - Comparativo dos resultados com teor de fibra de 80kg/m<sup>3</sup>

Fonte: (Autor, 2024).

Apesar de algumas anormalidades nos resultados dos teores de 40kg/m<sup>3</sup>, estas fibras que possuem seu fator de forma de 80 tiveram ganhos significativos de

resistências residuais se comparados às fibras anteriores em teores acima, com ganhos de resistência residual à tração de até 240,50% em comparação às primeiras fibras utilizadas.

Um ponto que deve ser ressaltado é que ao ser estudado o aumento da resistência residual correlacionado com o aumento do teor de cada fibra é visto que a relação não se comporta de maneira linear. Como valores que variam 25,38% para Dramix® 45/35 BL e de 71,70% para a Dramix® 80/60 BG o aumento de resistência médio entre os teores de  $40\text{kg/m}^3$  e  $60\text{kg/m}^3$  para cada uma delas mostra que os valores destoam da proporção de 50,00% do incremento de fibra. Este comportamento também continua entre os teores de  $60\text{kg/m}^3$  e  $80\text{kg/m}^3$  com um aumento de 32,89% para Dramix® 45/35 BL e de 13,30% para a Dramix® 80/60 BG.

## 6 CONCLUSÃO

O uso de fibras de aço para ganhos da tenacidade de uma matriz se mostrou uma tarefa complexa, mesmo com uso de aditivos, as fibras ainda no concreto fresco já realizam o travamento da matriz dificultando a sua homogeneidade nos corpos de prova e em alguns casos chegando a formar ouriços prejudicando a uniformidade da mistura e levando a resultados com alta variabilidade.

Apesar desta problemática, o uso deste material se tornou muito eficaz para o aumento da tenacidade do concreto em todas as dosagens ensaiadas e com os diferentes tipos de fibras utilizadas.

Em todos cenários foi constatado que o fator de forma é o principal componente do aumento da tenacidade de uma matriz, sendo ele atrelado às dosagens de fibra o principal fator para ganhos de resistência à tração.

Porém os ganhos de resistência não são lineares em relação ao aumento do fator de forma de cada fibra nas diferentes dosagens utilizadas constatou que é necessário uma avaliação prévia para que se defina qual fibra aplica melhor na sua aplicação e em qual teor para garantir uma melhor eficiência em seu uso.

É fundamental verificar numa próxima pesquisa a influência de adensamento interno com uma análise comparativa com corpos de prova com somente adensamento externo verificando a influência do tipo de adensamento na homogeneidade do concreto reforçado com fibras.

## 7. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas/Norma Brasileira 5738 - NBR 5738 Versão Corrigida. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro (RJ), junho 2016, 9 páginas.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas/Norma Brasileira 9778 - NBR 9778 Versão Corrigida 2. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro (RJ), setembro 2009, 4 páginas.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas/Norma Brasileira 16939 - 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 (RJ), fevereiro 2021, 6 páginas.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas/Norma Brasileira 16939 - NBR 15530. **Fibras de aço para concreto — Requisitos e Método de ensaio**. Rio de Janeiro (RJ), novembro 2019, 38 páginas.

Antonio Gallovich Sarzalejo, Bruno Rossi, Gianfranco Perri, Ralf Winterberg, & Roberto Eduardo Perri Aristeguieta. (2017). **Fibras como Elemento Estrutural para Reforço de Concreto**.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. Editora Dunas, 2014.

ARCELORMITTAL. **Catálogo de produtos: Dramix ®**. 2018.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção. Vol. 1**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.

Bentur, Arnon., & Mindess, Sidney. (2007). **Fibre reinforced cementitious composites**. Taylor & Francis.

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

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

Colpo, G. B. (2011). **Uso de fibras de aço em concreto para pavimentos [Trabalho de conclusão de curso]**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA.

fib. **Model Code 2010: Final Draft**; International Federation for Structural Concrete: Lausanne, Switzerland, 2012.

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

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

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto: Solicitações Transversais**. PINI, São Paulo, 2008.

JÚNIOR, M. D. S. (2021). **Avaliação da substituição da armadura transversal mínima por fibras de aço em vigas de concreto armado [Dissertação]**. Universidade Federal de Pernambuco.

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

Sika® ViscoCrete®-6500. (2019). **Especificações técnicas de superplastificante para concreto**.

Sikament®-101 SM. (2022). **Especificações técnicas de redutor de água para concreto**.

SIMÕES, L. C. **Um modelo constitutivo para o concreto com fibras**. 1998. 111 p. Dissertação (Mestrado) – Departamentos de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.