

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ISADORA QUEIROZ FREIRE DE CARVALHO

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS EM  
ELEMENTOS DE CONCRETO MOLDADO EM CAMADAS COM BASE NO  
ENSAIO INDUTIVO**

Maceió

2022

ISADORA QUEIROZ FREIRE DE CARVALHO

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS EM  
ELEMENTOS DE CONCRETO MOLDADO EM CAMADAS COM BASE NO  
ENSAIO INDUTIVO**

Monografia apresentada ao corpo docente do curso de engenharia civil do centro de tecnologia da universidade federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aline da Silva Ramos Barboza.

Maceió

2022

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Giralaine da Silva Santos – CRB-4 – 1127

C3331p Carvalho, Isadora Queiroz Freire de  
Proposta de otimização da distribuição das fibras em elementos de concreto  
moldado em camadas com base no ensaio indutivo /Isadora Queiroz Freire de  
Carvalho. – 2022.  
64 f. : il.

Orientadora: Aline da Silva Ramos Barboza  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil: Bacharelado)  
– Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.  
Bibliografia: f. 55- 60  
Apêndices: f. 61- 64

1. Concreto reforçado com fibras. 2. Método indutivo. 3. estrutura de concreto. 4.  
Engenharia civil. I. Título.

CDU:624.016

*À Deus, meus pais José Carlos e Verônica, minha vó Sininha, meus irmãos Yasmin e Luiz Henrique, e não menos importante, minha cachorra tequila, por todo suporte e incentivo.*

## AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial ao meu pai, José Carlos, minha mãe, Maria Verônica, minha avó Sininha, minha irmã Yasmin e irmão Luiz Henrique, por todo o apoio em todos os momentos da minha vida, principalmente por me permitir me dedicar exclusivamente à graduação, sou uma pessoa muito privilegiada por isso.

Ao amor da minha vida, minha cachorra Tequila, que sentia meus momentos de angústia e estresse e sabia exatamente o que fazer para me acalmar.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL) pela vivência e oportunidades dentro da universidade, juntamente com professores tão competentes que pude conviver.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aline da Silva Ramos, pelos ensinamentos, paciência e oportunidade de ingressar no projeto de pesquisa. Mesmo não pretendendo seguir carreira acadêmica, todo esse conhecimento levarei para a vida pessoal e profissional.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da UFAL, por fornecer o ambiente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que fiz dentro e fora da graduação, em especial a Wanderson Bruno, Kaio Oliveira, Danilo Freitas, Arthur Melo e Gabriela Dias, que me orientaram durante a pesquisa e sempre ajudaram no laboratório, Ao “Grupo parece bom” com meus amigos de graduação que me ajudaram em diversas matérias e mesmo em momentos de nervosismo e descrença, sempre me incentivaram e mostraram que sou capaz de me tornar uma engenheira competente. Ao meu amigo Carlinhos, que mesmo sendo da física me ajudou em diversas matérias com a maior paciência do mundo, além de ser uma das minhas principais inspirações de competência e foco.

Ao meu namorado, Gabriel Garibaldi, pelo amor, paciência e carinho. Obrigado por estar sempre presente, me apoiar, incentivar e amenizar a pressão que é uma graduação em exatas. Obrigada por tudo.

*“Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.”*

*(Thomas Edison)*

## RESUMO

**CARVALHO, I.Q.** Análise da otimização da orientação das fibras de aço em elementos estruturais de concreto moldado em múltiplas camadas. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

O concreto simples, não armado, apresenta um comportamento frágil, com baixa resistência à tração e baixa ductilidade, o que levou ao surgimento de concretos especiais a fim de suprir suas deficiências. O concreto reforçado com fibras (CRF) é um deles, que tem a proposta de melhorar o comportamento do concreto no Estado Limite Último (ELU), uma vez que minimizam a limitação de baixa resistência à tração deste compósito. Dentre os diversos tipos de fibras, as metálicas recebem destaque pois são mais econômicas e eficientes durante o processo de mistura, além de possuírem uma ótima aderência fibra-matriz garantindo ao compósito maior ductilidade após a fissuração e ainda maior resistência a esforços de tração. Tendo em vista todos os benefícios, a utilização do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), em pavimentos, revestimento de túneis e até em elementos estruturais sob flexão, é uma vantagem e realidade em diversos países. Para o CRFA ser aplicado com fins estruturais, um desempenho mecânico mínimo deve ser atingido e ensaios com critérios específicos são utilizados para garantir que as especificações de projeto sejam atendidas pela atual NBR 16938. Entretanto, uma vez que esse comportamento é influenciado pelo teor de fibras na mistura e sua dispersão, um método não destrutivo que vem se destacando como ferramenta de avaliação é o método indutivo. Esse método se baseia nas Leis de Faraday e na variação de indutância medida no corpo de prova inserido numa bobina. No Brasil, as fibras ainda têm um valor comercial alto, e, adicionando o preço dos aditivos necessários à produção da mistura, o custo do CRFA pode apresentar um aumento considerável em relação ao concreto convencional. Com foco numa utilização otimizada do CRFA, esse trabalho propõe o uso de CRFA em zonas tracionadas de uma viga sob flexão com os resultados obtidos através do método indutivo. A análise dos resultados evidencia que o uso de camadas orientam as fibras em sua maneira ótima, perpendicular a fissura, devido à diminuição de sua seção, portanto, além de ter um fator positivo na diminuição de custos, as vigas em camadas possuem a vantagem de otimizar a utilização das fibras por induzirem uma orientação em que elas respondem melhor aos esforços de tração.

**Palavras-chave:** *dupla camada, método indutivo, concreto reforçado com fibras metálicas, vigas, indutância.*

## ABSTRACT

**CARVALHO, I.Q.** Analysis of the optimization of the orientation of steel fibers in structural elements of molded concrete in multiple layers. 2022. Course Completion Work (Graduate - Civil Engineering) – Federal University of Alagoas, Maceió.

Simple, unreinforced concrete presents a brittle behavior, with low tensile strength and low ductility, which led to the emergence of special concretes in order to supply its deficiencies, as is the case of fiber reinforced concrete (FRC), which has the proposal to improve the behavior of concrete in the Ultimate Limit State (ULE), since they minimize the limitation of low tensile strength of this composite. Among the different types of fibers, metallic fibers are highlighted because they have a greater modulus of elasticity than concrete, guaranteeing the composite greater ductility after cracking and even greater resistance to tensile stresses. In view of all the benefits, the use of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in pavements, tunnel linings and even in flexural structural elements is an advantage and a reality in several countries. For the CRFA to be applied for structural purposes, a minimum mechanical performance must be achieved and tests with specific criteria are used to ensure that the design specifications are met by the current NBR 16938. However, since this behavior is influenced by the fiber content in the mixture and its dispersion, a non-destructive method that has been highlighted as an evaluation tool is the inductive method. This method is based on Faraday's Laws and on the variation of inductance measured in the specimen inserted in a coil. In Brazil, the fibers still have a high commercial value, and, adding the price of the additives necessary for the production of the mixture, the cost of CRFA can present a considerable increase in relation to conventional concrete. Focusing on an optimized use of CRFA, this work proposes the use of CRFA in tensioned zones of a beam under bending, correlating the orientation of the fibers in the specimen evidenced by the cracking result obtained through the inductive method. The analysis of the results shows that the use of layers guides the fibers in their optimal way, perpendicular to the crack, due to the reduction of its section, therefore, in addition to having a positive factor in reducing costs, the layered beams have the advantage of optimize the use of fibers by inducing an orientation in which they respond better to traction efforts.

**Keywords:** double layer, inductive method, concrete reinforced with metallic fibers, beams, inductance

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais que podem ser utilizadas no concreto .	19
Figura 2-Diagrama de tensão por deformação específica elástica de matriz e fibras.....	20
Figura 3-Esquema de concentração de tensões para um concreto sem fibras (a) e com fibras (b) .....	21
Figura 4-Esquema de configuração do ensaio de duplo puncionamento. ....	27
Figura 5-Exemplo de viga biapoiada. ....	28
Figura 6-Bobina circular do tipo Helmholtz .....	30
Figura 7-Fluxograma da metodologia. ....	32
Figura 8-Ensaio Slump-flow test. ....	35
Figura 9-Medição do diâmetro no ensaio slump-flow test. ....	35
Figura 10-Moldagem de vigas em dupla camada. ....	36
Figura 11-Posicionamento dos eixos durante o lançamento do concreto.....	37
Figura 12-Ensaio de compressão simples (a) e de tração por compressão diametral (b). ....	38
Figura 13-Vigotas rotacionadas 90° para execução do ensaio indutivo. ....	38
Figura 14-Marcação para corte dos corpos de prova.....	39
Figura 15-Execução do ensaio indutivo. ....	39
Figura 16-Marcação dos eixos nos corpos de prova.....	40
Figura 17-Procedimento da confecção dos corpos de prova de calibração .....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Especificações das fibras metálicas .....	23
Tabela 2-Parâmetros do equacionamento do método indutivo.....	31
Tabela 3-Dosagem para produção de 1m <sup>3</sup> de concreto com fibras de aço. ....	33
Tabela 4-Dosagem CRFA. ....	34
Tabela 5-Valores ótimos para concreto fluido. ....	36
Tabela 6-Descrição dos corpos de prova de calibração para dupla camada .....	41
Tabela 7-Descrição dos corpos de prova de calibração para tripla camada. ....	41
Tabela 8-Inserção das indutâncias aferidas dos corpos de prova. ....	44
Tabela 9-Indutância total e equivalente do corpo de prova. ....	44
Tabela 10-Obtenção da contribuição de cada eixo no corpo de prova. ....	45
Tabela 11-Resultados obtidos no slump flow-test. ....	46
Tabela 12-Resultado da caracterização mecânica dos CPs de concreto fluido reforçado com fibras. ....	47
Tabela 13-Resultado da caracterização mecânica dos CPs de concreto fluido. ....	47
Tabela 14- Quantidade de CP's. ....	48
Tabela 15- Desvio padrão CPS 100% CRFA. ....	49
Tabela 16-Determinação da massa média de fibras nos CP's 100% CRF. ....	49
Tabela 17-Desvio padrão para CPS dupla camada. ....	50
Tabela 18-Ajuste na massa em corpos de prova 1/2 CRF. ....	51
Tabela 19-Determinação da massa média de fibras nos CP's 1/2 CRF.....	51
Tabela 20-Desvio padrão CPS tripla camada .....	52
Tabela 21-Ajuste na massa em corpos de prova 2/3 CRF. ....	53

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-Varição da indutância versus teor de fibra para corpos de prova metade CRF. ....	42
Gráfico 2-Varição da indutância versus teor de fibra para corpos de prova 2/3 CRF.....	43
Gráfico 3- Porcentagem de contribuição de cada eixo no CP 1. ....	45
Gráfico 4- Contribuição de cada eixo para alinhamento das fibras com CPS 100% CRFA. ...	49
Gráfico 5-Contribuição de cada eixo para alinhamento das fibras com CPS dupla camada....	50
Gráfico 6-Contribuição de cada eixo para alinhamento das fibras com CPS tripla camada....	52

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1- Geometria das fibras de acordo com sua classificação .....	22
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
CTEC	Centro de Tecnologia
ELU	Estado Limite Último
fib	Fédération Internationale du béton
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica)
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
RBMG	Resíduo de Beneficiamento do Mármore e Granito
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
ELU	Estado Limite Último

## LISTA DE SÍMBOLOS

$L_i$	Varição de indutância em relação ao eixo i
$B_{v,i}$	Coefficiente relacionado com a geometria.
$\beta$	Constante beta
$L_e$	Indutância equivalente em relação ao eixo i.
$C_f$	Teor de fibras por volume
$\eta_i$	número de orientação
$\cos \alpha$	Ângulo formado entre a orientação média das fibras e o eixo i
$B_{v,i}$	Parâmetro que correlaciona a geometria da bobina e da amostra
$\gamma$	Fator de aspecto da fibra de aço utilizada;
$\partial$ e $\mu$	Fatores de correção da orientação das fibras

## SUMÁRIO

1.1.	COMENTÁRIOS INICIAIS .....	16
1.2.	OBJETIVOS .....	17
1.3.	JUSTIFICATIVA .....	17
1.4.	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	18
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
2.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	19
2.1.	CONCRETO COM FIBRAS.....	19
2.2.	CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO .....	21
2.3.	ADITIVOS .....	24
2.4.	ADIÇÕES .....	24
2.5.	ENSAIOS DE DESEMPENHO.....	25
2.6.	PROPOSTA DE VIGAS EM MÚLTIPLAS CAMADAS .....	28
2.7.	POSICIONAMENTO DAS FIBRAS E SUA OTIMIZAÇÃO .....	29
2.8.	INDUTIVO.....	29
3.	METODOLOGIA.....	32
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	33
3.2.	DOSAGEM .....	33
3.3.	PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	34
3.4.	ENSAIO NO ESTADO FRESCO .....	34
3.5.	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	36
3.6.	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	36
3.7.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO .....	37
3.8.	EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O MÉTODO INDUTIVO ...	38
3.9.	EXECUÇÃO DO ENSAIO INDUTIVO.....	39
3.10.	CORPOS DE PROVA DE CALIBRAÇÃO.....	40
3.11.	TRATAMENTO DOS DADOS DO ENSAIO INDUTIVO.....	43
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	46
4.1.	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO DO CONCRETO .....	46
4.2.	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO .....	47
4.3.	RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO INDUTIVO.....	48
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
	REFERÊNCIAS .....	55
	ANEXOS .....	61

## INTRODUÇÃO

### 1.1. COMENTÁRIOS INICIAIS

De acordo com Carreño (2013), uma grande vantagem do concreto em relação à madeira e aço é seu custo e boa resposta à compressão. Em contrapartida, é um material frágil, devido à sua incapacidade de interromper a formação de fissuras e microfissuras em sua matriz (FIGUEIREDO, 2011; JANSSON, 2011; LIAO *et al.*, 2013).

Devido a isso, a abertura de novas tecnologias no ramo do concreto foi crescente. A adição de fibras em concreto melhora suas propriedades como resistência à flexão e desempenho de ductilidade. Além disso, a incorporação de fibras resulta em redução das deformações de retração e fluência. No entanto, as fibras também podem ter efeitos negativos em algumas propriedades de concreto, como a trabalhabilidade (AFROUGHSAKET, 2016).

O concreto fluido é uma alternativa vantajosa para suprir essa perda de trabalhabilidade que as fibras proporcionam ao concreto, pois, ao adicionar aditivos superplastificantes, a fluidez promove uma livre movimentação das fibras no compósito sem formação de ouriços. De acordo com Rilem (2006), o concreto fluido tem habilidade de preenchimento dos espaços, de escoar por espaços restritos sem ocorrência de bloqueio e de manter sua homogeneidade durante as etapas de mistura, transporte e lançamento.

Em meados de 1970 estudos relacionados à pesquisa e ao desenvolvimento envolvendo a matriz, as fibras, a interface fibra-matriz, o processo de produção do compósito e o melhor conhecimento dos mecanismos fundamentais do concreto reforçado com fibras (CRF) aumentaram progressivamente, dando notoriedade à mistura (NAAMAN, 2013).

Para uma avaliação de desempenho do CRF, existem métodos de controle de qualidade que se subdividem em métodos diretos e indiretos para se estudar a orientação das fibras, os métodos indiretos têm uma enorme vantagem por não serem destrutivos, como é o caso do ensaio indutivo que possui grande destaque por ter resultados satisfatórios para o seu propósito e baixo custo comparado a outros ensaios, baseia-se em conceitos de impedância, resistência elétrica, micro-ondas e indutância (TORRENTS *et al.*, 2012; CAVALARO *et al.*, 2014).

Elementos estruturais de concreto reforçado com fibras podem ser dimensionados com a recente norma brasileira NBR 16935 (ABNT, 2021), e com esse avanço o presente trabalho propõe a confecção de vigotas moldadas em dupla e tripla camada, onde somente a parte tracionada da viga receberá o reforço das fibras de aço, gerando uma economia no custo final da peça devido à diminuição do consumo de fibras e aditivos.

## 1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar a orientação das fibras em elementos estruturais moldados em camadas, trazendo uma proposta de tamanho reduzido (vigota) moldado em dupla e tripla camada de concreto fluido e concreto fluido com fibras, sob a análise do ensaio indutivo, afim de propor uma otimização do uso das fibras neste elemento.

Para tanto, faz-se necessário:

- Calibrar o método indutivo para corpos de prova de múltiplas camadas;
- Propor uma otimização da utilização das fibras dentro de uma viga;
- Relacionar a orientação das fibras com controle de qualidade da peça.

## 1.3. JUSTIFICATIVA

A utilização e pesquisa das fibras de aço no mundo é liderada pela Europa e Estados Unidos da América. Nessas regiões a realidade é bem distinta do Brasil, pela normatização que já é bem estabelecida. Em decorrência do maior número de estudos e códigos as fibras são utilizadas em escala maior nessas regiões, conseqüentemente ao longo dos anos o seu maior uso ocasionou a queda do seu custo unitário. No Brasil, devido à recente normatização e conseqüentemente a utilização em obras do CRFA, o valor unitário das fibras metálicas ainda é bem elevado.

Durante a produção do CRFA as fibras de aço e aditivos apresentam papel fundamental na definição do custo (FIGUEIREDO, 2011), esse incremento no valor do concreto com fibras acarreta na preferência do uso de concreto convencional armado no país por questões econômicas.

A justificativa desta pesquisa se baseia em uma maior usabilidade do CRFA em vigas com a proposta de dupla ou tripla camada, fazendo com que a mesma tenha uma diminuição significativa nos custos com fibras e aditivos e, ainda assim, cumpra sua função de resistir a esforços de tração nas áreas solicitadas.

#### **1.4. DELIMITAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho foi conduzido com uma revisão bibliográfica e propostas teóricas e metodológicas acerca do tema, seguido da parte experimental em que foram produzidas vigotas para análise pelo método indutivo.

A confecção das vigotas seguiu dosagem pré-estabelecida e difundida entre o grupo de pesquisa, de acordo com o método de Gomes (2006), portanto, não foi abordado no corpo do trabalho. Os corpos de prova utilizados tiveram dimensões exigidas no ensaio e foram obtidos pelo corte das vigotas moldadas após a cura.

Por fim, é importante frisar que este trabalho de conclusão de curso é uma continuação de dois PIBIC'S realizados no tema em conjunto com o grupo de pesquisa de concreto com fibras orientado pela professora Dra. Aline Ramos, e os resultados obtidos ao longo desses anos foram utilizados e são fundamentais para os resultados e conclusões do trabalho.

#### **1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho se inicia com comentários iniciais acerca do título, seu objetivo, justificativa e delimitação do trabalho.

No segundo capítulo será realizada uma revisão bibliográfica acerca do concreto reforçado com fibras, seus componentes, os ensaios de desempenhos para peças de CRF proposta de vigas em múltiplas camadas, otimização no uso das fibras em uma viga e ensaio indutivo.

O capítulo 3 abrange todo o método experimental do trabalho para, então, dar embasamento para o capítulo 4 que consiste nos resultados e discussões.

Por fim, no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico tem como intuito dar embasamento teórico acerca do concreto reforçado com fibras de aço, a proposta de vigas em múltiplas camadas e seus ensaios de desempenho, focando no método indutivo que é o foco do trabalho.

### 2.1. CONCRETO COM FIBRAS

A utilização de qualquer tipo de fibras no concreto tem o intuito de reduzir a propagação de fissuras, melhorar a dureza do concreto, prevenir do desprendimento de concretos fraturados ou submetidos ao fogo, além da redução da retração plástica do concreto. (LÖFGREN, 2005).

Segundo Pasa (2007), existem numerosos tipos de fibras disponíveis para uso comercial, de acordo com a terminologia adotada pela *American Concrete Institute (ACI), Commitee 544 (Fiber Reinforced Concrete)*, existem quatro categorias de concreto reforçado com fibras: concreto reforçado com fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais. Como mostra a Figura 1.

Figura 1-Fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais que podem ser utilizadas no concreto



Fonte: Adaptado de CTU (2006).

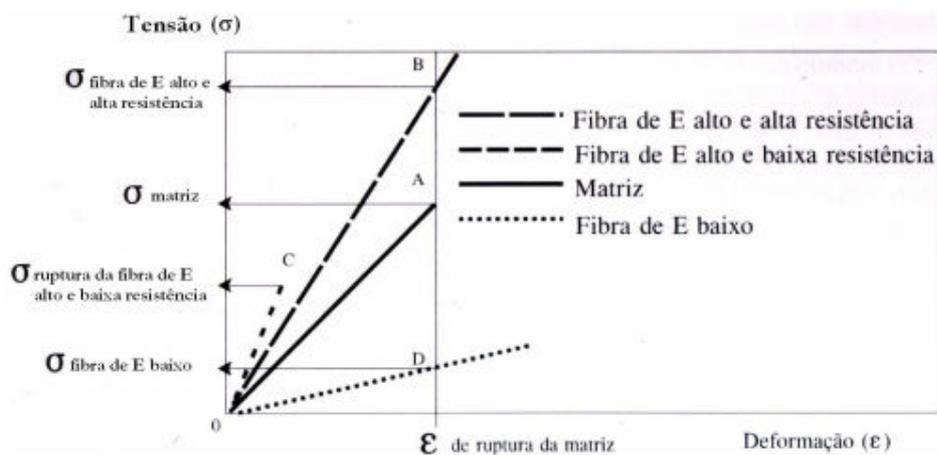
Figueiredo (2005) afirma que o módulo de elasticidade e resistência mecânica são as duas propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar no concreto, sendo as fibras subdivididas entre de baixo e alto módulo.

A Figura 2 esquematiza hipoteticamente como seria o gráfico tensão x deformação de três tipos de fibras, uma de baixo módulo de elasticidade e duas de alto modulo, sendo uma de baixa e outra de alta resistência mecânica.

Pela análise de Pasa (2007), as fibras de baixo módulo, quando a matriz se rompe no

ponto A e transfere a tensão para a fibra no ponto D, apresentam uma tensão muito baixa neste nível de deformação e resulta numa baixa capacidade de reforço pós-fissuração da fibra. Já as fibras de alto módulo de elasticidade e alta resistência apresentam um alto nível de tensão no momento da ruptura da matriz, proporcionando um reforço a partir do ponto B. E por último, as fibras de alto módulo de elasticidade, mas com baixa resistência a tração, sua capacidade de reforço é quase zero. Portanto, quando a matriz se romper, as fibras já terão sido rompidas e não terão ação nenhuma de reforço.

Figura 2-Diagrama de tensão por deformação específica elástica de matriz e fibras.



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2005).

Esta informação é importante para a escolha adequada do tipo de fibra para atingir o desempenho esperado do concreto.

Figueiredo (2011) afirma que o concreto com fibras e o concreto armado fazem parte de uma classe de compósitos que é constituída por uma matriz frágil e algum tipo de reforço. No caso do concreto com fibras, a adição da fibra no concreto resulta em uma facilitação de aplicação do material, que quando comparado ao concreto armado e sua execução da armadura de aço nas formas, há um ganho de tempo considerável.

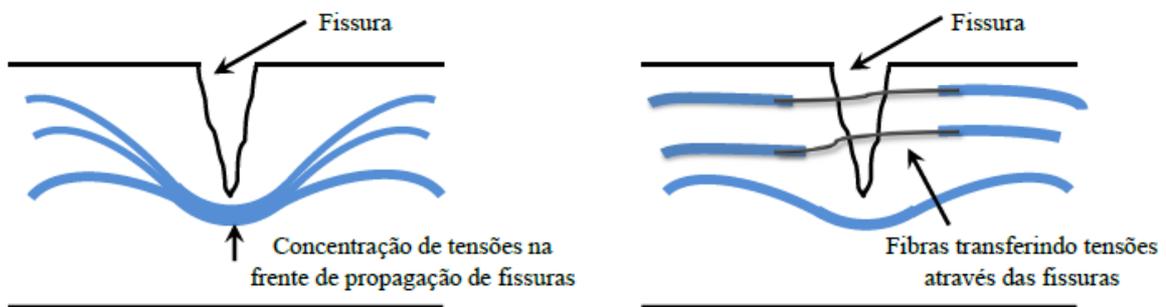
Ainda segundo Figueiredo (2011), a utilização do concreto com fibras no Brasil tem o enfoque em pavimentos industriais, concreto projetado e concreto pré-moldado, sendo as fibras poliméricas com o percentual ainda maior em pavimentos industriais.

Este panorama atual tem grande probabilidade de ser alterado devido à NBR 16935 (ABNT, 2021), que normatiza o dimensionamento de concreto reforçado com fibras de aço em espécimes estruturais, substituindo total ou parcialmente a armadura de aço.

## 2.2. CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO

As fibras de aço possuem alta resistência e alto módulo de elasticidade, atuam como reforço no concreto endurecido e podem até substituir a armadura convencional em alguns casos. Elas atuam como pontes de transferência de tensões entre as fissuras, redistribuindo as tensões na matriz, resultando numa menor velocidade de propagação de fissuras, aumentando sua tenacidade (FIGUEIREDO, 2011; JANSSON, 2011; LIAO *et al.* 2013). Como mostra a Figura 3.

Figura 3-Esquema de concentração de tensões para um concreto sem fibras (a) e com fibras (b)



Fonte: Nunes, Tanesi, Figueiredo (1997).

Os maiores efeitos e contribuições das fibras adicionadas ao concreto ocorrem após a fissuração da matriz, onde o arrancamento das fibras causa dissipação da energia entre os lados da fissura durante este processo, fazendo com que o CRF tenha capacidade de suportar cargas no estágio de pós fissuração e não possua uma ruptura frágil. (FIGUEIREDO; NETO; FARIA, 2008).

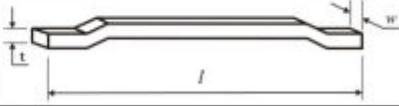
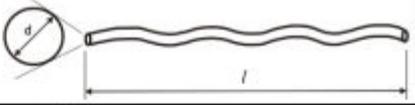
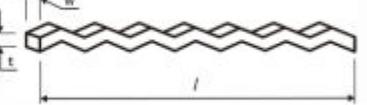
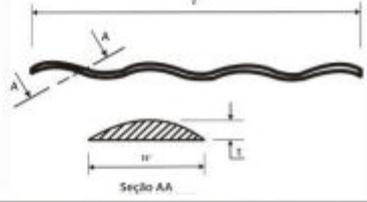
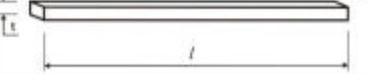
A norma vigente para as fibras de aço no Brasil é a NBR 15530 (ABNT, 2019) que fornece especificações e requisitos mínimos. As fibras devem estar de acordo com pelo menos uma dessas classificações: fabricação, forma, revestimento, teor de carbono e dentro das tolerâncias de comprimento e diâmetro.

A norma NBR 15530 (ABNT, 2019) traz distinções no tipo de material utilizado na fabricação da fibra, sendo eles: Grupo I - arames trefilados a frio; Grupo II - chapas cortadas e Grupo III - arames trefilados a frio e escarificados (shaved), Grupo IV - fibras produzidas por fusão e o Grupo V - usinadas a partir de blocos de aço, sendo as duas últimas não muito comuns. Além disso, também há três tipos básicos de fibras em função de sua conformação geométrica:

Tipo A - fibra com ancoragem nas extremidades; Tipo C - fibra com ondulações no corpo (corrugada) e Tipo R - fibra reta sem ancoragens, ilustradas no Quadro 1.

É importante frisar que a geometria da fibra é um dos principais aspectos definidores do desempenho do material no CRFA (NUNES, 2001).

Quadro 1-Geometria das fibras de acordo com sua classificação

Tipo	Grupo	Geometria
A	I	
	II	
B	I	
	II	
	III	
C	I	
	II	

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15530 (2019).

A resistência do aço que lhe deu origem é outro fator relevante na definição do desempenho da fibra no concreto. A influência deste fator está relacionada a proporcionalidade do nível de tenacidade e a resistência das fibras, ou seja, quanto maior a resistência das fibras maior será a tenacidade do concreto (FIGUEIREDO, 2005).

Na Tabela 1 se encontram apresentados o nível de resistência mínima do aço em função da classe da fibra.

Tabela 1-Especificações das fibras metálicas

<b>Tipo</b>	<b>Classe da fibra</b>	<b>Fator de forma mínimo</b>	<b>Limite de resistência à tração (Mpa)</b>
<b>A</b>	I	40	1000
	II	30	500
<b>C</b>	I	40	800
	II	30	500
	III	30	800
<b>R</b>	I	40	1000
	II	30	500

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15530 (2019).

De acordo com Pasa (2007), quando utilizado as fibras dispersas, é necessário se atentar a possibilidade ocorrência de falhas na distribuição das mesmas, permitindo a criação de regiões frágeis, as quais favorecem a formação de fissuras. Exigindo, assim, uma adequada mistura e dispersão das fibras na matriz do concreto.

As fibras são adicionadas no processo de produção do concreto, e se dispersam de forma aleatória na matriz. Portanto, a orientação final delas na estrutura é decorrente das propriedades reológicas do concreto, do processo de lançamento e da geometria da forma (ALBERTI *et al*, 2018).

Em um estudo de Yurtseven (2004), foi possível analisar que a perda de trabalhabilidade do concreto é diretamente proporcional à quantidade de fibras adicionadas a mistura, ademais, Figueiredo (2011) afirma que quando a dispersão não ocorre uniformemente, apenas uma parcela das fibras atua efetivamente no reforço da matriz, prejudicando o desempenho mecânico da estrutura, uma vez que as fibras estarão concentradas num determinado local.

Deste modo a utilização de concreto fluido é preferível, pois, a trabalhabilidade é retomada com o uso de aditivos superplastificantes e a dispersão das fibras é otimizada, tornando toda a estrutura reforçada de maneira igual. Esse fato proporciona maior segurança na utilização desse compósito para fins estruturais (FERRARA *et al*. 2007).

### 2.3. ADITIVOS

De acordo com Lopez (2013), para melhorar as propriedades do concreto fresco e/ou endurecido, aditivos à mistura, no concreto com fibras de aço, é convencional utilizar aditivos superplastificantes.

Os superplastificantes são usados com a finalidade de reduzir a perda de trabalhabilidade sofrida pelo concreto ao introduzir as fibras de aço. Este aditivo tem vantagens de evitar ter que adicionar mais água à mistura para melhorar a trabalhabilidade, não afetando, assim, a resistência ou durabilidade (LOPEZ, 2013).

### 2.4. ADIÇÕES

Para melhorar a interface fibra-matriz é necessária uma grande quantidade de finos para manter a estabilidade reológica nos concretos. Esse fato contribui para aumentar a resistência pós-fissuração do compósito (FERRARA *et al.* 2007)

Portanto, para aumentar a coesão e a resistência à segregação do CAA, incorpora-se a mistura materiais de origem mineral finamente moídos, chamados de adições minerais. Nesse sentido, a utilização de resíduos industriais como adições ao concreto é crescente, visto que gera tanto benefício econômico quanto ambiental (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na construção civil, estudos como de Gonçalves *et al.* (2003) comprovam que o Resíduo de Mármore e Granito (RMBG) é um material inerte na produção do cimento, isso significa sua aplicabilidade como filer.

Seu intuito é aumentar a coesão e a resistência à segregação dos concretos através do preenchimento de seus poros, usado como uma adição mineral na produção.

Para a produção de rochas ornamentais utilizadas amplamente na construção civil, é necessário serragem e polimento do material bruto, com isso, o desdobramento de blocos de rochas para produção de chapas gera uma quantidade significativa de resíduos na forma de lama (polpa abrasiva). A polpa abrasiva é constituída de água, granalha e cal moída. Costuma-se utilizar outros materiais tais como: calcário moído, escória de alto forno, etc., em substituição à cal (Silva, 1998 *apud* Neves, 2002).

A enorme quantidade de resíduos gerados e jogados incorretamente no ecossistema, sem um processo de tratamento para eliminar ou reduzir os poluentes presentes, tem sido uma preocupação para o meio ambiente (NEVES, 2002, p.1).

De acordo com Lisbôa (2004), estimou-se que em Maceió, no ano de 2004, foram geradas aproximadamente 1600 toneladas do resíduo por mês.

## 2.5. ENSAIOS DE DESEMPENHO

Para um melhor conhecimento do desempenho de uma peça de concreto reforçado com fibras, faz-se necessário ensaios de desempenho afim de estudar seus Estado Limite Último e no Estado Limite de Serviço e a orientação das fibras na peça, e assegurar que o comportamento mecânico do compósito está adequado para a necessidade (MONTE, TOALDO e FIGUEIREDO, 2014).

Os métodos diretos consistem na destruição da amostra, como é o caso do ensaio como o Ensaio de Dupla Punção – Barcelona, ensaio de flexão normatizado pela EN 14651, ensaio de determinação da tenacidade em placas de acordo com critérios da EFNARC (1996) e ASTM C1550 (2005), bastante difundidos no meio do concreto reforçado com fibras. Já os métodos indiretos não necessitam da destruição do corpo de prova, como é o caso do método indutivo e ultrassom.

No ano de 2021, as normas brasileiras que normatizam os ensaios EN 14651 e Barcelona no país foram publicadas, bem como a parte de dimensionamento de peças estruturais de CRF e seu controle de qualidade.

A norma NBR 16935 (ABNT, 2021) se aplica às estruturas de concreto reforçado com fibras, identificadas por massa específica seca maior do que 2 000 kg/m<sup>3</sup>, não excedendo 2 800 kg/m<sup>3</sup>, do grupo I de resistência (C20 a C50), conforme classificação da NBR 8953 (ABNT, 2015), não se aplicando aos requisitos para o dimensionamento de revestimento de túneis executados em concreto projetado reforçado com fibras e para evitar os estados-limite gerados por certos tipos de ações, como sismo, impacto, explosões e fogo.

As resistências à tração indiretas (resistência à tração na flexão) são determinadas por meio de ensaio de flexão em corpos de prova com entalhe, conforme a NBR 16940 (ABNT, 2021), as resistências à tração direta do CRF são obtidas pelo comportamento pós fissuração do CRF ou por meio de análise inversa.

A norma NBR 16935 (ABNT, 2021) traz parâmetros de relações mínimas de resistência, ELU, momento resistente da seção reforçada somente com fibras ou parte fibras parte armadura e todos os coeficientes de ponderação para um dimensionamento estrutural de um espécime de CRF pelo método presente na norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

A norma NBR 16938 (ABNT, 2021) traz que as estruturas de concreto CRF podem ser

classificadas em função de sua moldagem, podendo-se dividi-las em estruturas de concreto moldado no local, pré-moldadas ou de concreto projetado, e tem como intuito determinar o controle de qualidade concreto reforçado com fibras destinado às estruturas, incluindo ou não armaduras (passivas ou ativas), não se aplicando controle da qualidade do concreto projetado reforçado com fibras.

Segundo a norma NBR 16938 (ABNT, 2021) se faz necessário a qualificação das fibras pelas seguintes normas: fibras de aço NBR 15530 (ABNT, 2019); fibras de vidro álcali-resistentes (AR): NBR 16941 (ABNT, 2021); fibras poliméricas: NBR 16942 (ABNT, 2021).

Após a qualificação das fibras, é feito os ensaios de tração na flexão: resistências (LOP) e residuais, conforme a NBR 16940 (ABNT, 2021) resistência à compressão, conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994) e duplo puncionamento (opcional): resistências à tração e residuais, conforme a NBR 16939 (ABNT, 2021).

Para a avaliação desse concreto no estado fresco, a norma NBR 16938 (ABNT, 2021) dispõe que deverá ser feito o ensaio de abatimento de cone para concreto convencional seguindo a NBR 16889 (ABNT, 2014) ou espalhamento seguindo a NBR 15823-2 (ABNT, 2017).

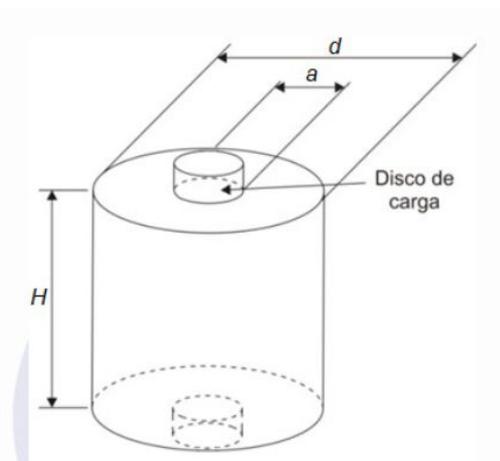
Para o ensaio de compressão do corpo de prova, deverá seguir a NBR 5739 (ABNT, 1994) mas se for uma estrutura pré-moldada, seguir a NBR 9062 (ABNT, 2017). Já nos ensaios de tração, poderá ser realizado o ensaio de tração na flexão pela NBR 16940 (ABNT, 2021) e/ou o ensaio de duplo puncionamento, conforme a NBR 16939 (ABNT, 2021).

A norma NBR 16939 (ABNT, 2021) especifica o método de ensaio de duplo puncionamento para os corpos de prova ou testemunhos de concreto reforçado com fibras, para determinação da resistência à fissuração e das resistências residuais à tração. Este ensaio é equivalente à norma espanhola UNE 83515 (2010).

Neste ensaio, os corpos de prova devem ser 150 mm de diâmetro por 150 mm de altura, devendo ser moldado em camada única e com vibrações externas (mesa vibratória ou vibrador de parede), há a possibilidade de ser preenchido com concreto autoadensável.

O carregamento aplicado no disco deve ter velocidade de deslocamento vertical de  $(0,50 \pm 0,05)$  mm/min. O ensaio pode ser finalizado quando o deslocamento vertical medido atingir no mínimo 4 mm após a carga de fissuração (Pf). A figura 4 ilustra a montagem do ensaio.

Figura 4-Esquema de configuração do ensaio de duplo puncionamento.



Fonte: ABNT NBR 16939 (2021).

Após os resultados, a norma NBR 16939 (ABNT, 2021) traz equações para a obtenção da resistência a tração por duplo puncionamento, cálculo das resistências residuais e cálculo da tenacidade.

Por fim, a norma NBR 16940 (ABNT, 2021) é análoga à EN 14651 (2007), que normatiza o ensaio de flexão em três pontos.

O corpo de prova pode ser de largura e altura de 150 mm e comprimento entre 550 mm e 700 mm, para agregado com no máximo 25 mm de diâmetro e fibras com comprimento máximo de 60 mm ou largura e altura de 100 mm e comprimento de 400 mm.

Neste ensaio é possível medir a resistência à tensão de flexão do CRFA, bem como determinar o limite de proporcionalidade (LOP) e os valores de tensões residuais no estado de pós-fissuração do concreto.

O ensaio é realizado com um sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento (closed-loop), sendo necessária a utilização de uma máquina servo controlada. Este sistema fechado propicia um controle melhor na peça, já que a instabilidade no estágio de pós-fissuração da matriz é evidente, sendo toda carga transmitida da matriz para as fibras (SALVADOR, 2013; MONTE, 2015).

O ensaio consiste na confecção de corpos de prova seguido de um entalhe de 5mm na peça a fim de induzir o posicionamento das fissuras apenas no plano daquele entalhe. Em seguida é posicionado transdutores do tipo clip-gage no entalhe, para medir a abertura do entalhe ao longo do ensaio.

Com o gráfico carga x abertura de fissura elaborado pelo equipamento, é possível extrair os valores do Estado Limite Último ( $fR3$ ) e de Serviço ( $fR1$ ), que correspondem ao  $CMOD3 = 2,5 \text{ mm}$  e  $CMOD1 = 0,5 \text{ mm}$ .

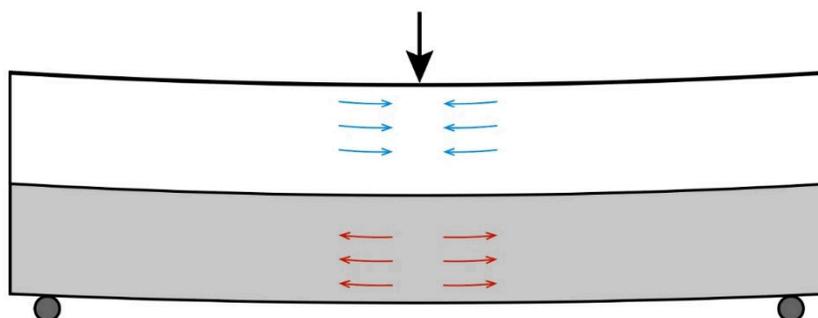
Esta norma é uma ótima ferramenta para se utilizar atrelado ao ensaio indutivo, visto que com a moldagem do corpo de prova que seria uma vigota, é possível extrair corpos de prova para o ensaio indutivo e correlacionar a orientação média das fibras na vigota e como a peça irá resistir a fissuração.

O ensaio normatizado pela NBR 16939 (ABNT, 2021) que é o equivalente ao ensaio Barcelona, também poderia ser utilizado para se correlacionar com o indutivo, mas os equipamentos são mais caros, tornando o desta norma mais viável para um controle de qualidade.

## 2.6. PROPOSTA DE VIGAS EM MÚLTIPLAS CAMADAS

Este trabalho traz como proposta a utilização de vigas estruturais moldadas em múltiplas camadas, sendo a primeira proposta com dupla camada, que consiste em uma camada com concreto fluido reforçado com fibras de aço e outra com concreto fluido. Nestes casos, temos como exemplo uma viga biapoiada, onde as fibras inferiores são tracionadas e as de cima comprimidas, (SUSSEKIND, J. 1981), como mostra a figura 5.

Figura 5-Exemplo de viga biapoiada.



Fonte: Autora (2022).

Já para a segunda proposta, temos a tripla camada, com fibras nas divisões superior e inferior da viga. Para este caso, temos um exemplo de utilidade nos casos de painéis sanduíche pré-moldados.

A moldagem de vigas nessas condições tem como objetivos, já citados no tópico 1.3, de economia no custo final, afinal estaria sendo reforçada apenas nos lugares solicitados.

## 2.7. POSICIONAMENTO DAS FIBRAS E SUA OTIMIZAÇÃO

A distribuição aleatória das fibras no CRF não garante que todas estas estejam alinhadas na direção do carregamento a ser aplicado. Uma fibra não perpendicular ao plano da fissura, quando solicitada, é curvada sofrendo uma força transversal chamada *snubbing effect* (FOSTER *et al.* 2012).

Neste caso a fibra é solicitada por uma combinação de tensões de tração, cisalhamento e flexão gerando altas concentrações de tensões forçando a fibra a dobrar podendo causar a ruptura local da fibra, não gerando, assim, benefícios significantes para a matriz (FOSTER *et al.* 2012).

Segundo Bentur e Mindess (2006), um volume de 5% de fibras de aço lisas e retas dispostas na direção de tração pode acarretar em um aumento de 130% na resistência, enquanto o mesmo volume, porém em direção aleatória apresenta somente um aumento de 60%.

Portanto, o estudo da orientação das fibras é bastante benéfico para correlacionar com resultados de resistência à fissuração, atuando como um controle de qualidade, pois se uma viga apresentar orientações não favoráveis a direção de atuação ótima à tração, sua resistência a esse esforço seria prejudicada e apontaria problemas na moldagem ou traço do concreto.

Em teoria, como a seção da dupla camada, o eixo Z tem sua seção diminuída pela metade, então as fibras tenderiam a se orientar no eixo com maior comprimento (eixo X), o que teria um resultado benéfico à peça por estar paralela ao eixo de tração que atua na viga. O mesmo vale para a viga de tripla camada, em tese teria a melhor orientação das fibras por ter um comprimento ainda menor do eixo Z.

Na fase experimental o objetivo é verificar se essa hipótese de que as camadas em uma viga seriam benéficas para a otimização da orientação das fibras no espécime é verdadeira.

## 2.8. INDUTIVO

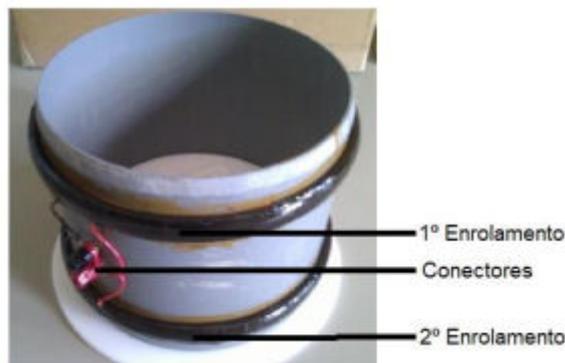
Um dos métodos mais eficazes para identificar a orientação das fibras por ter um baixo custo e bom resultado, é o método indutivo, proposto originalmente por Torrents *et al.* (2012) e posteriormente aperfeiçoado por Cavalaro *et al.* (2015). Este método é utilizado exclusivamente em espécimes com fibra de aço devido ao fato que somente elas possuem propriedades ferromagnéticas e proporcionam a variação de indutância nos corpos de prova medidos.

O método indutivo utiliza-se basicamente das Leis de Faraday do Eletromagnetismo para através da variação da indutância medida estimar a quantidade e a orientação das fibras. De

forma simplificada o método utiliza duas bobinas circular do tipo Helmholtz (Figura 6) para gerar campo magnético e um medidor LCR para aferir a indutância (MELO *et al.* 2017).

De acordo com Melo *et al.* (2016) baseia-se, resumidamente, em duas bobinas que geram um campo magnético onde os corpos de prova são introduzidos isolados do meio externo e seguem a orientação dos eixos X, Y e Z, que são pré-determinados. Com dados de corpos de calibração sem fibras, e equações propostas por Cavalaro *et al.* (2015), é possível analisar a variação de indutância em relação a cada eixo.

Figura 6-Bobina circular do tipo Helmholtz



Fonte: Lopez (2013), adaptado pela autora.

Cavalaro *et al* (2015) são responsáveis pela reformulação analítica do equacionamento do método, deixando-o com fundamentação teórica maior e mais aprofundada, é com base nela que o trabalho será desenvolvido.

Na Equação 1, é possível correlacionar o teor de fibras por volume ( $C_f$ ) com a indutância equivalente  $L_e$ . Para corpos de prova 100% concreto com fibras.

$$C_f = \beta \cdot \sum \frac{L_i}{B_{v,i}} = \beta \cdot L_e \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- $L_i$ - Variação de indutância em relação ao eixo i.
- $B_{v,i}$ - Coeficiente relacionado com a geometria.
- $\beta$ - Constante beta.
- $L_e$ - Indutância equivalente em relação ao eixo i.

O coeficiente  $\beta$  relaciona os parâmetros das fibras e da bobina utilizados no ensaio, ou seja, é uma constante. Por consequência é provada em Cavalaro (2015) que é possível encontrar

essa constante através de uma aproximação linear entre  $C_f$  e  $L_e$ .

Em relação à orientação média das fibras, produto final do estudo, em uma direção  $i$  é calculada a partir do número de orientação ( $\eta_i$ ). Tal parâmetro é dado pela razão entre a projeção da fibra na direção de  $i$  e o seu comprimento. Ele é calculado utilizando a equação 2, sendo a primeira para uma única fibra ou quando elas estão orientadas em uma direção específica e a segunda para uma distribuição aleatória. O teor médio de fibras na direção  $i$  ( $C_i$ ) é dado pela Equação 3 e os parâmetros citados por Cavalaro (2015) constam na Tabela 3.

$$\cos \alpha_i = \eta_i = \partial \sqrt{\frac{L_i \cdot (1+2\gamma) - L_e \cdot B_{v,i} \cdot \gamma}{L_e B_{v,i} (1-\gamma)}} - \mu \quad (\text{Equação 2})$$

$$C_i = \frac{\eta_i}{\eta_x + \eta_y + \eta_z} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- $\cos \alpha_i$  - Ângulo formado entre a orientação média das fibras e o eixo  $i$ ;
- $L_i$  - Variação da indutância em relação ao eixo  $i$ ;
- $L_e$  - Indutância equivalente em relação ao eixo  $i$ ;
- $B_{v,i}$  - Parâmetro que correlaciona a geometria da bobina e da amostra;
- $\gamma$  - Fator de aspecto da fibra de aço utilizada;
- $\partial$  e  $\mu$  - Fatores de correção da orientação das fibras.
- Os parâmetros utilizados no equacionamento são os que constam na tabela 2.

Tabela 2-Parâmetros do equacionamento do método indutivo.

Forma	Dimensões (mm)	Parâmetros				
<b>Cúbica</b>	100x100x100	$B_{v,i}$	$B_{v,i}$	$B_{v,i}$	$\mu$	$\partial$
		695	695	695	0,1	1,03

Fonte: Cavalaro *et al* (2015), adaptado pela autora.

O resultado do posicionamento das fibras dentro do corpo de prova analisado é baseado em Blanco *et al.* (2014) que afirmam que devido à distribuição anisotrópica das fibras no compósito, quando um número de orientação é encontrado próximo a 0,6, as fibras estão orientadas em paralelo a esse eixo. No entanto, quando esse número se encontra entre 0,3 e 0,4, as fibras estão organizadas ortogonalmente ao eixo.

### 3. METODOLOGIA

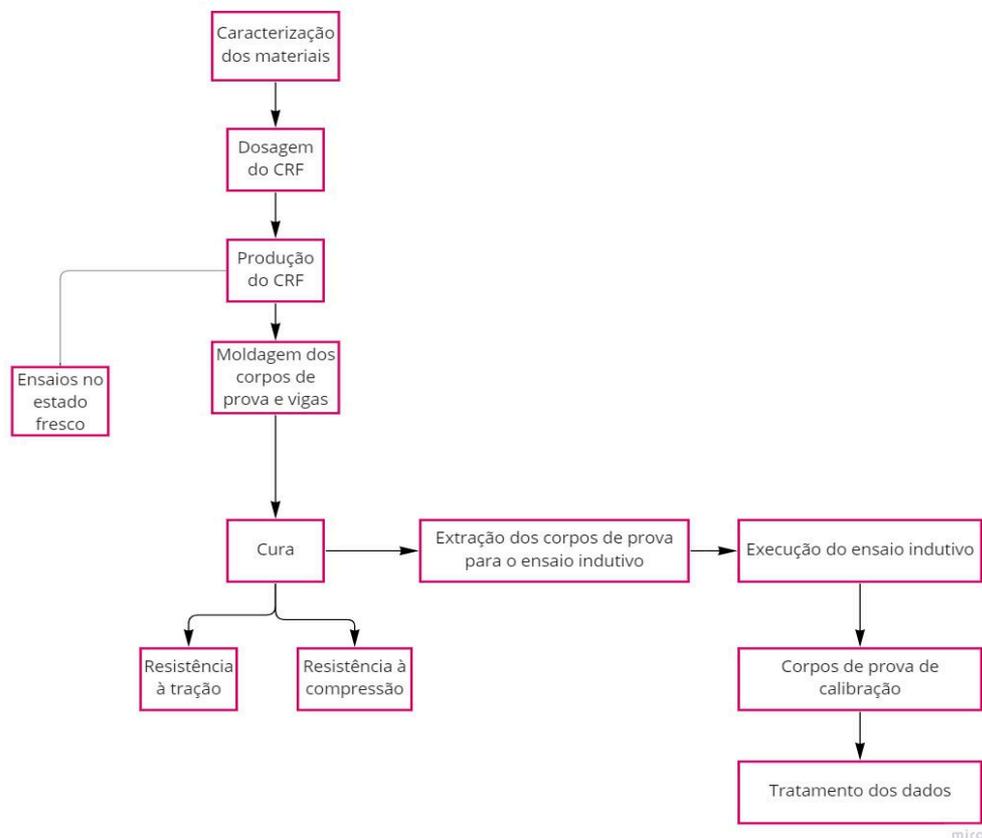
Este capítulo apresentará a metodologia de produção e de execução dos ensaios para as peças moldadas em camadas e de CRFA, mais especificamente abordará: as características dos materiais, dosagem utilizada, produção do concreto, moldagem e execução dos ensaios em laboratório nos estados fresco e endurecido das peças de concreto, e, por fim, como tratar os dados obtidos no método indutivo.

Em um cenário de construção civil, as vigas utilizadas possuem tamanho consideravelmente grande e para extrair corpos de prova cúbicos padrão para o ensaio indutivo de 100x100x100 mm, adotou-se neste trabalho vigotas de 150x150x500 mm afim de manusear mais facilmente no laboratório e conseguir fazer o ensaio indutivo com as dimensões dos corpos de prova exigidas.

Todas as amostras foram produzidas no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) do Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

É apresentada na Figura 7 a metodologia empregada nesse trabalho, a fim de se obter os objetivos propostos. Em seguida cada etapa metodológica será especificada

Figura 7-Fluxograma da metodologia.



### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento utilizado na produção foi o CP V ARI RS, por possuir uma resistência inicial elevada, além de sua finura proporcionar uma fluidez melhor à mistura.

Os agregados miúdos e graúdos foram adquiridas no comércio local. A areia foi seca ao ar livre e peneirada na malha de 4,75mm, o material retido descartado. A pedra britada foi lavada e, posteriormente, seca ao ar livre. Utilizando uma peneira com abertura de malha de 12,5 mm, a brita seca foi submetida ao processo de peneiramento, sendo utilizado somente o material passante.

Empregou-se aditivo superplastificante baseado numa cadeia de éter policarboxílico modificado. Esse aditivo atua como dispersante do material cimento, proporcionando alta fluidez e redução no consumo de água.

Partindo para o filer escolhido, o emprego do RBMG será utilizado com objetivo de melhorar a coesão da mistura, mas sem perder a trabalhabilidade, ademais, o RBMG possui diversas linhas de pesquisa na UFAL e é um material ecoeficiente, foi coletado de marmorarias locais e sem custo, por ainda não ser um filer comercializado.

### 3.2. DOSAGEM

A dosagem utilizada pertence à Melo (2018), que se baseou na metodologia de dosagem para concreto autoadensável (CAA) proposto por Gomes (2002), que consiste na composição da pasta e na determinação da relação superplastificante/cimento (sp/c) e filer/cimento (f/c). Após isso, segue-se com a otimização do esqueleto granular através do ensaio-padrão NBR NM 45 (ABNT, 2006) com os agregados secos e por último a determinação do volume de pasta que produza a fluidez necessária (GOMES; BARROS, 2009). A Tabela 3 demonstra os valores da dosagem.

Tabela 3-Dosagem para produção de 1m<sup>3</sup> de concreto com fibras de aço.

<b>Relação</b>	<b>Valor</b>
Água / Cimento	0,50
RBMG / Cimento	0,50
Sólidos do SP / Cimento (%)	0,50
Teor de Areia (%)	47,5
Teor de Brita (%)	52,5
Teor de Pasta (%)	38,0
Teor de adição de Fibras (%)	0,33

Fonte: Gomes (2002).

Para 1 m<sup>3</sup> de concreto com fibras produzido, foram utilizados os consumos em kg apontadas por Melo (2018), vide Tabela 4.

Tabela 4-Dosagem CRFA.

<b>Materiais</b>	<b>Massa (kg)</b>
Cimento	380,4
RBMG	190,2
Ag. Miúdo	744,0
Ag. Graúdo	838,3
Água inicial	152,2
Água complementar	38,0
Água de absorção	11,2
Superplastificante	6,3
Fibras de aço F F80	26,0

Fonte: Melo (2018).

### 3.3. PRODUÇÃO DO CONCRETO

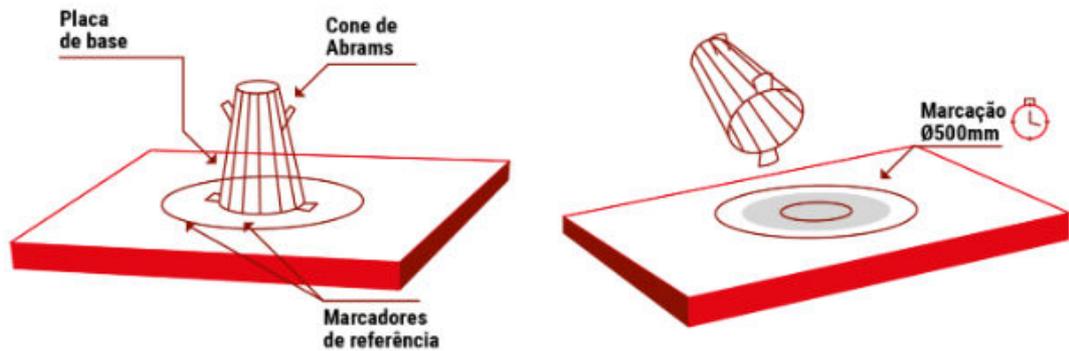
O procedimento de mistura do concreto foi iniciado com a colocação dos agregados e da água de absorção, sendo misturados por 30 segundos. Adicionou-se o cimento e o RBMG e misturou-se por mais 30 segundos. Na sequência, a água inicial foi colocada e misturou-se por 1,5 minutos, depois se adicionou o aditivo superplastificante e a água restante, sendo misturados por mais 2 minutos. As fibras foram adicionadas de forma fracionada durante a última etapa da mistura. Na produção da dupla ou tripla camada, seguiu-se rigorosamente as mesmas etapas em tempos idênticos com duas betoneiras distintas, a fim da moldagem ser simultânea, eliminando, assim, qualquer possibilidade de não adesão das duas camadas.

### 3.4. ENSAIO NO ESTADO FRESCO

A avaliação do concreto no estado fresco se deu por meio da norma NBR 15823-2 (ABNT, 2017) que normatiza o slum-flow test. Esse ensaio que permite avaliar a fluidez do concreto e verificar a capacidade de preenchimento é fundamental para o trabalho, pois, só será possível a execução dos corpos de prova preenchidos sem a presença de ninhos se o concreto for considerável fluido.

A norma NBR 15823-2 (ABNT, 2017), estabelece como requisitos: espalhamento (SF), tempo de escoamento (t500) e índice de estabilidade visual (IEV). O procedimento do ensaio é apresentado na figura 8.

Figura 8-Ensaio *Slump-flow test*.



Fonte: Pré-Fabricar.

Após a retirada vertical do cone é feita uma média dos diâmetros medidos ( $D_f$  final), como consta a Figura 9, e o tempo gasto para o concreto atingir os 50 cm de espalhamento na placa ( $T_{50}$ ).

Figura 9-Medição do diâmetro no ensaio *slump-flow test*.



Fonte: Autora (2019).

Os parâmetros recomendados pela norma para um concreto fluido seguem na Tabela 5, valores de espalhamento abaixo disso são considerados concretos pouco fluidos e acima concretos muito fluidos sujeitos à segregação.

Tabela 5-Valores ótimos para concreto fluido.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor ótimo</b>
Diâmetro final	650 a 850mm
T50	3 a 7 segundos

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15823-2 (2017).

### **3.5. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO**

Para a caracterização mecânica do concreto, foram moldados 8 corpos de prova de concreto fluido e 8 corpos de prova de concreto fluido reforçado com fibras. Metade foram destinados ao ensaio de compressão e a outra metade ao ensaio de tração por compressão diametral. No ensaio de compressão a norma vigente é a NBR 5739 (ABNT, 2018) e no de tração por compressão diametral, a norma NBR 7222 (ABNT, 2011).

### **3.6. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA**

Para as vigas de comparação que serão 100% CRF, a moldagem foi basicamente o lançamento do concreto por baldes nos moldes de madeira.

Para a moldagem das vigas em múltiplas camadas, foi necessária uma placa de divisória de alumínio prensado para melhor precisão no quantitativo de concreto com fibras e autoadensável sem fibras, como mostra a Figura 10.

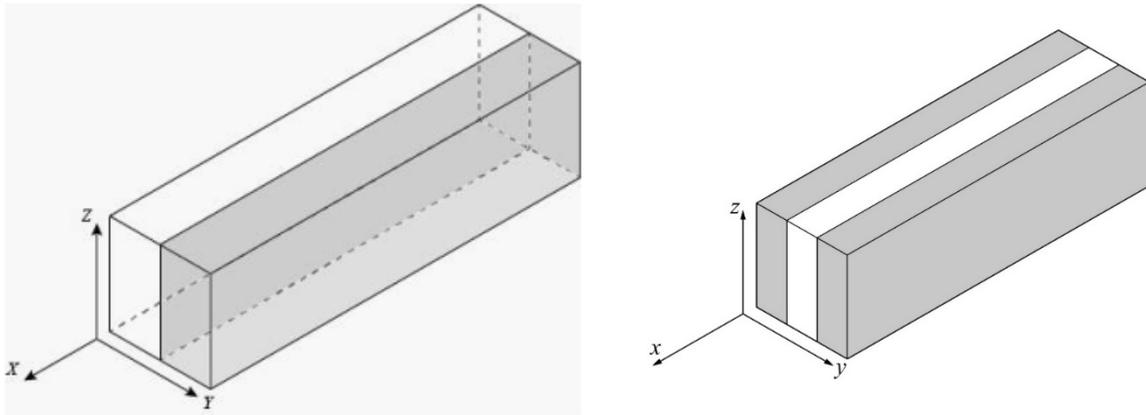
Figura 10-Moldagem de vigas em dupla camada.



Fonte: Autora (2021).

Em cada corpo de prova foram demarcados os eixos X, Y e Z relativos ao plano de moldagem. Na Figura 11 é apresentado o posicionamento dos eixos durante o lançamento do concreto.

Figura 11-Posicionamento dos eixos durante o lançamento do concreto



Fonte: Autora (2022).

Após a aplicação dos desmoldante nas formas de madeira, os concretos foram lançados simultaneamente nas formas com a placa de alumínio prensado posicionada em cada vão, logo após o preenchimento, a placa é imediatamente retirada e as vigas ficam um período de 24h para serem desmoldadas e submetidas a um período de cura de 28 dias.

### 3.7. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO

A caracterização mecânica do concreto é realizada por meio dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, respectivamente normatizados pela NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7222 (ABNT, 2011).

Após a cura de 28 dias os corpos de provas cilíndricos foram submetidos aos ensaios em uma prensa com capacidade de carga de 200 tf (Figura 12).

Figura 12-Ensaio de compressão simples (a) e de tração por compressão diametral

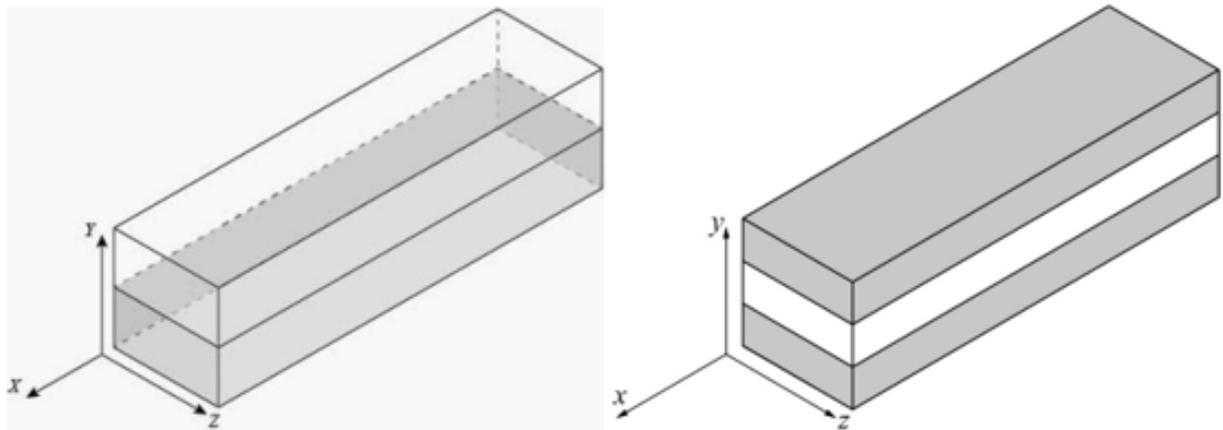


Fonte: Oliveira (2019) adaptado.

### 3.8. EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O MÉTODO INDUTIVO

Após a cura de 28 dias, as vigotas foram rotacionadas em  $90^\circ$  para a execução do ensaio, como mostra a Figura 13.

Figura 13-Vigotas rotacionadas  $90^\circ$  para execução do ensaio indutivo



Fonte: Autora (2022).

Em seguida, foram cortados dois corpos de provas cúbicos de 100mm, de cada viga, desprezando antes 25 mm das bordas para que as fibras não sofressem alteração no sentido devido ao contato com a forma, como mostra a Figura 14, para a realização do ensaio indutivo.

Figura 14-Marcação para corte dos corpos de prova



Fonte: Autora (2021).

### 3.9. EXECUÇÃO DO ENSAIO INDUTIVO

Para a execução do ensaio, é necessário a montagem dos equipamentos descritos no tópico 2.9, como mostra a Figura 15.

Figura 15-Execução do ensaio indutivo.



Fonte: Autora (2019).

Ainda de acordo com a figura 16, é necessário que o equipamento esteja completamente isolado de materiais metálicos por no mínimo 200 mm (TORRENTS *et al* 2012), portanto a caixa de madeira usada para isolar a bobina nas medições não possui pregos ou parafusos.

A marcação dos eixos nos corpos de prova se dá com o plano XY sendo o de lançamento do concreto, e o eixo Z como o vertical, (Figura 16). O ensaio é feito com a medição da variação

de indutância nos três eixos previamente marcados, a medição se dá colocando o eixo a ser medido na posição vertical dentro do equipamento.

Figura 16-Marcação dos eixos nos corpos de prova.



Fonte: Melo (2018).

Com a aferição de indutância dos corpos de prova feitos, é possível indicar a orientação média das fibras baseada nas equações apresentadas no tópico 2.9, no tópico 3.10 consta um passo a passo para o tratamento dos dados por meio de uma planilha, afim de facilitar o processo.

### 3.10. CORPOS DE PROVA DE CALIBRAÇÃO

Como a proposta da pesquisa é diferente da literatura, onde se utilizou corpos de prova 50% concreto fluido e 50% concreto reforçado com fibras, e corpos de prova 2/3 concreto com fibras e 1/3 concreto fluido, é necessário refazer os corpos de prova de calibração para as novas retas de calibração que serão geradas, afim de achar o parâmetro  $\beta$  presente na equação 1, conseguindo, assim, a quantidade de fibras no elemento apenas medindo sua indutância equivalente.

Foram produzidos seis corpos de prova para dupla camada e seis corpos de prova para tripla camada, seus ângulos, número e espessura de camadas de EPS são descritas nas Tabelas 6 e 7.

A quantidade de fibras por corpo padrão foi definida utilizando o percentual do volume

crítico de 1,1% para fibra longa, e densidade do concreto igual a 2500 kg/m<sup>3</sup>. Sabendo que o cubo de 10 cm de aresta possui volume de 0,001 m<sup>3</sup> resulta em uma massa de cubo de 2,5 kg. Por sua vez, um cubo de concreto reforçado possui em média 27,7 g de fibra longa.

Tabela 6-Descrição dos corpos de prova de calibração para dupla camada

<b>Corpo de prova</b>	<b>Espessura da camada (cm)</b>	<b>Ângulo (°)</b>	<b>Número de placas</b>	<b>Número de fibras por placa</b>	<b>Número de fibras total</b>
1	0,5	30	20	13	130
2	0,5	45	20	13	130
3	0,5	60	20	13	130
4	1	30	10	13	65
5	1	45	10	13	65
6	1	60	10	13	65

Fonte: Autora (2021).

Tabela 7-Descrição dos corpos de prova de calibração para tripla camada.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Espessura da camada (cm)</b>	<b>Ângulo (°)</b>	<b>Número de placas</b>	<b>Número de fibras por placa</b>	<b>Número de fibras total</b>
1	0,5	30	20	13	156
2	0,5	45	20	13	156
3	0,5	60	20	13	156
4	1	30	10	13	78
5	1	45	10	13	78
6	1	60	10	13	78

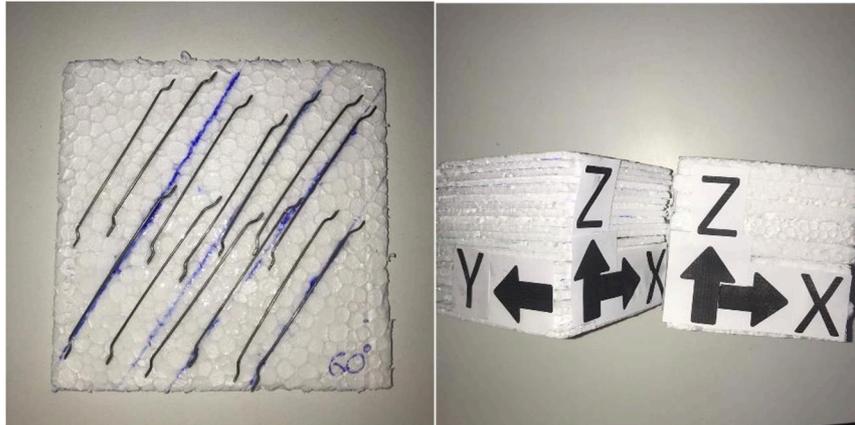
Fonte: Autora (2021).

Sabendo que a fibra longa tem peso unitário de 0,23 g o seu teor foi calculado em 13 fibras por placa, levando em consideração 10 placas, com a dupla camada, usou-se 5 placas de 1cm com fibra e 5 placas de 1cm sem fibra. E para tripla camada, 6 placas com fibras e 4 sem fibras. Adotou-se o mesmo teor de 13 fibras por placa para os corpos de camada com 0,5cm de espessura, afim de obter uma reta de calibração que mostre a influência da quantidade de fibras

com a indutância medida.

A confecção se deu colando cada fibra unitariamente nas camadas, após isso, é marcado o eixo para a aferição de indutância no equipamento, como mostra a Figura 17.

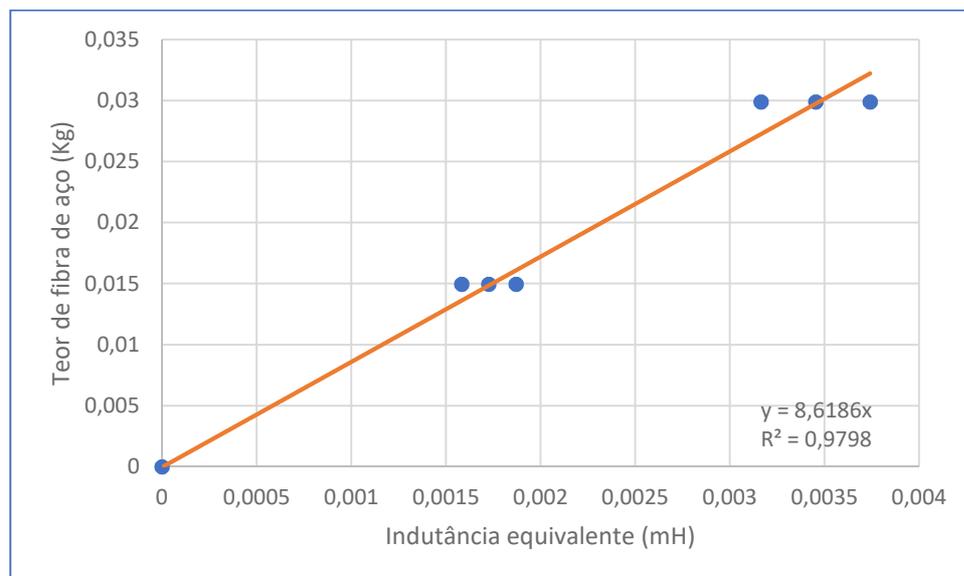
Figura 17- Procedimento da confecção dos corpos de prova de calibração



Fonte: Autora (2021).

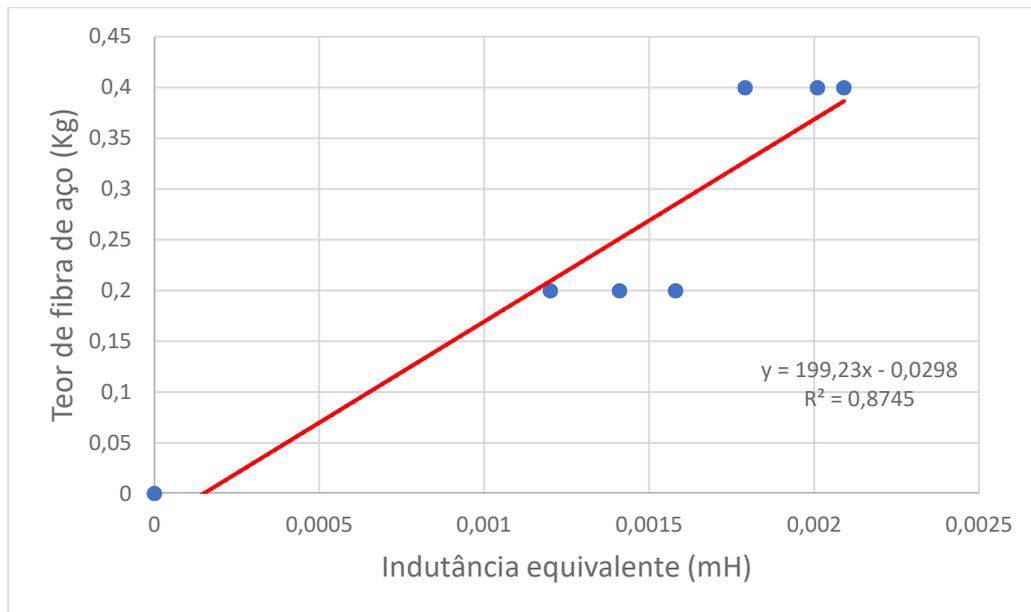
As aferições de indutância dos 12 corpos de calibração estão presentes no ANEXO A e geraram os Gráficos 1 e 2 de indutância equivalente por teor de fibra, que são as retas de calibração para cada tipo de corpo de prova.

Gráfico 1-Variação da indutância versus teor de fibra para corpos de prova metade CRF.



Fonte: Autora (2021).

Gráfico 2-Variação da indutância versus teor de fibra para corpos de prova 2/3 CRF.



Fonte: Autora (2021).

Como é possível notar, a correlação entre o aumento do peso de fibras e indutância é linear, sendo confirmada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) próximo de 1.

Tem-se então que para corpos de prova de dupla camada, a quantidade de fibras é calculada com a Equação 4, e para corpos de prova de tripla camada está descrita na Equação 5:

$$C_f = 8,6186 \cdot L_e \quad (\text{Equação 4})$$

$$C_f = 199,23 \cdot L_e - 0,0298 \quad (\text{Equação 5})$$

Estas retas de calibração serão usadas como base de cálculos para os corpos em dupla camada e tripla camada extraídos das vigotas de concreto.

### 3.11. TRATAMENTO DOS DADOS DO ENSAIO INDUTIVO

A partir da planilha eletrônica desenvolvida por Melo (2016) em suas pesquisas, no *software excel*, com base nas equações do método indutivo foi realizado o tratamento dos dados obtidos na aferição de indutância.

Os dados de entrada para obter a orientação média nos corpos de prova são as indutâncias aferidas nos eixos X, Y e Z de cada corpo de prova.

Para demonstração, foi utilizado o CP-01 moldado em dupla camada presente no ANEXO B2 deste trabalho.

O primeiro passo é a inserção das indutâncias aferidas pelos corpos de prova, são feitas duas medições para cálculo de média e desvio padrão, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8-Inserção das indutâncias aferidas dos corpos de prova.

	C1		
	Z	Y	X
1	0,6	1,5	1,6
2	0,6	1,5	1,6
Média	0,6	1,5	1,6
D.P.	0,0	0,0	0,0

Fonte: Autora (2022).

Em seguida, a indutância utilizada será a média da tabela anterior, e  $L_e$  conforme a equação 1, será a soma das indutâncias no eixo por seu parâmetro que correlaciona a geometria da amostra e da bobina ( $B_{v,i}$ ) estabelecida na tabela 9.

Já as massas de fibras dos corpos de prova seguem a equação 4 obtida pela reta de calibração, obtêm-se a Tabela 10 abaixo.

Tabela 9-Indutância total e equivalente do corpo de prova.

Variação de indutância (mH)	Cubos com fibra de FF 80 CP-01
Z	0,60
Y	1,50
X	1,60
$\sum L$	3,70
$L_e$	5,32E-03
Massa calculada (kg)	0,046

Fonte: Autora (2022).

Na tabela 11 temos a variação de indutância  $\Delta L$  e  $L_e$ , para encontrar o  $\eta_i$  em cada eixo, é utilizada a equação 2, que também resulta no  $\alpha_i$  em radiano, converte-se para grau e por fim a contribuição de influência de cada eixo na espécime (C), que consiste na divisão do  $\eta_i$  pela soma do  $\eta_x$ ,  $\eta_y$  e  $\eta_z$ , com os parâmetros explicitados na Tabela 10.

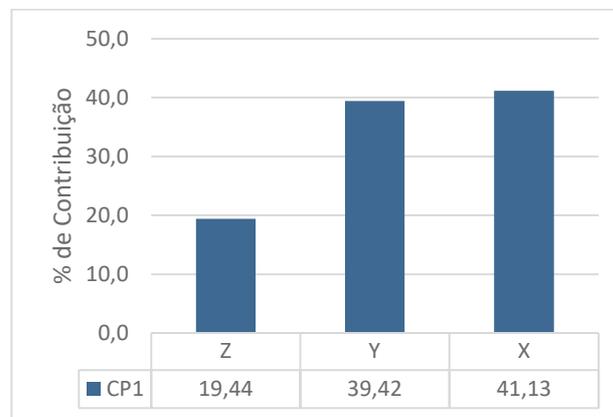
Tabela 10-Obtenção da contribuição de cada eixo no corpo de prova.

CP-01								
			$\Delta L$	$\eta$	$\alpha(\text{rad})$	$\alpha(^{\circ})$	C	
$\theta$	1,03	Z	0,60	0,28	1,29	79,80	0,19	
$\mu$	0,10	Y	1,50	0,56	0,97	55,60	0,39	
$\gamma$	0,05	X	1,60	0,59	0,94	53,90	0,41	
$\beta$	695	Le	5,32E-03					

Fonte: Autora (2022).

Com isso, é feito um gráfico em coluna para apresentar o valor de contribuição de cada eixo (C), em porcentagem, como mostra o Gráfico 3.

Gráfico 3- Porcentagem de contribuição de cada eixo no CP 1.



Fonte: Autora (2022).

Neste caso, uma influência similar do eixo Y e X, levando a concluir que as fibras estão em torno de  $45^{\circ}$  no plano XY, em contrapartida o eixo Z tem menor influência. Analisando o ângulo obtido entre as fibras e o eixo Z, é possível inferir que as fibras se orientam majoritariamente perpendiculares a este eixo. A análise da orientação das fibras será mais detalhada no tópico 4.3.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises dos corpos de prova moldados para ensaios nos estados fresco e endurecido, e resultados do ensaio indutivo proposto por Torrents *et al* (2012) para validar toda a abordagem teórica feita no capítulo 2.

### 4.1. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO DO CONCRETO

A partir da NBR 15823-2 (ABNT, 2017) explicada no tópico 3.4 foi efetuado o *slump test-flow* nos concretos produzidos, o concreto fluido e o concreto fluido com fibras, nas Tabelas 11 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 11-Resultados obtidos no *slump flow-test*.

<b>Parâmetros do método do cone de Abrams</b>	<b>Concreto fluido reforçado com fibras</b>	<b>Concreto fluido</b>
Espalhamento (mm)	748	745
Tempo de escoamento (s)	3,1	3,2
Índice de estabilidade visual	Alt. Estável	Estável

Fonte: Autora (2020).

De acordo com a NBR 15823-2 (ABNT, 2017), os intervalos recomendados são de diâmetro final entre 650 e 850 mm e um tempo para atingir o espalhamento de 50 cm (T500) entre 3 e 7 segundos, portanto, ambos concretos passaram no teste.

Ademais, as amostras estão na classe de espalhamento SF2 e na classe de viscosidade plástica aparente VS 2/ VF 2, portanto estão adequadas para diversos tipos de aplicações estruturais. Por fim, visualmente não apresentaram nenhum problema de exsudação ou segregação.

## 4.2. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

Os resultados obtidos para a caracterização do concreto estão na Tabela 12 e 13.

Tabela 12-Resultado da caracterização mecânica dos CPs de concreto fluido reforçado com fibras

<b>Corpo de prova</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>
1	31,69	4,81
2	33,80	4,23
3	37,31	4,49
4	38,77	4,22
Média	36,89	4,44
Desvio padrão	2,15	0,28
coef. De variação (%)	5,83	6,26

Fonte: Autora (2020).

Tabela 13-Resultado da caracterização mecânica dos CPs de concreto fluido

<b>Corpo de prova</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>
1	34,67	4,33
2	30,76	3,51
3	35,07	4,06
4	35,28	3,69
Média	33,94	3,69
Desvio padrão	2,14	0,37
coef. De variação (%)	6,30	9,49

Fonte: Autora (2020).

Os valores de resistência à compressão de modo geral superaram os 30 MPa. Comparado a resistência à compressão entre os corpos de prova de concreto fluido e concreto fluido reforçado com fibras, é perceptível uma diminuição média de aproximadamente 8% na resistência à compressão dos CPs sem adição de fibras de aço.

Já na resistência à tração, os CPs de concreto fluido apresentaram valores superiores a 3,5 MPa, já com adição de fibras os valores foram superiores a 4 MPa.

Como esperado, os corpos de prova sem adição de fibras apresentaram bipartição ou desintegração, ao contrário dos que possuem fibras, uma vez que as fibras proporcionaram aos CPs esta coesão.

### 4.3. RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO INDUTIVO

Para a avaliação da orientação média das fibras, foram extraídos dois testemunhos de cada vigota produzida. Portanto, foram obtidos a quantidade de testemunhos descritas na tabela 14.

Tabela 14- Quantidade de CP's

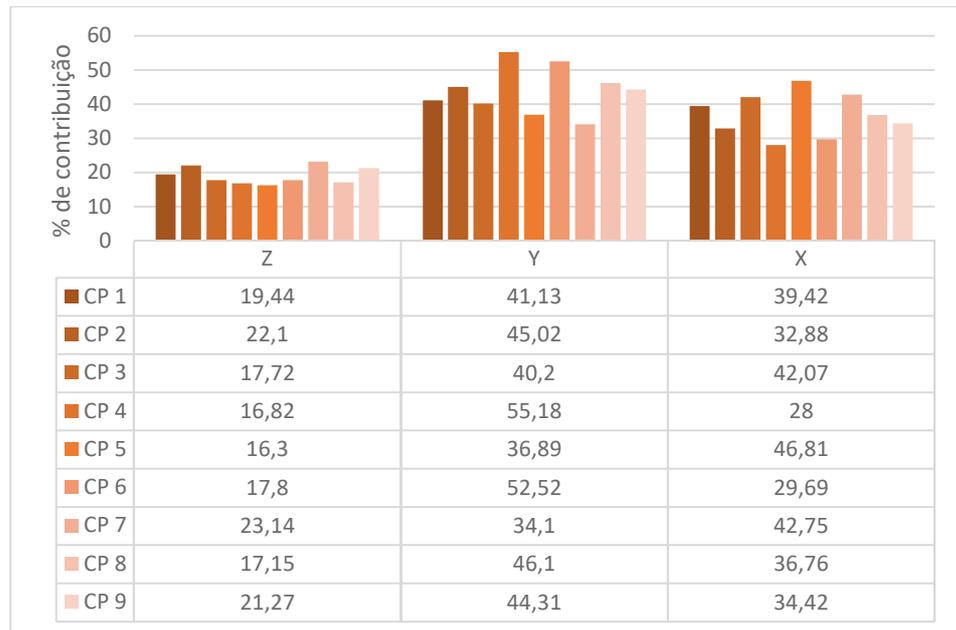
<b>Tipo do CP</b>	<b>Quantidade</b>
100% CRF	8
Dupla camada	8
Tripla camada	4

Fonte: Autora (2021).

Foi determinado o ângulo médio das fibras em relação aos três eixos coordenados, X, Y e Z, utilizando a Equação 3 e o método do tópico 3.10, em que todos os resultados estão expostos nos ANEXOS A, B1, B2 e B3. Esse parâmetro identifica a contribuição das fibras, pois caso estejam paralelas ao eixo analisado, a sua contribuição com a variação de indutância é máxima e orientadas em paralelo, mínimas. Portanto, quanto maior a contribuição da fibra no eixo, maior é a quantidade de fibras paralelas.

No ANEXO B1 constam as indutâncias medidas e ângulo médio das fibras, que gera o Gráfico 4 que apresenta a contribuição das fibras para os eixos coordenados dos testemunhos compostos com 100% de CAARFA. Com os dados do angulo médio fornecido, é possível concluir que as fibras se orientam perpendicularmente ao eixo Z. Um resultado satisfatório, pois as fibras tendem a se alinhar com o fluxo de lançamento. É possível visualizar também a tendência do alinhamento das fibras em torno de 45° no plano XY. Na análise do desvio padrão, houve um aumento nos eixos X e Y, mas ainda baixo, em torno de 6%, vide Tabela 15.

Gráfico 4- Contribuição de cada eixo para alinhamento das fibras com CPS 100% CRFA



Fonte: Autora (2021).

Tabela 15- Desvio padrão CPS 100% CRFA

	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão (%)</b>
<b>Z</b>	19,18	2,51
<b>Y</b>	43,94	6,84
<b>X</b>	36,98	6,31

Fonte: Autora (2021).

Desta forma é possível inferir que, mesmo sem a utilização de métodos de indução da orientação, a fluidez do concreto proporcionou o alinhamento das fibras de acordo com o fluxo de lançamento do concreto.

Com a tabela 16, também é possível inferir que as fibras foram distribuídas homogeneamente por toda a viga, pois o desvio padrão da massa de fibras dos CP's foi baixo.

Tabela 16-Determinação da massa média de fibras nos CP's 100% CRF.

<b>Massa média (kg)</b>	<b>Desvio padrão (%)</b>	<b>Coef. De variação (%)</b>
0,022	0,54	24,8

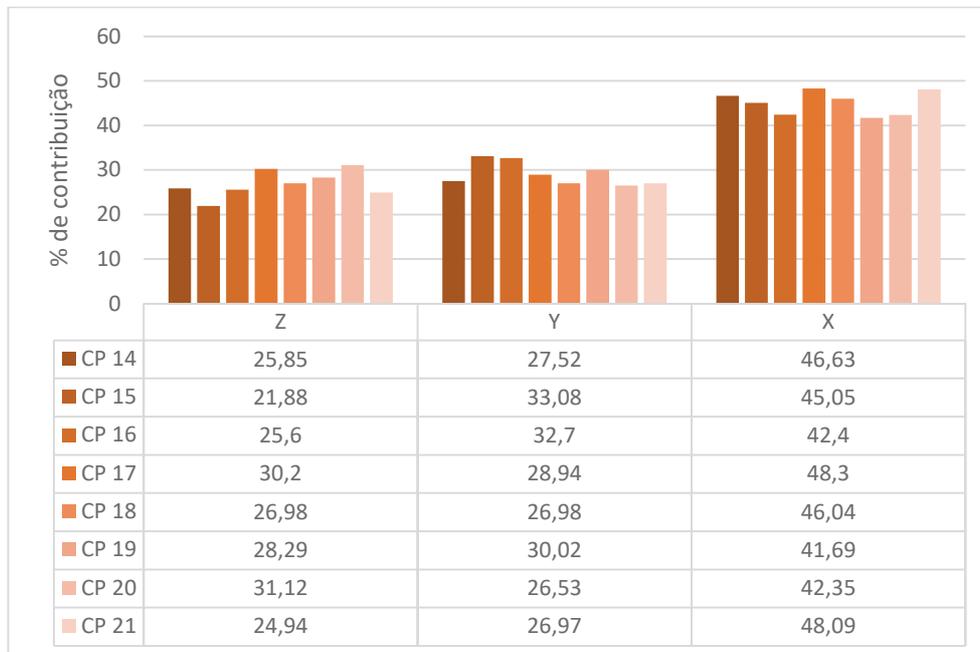
Fonte: Autora (2021).

Como o foco do trabalho são vigas com a proposta de múltiplas camadas, os corpos de

provas cúbicos das mesmas foram em maior escala, variando entre 1/3 (tripla camada) e 1/2 (dupla camada) de concreto reforçado com fibras de aço, para melhor comparação entre a orientação das fibras das vigas com 100% CRFA.

Com a análise dos CP's de dupla camada, foi possível observar que os resultados deram diferentes dos CP's 100% CRF no ANEXO B2 se tem os resultados da orientação média das fibras com a indutância medida, gerando o gráfico 5, que mostra um aumento da contribuição do eixo Z em relação ao corpo de prova 100% CRFA, e uma soberania com o eixo X. Isso tudo se dá ao fato que o eixo com maior comprimento ser o X, por isso as fibras tendem a se alinhar com ele. É possível afirmar também que houve uma variação pequena para cada CP, vide desvio padrão na tabela 17.

Gráfico 5-Contribuição de cada eixo para alinhamento das fibras com CPS dupla camada..



Fonte: Autora (2021).

Tabela 17-Desvio padrão para CPS dupla camada.

	Média	Desvio padrão (%)
Z	26,86	2,99
Y	29,09	2,61
X	45,07	2,64

Fonte: Autora (2021).

Para os resultados da massa de fibra do corpo de prova, foi utilizado a Equação 4 obtida

pelos corpos de prova de calibração, percebeu-se que a massa resultava semelhante ao corpo de prova de 100% concreto com fibras, isso se dá ao fato que a indutância dos corpos de provas serem na mesma ordem.

Inferindo-se que a equação 1 é linear e correlaciona a massa de fibras com a indutância aferida, englobando constantes como geometria da amostra, será considerado nesse trabalho que um corpo de prova metade concreto com fibras terá metade da massa obtida pelas equações. A tabela 18 fornece a indutância dos corpos de prova, sua massa pela equação 4 e por fim a massa considerada com o ajuste proposto.

Tabela 18-Ajuste na massa em corpos de prova 1/2 CRF.

<b>Le</b>	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Proporcional de massa</b>
0,0026	0,02240836	0,01120418
0,00231	0,019908966	0,009954483
0,0018	0,01551348	0,00775674
0,0026	0,02240836	0,01120418
0,00213	0,018357618	0,009178809
0,00196	0,016892456	0,008446228
0,00218	0,018788548	0,009394274
0,00196	0,016892456	0,008446228

Fonte: Autora (2022).

Levando a tabela 19, com a massa média dos CP's, seu desvio padrão e coeficiente de variação.

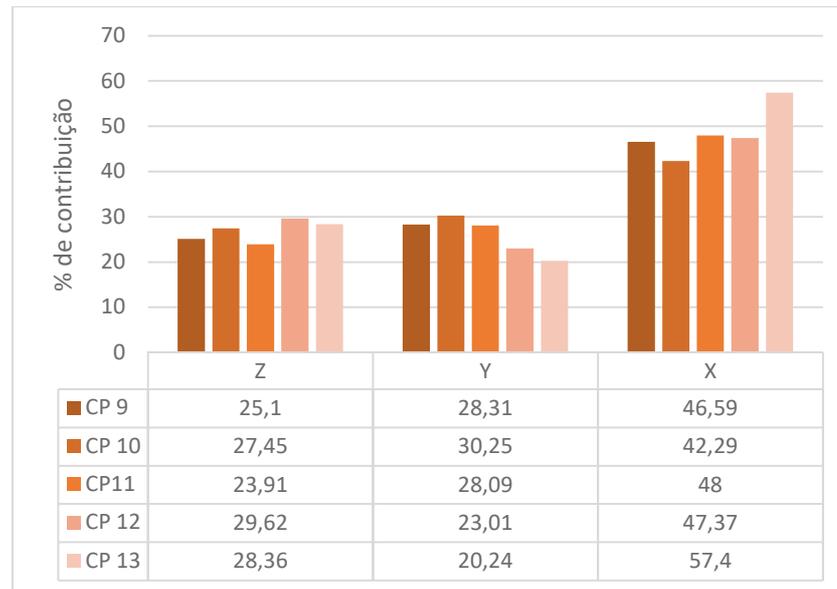
Tabela 19-Determinação da massa média de fibras nos CP's 1/2 CRF.

<b>Massa média (Kg)</b>	<b>Desvio padrão (%)</b>	<b>Coef. De variação (%)</b>
0,009	0,25	13

Fonte: Autora (2022).

Os últimos ensaios contemplaram os CP's de tripla camada, com indutância medida no ANEXO B3, com resultados esperados e diferentes dos CP'S 100% CRFA e de dupla camada. Como mostra o Gráfico 6.

Gráfico 6-Contribuição de cada eixo para alinhamento das fibras com CPS tripla camada



Fonte: Autora (2021).

Com estes resultados, temos a média da contribuição de cada eixo para os CPS de tripla camada, bem como seu desvio padrão que foi relativamente baixo, vide tabela 20.

Tabela 20-Desvio padrão CPS tripla camada

	Média	Desvio padrão (%)
Z	26,89	2,35
Y	25,98	4,18
X	48,33	5,54

Fonte: Autora (2022).

Essa predominância do eixo X mais evidente que nos de dupla camada se dá ao fato da sua profundidade (eixo Y) ter sido reduzida em  $2/3$ , ocasionando novamente na prática um alinhamento das fibras no eixo com maior tamanho, no caso o eixo X que não teve redução de tamanho.

O aumento na porcentagem de contribuição do eixo Z também aumentou, ocasionado por uma maior presença de efeito parede nestes CP's justamente por uma face estar muito mais próxima que a outra quando comparado aos CP's de 100% CRF e dupla camada.

Os resultados obtidos pela Equação 5 que fornece a massa do CP pela indutância medida em corpos de prova  $2/3$  CRF, destoou dos resultados esperados proporcionais a massa de fibras comparada com corpos de prova 100% CRF e  $1/2$  CRF, com consta na Tabela 21.

Tabela 21-Ajuste na massa em corpos de prova 2/3 CRF.

<b>Le</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>Proporcional de massa</b>
0,00235	0,4383905	0,146130167
0,00188	0,3447524	0,114917467
0,00175	0,3188525	0,106284167
0,00192	0,3527216	0,117573867

Fonte: Autora (2022).

Estes resultados devem ser descartados, pois provavelmente necessitam de algum ajuste de parâmetros nos corpos de prova de calibração e as retas de calibração geradas nesta etapa não identificados.

Com a análise dos resultados dos três tipos de vigas moldadas, é possível afirmar que em todas há uma preferência de orientação no plano XY, devido ao adensamento natural do concreto fluido. Ademais, as inclusões de camadas na viga tendem a orientar as fibras de uma maneira otimizada a resistir à esforços de tração, tendo a tripla camada uma orientação melhor que a dupla por possuir a menor seção longitudinal.

Por fim, a proposta de vigas em camadas se torna viável pelo seu viés econômico com uma vantagem da orientação otimizada das fibras no elemento estrutural.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para um conhecimento melhor do comportamento de CRFA, o método indutivo, proposto por Torrents et al (2012), foi utilizado por ser um método eficiente e não destrutivo para estudar a orientação das fibras dentro das vigas moldadas.

Como o concreto utilizado foi o fluido, as fibras possuem livre orientação no concreto, inferindo-se, assim, por meio dos ensaios que elas tendem a se orientar no plano XY, isso se dá ao adensamento que o concreto fluido atinge com seu próprio peso, se um concreto convencional fosse utilizado, as fibras não estariam tão bem orientadas.

Nas vigas de dupla e tripla camada, pode-se notar uma tendência das fibras em orientar-se no eixo com maior comprimento (eixo X), devido à redução de sua largura, comprimento antes que era assumido pela diagonal do corpo de prova, por isso as fibras orientavam-se em média a 45° do eixo X e Y.

Portanto, em vigas, a proposta de dupla e tripla camada é totalmente viável e econômica, pois as fibras possuem um comportamento previsto quando misturadas a um concreto fluido, inferindo maior resistência e tenacidade ao elemento estrutural. Partindo do pressuposto de

reforço somente na face que tem uma deficiência maior de tenacidade, pode-se garantir essa maior tenacidade com o CRFA, e onde não for necessário reforço das fibras, utiliza-se concreto convencional.

Expandindo o conceito de dupla camada para placas, tem-se também um conhecimento do alinhamento da fibra no plano XY, tornando-se uma ótima proposta para reforçar a parte tracionada.

A medição da orientação das fibras nas vigas teve resultados satisfatórios e com respaldo na literatura, sendo um grande aliado no controle de qualidade da peça, pois, a orientação se correlaciona em como a peça responderá quando solicitada, ótimo para comparar com ensaios normatizados pelas normas vigentes de concreto reforçado com fibras, a NBR 16939 (ABNT, 2021) e NBR 16940 (ABNT, 2021).

Para propostas de trabalhos futuros se faz interessante uma revisão dos corpos de prova de calibração de tripla camada, bem como seus parâmetros nas equações tradicionais, principalmente o que diz respeito a geometria da amostra.

No cenário atual, é necessário extrair o corpo de prova da viga modelo para a utilização do ensaio, seria interessante um equipamento que fizesse a varredura da viga pronta medindo sua indutância, para isso seria necessária uma abordagem física do eletromagnetismo e campos magnéticos, pois seria necessário a criação de um novo aparelho de medição de indutância. Esta possibilidade seria mais prática para ser aderida em obra, pois, seria possível a avaliação da viga que será utilizada.

Além disso, seria interessante aderir o ensaio indutivo à norma de controle de qualidade da peça de CRF, por ser um ensaio barato e de fácil execução, ele se relaciona diretamente ao comportamento da peça quando tracionada.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014

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 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência,** Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável. Parte 2 – Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16935: Projeto de**

**estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento.** Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16938: Concreto reforçado com fibras — Controle da qualidade.** Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16939: Concreto reforçado com fibras — Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento — Método de ensaio.** 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. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16941: Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa - Requisitos e métodos de ensaio,** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16942: Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio,** Rio de Janeiro, 2021.

AENOR. UNE 83515: **Hormigones com fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción.** Método Barcelona. Spain, 2010.

AFROUGHSAKET, Vahid. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *J Mater Sci*, Italy, 2016.

ALBERTI, M. G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J. C. **A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibers for concrete.** Elsevier Applied Science, London and New York, 2018.

BLANCO, A. et AL. **Constitutive model for fiber reinforced concrete based on the Barcelona test.** *Cement and Concrete Composites*, v. 54, p. 327-340. Oct. 2014.

CARREÑO, R. D. L. **Determinación de cuantía y orientación de fibras en HRFA por inducción magnética: mejora de un método existente e implantación para probetas cilíndricas**. Escola tecnica superior de Camins, Barcelona, 2013.

CAVALARO, S.; LÓPEZ, R.; TORRENTS, J.; AGUADO, A. **Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC**. Materials and Structures, 2014.

CAVALARO, S.; LÓPEZ, R.; TORRENTS, J.; AGUADO, A.; GARCÍA, P. **Assessment of fibre content and 3D profile in cylindrical SFRC specimens**. Materials and Structures, 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651: Test method for metallic fiber-reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)**, CEN, London, 2010. 15p

FERRARA, L.; PARK, Y. D.; SHAH, S. P. **A method for mix-design of fiberreinforced self-compacting concrete**. Cement and Concrete Research, v. 37, p. 957-971, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011b. 247p.

FIGUEIREDO, E. **Inspeção e diagnostico de estruturas de concreto com problemas de resistência, fissuras e deformações**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, p. 985–1015, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. **O concreto com reforço de macrofibras poliméricas**. Concreto & Construção. v.59, p.39 - 43, 2010.

FIGUEIREDO, A. D.; NETO, P. J. C.; FARIA, H. M. **A nova normalização brasileira sobre fibras de aço [the new brazilian standard on steel fibers]**. Concreto e Construção, v. 36, p. 67–76, 2008.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; LEITE, M. B. (2003) **Utilização de resíduos sólidos industriais e urbanos para produção de concretos**. Engenharia, Ciência e Tecnologia. v. 06, n. 3, p. 17 – 30, maio/junho – 2003.

GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. Pini, São Paulo, 2009.

GOMES, P. C. C. **Optimization and Characterization of High-Strength SelfCompacting Concrete**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de PósGraduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

JANSSON, A. 2011. **Effects of Steel Fibres on Cracking in Reinforced Concrete**. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of technology. Gothenburg, Sweden, 2011.

GOODMAN, J. W. **Introduction to Fourier optics**. [S.l.]: Roberts and Company Publishers, 2005. Citado na página 14.

LIAO, LIN; DE LA FUENTE, A.; CAVALARO, S.; AGUADO, A. **Complementary use of inductive test and bedding test for the characterization of SFRC**. 2013.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas**, 2004, 150 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade federal de Alagoas, 2004.

LÖFGREN, I. 2005. **Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction**. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. IBRACON, São Paulo, 2008

MELO, A. H. V.; BRITO, G. M. S.; ALMEIDA, L. T. G.; BARBOZA, A. S. R.; **Avaliação do Método Indutivo na determinação da quantidade e da orientação médias das fibras em**

CRFA. Revista Concreto e Construções, 2016.

MELO, A. H. V.; **Distribuição das fibras como parâmetro de influência para o comportamento de concretos com adição de fibras.** Relatório de Pesquisa de Iniciação Científica (PIBIC). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

MELO, A. H. V.; MONTE, R.; BARBOZA, A. S. R.; **Ensaio não destrutivo para determinar a quantidade e a orientação média das fibras em CRFA por meio da indução eletromagnética.** Revista Concreto e Construções, 2017.

NAAMAN, A.E. Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead. In: **RILEM Proceedings, PRO 15**, RILEM Publications SARL, p. 65-86, 2013.

NEVES, G. de A. (2002) **Reciclagem de Resíduos da Serragem de Granitos para uso como Matéria-Prima Cerâmica.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

NG TS, Htut TNS, Foster SJ. **Fracture of Steel Fibre Reinforced Concrete - the Unified Variable Engagement Model.** Uniciv Rep No R-420 2012:1–117.

NUNES, S. d. C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades.** 2001.

RILEM. **Casting of Self Compacting Concrete.** Report 35, Final report of RILEM TC 188-CSC. Skarendahl, A.; Billberg, P. (Ed.). Bagnaux, França: RILEM Publications S.A.R.L. 2006. p. 41.

PASA, V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via métodos dos elementos finitos.** Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Curso de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para a caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras.** 2012. Dissertação (Mestrado)

– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo, 2013.

SILVA, S. A. (1998) **Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granitos. Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solocimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES.

SÜSSEKIND, J.C. **Curso de Análise Estrutural – Vol. 1: Estruturas Isostáticas**, Editora Globo, Porto Alegre, 1981

TORRENTS, J.; BLANCO, A.; PAJUDAS, P.; AGUADO, A.; JUAN-GARCIA, P.; SÁNCHEZ-MORAGUES, M. **Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete**, *Materials and Structures*, 45 (2012) 1577-1592.

YURTSEVEN, A. E. **DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HYBRID FIBER REINFORCED CONCRETE**, "*Master thesis*". MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2004.

## ANEXOS

## ANEXO A: Indutância aferida nos CP's de calibração

	CP's 50% concreto com fibras						CP's 2/3 concreto com fibras					
	Espessura 1cm			Espessura 0,5 cm			Espessura 1cm			Espessura 0,5 cm		
	30°	45°	60°	30°	45°	60°	30°	45°	60°	30°	45°	60°
<b><math>\Delta L X</math></b>	1,0	0,6	0,4	1,6	1,4	0,8	2,5	2,7	1,4	2,2	2,6	2,9
<b><math>\Delta L Y</math></b>	0,3	0,5	0,8	0,6	1,2	1,6	0,5	0,8	0,6	0,8	1,4	1,7
<b><math>\Delta L Z</math></b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,4	0,6	0,3	0,1
<b>Soma</b>	1,3	1,1	1,2	2,2	2,6	2,4	3,3	3,7	2,4	3,6	4,3	4,7

Fonte: Autora (2021).

ANEXO B1: Dados sobre orientação média e ângulo medido das fibras nos corpos de prova 100% CRFA.

Eixo	CP 1				Eixo	CP 2				Eixo	CP 3			
	$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C
<b>Z</b>	0,60	0,28	73,80	0,19	<b>Z</b>	0,60	0,32	71,5	0,22	<b>Z</b>	0,50	0,24	75,9	0,18
<b>Y</b>	1,50	0,56	55,60	0,39	<b>Y</b>	1,00	0,47	61,8	0,33	<b>Y</b>	1,50	0,58	54,8	0,42
<b>X</b>	1,60	0,59	53,90	0,41	<b>X</b>	1,60	0,65	49,7	0,45	<b>X</b>	1,40	0,55	56,5	0,40
<b>Le</b>	1,58E-03				<b>Le</b>	1,37E-03				<b>Le</b>	1,45E-03			
<b>Massa (Kg)</b>	0,026				<b>Massa (Kg)</b>	0,021				<b>Massa (Kg)</b>	0,022			

Eixo	CP 4				Eixo	CP 5				Eixo	CP 6			
	$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C
<b>Z</b>	0,40	0,23	76,8	0,17	<b>Z</b>	0,60	0,23	76,8	0,16	<b>Z</b>	0,50	0,25	75,8	0,18
<b>Y</b>	0,70	0,38	67,6	0,28	<b>Y</b>	2,30	0,66	49,0	0,47	<b>Y</b>	0,90	0,41	65,8	0,30
<b>X</b>	1,90	0,75	41,4	0,55	<b>X</b>	1,60	0,52	58,9	0,37	<b>X</b>	2,10	0,73	43,5	0,53
<b>Le</b>	1,28E-03				<b>Le</b>	1,92E-03				<b>Le</b>	1,49E-03			
<b>Massa (Kg)</b>	0,019				<b>Massa (Kg)</b>	0,034				<b>Massa (Kg)</b>	0,024			

Eixo	CP 7				Eixo	CP 8				Eixo	CP 9			
	$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C
<b>Z</b>	0,50	0,29	73,4	0,23	<b>Z</b>	0,50	0,18	79,4	0,17	<b>Z</b>	0,60	0,29	72,9	0,21
<b>Y</b>	1,10	0,53	58,1	0,43	<b>Y</b>	1,10	0,39	66,8	0,37	<b>Y</b>	1,10	0,47	61,7	0,34
<b>X</b>	0,80	0,42	65,1	0,34	<b>X</b>	1,50	0,49	60,4	0,46	<b>X</b>	1,60	0,61	52,3	0,44
<b>Le</b>	1,02E-03				<b>Le</b>	1,32E-03				<b>Le</b>	1,41E-03			
<b>Massa (Kg)</b>	0,012				<b>Massa (Kg)</b>	0,019				<b>Massa (Kg)</b>	0,022			

Fonte: Autora (2020).

ANEXO B2: Dados sobre orientação média e ângulo medido das fibras nos corpos de prova  
1/2 CRFA.

Eixo	CP 1				Eixo	CP 2				Eixo	CP 3			
	$\Delta L$ (mH)	H	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C
Z	1,20	0,37	68,2	0,26	Z	1,00	0,31	71,7	0,22	Z	1,00	0,39	66,8	0,26
Y	1,30	0,40	66,7	0,28	Y	1,70	0,48	61,6	0,33	Y	1,40	0,50	59,8	0,33
X	2,80	0,67	47,9	0,47	X	2,70	0,65	49,7	0,45	X	2,00	0,64	50,4	0,42
Le	2,26E-03				Le	2,31E-03				Le	1,88E-03			

Eixo	CP 4				Eixo	CP 5				Eixo	CP 6			
	$\Delta L$ (mH)	H	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C
Z	1,50	0,53	58,0	0,30	Z	1,20	0,39	67,1	0,27	Z	1,20	0,41	65,5	0,28
Y	1,40	0,51	59,6	0,29	Y	1,20	0,39	67,1	0,27	Y	1,30	0,44	63,9	0,30
X	2,40	0,72	44,1	0,41	X	2,60	0,66	48,4	0,46	X	2,10	0,61	52,4	0,42
Le	2,26E-03				Le	2,13E-03				Le	1,96E-03			

Eixo	CP 7				Eixo	CP 8			
	$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C
Z	1,5	0,50	59,8	0,31	Z	1,0	0,34	70,4	0,25
Y	1,2	0,43	64,6	0,27	Y	1,1	0,36	68,7	0,27
X	2,4	0,68	46,9	0,42	X	2,5	0,65	49,7	0,48
Le	2,18E-03				Le	1,96E-03			

Fonte: Autora (2020).

ANEXO B3: Dados sobre orientação média e ângulo medido das fibras nos corpos de prova 1/3 CRFA.

<b>Eixo CP 10</b>					<b>Eixo CP 11</b>				
	$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	H	$\alpha(^{\circ})$	C
<b>Z</b>	1,20	0,36	68,90	0,25	<b>Z</b>	0,90	0,34	70,00	0,24
<b>Y</b>	1,40	0,41	0,41	0,28	<b>Y</b>	1,10	0,40	66,30	0,28
<b>X</b>	2,90	0,67	48,00	0,47	<b>X</b>	2,40	0,68	46,90	0,48
<b>Le</b>	2,35E-03				<b>Le</b>	1,88E-03			
<b>Eixo CP 12</b>					<b>Eixo CP 13</b>				
	$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C		$\Delta L$ (mH)	$\eta$	$\alpha(^{\circ})$	C
<b>Z</b>	1,1	0,41	65,90	0,30	<b>Z</b>	1,00	0,37	68,50	0,26
<b>Y</b>	0,8	0,32	71,60	0,23	<b>Y</b>	1,10	0,39	66,80	0,27
<b>X</b>	2,2	0,65	49,10	0,47	<b>X</b>	2,40	0,67	47,60	0,47
<b>Le</b>	1,75E-03				<b>Le</b>	1,92E-03			

Fonte: Autora (2020).