

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

DANILO JOSÉ PEREIRA FREITAS

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO
REFORÇADO COM FIBRAS MOLDADOS EM CAMADAS**

Maceió/AL
2020

DANILO JOSÉ PEREIRA FREITAS

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO
REFORÇADO COM FIBRAS MOLDADOS EM CAMADAS**

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.^a Dr.^a Aline da Silva Ramos Barboza

Maceió/AL
2020

Autor: Danilo José Pereira Freitas

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO
REFORÇADO COM FIBRAS MOLDADOS EM CAMADAS**

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.

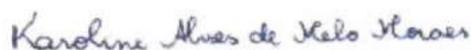
Aprovada em: 05/01/2021.

Orientador:

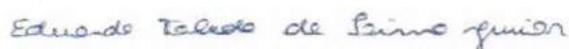


Prof.^a Dr.^a Aline da Silva Ramos Barboza (Orientadora)
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Banca examinadora:



Prof.^a Dr.^a Karoline Melo (Examinadora interna)
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)



Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Junior (Examinador interno)
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

À Deus, aos meus pais, à minha irmã e aos meus avós, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial a minha mãe, Danyela Freitas, meu pai, Luciano Raposo e minha irmã, Anadélia Freitas, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida, principalmente durante minha graduação, e pela compreensão nos momentos de estresse.

Aos meus avós, José Barros, Ana Maria, Olival Freitas e Maria Adélia, pelo apoio e pelo carinho.

A Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e a todos os professores que tive a oportunidade e o prazer de aprender e crescer. Todos contribuíram de alguma maneira para o desenvolvimento deste trabalho, sem a dedicação e esforço deles, nada disso seria possível.

À Prof.^a Dr.^a Aline da Silva Ramos Barboza, minha orientadora durante todo o meu período de graduação em Maceió, minha mais sincera gratidão aos momentos de ensinamentos, puxões de orelha, críticas construtivas e conselhos, possibilitando a busca contínua por novos conhecimentos, sempre me incentivando a vencer novos limites. Meus agradecimentos, a todo apoio durante a graduação, ensinamentos e conselhos que levarei para a minha vida.

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

Aos amigos que fiz dentro e fora da graduação, em Delmiro Gouveia e em Maceió, obrigado pelo apoio e ao carinho durante toda a minha trajetória. Ao “Fiber Team”, Kaio Oliveira, Wanderson Bruno, Isadora Queiroz, Gabriela Dias, Arthur Melo, Daniel Andrade, que estiveram presentes em todos os momentos de correria dentro do laboratório, e por todo conhecimento trocado. Aos amigos durante a graduação em Delmiro Gouveia, Renan Pires, Bárbara Simionatto, Caio Lima, Italo Vinícius, Luis Costa, Luana Kívia e Fabrício Miranda, a todos bons momentos durante meu percurso em Delmiro. Aos amigos durante a graduação em Maceió, em especial ao grupo do “BBfest Raíz”, Luísa Vitória, Lucas Santos, Bruno Moura, Ewerton Lopes, Kaio Nóbrega, Larah Maria, Leonardo Fortes, Arthur Teodozio, Jordson Danilo e Gabriel Torres, por todos os bons momentos e pela amizade. Aos amigos do ensino médio, Felipe Maia, Thiago Calheiros, Dinario Lemos, Igor Seabra e Rodrigo Duarte, sempre presentes ao longo da minha trajetória.

“O sucesso não tem a ver com o lugar de onde você veio, e sim com a confiança que você tem e o esforço que você está disposto a investir”

Michelle Obama

RESUMO

FREITAS, D.J.P. Comportamento estrutural de elementos de concreto reforçado com fibras moldados em camadas. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

A adição de fibras de aço no concreto, principalmente no Brasil, possui como um dos principais limitantes o seu alto custo, inviabilizando a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) no campo prático, como por exemplo em pavimentos industriais e em revestimento de túneis. Diante da dificuldade de garantir a competitividade do CRFA no mercado da construção civil, esse trabalho apresenta uma análise sobre peças de dupla camada de concreto, em que é aplicada uma camada de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) e outra camada de concreto autoadensável (CAA), utilizando as fibras de aço nas regiões de maior solicitação estrutural, diminuindo assim o seu custo de produção. Dentro desse contexto, é necessário validar as peças de dupla camada, logo este trabalho realizou o ensaio de flexão à três pontos preconizado pela EN 14651 (2007), que possibilitou obter a resistência à tração por flexão, bem como a resistência residual. Além da validação da performance obtida pelas peças de dupla camada, foi necessário avaliar as orientações das fibras, já que esse parâmetro é de grande importância para o controle de qualidade das peças de CRFA. Logo, utiliza-se o método proposto por Torrents et al. (2012) para determinação da orientação das fibras das peças analisadas neste trabalho. A partir da análise dos resultados dos ensaios, observou-se que as peças de dupla camada atenderam aos critérios de garantia de bom desempenho estabelecidos pelo FIB Model Code (2013), além de que, em sua moldagem, ocorreu a mudança da orientação preferencial das fibras, o que interferiu na resistência pós-fissuração da peça.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras. Fibras metálicas. Moldagem de concreto em camadas. Ensaio destrutivo e não-destrutivo.

ABSTRACT

FREITAS, D.J.P. Structural behaviour of fiber-reinforced concrete elements moulded in layers. 2021. Course Completion (Undergraduate - Civil Engineering) - Federal University of Alagoas, Maceió.

The addition of steel fibers to concrete, mainly in Brazil, presents as main limitation its high cost, making it unavailable for application of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in the practical field, for example on industrial floors and tunnel lining. In view of the difficulty of ensuring competitiveness of SFRC in the civil construction market, this work presents an analysis on double layer concrete elements, combining a layer of SFRC and another conventional concrete layer, using steel fibers in the regions of greater structural demand, thereby reducing its production cost. In this context, it is necessary to validate the double layer pieces, so this work aims to perform the three-point bending test recommended by EN 14651 (2007), which allows to obtain flexural tensile strength as well as residual strength. Beyond validation performance obtained for the double layer elements, it is necessary to evaluate the fiber orientations, since this parameter is of great importance for the control quality of SFRC parts. Thus, this work applies the method proposed by Torrents et al. (2012) to determine the orientation of the fibers of the elements analyzed in this work. From the analysis of the results of the tests, it was observed that pieces of double layer met the performance criteria established by FIB Model Code (2013), besides the change on preferential orientation of the fibers due to molding process, that interfered on the post cracking resistance of double layer materials.

Keywords: Fiber reinforced concrete. Steel fiber. Concrete moulding in layers. Destructive and non-destructive testing.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Ilustração da transferência de tensões entre a matriz e as fibras	22
2.2	Processo de arrancamento das fibras.....	23
2.3	Posicionamento da área de influencia.....	29
2.4	Ensaio de três pontos preconizado pela EN 14651	29
2.5	Posicionamento das cantoneiras e transdutores LVDTs na haste de suporte	31
2.6	Montagem das bobinas e medidor LCR para a realização do ensaio in- dutivo	34
2.7	Na esquerda é apresentado o processo de amolecimento do CRF, já na direita o de endurecimento do CRF	35
3.1	Fluxograma das etapas realizadas no trabalho	36
3.2	Curva granulométrica do agregado miúdo	38
3.3	Curva granulométrica do agregado graúdo	39
3.4	Fibras utilizadas no trabalho	41
3.5	Dimensão das formas prismáticas de madeira utilizadas na moldagem do concreto	44
3.6	Posicionamento da placa para o lançamento do concreto com e sem fi- bras de aço	44
3.7	Formas preenchidas com o concreto fresco	45
3.8	Materiais utilizados para a execução do ensaio de espalhamento	46
3.9	(a) Ensaio de compressão simples e (b) ensaio de tração por compressão diametral	47
3.10	(a) Ilustração do entalhe no corpo de prova com 100% de CAARFA e (b) Ilustração do entalhe no corpo de prova moldada em camadas	48
3.11	Corpo de prova após a aplicação do entalhe	48
3.12	Transdutor (LVDT).....	49
3.13	Posicionamento dos Transdutores (LVDT) na base magnética	50
3.14	Spider 8®	50
3.15	Calibração do transdutor com auxílio da base magnética	51
3.16	Posicionamento do corpo de prova para à EN 14651 (2007)	52
3.17	(a) e (b) montagem do ensaio indutivo	53
3.18	Extração dos corpos de prova para o método indutivo	54
3.19	Posicionamento dos eixos durante o lançamento do concreto	55
3.20	Posicionamento dos eixos após a rotação de 90°	56
4.1	Detalhes do espalhamento do CAARFA.....	58
4.2	Gráfico de calibração do LVDT esquerdo.....	60

4.3	Gráfico de calibração do LVDT direito	61
4.4	Curva de carga por abertura de fissura dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA: CP 1 (a); CP 2 (b); CP 3 (c); CP 4 (d)	63
4.5	Curva média de carga por abertura de fissura dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA	64
4.6	Curva de carga por abertura de fissura dos corpos de prova moldado em camadas (dupla camada): CP 1 (a); CP 2 (b); CP 3 (c); CP 4 (d)	65
4.7	Curva média de carga por abertura de fissura dos corpos de prova moldados em camadas (dupla camada)	66
4.8	Curvas médias de carga por abertura de fissura dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA e da dupla camada	67
4.9	Contribuição por eixo de alinhamento das fibras pelas amostras de 100% de CAARFA	69
4.10	Contribuição por eixo de alinhamento das fibras pelas amostras moldadas em camadas	69

LISTA DE TABELAS

1.1	Resumo de alguns trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa em CRF da UFAL dos últimos 3 anos.....	18
2.1	Classificação das fibras de aço para reforço de concreto	25
2.2	Especificação das fibras metálicas	25

LISTA DE QUADROS

2.1	Classes para as resistências residuais $\frac{f_{R,3K}}{f_{R,1K}}$, obtidas pelo ensaio EN 14651 (2007)	31
3.1	Características do agregado miúdo.....	38
3.2	Características do agregado graúdo.....	39
3.3	Características do RBMG	40
3.4	Características do superplastificante fornecidas pelo fabricante.....	41
3.5	Características das fibras de aço	42
3.6	Dosagem do Concreto	43
4.1	Resultados no estado fresco	57
4.2	Resultados da caracterização mecânica dos CPs de CAARFA	58
4.3	Resultados da caracterização mecânica dos CPs de CAA.....	59
4.4	Dados de calibração do LVDT da esquerda	60
4.5	Dados de calibração do LVDT da direita	61
4.6	Informações dos corpos de prova analisados	62
4.7	Resultados obtidos a partir das curvas de carga por abertura de fissura das 4 amostras compostas por 100% de CAARFA	64
4.8	Resultados obtidos a partir das curvas de abertura de fissura das 4 amostras moldadas em camadas (dupla camada)	66
4.9	Comparação do desempenho dos corpos de prova compostos com 100% de CAARFA e de dupla camada submetidos a EN 14651 (2007)	68
4.10	Contribuição média das fibras nas amostras compostas por 100% de CAARFA.....	70
4.11	Contribuição média das fibras nas amostras moldadas em camadas	70
4.12	Análise dos resultados dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA.....	71
4.13	Análise dos resultados dos corpos de prova moldados em camadas	71
4.14	Resultados dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA	72
4.15	Resultados dos corpos de prova moldados em camadas	73
5.1	Dados dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA	81
5.2	Dados dos corpos de prova moldados em camadas	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Concreto Autoadensável
CID	Correlação Digital de Imagens
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
CAARFA	Concreto Auto Adensável Reforçado com Fibras de Aço
CTEC	Centro de Tecnologia
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
FIB	Fédération Internationale du béton
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais
LOP	Limite de Proporcionalidade
LVDT	Transdutor de Deslocamento Variável Linear
NBR	Norma Brasileira
RBMG	Resíduo de Beneficiamento do Mármore e Granito
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	Deslocamento Axial
a/c	Relação água/cimento
b	Largura do corpo de prova
f_{ctm}	Resistência à tração do concreto
$f_{R,j}$	Resistência residual à flexão correspondente à abertura de fissura j
f_{Lk}	Resistência nominal característica do concreto
F_j	Carga correspondente à abertura de fissura j
h_{sp}	Distância entre o topo do entalhe e a face superior do corpo de prova
l	Vão de ensaio
μ	Permeabilidade magnética do meio
k	Coefficiente de geometria
n_i	Número de orientação das fibras
C_i	Contribuição relativa das fibras
α_i	Ângulo formado entre a orientação média das fibras e o eixo i
L_i	Contribuição relativa das fibras
L_e	Indutância equivalente em relação ao eixo i
$B_{V,I}$	Parâmetro que correlaciona a geometria da bobina e da amostra
γ	Fator de aspecto da fibra de aço utilizada
ϑ	Fator de correlação da orientação das fibras

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Comentários Iniciais	16
1.2	Objetivo Geral	18
1.3	Justificativa Do Trabalho	18
1.4	Delimitação Da Pesquisa.....	19
1.5	Estrutura Do Trabalho	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Concreto Reforçado Com Fibras (CRF)	21
2.1.1	Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA)	24
2.1.2	Concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA)...	27
2.2	Métodos De Ensaio Para Caracterização Do Concreto Reforçado Com Fibras De Aço (CRFA)	28
2.2.1	Ensaio de flexão a três pontos (EN 14651, 2007)	28
2.2.2	Método indutivo.....	32
2.3	Orientação Preferencial Das Fibras	34
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	36
3.1	Caracterização Dos Materiais	37
3.1.1	Cimento	37
3.1.2	Agregado miúdo.....	37
3.1.3	Agregado graúdo.....	38
3.1.4	Água.....	39
3.1.5	Adição mineral.....	39
3.1.6	Aditivo superplastificante.....	40
3.1.7	Fibras de aço	41
3.2	Produção, Moldagem e Cura Dos Concretos	42
3.3	Ensaio No Estado Fresco	45
3.4	Ensaio De Caracterização Mecânica	46
3.5	Preparação Das Amostras	47
3.6	Aplicação Do Ensaio Normatizado Pela EN 14651 (2007)	48
3.7	Aplicação Do Método Indutivo	53
3.7.1	Extração do corpo de prova	54
3.7.2	Orientação média das fibras	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57

4.1	Caracterização Das Amostras No Estado Fresco	57
4.2	Caracterização Mecânica Das Amostras	58
4.3	Calibração Dos LVDT's.....	59
4.4	Resultados Obtidos Com o Ensaio Da Norma EN 14651 (2007)	62
4.5	Resultados Obtidos Pelo Método Indutivo.....	68
4.6	Análise De Resultados	71
4.6.1	Análise dos dados obtidos pela EN 14651 (2007)	71
4.6.2	Análise dos resultados obtidos pela EN 14651 (2007) e pelo método indutivo.....	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1	Conclusões	74
5.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	75
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comentários Iniciais

O concreto é um dos compósitos mais utilizados na construção civil, porém quando submetido a esforços de tração apresenta resistência bem inferior à resistência à compressão, cuja relação está entre 7% e 11% (MEHTA; MONTEIRO, 2008), comportando-se de maneira não favorável devido à sua incapacidade de impedir o surgimento de fissuras e microfissuras.

A necessidade de aprimorar e inovar os materiais utilizados na construção civil é constante, portanto, novas formas de produções de concretos são necessárias para a competitividade no campo prático. Como exemplo, tem-se a adição de fibras de aço que representa uma alternativa em relação ao uso convencional do concreto, pois permite uma melhor distribuição das tensões principalmente entre as fissuras, atuando como pontes de transferência de tensões, diminuindo a velocidade de ruptura (PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013).

No entanto a adição de fibras de aço apresenta prejuízos à plasticidade e trabalhabilidade do concreto, logo uma das soluções encontradas é a adição de superplastificante para a produção de concreto de matriz fluida, como o concreto autoadensável (CAA). Também é bastante comum, a utilização de adições minerais de granulometria muito finas, como o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) (LISBÔA et al., 2004). O RBMG é adicionado com o propósito de obter a coesão e a viscosidade necessárias no concreto, evitando segregações (AGRA, 2017).

O concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) é um material estrutural relativamente econômico e útil em diversas aplicações, como em revestimentos de túneis e pisos (FIGUEIREDO, 2011), além de proporcionar às fibras uma orientação preferencial durante o seu lançamento. Porém, um dos grandes problemas do CAARFA é o maior custo em relação a outras alternativas, devido ao valor das fibras de aço ainda ser bastante elevadas no Brasil, já que grande parte é obtida pela importação do material.

Ao longo dos últimos anos ocorreu em âmbito mundial um crescimento da pesquisa e desenvolvimento do concreto reforçado com fibras (CRF), logo surgiram diversos códigos internacionais para o seu dimensionamento estrutural. Porém no Brasil, devido à falta de normatização local referente ao CRF, o dimensionamento desse material é baseado em documentos estrangeiros, como o FIB Model Code (2013).

O FIB Model Code (2013) é um código em que estão representados os aspectos de dimensionamento para a concepção de um projeto estrutural com elementos de CRF. Esse código é baseado no estudo da resistência residual do CRF, em que são observadas, a partir de ensaios à flexão, as aberturas de fissuras na parte tracionada do concreto. Porém, o FIB Model Code (2013) não leva em consideração a orientação das

fibras como um fator que interfere na força resultante na região tracionada da viga (LIMA, 2020).

Diante disso, sabendo a significativa mudança que a orientação das fibras pode representar para o CRFA, esse trabalho utiliza o método não destrutivo, denominado de método indutivo (TORRENTS et al., 2012), que possibilita determinar a orientação preferencial das fibras.

A partir dos ensaios citados anteriormente, esse trabalho apresenta uma análise de vigas de dupla camada e de vigas compostas por 100% de CAARFA. Como a orientação das fibras apresenta uma grande interferência no desempenho mecânico das peças de dupla camada ou de CAARFA, será realizada nesse trabalho uma análise sobre peças moldadas em camadas a partir dos dados obtidos no ensaio preconizado pela EN 14651 (2007) e no ensaio indutivo.

É importante destacar também que foram desenvolvidas nos últimos anos no grupo de pesquisa em CRF no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) na Universidade Federal de Alagoas (UFAL) diversas pesquisas relacionadas ao assunto. Esse estudo do CRF possibilitou uma ampla gama de trabalhos publicados que contribuiu com a elaboração dessa monografia. Esse trabalho se soma aos estudos realizados anteriormente pelo grupo, com a produção e análise das vigas moldadas em camadas até então não exploradas pelos trabalhos anteriores. Portanto, na **Tabela 1.1** demonstram-se em ordem cronológica os trabalhos desenvolvidos pelo grupo que diz a respeito ao CRF.

Tabela 1.1: Resumo de alguns trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa em CRF da UFAL dos últimos 3 anos

Ano	Autor	Observações
2017	(AGRA, 2017)	Verificou-se a influencia de diferentes tipos de fibras (borracha, polipropileno e aço) no comportamento mecânico, por meio de ensaio a flexão de vigas de concreto fluido.
2018	(SOUZA, 2018)	Correlacionou-se os resultados obtidos pela EN 14651 (2007) com o ensaio Barcelona, afim de avaliar a resistência residual à tração utilizando corpos de prova cilíndricos.
2018	(MELO, 2018)	Avaliou-se a distribuição e a contribuição do alinhamento das fibras no comportamento pós-fissuração do compósito, por meio do ensaio indutivo e do ensaio Barcelona.
2019	(OLIVEIRA, 2019)	Aplicou-se a correlação digital de imagens (CID) ao ensaio normatizado pela EN 14651 (2007) afim de fazer um estudo comparativo entre a abertura de fissura com a abertura obtidas através das imagens.
2020	(LIMA, 2020)	Apresentou-se um modelo de cálculo ao CRF, a partir da teoria de flexão em vigas, utilizando a EN 14651 (2007).
2020	(CARMO, 2020)	Aplicou-se a CID e a técnica óptico-numérica para a análise estrutural de elementos de CRF.

Fonte: Autor

1.2 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estrutural de vigas moldadas em duas camadas, sendo uma de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) e outra de concreto autoadensável (CAA), afim de verificar a sua viabilidade de aplicação.

1.3 Justificativa Do Trabalho

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, come-

quando 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, consequentemente ao longo dos anos o seu maior uso ocasionou a queda do seu custo unitário. No Brasil, devido à falta de normatizações locais e consequentemente de obras com utilização do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), o valor unitário das fibras metálicas ainda é bem elevado devido à necessidade de importar esses materiais de outros países. Consequentemente, utilizam-se no Brasil para o dimensionamento estrutural códigos internacionais como o FIB Model Code (2013).

Durante a produção do CRFA as fibras de aço apresentam papel fundamental na definição do custo (FIGUEIREDO, 2011). Logo, umas das maiores dificuldades da aplicação do CRFA é a falta de competitividade no mercado da construção civil em relação a outras alternativas. Portanto, foram produzidos em trabalhos anteriores vigas moldadas em camadas de CRFA e concreto convencional, denominado pelo autor de dupla camada (FREITAS et al., 2019). Para que as vigas de dupla camada pudessem ser utilizadas como elemento estrutural, era necessário atingir um desempenho em seu estado limite de serviço (ELS) e no estado limite de utilização (ELU), portanto, para verificação de sua capacidade estrutural, foi escolhido o código estabelecido pelo FIB Model Code (2013). Como apresentado em trabalhos anteriores, a dupla camada atendeu os requisitos propostos, logo seu ELS e ELU foram satisfatórios para substituição total ou parcial de armaduras metálicas no concreto.

Devido à carência de normas vigentes em nível nacional, esse trabalho propõe colaborar com o aperfeiçoamento do CRFA no Brasil, por meio de uma análise mais abrangente da dupla camada, avaliada pelo ensaio de flexão preconizado pela EN 14651 (2007) e também pelo método indutivo. A partir disso, ajudar no desenvolvimento de uma norma nacional com a utilização de vigas em camadas, afim de se obter um material confiável e competitivo no campo prático.

1.4 Delimitação Da Pesquisa

O trabalho é limitado à elaboração de uma análise das peças moldadas em camadas, por meio da avaliação do ensaio preconizado pela EN 14651 (2007) e também pelo ensaio indutivo (TORRENTS et al., 2012). O trabalho não apresentará a metodologia para obtenção da dosagem do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA), pois a dosagem já foi determinada em trabalhos anteriores no grupo de pesquisa de concreto reforçado com fibras (CRF) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) (MELO, 2018).

Nas moldagens foram utilizadas fibras de aço de classe I e do tipo A, conforme a ABNT NBR 15530 (ABNT, 2007), com fator de forma 80. Conforme especificado pela EN 14651 (2007), foram produzidos somente corpos de prova prismáticos de dimensão

15x15x55 cm^3 . Para a realização do método indutivo proposto por Torrents et al. (2012) foram extraídos corpos de prova após a ruptura dos testemunhos prismáticos da EN 14651 (2007). A avaliação dos ensaios é restringida pela validação dos testemunhos, por meio dos critérios estabelecidos pelo FIB Model Code (2013), não sendo utilizadas análises de elementos estruturais em funcionamento.

1.5 Estrutura Do Trabalho

Este trabalho inicia-se com a apresentação do tema de estudo, seu objetivo, sua justificativa e a delimitação do trabalho. No segundo capítulo será realizada uma revisão bibliográfica detalhada a respeito do concreto reforçado com fibras (CRF), do ensaio a flexão a três pontos (EN 14651, 2007), do FIB Model Code (2013), do método indutivo e da orientação preferencial das fibras. Na sequência, o capítulo 3 contém todo o programa experimental utilizado no desenvolvimento deste trabalho, visando alcançar os objetivos estabelecidos. Os resultados e discussões estão expostos no capítulo 4. Por fim, no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo atual trará alguns conceitos importantes do concreto reforçado com fibras (CRF), bem como um aprofundamento das referências do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) e do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA). A partir do entendimento do compósito, serão apresentados os ensaios de caracterização do CRFA, sendo eles o ensaio destrutivo de flexão de três pontos (EN 14651, 2007), como também o ensaio não-destrutivo proposto por Torrents et al. (2012), denominado método indutivo. Por fim será apresentado um pouco das referências bibliográficas que tratam da influência da orientação das fibras sobre o desempenho mecânico do material compósito.

2.1 Concreto Reforçado Com Fibras (CRF)

As pesquisas relacionadas ao concreto reforçado com fibras (CRF) foram iniciadas nos Estados Unidos da América no final da década de 1950 pela Associação de Cimento Portland (PCA) (PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013). Durante a segunda metade do século XX os estudos referentes ao CRF obtiveram um grande impulso principalmente na Europa e nos Estados Unidos da América (NAAMAN; SHAH, 1975). Porém, atualmente no Brasil, ainda existe uma carência no embasamento técnico devido à falta de normas vigentes na região a respeito ao assunto. Logo, as aplicações locais do CRF ainda são bastante concentradas no campo prático, em: pisos de pavimentos industriais, concretos projetados e pré-moldados. No entanto essa centralização do uso do CRF apresenta uma tendência de alteração no futuro devido à necessidade de obras de saneamento e de sistemas de transportes de massa nos grandes centros urbanos (FIGUEIREDO, 2011).

Dado o contexto histórico e regional do CRF, é importante enfatizar as características do concreto simples, material que apresenta baixa capacidade de deformação antes de atingir a ruptura quando submetido aos esforços de tração. Essa incapacidade de restringir a ruptura ocorre devido à falta de capacidade do concreto convencional de impedir a formação de fissuras e microfissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Devido às limitações encontradas no concreto simples, ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas para suprir as carências encontradas, logo surgiu o concreto armado e mais recentemente como apresentado acima o CRF.

Uma das formas de minimizar esses efeitos de fissuração e conseqüentemente a ruptura do concreto decorrentes dos esforços de tração é com a adição de fibras. Logo o desenvolvimento das fibras foi fundamentais para o avanço tecnológico do CRF (FIGUEIREDO, 2011). As fibras possuem o comprimento bem maior que a dimensão transversal podendo ser de diversos materiais, como: vidro, aço, sintéticas e naturais. O principal objetivo delas é transferir as tensões solicitantes por meio de microfissuras

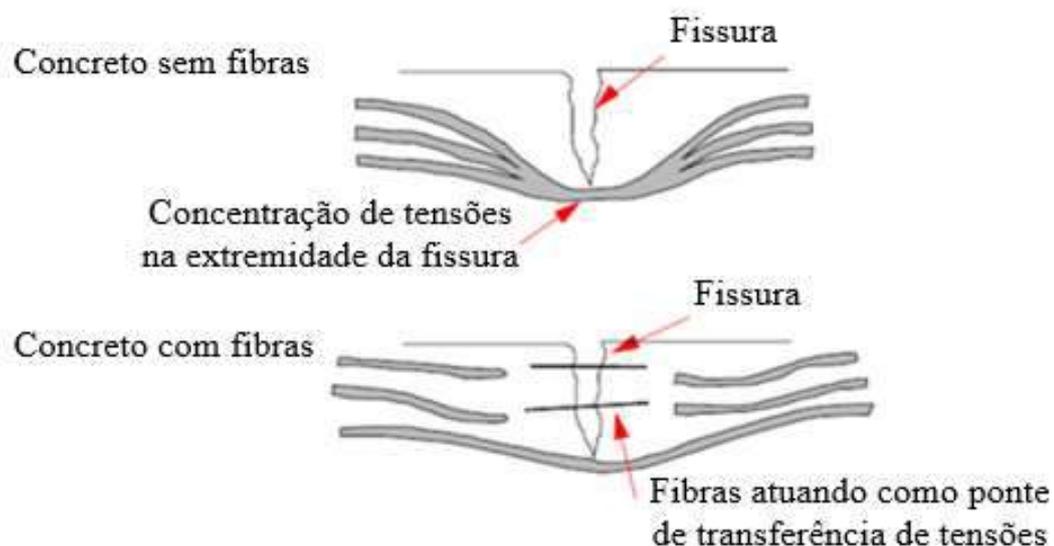
internas, logo proporcionar ao concreto uma maior durabilidade (LÖFGREN, 2005).

A adição de fibras deve ocorrer de maneira controlada, já que elas comprometem a trabalhabilidade do compósito. O elevado teor de fibras pode ocasionar a segregação delas, bem como o aparecimento de ouriços nos elementos de concreto, podendo provocar o surgimento de pontos fracos na região em que o ouriço está localizado (FIGUEIREDO, 2005), além do aumento da porosidade do concreto e conseqüentemente a diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade (JAMES, 1996). Porém, quando o teor de fibras é menor do que o recomendado, as resistências de tração e compressão são pouco significativas (TANESI, 1999).

Uma das principais funções das fibras é na fase pós-fissuração do concreto, na qual dificulta a propagação de fissuras. Porém a função mais importante é proporcionar um aumento da tenacidade do compósito (HANNANT, 1994). Essa propriedade do CRF ocorre devido à capacidade das fibras de interromper a propagação de fissuras, atuando como ponte de transferência de tensão. Logo, mesmo após a fissuração do CRF, o compósito ainda apresenta resistência residual a esforços aplicados, impedindo o surgimento de uma ruptura brusca (LÖFGREN, 2005).

Após a fissuração da matriz, a capacidade de carga do compósito é transferida para as fibras, portanto caso a carga suportada pelas fibras seja superior ao da matriz a ruptura do material não será frágil, pois as fibras irão absorver as cargas aplicadas, passando a distribuir para locais afastados da fissura (VELASCO, 2008). Além da capacidade de carga suportada pela fibra outro fator que influencia é o vínculo de aderência entre fibra-matriz, quanto mais eficiente essa aderência maior a atuação das fibras (FILHO, 1997). Na **Figura 2.1** é demonstrado o fenômeno de transferência de tensões por meio das fibras.

Figura 2.1: Ilustração da transferência de tensões entre a matriz e as fibras

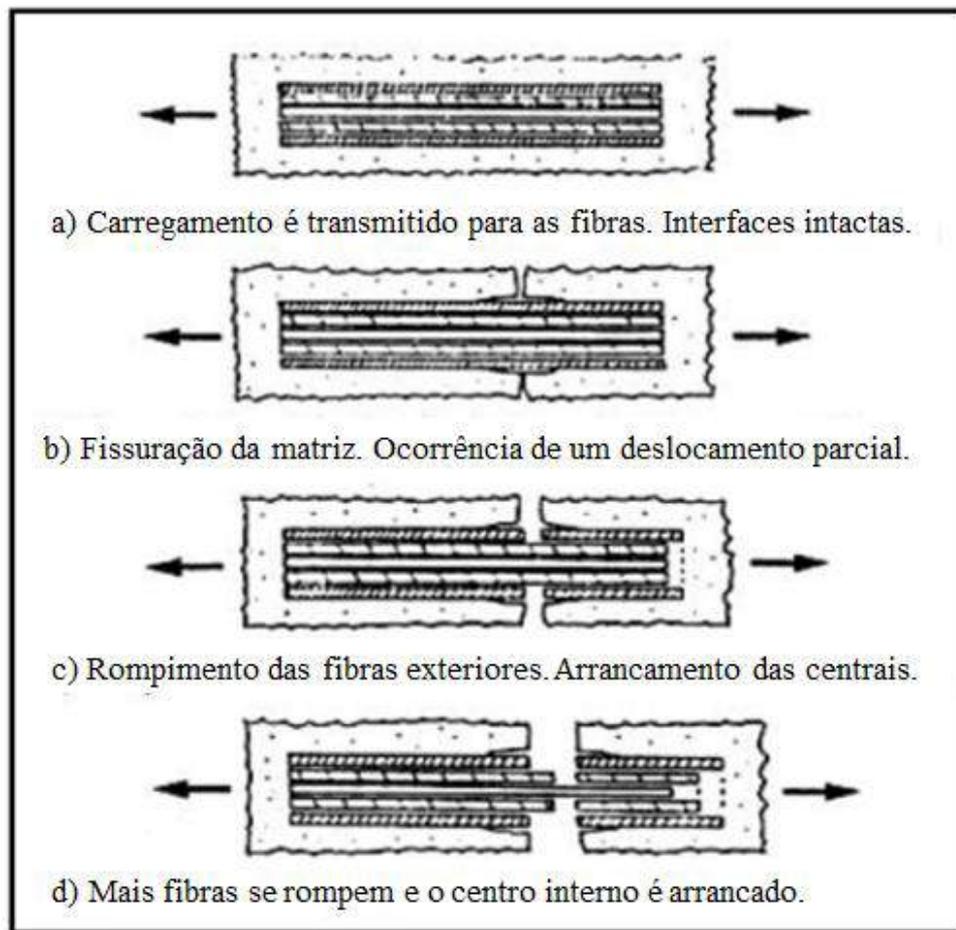


Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Como observado na **Figura 2.1**, no concreto sem fibras uma fissura irá representar uma barreira de propagação de tensões. Com isto, ocorrerá um desvio de tensões que provocará uma concentração nas bordas da fissura, caso as tensões superem a resistência da matriz, ocorrerá a ruptura frágil do material. Já quando as fibras são adicionadas com resistência e módulo adequado ao concreto com um teor de fibras adequada, esse material apresenta um ganho de ductilidade. Isso ocorre pelo fato de a fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, obtendo assim, uma diminuição da velocidade de propagação das fissuras no material. Portanto, o CRF apresenta capacidade de resistir após a sua fissuração, descaracterizando o comportamento frágil presente no concreto sem fibras (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Mano e Mendes (1985), a aderência fibra-matriz apresenta uma característica muito importante para o compósito. Também o teor de fibras apresenta um importante papel, já que o baixo volume provoca um rápido processo de rompimento, acarretando no arrancamento das fibras. Na **Figura 2.2** é apresentado o processo de arrancamento.

Figura 2.2: Processo de arrancamento das fibras



Fonte: Resende (2003)

Já que as fibras estão posicionadas de forma aleatória nas peças de concreto, a sua melhor utilização é em estruturas que não apresentem concentração de esforços em áreas específicas (GYLLTOFT, 2008). Portanto, sua maior vantagem é proporcionar a todas regiões da peça um reforço.

Como citado anteriormente, quanto maior o teor de fibras maior a probabilidade da transferência de tensões ao longo da fissura, conseqüentemente melhor a sua resistência residual. Porém deve-se ter cuidado com altos teores de fibras já que podem provocar o surgimento de novelos, aumentando significativamente a área superficial, conseqüentemente o maior consumo de pasta para assegurar uma boa aderência fibra-matriz. Como também a adição de fibras provoca a perda de trabalhabilidade do compósito em seu estado fresco, uma das soluções para melhorar sua eficiência é a adição de aditivos superplastificantes. A sua utilização é interessante pois garante que o concreto apresente uma matriz fluida com boa trabalhabilidade (GOMES; BARROS, 2009).

Analisando todas as características do CRF, a sua propriedade está diretamente ligada a alguns fatores, como: característica mecânica do compósito, orientação preferencial, distribuição das fibras no concreto, teor de fibras, aderência fibra-matriz e as características geométricas das fibras. Como este trabalho apresenta maior ênfase com o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), na seção seguinte será realizada uma revisão bibliográfica especificamente do CRFA, bem como a descrição da norma brasileira ABNT NBR 15530 (ABNT, 2007) que especifica as fibras de aço. Posteriormente, será apresentado o concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA), que possui características fundamentais para a melhora significativa da trabalhabilidade do compósito, bem como para a indução de uma orientação preferencial das fibras de aço.

2.1.1 Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA)

As fibras de aço são as mais utilizadas nas pesquisas científicas (ACCETTI; PINHEIRO, 2000), pois são mais econômicas e eficientes durante o processo de mistura, além de possuírem uma ótima aderência fibra-matriz. Por apresentarem formato bastante variável, as fibras de aço são normatizadas no Brasil pela ABNT NBR 15530 (ABNT, 2007), essa norma determina parâmetros para classificar as fibras metálicas que apresentam baixo teor de carbono. Segundo a norma brasileira as fibras metálicas são classificadas de acordo com sua geometria em três tipos: Tipo A, apresentam ancoragem nas extremidades; Tipo C, são as fibras metálicas corrugadas; e Tipo R, que são as fibras de aço reta. As fibras também são classificadas pela norma de acordo com o seu método de produção, em: Classe I, são as fibras de arame trefilado a frio; Classe II, são as fibras obtidas a partir de chapa laminada cortada a frio; e Classe III, que são às fibras obtidas do arame trefilado e escarificado. Na **Tabela 2.1** é apresentada a classificação das fibras de aço pela norma brasileira.

Tabela 2.1: Classificação das fibras de aço para reforço de concreto

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: ABNT NBR 15530 (ABNT, 2007)

As fibras de aço também possuem um fator de forma (relação entre o comprimento e o seu diâmetro) estando na faixa de 20 a 100. Portanto a norma ABNT NBR 15530 (ABNT, 2007) também estabelece os limites de resistência à tração e o fator de forma mínimo em relação à cada tipo de fibra, essa classificação é apresentada na **Tabela 2.2**.

Tabela 2.2: Especificação das fibras metálicas

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

Fonte: ABNT NBR 15530 (ABNT, 2007)

Quando as fibras de aço são inseridas no concreto elas diminuem o nível de fissuração e deformação da matriz, já que desenvolvem elevadas tensões com baixo alongamento, apresentando no momento de ruptura da matriz um nível de tensão elevado. Esse fenômeno faz com que a energia para o colapso do concreto aumente, tornando melhor o seu desempenho mecânico (CAETANO et al., 2004). Portanto, o concreto passa a

apresentar capacidade de suportar carga no estágio de pós-fissuração, além das fibras metálicas impedirem o rompimento do compósito imediatamente após a primeira fissura (FIGUEIREDO; NETO; FARIA, 2008).

Além das vantagens apresentadas acima, já que as fibras de aço apresentam um alto módulo de elasticidade, elas são pouco deformáveis, colaborando com o enrijecimento do compósito. Essa propriedade contribui para a maior dificuldade da propagação de fissuras, possibilitando a formação de ponte de tensões entre fibra-matriz. Logo o reforço das fibras no concreto pode ser aplicado no reforço primário e não somente no controle de fissuração (FIGUEIREDO; NETO; FARIA, 2008).

É importante ressaltar que o principal fator que contribui com o desempenho do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) é a sua interação fibra-matriz (FIGUEIREDO, 2005), já que uma das suas funções como apresentado é de impedir o rompimento do CRFA na primeira fissura. A utilização de fibras com boa qualidade, dentro das normas estabelecidas, não garante um bom desempenho do compósito, sendo necessário verificar a dosagem bem como o controle do material.

Um importante fator que deve ser levado em consideração no controle do material é o volume de fibras do compósito, já que a trabalhabilidade possui uma relação direta com a quantidade de fibras inseridas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). É de fundamental importância que exista um equilíbrio para determinar a quantidade de fibras utilizadas, segundo Góis et al. (2010), a quantidade de fibras de aço deve ser na ordem de 2% com o fator de forma máximo de 100, já estabelecido por norma.

Os estudos relacionados à orientação das fibras de aço apresentam grande destaque, pois possibilitam um maior controle de qualidade do compósito, já que a orientação está diretamente relacionada à melhoria na resistência à tração. 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%. Devido a esse fator, o controle tecnológico das fibras de aço é de grande importância para a sua aplicação no campo prático, portanto foram desenvolvidos alguns métodos, entre eles o método indutivo, proposto originalmente por Torrents et al. (2012) e posteriormente aperfeiçoado por Cavalaro et al. (2015), que apresenta grande vantagem por ser um método não destrutivo e que determina a orientação das fibras por meio do eletromagnetismo. Posteriormente será discutido nesse trabalho o método indutivo, já que para a aplicação das vigas em camadas é de fundamental importância a existência de um método não destrutivo e eficaz para a determinação das orientações preferenciais das fibras, facilitando a introdução de um controle de qualidade no campo prático.

As fibras de aço apresentam um papel muito importante na definição do custo do concreto, já que com consumos superiores a 1% de adição de fibras o seu custo unitário praticamente dobra (FIGUEIREDO, 2011). Portanto, a otimização do uso das fibras

de aço, utilizando somente em regiões que exista uma demanda estrutural, além de produzir peças que apresentem uma orientação preferencial, é de grande importância para a competitividade do CRFA em um novo cenário da construção civil.

2.1.2 Concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA)

Como já citado anteriormente, a adição de fibras de aço no compósito ajuda no controle de fissuração do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA). Porém, um dos principais problemas da sua adição é com a perda de trabalhabilidade do material. Estudos relacionados à perda de trabalhabilidade da adição de fibras no concreto foram efetuados por Yurtseven (2004) e percebeu-se que, quanto maior a porcentagem de fibras adicionadas, maior é a perda de trabalhabilidade. Dentro de seus estudos o autor constatou que um teor de 3% de fibras no concreto provoca uma redução de 12% do *slump*, caso o teor seja de 8% a redução do *slump* pode chegar até à 70%.

No entanto, os obstáculos relacionados à falta de trabalhabilidade do CRFA podem ser facilmente contornados com a adoção do concreto autoadensável (CAA) (NUNES, 2001). O CAA é um compósito que possui grande fluidez, porém apresenta resistência adequada à exsudação e segregação (TUTIKIAN, 2007), além de ter a capacidade de ocupar todos os espaços pelo seu peso próprio, eliminando assim a necessidade de adensamento mecânico do concreto (REPETTE, 2011).

Para a produção do concreto autoadensável é necessário o uso dos mesmos materiais para a fabricação do concreto simples, somente são acrescentados aditivos químicos e adições minerais (GOMES; BARROS, 2009). Portanto, é necessário um aditivo químico denominado de superplastificante para o aumento da fluidez da mistura, além da adição minerais para melhorar a resistência à segregação. A partir do resultado de estudos do grupo de pesquisa do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), foi desenvolvido a produção do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) com o aditivo mineral de resíduo do beneficiamento do mármore e granito (RBMG), resíduo encontrado em fábricas de rochas ornamentais que pode provocar um alto impacto ambiental quando descartado de forma errada (LISBÔA et al., 2004).

Uma das características importantes do CAARFA é com a possibilidade de induzir uma orientação preferencial das fibras durante as moldagens dos corpos de prova (MELO, 2018). Em estudos realizado por Grünewald (2004) foram produzidas vigas de CAARFA induzindo a orientação das fibras durante o fluxo de lançamento, Grünewald (2004) comparou o desempenho mecânico de vigas de CAARFA e de CRFA e observou que as vigas de CAARFA apresentaram um desempenho mecânico superior, já que possuía uma indução da orientação das fibras durante o fluxo de lançamento. Como a orientação das fibras é uma propriedade importante para o desempenho mecânico do CAARFA, será discutido posteriormente a influencia do comportamento mecânico do

CAARFA em relação à orientação preferencial das fibras de aço.

2.2 Métodos De Ensaio Para Caracterização Do Concreto Reforçado Com Fibras De Aço (CRFA)

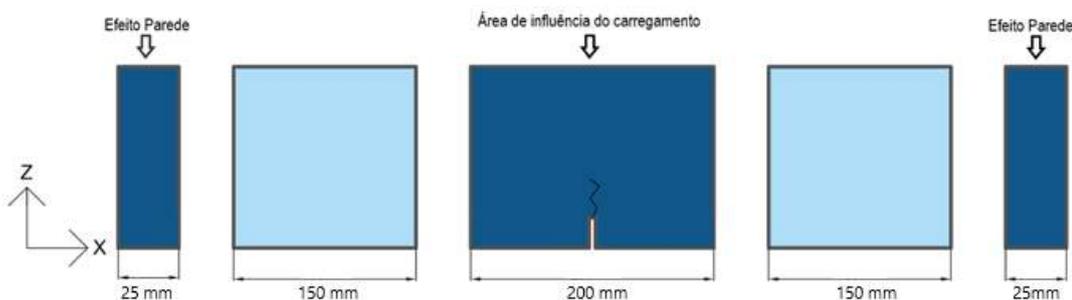
A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica acerca dos ensaios utilizados nesse trabalho para a caracterização das peças de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), bem como para as peças em camadas. Para a maioria dos métodos de caracterização das peças de concreto reforçado com fibras (CRF) são utilizados os ensaios de flexão de vigas, portanto será efetuada uma revisão do ensaio preconizado pela EN 14651 (2007) utilizada nesse trabalho, bem como do código de dimensionamento de peças de CRF, o FIB Model Code (2013). Também será efetuada uma revisão da literatura sobre o método indutivo proposto originalmente por Torrents et al. (2012) para a obtenção do controle de qualidade da orientação das fibras metálicas. Por fim será realizada uma revisão da influencia da orientação das fibras sobre o desempenho mecânico do CRFA.

2.2.1 Ensaio de flexão a três pontos (EN 14651, 2007)

O método normatizado pela EN 14651 (2007) é um ensaio de flexão de três pontos, em que é possível medir a resistência de flexão do concreto reforçado com fibras (CRF), bem como determinar os valores de tensões residuais no pós-fissuração do compósito, além de obter o limite de proporcionalidade (LOP). O ensaio apresenta um sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento (closed-loop), portanto, garante a limitação da instabilidade na pós-fissuração da matriz, muito comum na carga de pico. Logo, esse sistema permite que se obtenha um melhor controle da peça (SALVADOR, 2012), possibilitando que a carga seja transmitida totalmente da matriz para as fibras (MONTE, 2015).

A EN 14651 (2007) também determina a aplicação de um entalhe em um dos lados do corpo de prova prismático, com o objetivo de induzir a fissura na região central durante a realização do ensaio. O corpo de prova prismático é na dimensão $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$, em que apresenta um vão de ensaio de 50 cm. Estudos mostram que as solicitações são restringidas somente a um comprimento de 20 cm, no centro da viga, limitando o aparecimento de deformações não lineares bastante próxima ao ponto de entalhe ou até mesmo no entalhe (GALEOTE et al., 2017). A **Figura 2.3** demonstra o posicionamento da área de influencia do carregamento.

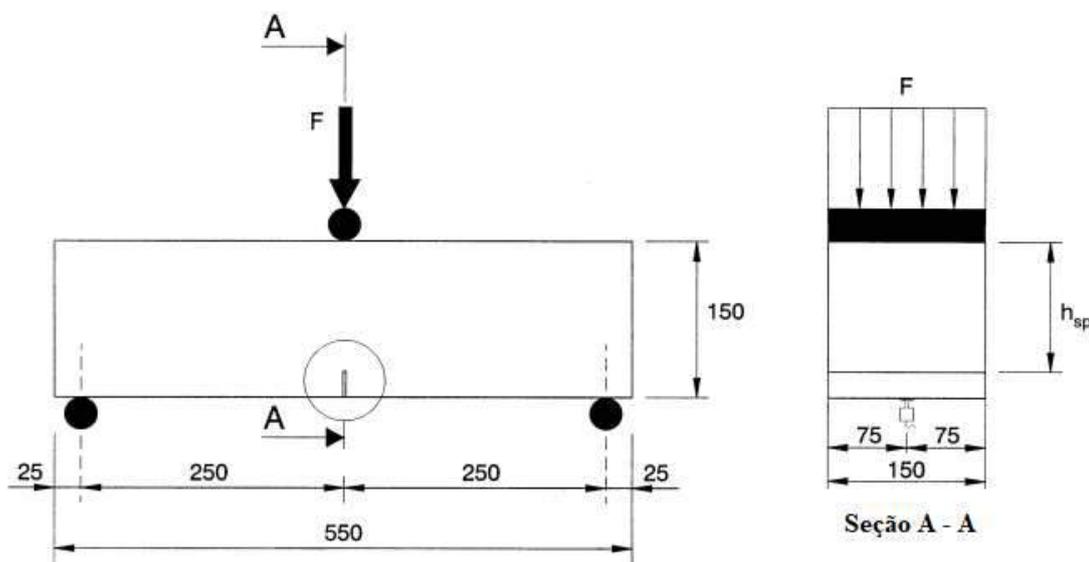
Figura 2.3: Posicionamento da área de influencia



Fonte: Galeote et al. (2017) apud Oliveira (2019)

Como já citado anteriormente, os corpos de prova devem possuir um entalhe localizado na região central, a principal função desse entalhe é induzir o aparecimento de fissura nessa região, possibilitando assim a obtenção da abertura de fissura, em que pode ser correlacionar com a energia dissipada. O entalhe deve possuir 5 mm de largura e 25 mm de altura, na **Figura 2.4** é apresentado o esquema do posicionamento do entalhe proposto por norma.

Figura 2.4: Ensaio de três pontos preconizado pela EN 14651



Fonte: EN 14651 (2007)

Como a abertura de fissura é um parâmetro de controle de ensaio, a sua captação é necessária, portanto, é possível obter seus dados por meio da utilização de Glip Gage, linear variable differential transformer (LVDT) ou do cálculo do deslocamento vertical do corpo de prova. De acordo com a norma EN 14651 (2007) a obtenção da abertura de fissura por meio do deslocamento vertical é obtida pela **Equação 2.1** . Em que δ é

o deslocamento axial e o crack mouth opening displacement (CMOD) é a abertura de fissura medida em milímetros.

$$\delta = 0,85CMOD + 0,04 \quad (2.1)$$

A partir do gráfico obtido no ensaio, é o possível ter os valores do estado limite ultimo (ELU) (f_{R3}) e do estado limite de serviço (ELS) (f_{R1}), correspondendo respectivamente ao $CMOD_3 = 2,5mm$ e $CMOD_1 = 0,5mm$, dados pela **Equação 2.2**. Já a **Equação 2.3** proporciona a obtenção do limite de proporcionalidade (MPa), que é a resistência calculada a partir da carga máxima dentro do intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05 mm.

$$f_{R,j} = \frac{3f_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (2.2)$$

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (2.3)$$

Em que:

$f_{ct,L}^f$: limite de proporcionalidade (MPa), identificado como LOP. É definido como a resistência calculada a partir da carga máxima dentro do intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05mm;

$f_{R,j}$: resistência residual à flexão (Mpa) correspondente à abertura de fissura j , sendo f_{R1} para 0,5 mm e f_{R3} para 2,5 mm;

F_L : carga máxima de ensaio no intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05 mm (N);

F_j : carga correspondente à abertura de fissura j (N), sendo $j = 0,5$ e $0,05$ mm;

l : vão de ensaio (mm);

b : largura do corpo de prova (mm);

h_{sp} : distância entre o topo do entalhe e a face superior do corpo de prova (mm).

Para a análise do desempenho do concreto segundo a norma, deve ser utilizado a razão entre o ELU e o ELS o em seus valores característicos. Segundo Prisco, Plizzari e Vandewalle (2009), para garantir um bom desempenho do compósito em elementos estruturais, se a **Equação 2.4** e a **Equação 2.5** forem satisfeitas as fibras podem substituir barras ou telas metálicas, total ou parcialmente. Também segundo os autores, para uma forma mais simplificada para classificação do material, o valor do ELS pode ser definido pelas seguintes classes: 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0 e 8,0 MPa e a razão citada acima pode ser representada pelas letras a, b, c e d, apresentadas no **Quadro 2.1**.

Quadro 2.1: Classes para as resistências residuais $\frac{f_{R,3K}}{f_{R,1K}}$, obtidas pelo ensaio EN 14651 (2007)

Letra	Condições
a	$0,5 \leq \frac{f_{R,3K}}{f_{R,1K}} \leq 0,8$
b	$0,8 \leq \frac{f_{R,3K}}{f_{R,1K}} \leq 1,1$
c	$1,1 \leq \frac{f_{R,3K}}{f_{R,1K}} \leq 1,4$
d	$1,4 \leq \frac{f_{R,3K}}{f_{R,1K}}$

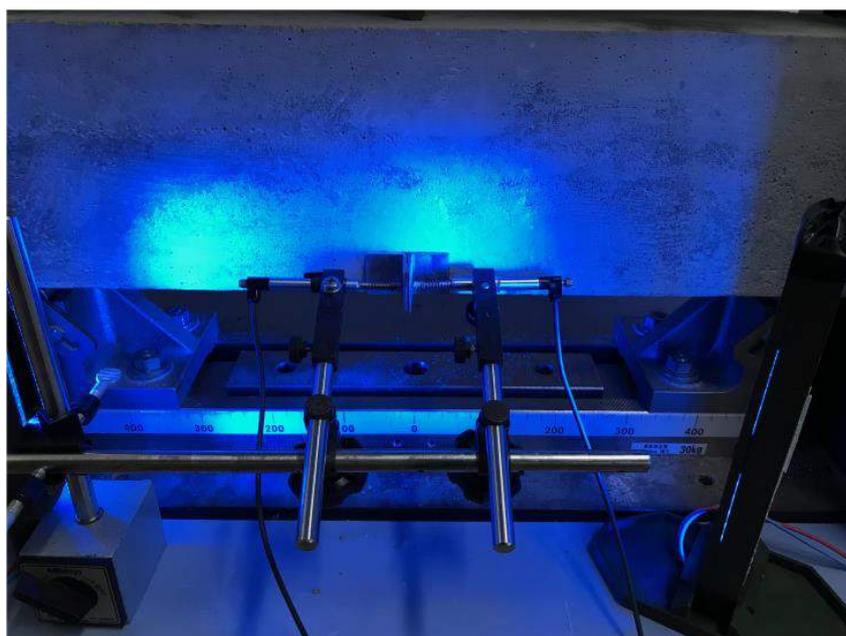
Fonte: Prisco, Plizzari e Vandewalle (2009)

$$\frac{f_{R,1k}}{f_{Lk}} \geq 0,4 \quad (2.4)$$

$$\frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \geq 0,5 \quad (2.5)$$

Em que, f_{Lk} é a resistência nominal característica do concreto (MPa). Já $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ é a resistência residual característica para a abertura de fissura de 0,5 e 2,5 mm respectivamente (MPa). A seguir na **Figura 2.5** é apresentado o ensaio, com o posicionamento das cantoneiras e dos transdutores LVDTs em sua haste de suporte.

Figura 2.5: Posicionamento das cantoneiras e transdutores LVDTs na haste de suporte



Fonte: Freitas et al. (2019)

2.2.1.1 Normatização do concreto reforçado com fibras (CRF)

A falta de normatização do concreto reforçado com fibras (CRF) foi um dos maiores entraves para a sua entrada na construção civil, uma vez que se conhecia o CRF somente por artigos científicos publicados (PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013). Com o passar dos anos, novas pesquisas sobre o CRF foram desenvolvidas, conseqüentemente foi necessário o aprimoramento de novos métodos para obter um controle sobre o compósito, assim surgiu os critérios de dimensionamento de elementos de CRF regulamentados pelo FIB Model Code (2013).

No FIB Model Code (2013) é abordado a capacidade do material, modos de dimensionamento e comportamento do compósito. A sua criação foi de grande importância para o campo prático, já que agora existe um método com validade para todo o mundo, para a obtenção do estado limite último (ELU) e do estado limite de serviço (ELS). Este documento tem como principal objetivo fornecer uma base sólida para o desenvolvimento de novas normas, que permita a introdução do CRF como um concreto estrutural (OLIVEIRA, 2019).

O FIB Model Code (2013) utiliza o ensaio de flexão de três pontos preconizado pela norma EN 14651 (2007), em que se obtém os parâmetros ao ELU e ELS, esses sendo utilizados como base de avaliação de performance do CRF. Como já citado no capítulo anterior, esses parâmetros obtidos pela EN 14651 (2007) são aplicados para o dimensionamento estrutural do CRF, com a finalidade de substituir totalmente ou parcialmente barras ou telas metálicas do concreto (PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

2.2.2 Método indutivo

O ensaio indutivo proposto por Torrents et al. (2012) é um método não destrutivo aplicado ao concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), que se utiliza da combinação das leis de Faraday do eletromagnetismo e da permeabilidade magnética para a obtenção da orientação das fibras.

O ensaio proposto por Torrents et al. (2012) consiste em duas bobinas conectadas a um medidor LCR que determina a variação da indutância presente no campo magnético gerado. Como o CRFA contém as fibras de aço que possuem propriedades ferromagnéticas, caso se estabeleça a mesma geometria dos corpos de prova e da bobina, a variação da indutância captada será variada em função da orientação e direções das fibras. Conforme a teoria do eletromagnetismo, a variação da indutância provocada pela orientação das fibras é maior quando sua posição é paralela ao campo magnético, ocasionando maior permeabilidade magnética.

A **Equação 2.6** apresenta a indutância (L) que é diretamente proporcional à permeabilidade magnética do meio (μ) e ao coeficiente de geometria (k). Portanto, diante

da padronização da geometria das bobinas e dos corpos de prova, o coeficiente de geometria (k) da **Equação 2.6** torna-se uma constante.

$$L = \mu \cdot k \quad (2.6)$$

Já que o coeficiente de geometria (k) com a padronização é uma constante, a indutância refere-se somente à variação da permeabilidade magnética do meio. Para que obtivesse uma calibração do método, Torrents et al. (2012) submeteram corpos de prova cúbicos de CRFA e de 150 mm de aresta com teores de fibras variadas (15, 30, 45 e 60 kg/m³). O procedimento ocorreu com a colocação dos corpos de prova em relação aos três eixos coordenados, a partir disso foi observada a variação da indutância. Após o ensaio, os corpos de prova foram triturados, obtendo assim a massa de cada um deles. Como conclusão, Torrents et al. (2012) observaram que a variação da indutância dos três eixos dos testemunhos e a massa de fibra de aço possuía uma relação, fundamentando assim o que se conhece como método indutivo.

Devido à presença de cantos e, conseqüentemente, um campo magnético pouco uniforme nas bobinas, proposta por Torrents et al. (2012), Cavalaro et al. (2015) propuseram a utilização de bobinas circulares que apresentam um campo magnético mais homogêneo e, portanto, resultados mais precisos. A nova bobina proposta por Cavalaro et al. (2015) é circular com duplo enrolamento, do tipo Helmholtz. Os fios de cobre possuem um diâmetro de 0,3 mm e cada enrolamento é composto por 1200 voltas de fio de cobre esmaltado.

Segundo a teoria do eletromagnetismo, quando as fibras estão alinhadas todas paralelamente às linhas do campo magnético, a sua permeabilidade magnética será máxima, já quando as fibras estão na posição perpendicular em relação ao campo magnético a variação da indutância será mínima. Portanto, Cavalaro et al. (2015) determinaram um equacionamento para a análise da orientação das fibras, em que são determinadas para isso, o número de orientação (n_i) e a contribuição relativa (C_i) das fibras no eixo escolhido. A seguir são apresentadas as **Equação 2.7** e **Equação 2.8** para a determinação das orientações das fibras.

$$\cos \alpha_i = n_i = \vartheta \cdot \sqrt{\frac{L_i(1 + 2\gamma) - L_e B_{v,i} \gamma}{L_e B_{v,i}(1 - \gamma)}} - \mu \quad (2.7)$$

$$C_i = \frac{n_i}{\sum_{i=x,y,z} n_i} \quad (2.8)$$

Onde:

α_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;

γ : Fator de aspecto da fibra de aço utilizada;

$\theta e \mu$: Fatores de correlação da orientação das fibras.

Para esse trabalho será utilizado o método indutivo proposto por Torrents et al. (2012) e adaptado por Cavalaro et al. (2015) com a utilização de bobinas circulares como demonstrado na **Figura 2.6**. Para a realização desse ensaio é necessário a utilização do equacionamento proposto por Cavalaro et al. (2015) para a captação da orientação das fibras de aço, obtendo assim um controle de qualidade para as peças em camadas e de 100% de CRFA.

Figura 2.6: Montagem das bobinas e medidor LCR para a realização do ensaio indutivo



Fonte: Autor

2.3 Orientação Preferencial Das Fibras

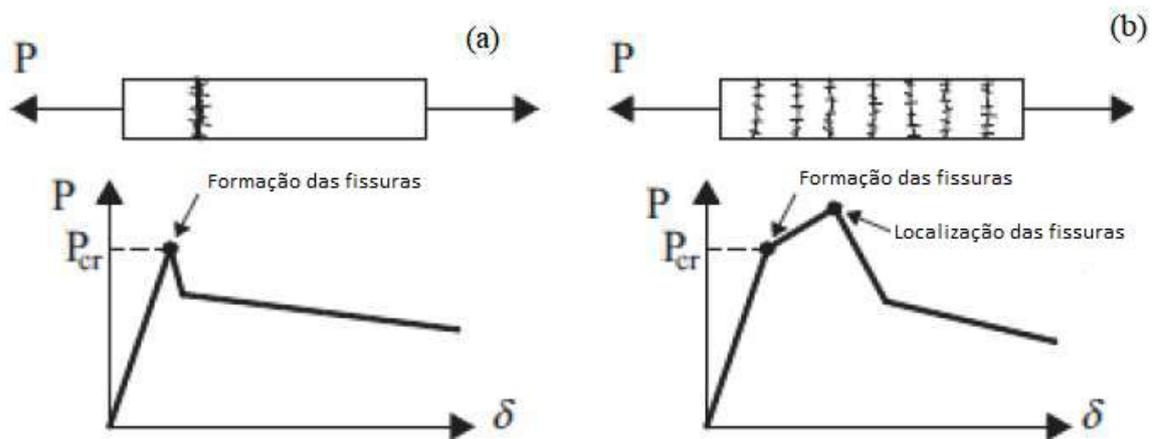
As características mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) são influenciadas diretamente pela orientação das fibras, quando estão alinhadas na direção das linhas de tensões as fibras de aço atuam como reforço na estrutura, já que ocorre uma transferência de tensão entre matriz e a fibra (LARANJEIRA et al., 2012).

A orientação das fibras é influenciada por diversos fatores, como: o processo de mistura do compósito, o processo de lançamento do concreto, tipo de moldagem que é efetuada e o seu processo de cura. Portanto, um processo de produção que induza uma orientação preferencial do concreto é de grande importância (LARANJEIRA et al., 2012), bem como da utilização de um controle de qualidade que possibilite verificar qual a orientação das fibras, como por exemplo o método indutivo (TORRENTS et al., 2012).

É importante observar também que após as peças de concreto atingirem a sua carga máxima, as fibras passam a ser solicitadas, como já citado anteriormente com

as pontes de tensões (FIGUEIREDO, 2011). Dentro desse cenário de redistribuição de tensões, as peças de CRFA podem obter dois tipos de comportamentos diferentes, o amolecimento ou o endurecimento (PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013). O amolecimento ocorre quando a peça de CRFA apresenta uma perda de resistência após a formação de fissura, já o endurecimento ocorre quando a peça de CRFA apresenta um ganho de resistência após a formação das fissuras. Portanto, quando existe uma orientação preferencial das fibras, as tensões após a ruptura da matriz são transferidas para as fibras de aço, logo ocorre um processo de endurecimento em que as solicitações são maiores na pós-fissuração. A **Figura 2.7** apresenta as características de amolecimento e de endurecimento do concreto reforçado com fibras (CRF).

Figura 2.7: Na esquerda é apresentado o processo de amolecimento do CRF, já na direita o de endurecimento do CRF



Fonte: Prisco, Colombo e Dozio (2013) adaptado

Pode-se observar pela **Figura 2.7** que no processo de amolecimento do CRF, as fibras não apresentam uma orientação preferencial na direção das tensões solicitantes. Já no endurecimento, a carga solicitada aumenta depois da formação da fissura, devido à presença de uma orientação preferencial das fibras, isso significa que as tensões estão sendo transferidas da matriz para as fibras. Esse é o papel mais importante do CRFA que é o de aumentar a capacidade de carga no pós-fissuração, dando às peças de CRFA uma maior confiabilidade. Portanto, é de grande importância a correlação entre a orientação preferencial das fibras com as características mecânicas das peças de CRFA. Sendo assim, possível compreender como a orientação das fibras influencia as características mecânicas das peças moldadas em camadas, já que a produção da dupla camada é realizada por um método de moldagem diferente (FREITAS et al., 2019).

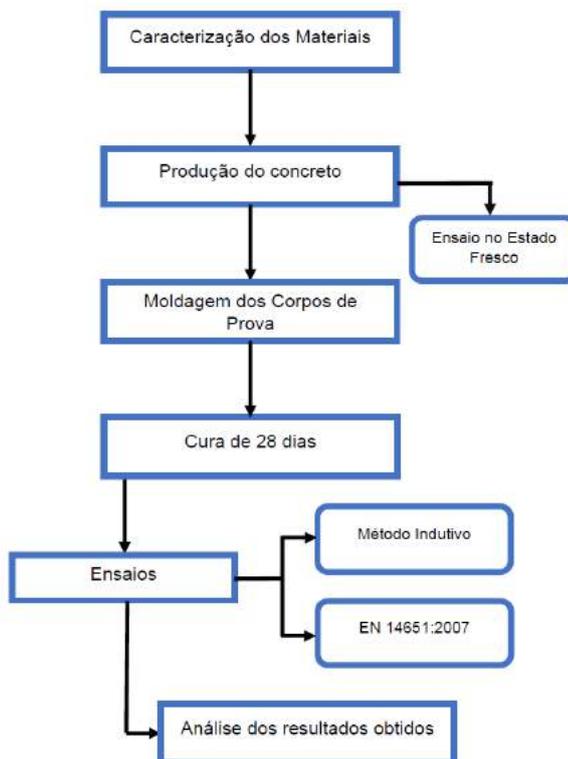
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresentara a metodologia de produção e de execução dos ensaios para as peças moldadas em camadas e de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA), mais especificamente abordará: as características dos materiais e equipamentos, a metodologia utilizada para a mistura, moldagem e execução dos ensaios em laboratório nos estados fresco e endurecido das peças de concreto.

Todas as amostras foram produzidas no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) do Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Para a avaliação do comportamento mecânico foi utilizado o ensaio preconizado pela EN 14651 (2007), em que foram avaliadas quatro vigas de peças moldadas em camadas com 50% de CAARFA e 50% de concreto autoadensável (CAA) e mais quatro vigas compostas por 100% de CAARFA. Foi analisada a orientação das fibras por meio do método proposto por Torrents et al. (2012), para isso foram extraídos dois testemunhos cúbicos de cada viga ensaiada pela EN 14651 (2007). Essa quantidade de amostras é vista como satisfatória para a obtenção de parâmetros para a caracterização das peças moldadas em camadas, como também para as peças de 100% de CAARFA.

É apresentada na **Figura 3.1** a metodologia empregada nesse trabalho, a fim de se obter os objetivos propostos. Em seguida cada etapa metodológica será especificada.

Figura 3.1: Fluxograma das etapas realizadas no trabalho



Fonte: Autor

3.1 Caracterização Dos Materiais

A produção do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) se difere em relação à do concreto convencional, já que é necessária a utilização do superplastificante como aditivo, além da adição de materiais finos. Durante esse trabalho foi adicionado o resíduo de beneficiamento do mármore e granito (RBMG) como material fino. Já o processo de dosagem foi definido por meio do método de GOMES (2002), sendo utilizados para a produção do compósito os seguintes materiais:

1. Cimento CP V ARI-RS;
2. Agregado miúdo e graúdo;
3. Água, do sistema de abastecimento local;
4. Adição: Resíduo da indústria de beneficiamento do mármore e granito;
5. Aditivo: Superplastificante de última geração com base em uma cadeia de éter carboxílico;
6. Fibras de aço FF 80 do tipo A I de acordo com a ABNT NBR 15530 (ABNT, 2007).

3.1.1 Cimento

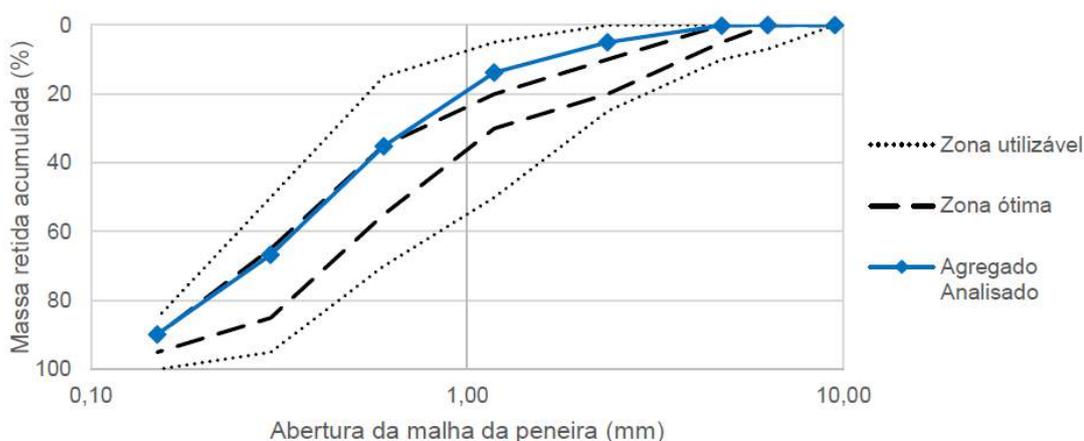
Para a produção do CAARFA foi utilizado o cimento CP V ARI-RS, a partir de sacos de 50Kg. Esse cimento apresenta algumas características importantes, como a alta resistência inicial e alta reatividade em baixas idades. Devido a essas características esse cimento é amplamente utilizado em fabricas de pré-moldados. Devido a sua finura, o CP V ARI-RS garante uma boa fluidez na mistura (MELO et al., 2005).

3.1.2 Agregado miúdo

A areia utilizada foi adquirida no comércio local, a qual após a sua lavagem a areia foi seca ao sol, e posteriormente submetida ao processo de peneiramento. Foi selecionado o material que passou pela peneira com a abertura de 4,75 mm.

A seguir na **Figura 3.2** é apresentada a composição granulométrica do material, determinada através do processo normatizado pela ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 3.2: Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Melo (2018)

Foram utilizadas as metodologias propostas pela ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006), ABNT NBR NM 30 (ABNT, 2001) e ABNT NBR NM 52 (ABNT, 2009), para obter a massa específica no estado solto, massa específica e absorção do agregado. No **Quadro 3.1** são apresentados os resultados obtidos.

Quadro 3.1: Características do agregado miúdo

Massa Específica (g/cm ³)	2,56
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,49
Massa Unitária no Estado Solto (g/cm ³)	1,49
Absorção (%)	0,56
Diâmetro Máximo (mm)	2,36
Módulo de Finura	2,10
Gradação Granulométrica	Areia Fina

Fonte: Melo (2018)

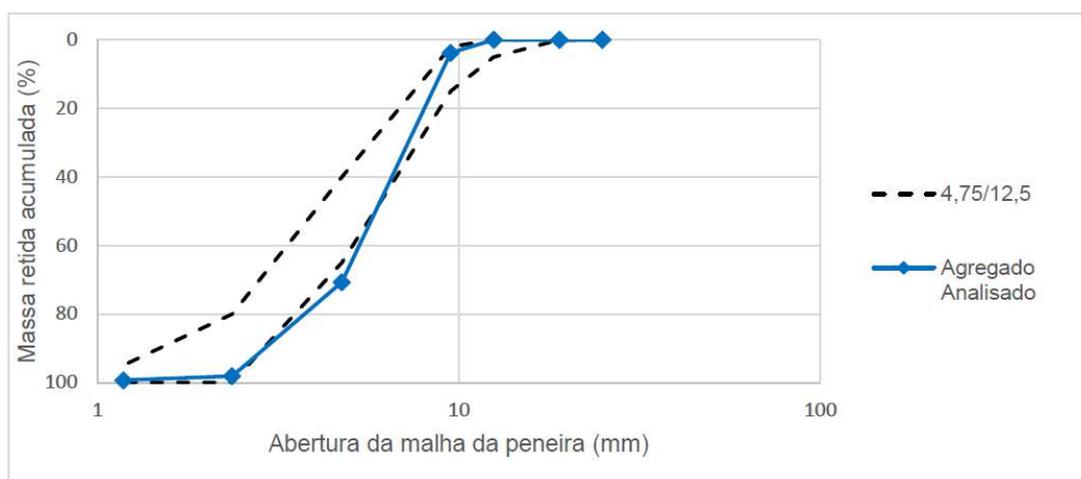
3.1.3 Agregado graúdo

Com o fornecimento do agregado, o material foi seco ao ar e passado na peneira com abertura de 12,5 mm, posteriormente para a retirada dos finos e outros resíduos misturados ao material, a pedra britada foi lavada e colocada para secar, ao ar livre. O material utilizado para a produção do concreto foi o que passou na peneira com a malha de abertura de 12,5 mm.

Também foi efetuado os ensaios para a caracterização do agregado miúdo, sendo utilizado para a obtenção da composição granulométrica o ensaio determinado pela ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003), na **Figura 3.3** é apresentada a curva granulométrica

trica, em que o agregado está na zona de classificação 4,75/12,5. Foram obtidas pelos ensaios especificados pela ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006) e ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2003) a massa unitária no estado solto, massa específica e absorção do agregado graúdo (**Quadro 3.2**).

Figura 3.3: Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Melo (2018)

Quadro 3.2: Características do agregado graúdo

Massa Específica (g/cm^3)	2,57
Massa Específica Aparente (g/cm^3)	2,63
Massa Unitária no Estado Solto (g/cm^3)	1,39
Absorção (%)	0,78
Diâmetro Máximo (mm)	9,50

Fonte: Melo (2018)

3.1.4 Água

A água utilizada no processo de produção do concreto foi obtida por meio da rede de abastecimento local fornecida pela companhia de saneamento de Alagoas (CASAL), disponível na rede de abastecimento da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

3.1.5 Adição mineral

A adição escolhida nesse trabalho foi o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG). Este aditivo é obtido pelo corte e polimento de placas de mármore e granito, sendo disponibilizado por uma empresa que está localizada na cidade de

Maceió-AL. O RBMG contribui com o aumento da coesão e viscosidade da mistura, atuando como um filer.

O RBMG foi coletado junto com a empresa, posteriormente levado até o LEMA, para o seu armazenamento. Após a coleta e transporte o material passa por um processo com secagem em estufa a 110 °C. Após o processo de secagem o material é destorroado e peneirado em uma peneira com abertura de malha de 300 μm . O RBMG foi caracterizado seguindo as especificações da ABNT NBR NM 52 (ABNT, 2009) (**Quadro 3.3**).

Quadro 3.3: Características do RBMG

Abertura da Peneira (mm)	0,30
Tipo de Adição	Inerte
Massa Específica (g/cm ³)	2,711
Material Retido na Peneira (%)	0,558

Fonte: Oliveira (2019)

3.1.6 Aditivo superplastificante

Como a função do superplastificante é garantir a redução da quantidade de água no concreto mantendo a sua fluidez, ele pode ser classificada em tipo I e tipo II, de acordo com sua composição química e sua capacidade de reduzir a quantidade de água necessária. O superplastificante do tipo I é formado por bases de sais condensados de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonata, obtendo uma redução de 25% de água. Já o tipo II é formado pelo grupo de superplastificante de terceira geração, formado a base de policarboxilatos-poliéster, conseguindo reduzir em 40% a quantidade de água (GOMES; BARROS, 2009).

O superplastificante utilizado nesse trabalho é a do tipo II de terceira geração, já que permite ter uma maior trabalhabilidade do material sem a necessidade de alterar a relação de água/cimento. No **Quadro 3.4** é apresentada as características técnicas fornecidas pelo fabricante.

Quadro 3.4: Características do superplastificante fornecidas pelo fabricante

Nome	Glenium 51
Função Principal	Aditivo Superplastificante
Base Química	Éter Policarboxílico
Densidade (g/cm ³)	1,067 - 1,107
Teor de Sólidos (%)	28,5 - 31,5
Aspecto	Líquido
Viscosidade (psi)	<150
Cor	Branco Turvo
pH	5 - 7

Fonte: BASF (2021)

3.1.7 Fibras de aço

As fibras de aço utilizadas para a produção do compósito nesse trabalho são da linha *Winrand*®, fabricada pela Maccaferri (**Figura 3.4**). Uma das características dessas fibras é a presença de ancoragem de acordo com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 15530 (ABNT, 2007), sendo, portanto, do tipo A. Já o seu processo de fabricação é através do processo de trefilação à frio de arames de aço, sendo classificadas como fibras de classe I. As fibras utilizadas nesse trabalho estão caracterizadas no **Quadro 3.5**.

Figura 3.4: Fibras utilizadas no trabalho



Fonte: AWA Comercial (2020)

Quadro 3.5: Características das fibras de aço

Material	Aço
Tipo	Aço
Classe	I
Comprimento (mm)	60
Diâmetro (mm)	0,75
Fator de Forma	80
Densidade (g/cm ³)	7,85
Resistência à Tração (Mpa)	>11000
Deformação Máxima (%)	<4
Módulo de Elasticidade (MPa)	210000

Fonte: Melo (2018)

3.2 Produção, Moldagem e Cura Dos Concretos

Neste estudo foram produzidas 4 vigas moldadas em camadas, compostas por 50% de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) e 50% de concreto autoadensável (CAA), com uma produção de aproximadamente 35 litros de CAARFA e 35 litros de CAA. Também foram preparadas mais 4 vigas compostas totalmente por CAARFA, produzindo 70 litros de CAARFA para o preenchimento das vigas.

A dosagem foi definida por meio do método de GOMES (2002) para a produção do concreto com característica fluida utilizando o resíduo de beneficiamento do mármore e granito (RBMG), para a produção do CAA foi utilizado a mesma dosagem do CAARFA, porém não foram adicionadas as fibras de aço. No **Quadro 3.6** é apresentada a dosagem utilizada nesse trabalho.

Quadro 3.6: Dosagem do Concreto

Materiais	Massa (Kg/m ³)
Cimento	380,41
RBMG	190,20
Areia	744,00
Brita	838,24
Água inicial	152,17
Água complementar	37,99
Água de absorção	11,21
Superplastificante	6,34
Fibras de Aço FF 80	25,97

Fonte: Autor

Para a produção do concreto foi utilizado dois misturadores de eixo inclinado (betoneira), em um misturador foi produzido CAARFA e em outro o CAA, para a produção foram obedecidas as seguintes etapas:

1. A betoneira foi molhada para evitar que a água da mistura fosse absorvida pelas paredes internas do equipamento;
2. Adição dos agregados miúdos e graúdos e a água de absorção dos agregados. Em seguida os materiais foram misturados por 30 segundos;
3. Adição do cimento e do RBMG. Misturar por 30 segundos;
4. Adição da água inicial (80% da relação a/c). Misturar por 90 segundos;
5. Diluir o aditivo superplastificante na água restante (20% da relação a/c), posteriormente adicionada na betoneira. Misturar por 120 segundos;
6. Somente para o CAARFA foram adicionadas as fibras de aço de forma fracionada com a betoneira em movimento. Para o CAA não foram adicionadas as fibras de aço. Misturar por mais 60 segundos;
7. Ensaio no estado fresco e lançamento do concreto nos moldes.

Após a produção do compósito, foram moldadas as peças por meio do lançamento do concreto com a utilização de baldes disponibilizados em laboratório. Como especificado pela EN 14651 (2007), foram moldadas peças de concreto de formato prismático com as dimensões $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$ (**Figura 3.5**). Para a produção do concreto em camadas foi necessário a utilização de uma placa (**Figura 3.6**), em que foi lançado em uma

região o CAA e na outra o CAARFA. Já que foi produzido concreto com característica fluida o processo de adensamento mecânico não foi necessário.

Figura 3.5: Dimensão das formas prismáticas de madeira utilizadas na moldagem do concreto



Fonte: Autor

Figura 3.6: Posicionamento da placa para o lançamento do concreto com e sem fibras de aço



Fonte: Autor

Após o preenchimento das peças de concreto, os seguintes passos foram realizados: retirada da placa que separava o CAARFA e o CAA para os corpos de prova de dupla camada, acabamento e nivelamento da superfície, identificação dos corpos de prova e de suas camadas para as peças de dupla camada (FREITAS et al., 2019), os

corpos de prova foram mantidos cobertos à temperatura ambiente por 24 horas, após o período de 24 horas os testemunhos foram desmoldados e levados para tanque de imersão durante um período de 28 dias.

Figura 3.7: Formas preenchidas com o concreto fresco



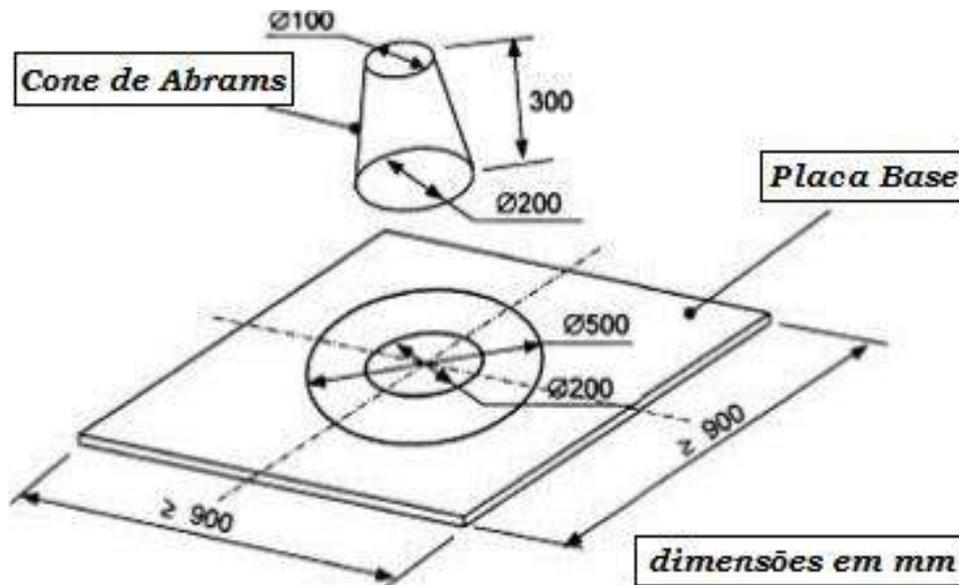
Fonte: Oliveira (2019)

3.3 Ensaio No Estado Fresco

Os concretos produzidos foram submetidos em seu estado fresco ao ensaio de espalhamento (slump-flow test) para a verificação da fluidez. Esse ensaio é utilizado para a verificação da capacidade de preenchimento e o aspecto de uniformidade da distribuição do agregado graúdo. O ensaio é realizado em conformidade com a norma ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017).

São necessários para a realização do ensaio os seguintes equipamentos: placa quadrada de 100 X 10 cm impermeável à água e tronco de cone de material semelhante com à da placa. No centro da placa existe uma marcação de 200 mm para o posicionamento do tronco de cone. O cone possui uma altura de 300 mm, diâmetro interno superior de 100 mm e diâmetro inferior de 200 mm. Na **Figura 3.8** é apresentado os materiais utilizados nesse ensaio.

Figura 3.8: Materiais utilizados para a execução do ensaio de espalhamento



Fonte: Ali e Al-Tersawy (2012) adaptado

Antes da execução do ensaio é necessário o umedecimento dos materiais, já que pode ocorrer a absorção da água presente no compósito pelos materiais. Posteriormente, a placa é colocada nivelada em superfície e o tronco de cone centralizado no meio da placa. É necessário manter o tronco de cone fixo com as pernas para posteriormente lançar o concreto em seu interior. O cone é erguido verticalmente, permitindo assim que o concreto se espalhe. Os dados captados do ensaio são as médias das medidas do espalhamento perpendiculares (D_{final}) e o tempo gasto para o concreto atingir os 50 cm de espalhamento na placa (T_{50}).

Como foram produzidos CAARFA e concreto autoadensável (CAA), somente foi realizado esse ensaio no estado fresco, já que o objetivo desse trabalho é a produção de concreto fluido. Logo, outros ensaios utilizados para classificar o concreto autoadensável como caixa L e o Método do funil V não foram realizados.

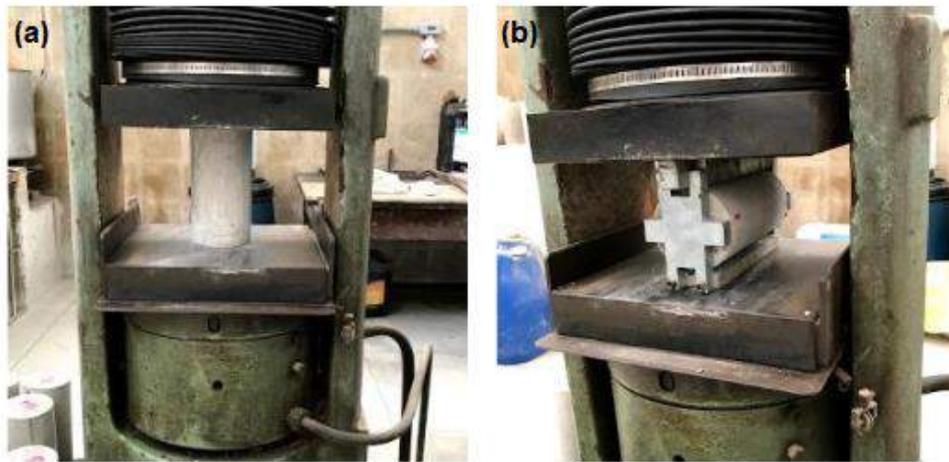
Na literatura o ensaio de espalhamento para o CAA aqui adotado como concreto fluido, é recomendado o diâmetro final entre 650 e 850 mm e uma faixa de valores de 3 a 7 segundos para o concreto atingir o diâmetro de espalhamento de 50 cm (T_{50}). Espalhamento com valores abaixo ao estabelecidos pela literatura são considerados pouco fluidos. Já valores acima do recomendado indica um concreto bastante fluido, com possibilidade de segregação.

3.4 Ensaios De Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica do concreto é realizada por meio dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, normatizados pela ABNT NBR

5739 (ABNT, 2018) e ABNT NBR 7222 (ABNT, 2011). Após o período de cura de 28 dias, os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios em uma prensa com capacidade de carga de 200 tf (**Figura 3.9**).

Figura 3.9: (a) Ensaio de compressão simples e (b) ensaio de tração por compressão diametral



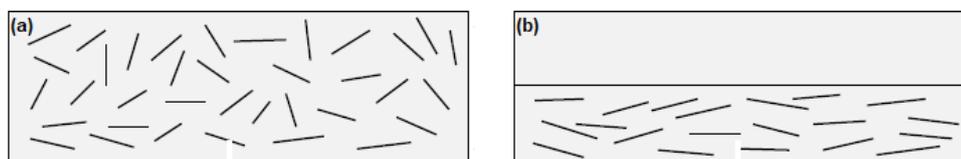
Fonte: Oliveira (2019) adaptado

3.5 Preparação Das Amostras

Antes das amostras serem submetidas ao ensaio preconizado pela EN 14651 (2007) é necessário a aplicação de um entalhe, feito com a utilização de uma serra mármore portátil SMV 1300S, tensão 220 V, frequência de 50/60 Hz, potência de 1300 W, rotação de 13000 rpm, capacidade de corte de 34 mm, diâmetro do disco de 110 mm e diâmetro do eixo de 20 mm, classe de isolamento II e normatizada pela ABNT NBR 15910 (ABNT, 2010). Em sua execução foram utilizados equipamentos de proteção individual, como luvas e óculos de segurança, para manuseio da serra, na qual foi introduzido um disco segmentado diamantado, próprio para corte em concreto.

Após o processo de cura os corpos de provas foram rotacionados em 90° em referência a face de cima que ficou em contato com ar. Todas as amostras foram submetidas à aplicação do entalhe antes da execução do ensaio, com 5 mm de largura por 25 mm de altura. Os entalhes foram aplicados na parte central do plano de corte na superfície lateral do corpo de prova em relação à direção de moldagem. Para as vigas moldadas em camadas a face do entalhe foi aplicada na camada de CAARFA (**Figura 3.10** e **Figura 3.11**), já que durante a execução do ensaio as fibras de aço entram com uma importante função de dificultar o aparecimento de fissuras na parte tracionada.

Figura 3.10: (a) Ilustração do entalhe no corpo de prova com 100% de CAARFA e (b) Ilustração do entalhe no corpo de prova moldada em camadas



Fonte: Autor

Figura 3.11: Corpo de prova após a aplicação do entalhe



Fonte: Freitas et al. (2019)

3.6 Aplicação Do Ensaio Normalizado Pela EN 14651 (2007)

Após o período de cura de 28 dias e da preparação para o ensaio, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de flexão de 3 pontos preconizado pela EN 14651 (2007). Foram avaliados 4 corpos moldados em camadas e 4 corpos de prova moldados totalmente com concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA). Esse ensaio mede a resistência à tração por flexão do concreto, de forma que caracteriza as resistências do concreto à flexão para determinadas aberturas de fissuras, além da obtenção do limite de proporcionalidade.

Para a realização do ensaio foi utilizada uma máquina universal de ensaios, com capacidade de 100 KN, da marca *Shimadzu*®, modelo Autograph AG-X Plus, no Laboratório de Materiais e Estruturas (LEMA). Para execução do ensaio é recomendada a utilização de um clip-gage para o monitoramento da abertura de fissura e um transdutor de deslocamento variável linear (LVDT) instalado no *yoke* para medir o deslocamento vertical do corpo de prova (**Figura 3.12**). Devido à falta de alguns materiais, foi efetuada uma adaptação com a utilização de um transdutor do tipo LVDT, instalado na posição horizontal para medição da abertura de fissura, de modo que os resultados obtidos não comprometeram os dados do ensaio.

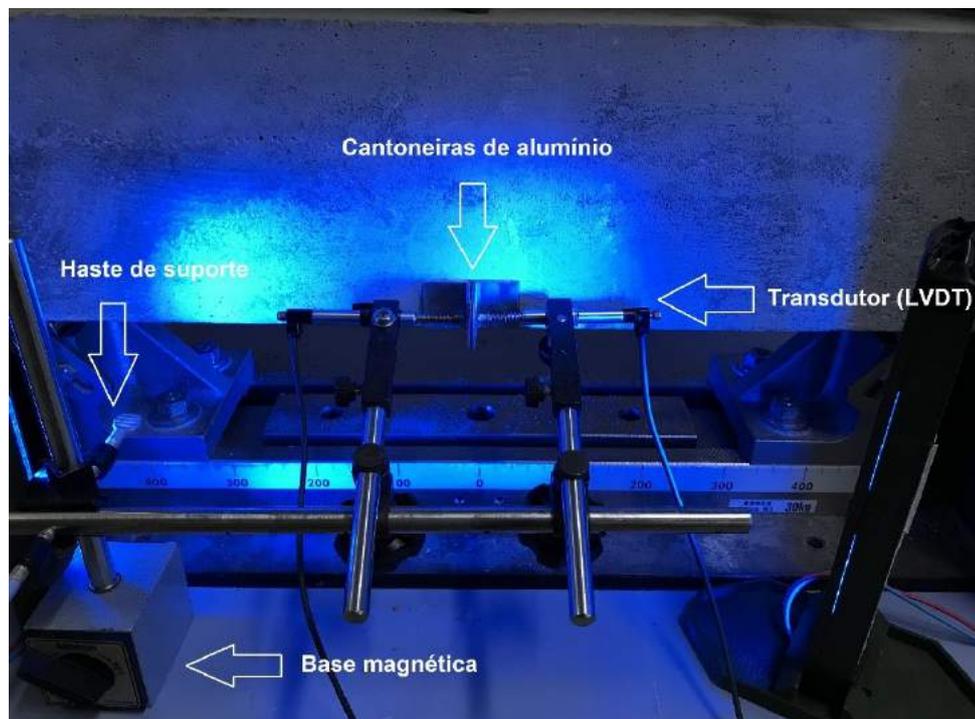
Figura 3.12: Transdutor (LVDT)



Fonte: Autor

Duas cantoneiras finas de alumínio em formato de “L” foram fixadas por meio de uma cola de média viscosidade, sendo uma na direita e outra na esquerda do entalhe (**Figura 3.13**), de modo que os transdutores captavam a abertura de fissura com o deslocamento das cantoneiras. Portanto a soma do deslocamento de ambos os transdutores representa a abertura de fissura do ensaio. Uma base magnética foi utilizada para manter os transdutores fixo na posição horizontal (**Figura 3.13**). Durante o ensaio, os valores de deslocamento foram registrados em tempo real, por meio da utilização do software *ITOM*®, com o sistema de vários módulos para aquisição de sinais analógicos, o *Spider 8*® (**Figura 3.14**), em que os transdutores estavam conectados. Por meio dos equipamentos os dados foram convertidos para linguagem de máquina.

Figura 3.13: Posicionamento dos Transdutores (LVDT) na base magnética



Fonte: Autor

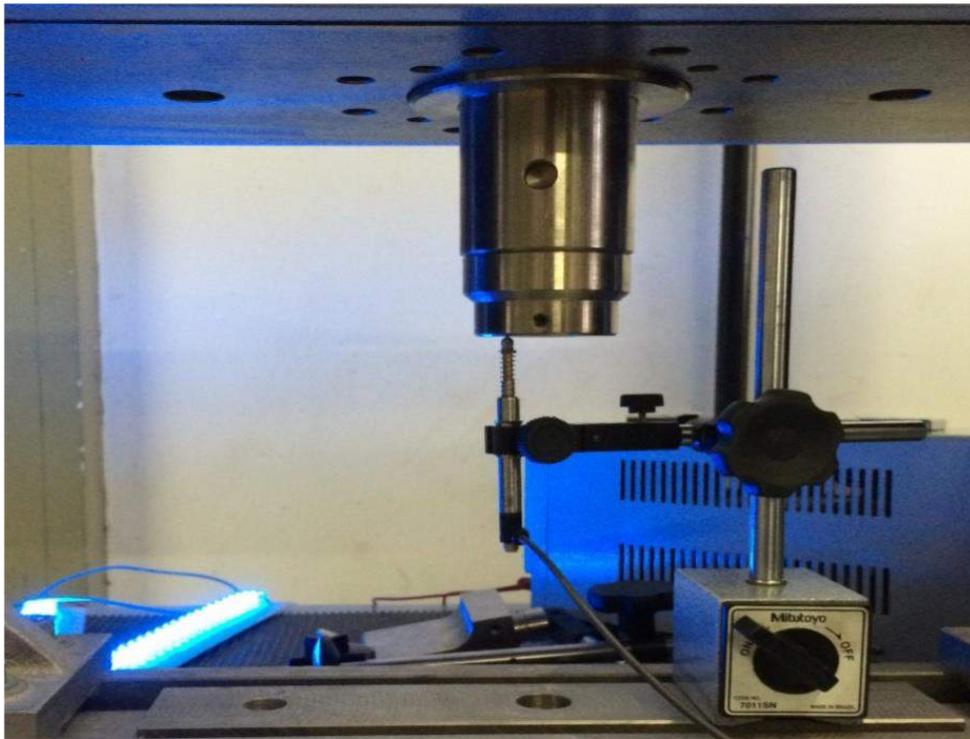
Figura 3.14: Spider 8®



Fonte: Agra (2017)

Os transdutores foram previamente calibrados na máquina de ensaio, com o auxílio da base magnética, que os mantiveram fixos na posição vertical (Figura 3.15).

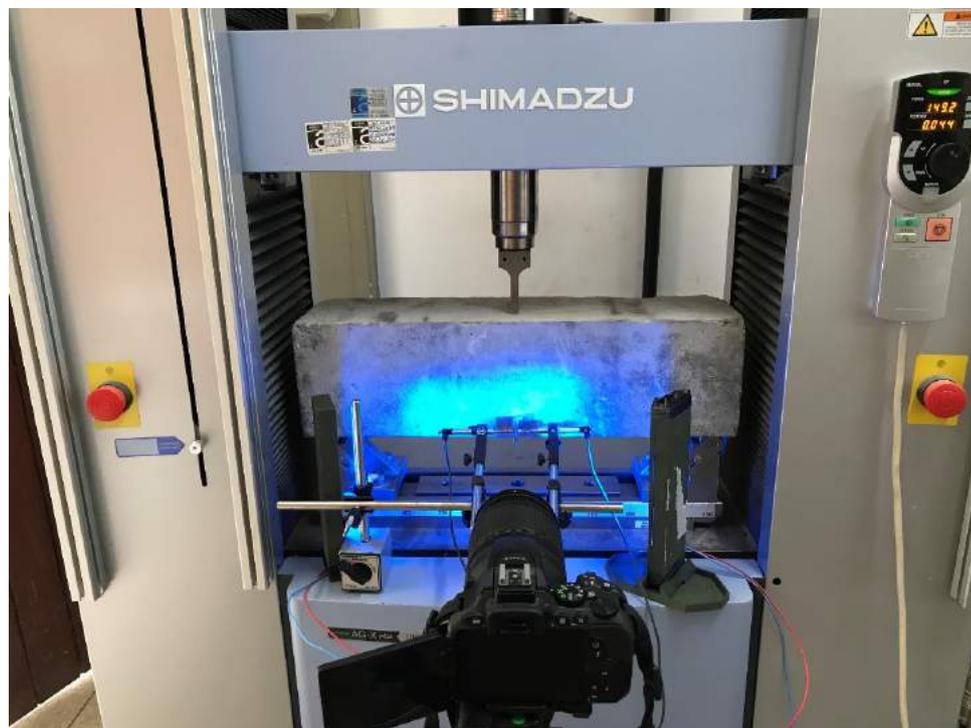
Figura 3.15: Calibração do transdutor com auxílio da base magnética



Fonte: Agra (2017)

Antes da execução do ensaio foi verificada a posição do corpo de prova por meio de uma trena, segundo a norma cada rolete deve estar localizado a 25 mm de cada face lateral do testemunho, logo o vão de ensaio é de 500 mm (Figura 3.16). Com o corpo de prova corretamente arranjado nos roletes do equipamento, a célula de carga foi manualmente posicionada em uma região muito próxima ao corpo de prova. O modo manual foi desligado e as calibrações foram efetuadas, antes de iniciar o carregamento todos os valores de deslocamento e de força foram zerados.

Figura 3.16: Posicionamento do corpo de prova para à EN 14651 (2007)



Fonte: Autor

Os parâmetros de ensaio previamente estabelecidos pela norma foram configurados no software *Trapezium X*®, tendo o deslocamento da célula em 0,05 mm/min para o trecho que corresponde ao intervalo de abertura de fissura entre 0 e 0,10 mm, aproximadamente equivalente aos primeiros 5 minutos de ensaio. Já para o segundo trecho entre 0,10 e 4,0 mm de abertura de fissura, foi configurada uma velocidade de 0,20 mm/min. A menor velocidade adotada no trecho inicial teve a função de minimizar a instabilidade pós-pico, observados em trabalhos anteriores.

Após a aplicação dos ajustes os corpos de prova prismáticos foram submetidos ao ensaio de flexão de 3 pontos proposto pela EN 14651 (2007). O ensaio determina a resistência à tração com a flexão do concreto, caracterizando a resistência residual para determinar a aberturas de fissuras. A duração de cada ensaio foi de aproximadamente de 1500 segundos, que forneceu uma curva carga-abertura de fissura. O ensaio foi finalizado quando a abertura de fissura chegou a 4 mm, caso a fissura ocorresse fora do entalhe a amostra seria descartada.

Os dados capturados durante o ensaio foram fornecidos pelo software *Trapezium X*®, em planilhas do *Excel*®, que relacionava a carga aplicada coma deflexão que o corpo de prova sofreu em um determinado tempo. Já as informações obtidas pelos transdutores LVDT foram fornecidos pelo software *ITOM*®, em planilhas do *Excel*®, que relacionava o tempo com a abertura de fissura obtida em cada ensaio.

Foram analisados os valores de resistência residuais de cada corpo de prova com

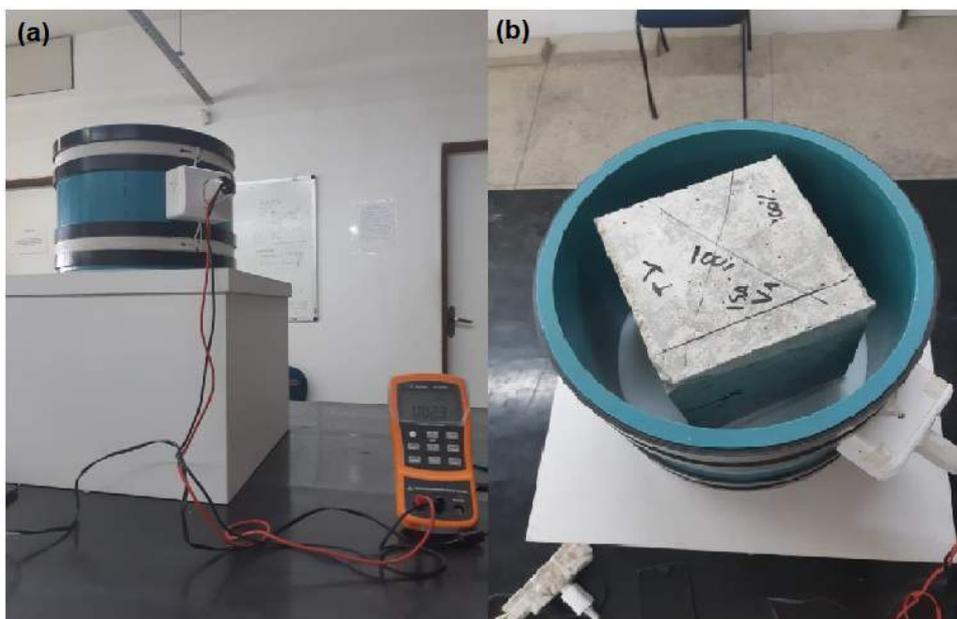
base na curva carga-abertura de fissura estabelecida pela EN 14651 (2007). As resistências residuais analisadas foram de 0,5 mm e 2,5 mm, associados, respectivamente, no estado limite de serviço (ELS) e estado limite último (ELU), sendo os valores utilizados para o dimensionamento.

3.7 Aplicação Do Método Indutivo

O equipamento utilizado para o método indutivo tem as seguintes especificações: um elemento sensor e uma bobina circular com duplo enrolamento do tipo Helmholtz. Este arranjo é o mais preciso pois a distância vertical entre os enrolamentos deve ser equivalente ao raio da circunferência da seção transversal da bobina e tem potencial de produzir campo magnético uniforme e de baixa intensidade, ideal para as fibras estudadas. Para medir a variação da indutância optou-se pelo medidor LCR de mão da *Agilent®*, modelo U1732C. O ensaio foi montado como apresentado na **Figura 3.17**.

Segundo Torrents et al. (2012), é necessário que o equipamento esteja completamente isolado de materiais metálicos por no mínimo 200 mm, portanto a caixa de madeira é usada para isolar a bobina de outros materiais ferromagnéticos, como pregos e parafusos (**Figura 3.17**).

Figura 3.17: (a) e (b) montagem do ensaio indutivo



Fonte: Autor

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. O ensaio é feito com a medição da variação de indutância nos três eixos previamente marcados.

Para a obtenção dos resultados de orientação das fibras dentro do corpo de prova, foi utilizada a calibração proposta por Melo et al. (2016), para a qual foram confeccionados corpos de prova de isopor com orientação das fibras conhecidas para, assim, calcular por meio das **Equação 2.7** e **Equação 2.8** o número de orientação (n_i) e a contribuição relativa (C_i) das fibras. Para o parâmetro (λ) foi adotado 0,05, já para o parâmetro que correlaciona a geometria da bobina ($B_{v,i}$) para um cubo de 150 mm de aresta o seu valor é de 2342. Segundo Cavalaro et al. (2015), devem ser adotados os valores de 1 para (ϑ) e 0 para (μ).

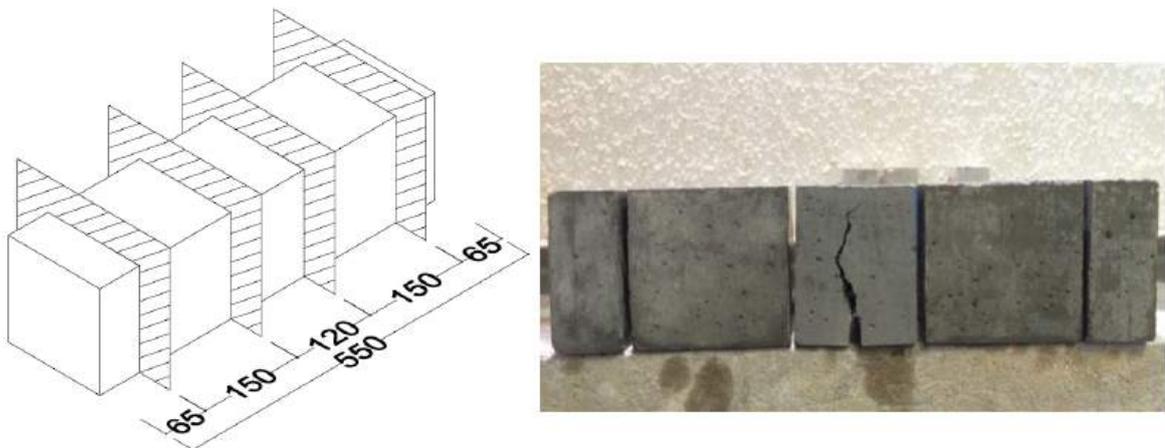
Para a análise da distribuição das fibras nos corpos de prova, Melo et al. (2016) equacionaram a reta de calibração (**Equação 3.1**) que correlaciona a quantidade de fibra com a indutância medida, já que a indutância equivalente (L_e) para cada corpo de prova e a massa de fibras de aço contidas já eram previamente conhecidas em trabalhos anterior desenvolvido por Melo (2018), os dados foram utilizados como referência para a calibração. Em que na **Equação 3.1**, C_f é a quantidade de fibras.

$$C_f = -0,012 + 23,86 \cdot L_e \quad (3.1)$$

3.7.1 Extração do corpo de prova

Após a execução do ensaio preconizado pela EN 14651 (2007) foram extraídos dois corpos de prova de cada testemunho utilizados no método indutivo. A seguir na **Figura 3.18** é apresentada a região em que foram retirados os corpos de prova.

Figura 3.18: Extração dos corpos de prova para o método indutivo



Fonte: Autor

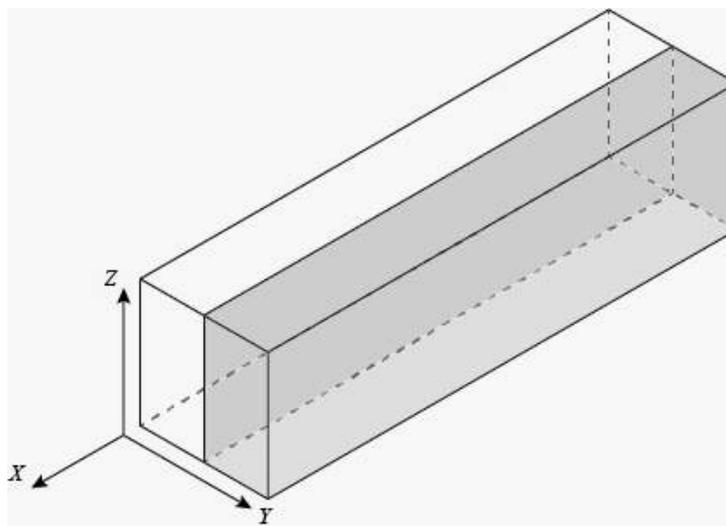
Foram analisadas no método indutivo corpos de prova cubico com 150 mm de aresta, como para cada viga ensaiada na EN 14651 (2007) foram extraídos 2 corpos de

prova cúbicos, logo foram obtidos 8 testemunhos cúbicos moldado em camadas e mais 8 testemunhos cúbicos compostos totalmente por concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA).

Como pode ser observado na **Figura 3.18** foram descartadas as extremidades da viga, devido à influência da parede sobre a orientação das fibras, fenômeno denominado de efeito parede (LARANJEIRA et al., 2012).

Em cada corpo de prova foram demarcados os eixos X, Y e Z relativos ao plano de moldagem. Na **Figura 3.19** é apresentado o posicionamento dos eixos durante o lançamento do concreto.

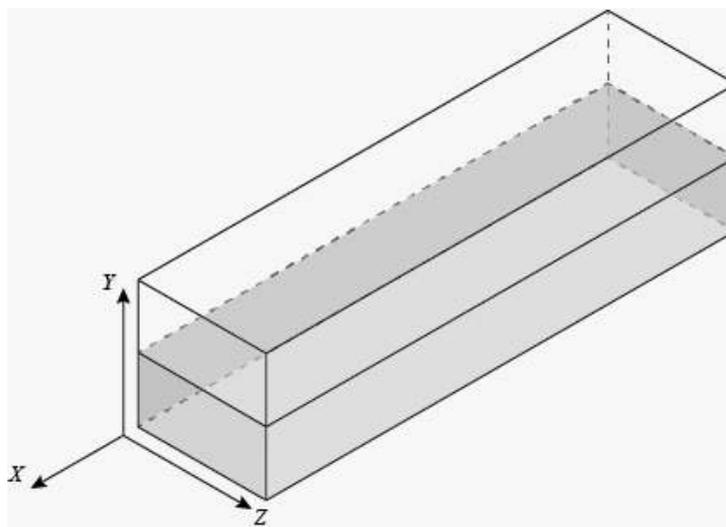
Figura 3.19: Posicionamento dos eixos durante o lançamento do concreto



Fonte: Autor

Como os corpos de prova sofreram uma rotação de 90° para a aplicação do entalhe previsto pelo ensaio de três pontos, os eixos de moldagem tiveram uma mudança em sua orientação. Logo, na **Figura 3.20** é possível visualizar o posicionamento dos eixos no qual foi utilizado como referência pelo método indutivo.

Figura 3.20: Posicionamento dos eixos após a rotação de 90°



Fonte: Autor

3.7.2 Orientação média das fibras

A avaliação da orientação média das fibras dos corpos de prova cúbicos foi realizada com a extração dos testemunhos. Os parâmetros de orientação foram determinados para cada cubo. Determinando o ângulo médio das fibras em relação aos três eixos coordenados, em que foi utilizada a **Equação 2.8** (C_i).

Também foi determinado o percentual de contribuição das fibras em relação aos eixos coordenados, X, Y e Z. Quando as fibras metálicas estão paralelas ao campo magnético elas apresentam uma contribuição máxima para a variação de indutância. Portanto, quanto maior a variação de indutância no eixo estudado mais paralelas as fibras estão em relação ao eixo.

A massa de fibras em cada corpo de prova moldado em camada não pode ser calculada pelos parâmetros existentes, já que o comprimento do corpo de prova com fibra diminui, interferindo no parâmetro que correlaciona a geometria da bobina e a amostra. Devido à incompatibilidade encontrada, será apresentada uma sugestão para trabalhos futuros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos referentes ao ensaio nos estado fresco e endurecido, além dos valores provenientes do ensaio de flexão a três pontos (EN 14651, 2007), por onde foram obtidos os valores correspondentes ao limite de proporcionalidade e as resistências residuais. Além disso, serão apresentados e discutidos os resultados da orientação das fibras por meio do método proposto por Torrents et al. (2012).

4.1 Caracterização Das Amostras No Estado Fresco

A partir da ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017) foi efetuado o ensaio de espalhamento para o concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) e também para o concreto autoadensável (CAA), sendo o CAA utilizado pra a produção das vigas em camadas (50% de CAARFA e 50% de CAA), para isso foram separados aproximadamente 15 litros de concreto. O **Quadro 4.1** apresenta os resultados obtidos para a caracterização no estado fresco dos dois concretos.

Quadro 4.1: Resultados no estado fresco

Parâmetro do Método do Cone de Abrams	CAARFA	CAA
Espalhamento (mm)	748	745
Tempo de Escoamento (s)	3,1	3,2
Índice de Estabilidade Visual	Alt. Estável	Estável

Fonte: Autor

Diante dos resultados obtidos no **Quadro 4.1** é perceptível que as produções estão enquadradas dentro do intervalo recomendando pela ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017), apresentando diâmetro final entre 650 e 850 mm e um tempo para atingir o espalhamento de 50 cm (T_{500}) entre 3 e 7 segundos. Além disso, 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.

Na **Figura 4.1** é apresentada a amostra de CAARFA utilizada no ensaio, por meio de inspeção visual não foi identificado nenhum problema, estando a amostra coesa e sem afloramento de água.

Figura 4.1: Detalhes do espalhamento do CAARFA



Fonte: Autor

4.2 Caracterização Mecânica Das Amostras

Para a caracterização mecânica do concreto, foram moldados 8 corpos de prova de concreto autoadensável reforçado com fibras (CAARFA) e 8 corpos de provas de concreto autoadensável (CAA), totalizando 16 corpos de prova. Dos 8 corpos de prova de cada amostra, 4 foram destinados à determinação da resistência à compressão e os outros 4 para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, seguindo em ambos os casos as recomendações estabelecidas pelas normas ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018) e ABNT NBR 7222 (ABNT, 2011), respectivamente.

Quadro 4.2: Resultados da caracterização mecânica dos CPs de CAARFA

Corpo de Prova	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
1	37,69	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: Autor

Quadro 4.3: Resultados da caracterização mecânica dos CPs de CAA

Corpo de Prova	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
1	34,67	4,33
2	30,76	3,51
3	35,07	4,06
4	35,28	3,69
Média	33,95	3,90
Desvio Padrão	2,14	0,37
Coef. de Variação (%)	6,30	9,49

Fonte: Oliveira (2019)

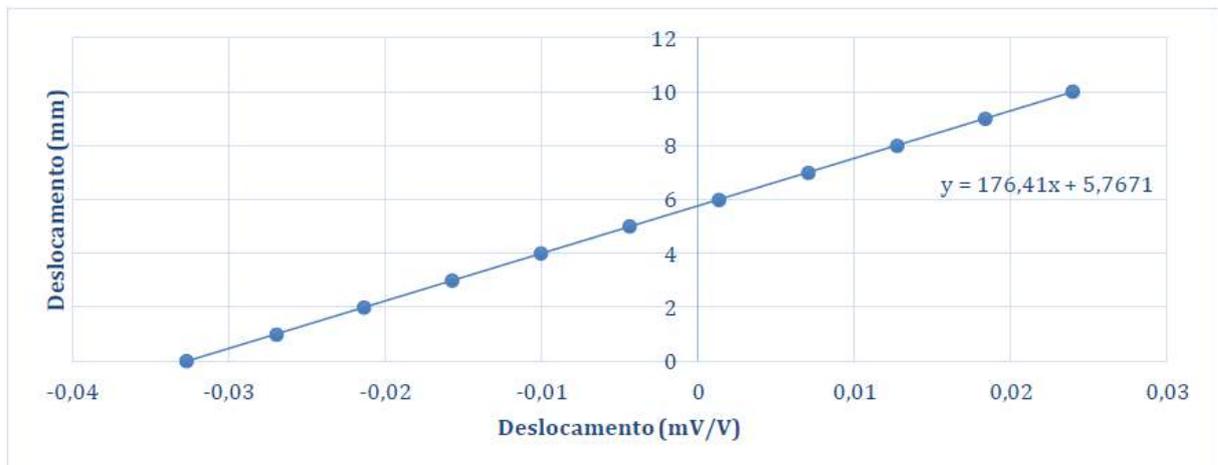
A partir dos resultados é perceptível que a caracterização mecânica do concreto, apresentou um valor elevado na resistência à compressão (**Quadro 4.2** e **Quadro 4.3**), superando os 30 MPa. Comparado a resistência à compressão entre os corpos de prova de CAARFA e CAA é perceptível uma diminuição média de aproximadamente 8% dos CPs de CAA em relação aos de CAARFA.

Já na resistência à tração, os CPs de CAA apresentaram valores superiores a 3,5 MPa, já com os CPs de CAARFA o valores foram superiores a 4 MPa (**Quadro 4.2** e **Quadro 4.3**). Para os corpos de prova de CAARFA durante o ensaio de tração, não houve a bipartição, uma vez que as fibras proporcionaram aos CPs esta coesão. Já para os de CAA como não havia a presença de fibras, os corpos de prova apresentaram bipartição ou desintegração.

4.3 Calibração Dos LVDT's

A partir dos valores do deslocamento médio em mV/V e em mm , deve ser plotado um gráfico para cada um dos LVDT's, de onde o valor da inclinação da reta obtido será o fator de calibração utilizado para a conversão dos valores em mV/V para mm . Na **Figura 4.2** é apresentado o gráfico do LVDT Esquerdo e na **Figura 4.3** para o LVDT Direito, também são apresentados no **Quadro 4.4** e **Quadro 4.5** os dados de calibração do LVDT da esquerda e da direita, consecutivamente.

Figura 4.2: Gráfico de calibração do LVDT esquerdo



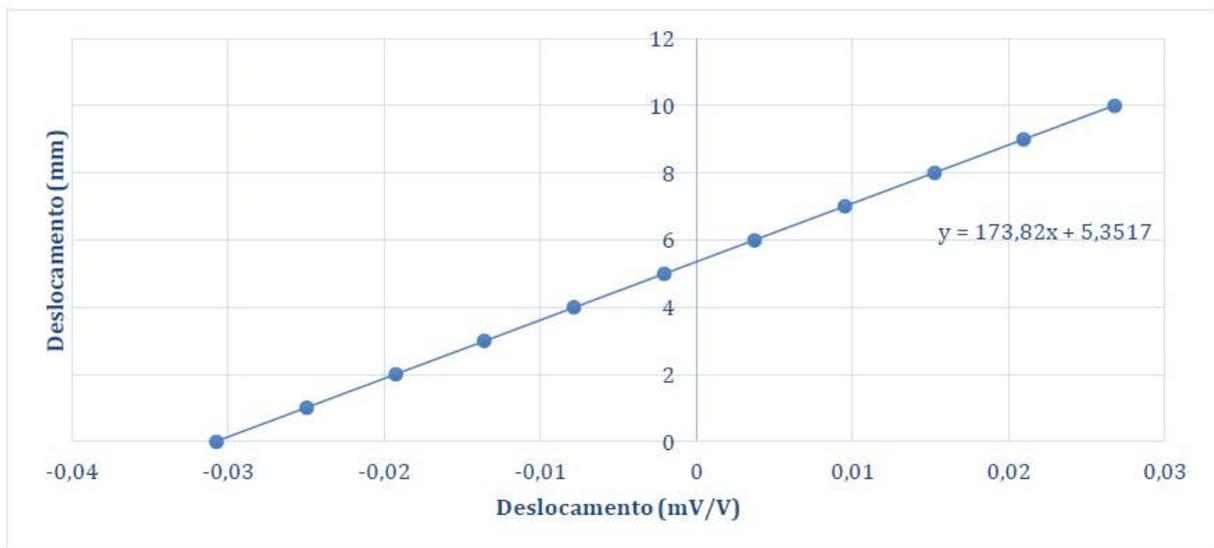
Fonte: Oliveira (2019)

Quadro 4.4: Dados de calibração do LVDT da esquerda

Deslocamento (mm)	Deslocamento (mV/V) A	Deslocamento (mV/V) B	Deslocamento (mV/V) C	Deslocamento Médio (mV/V)
0	-0,0327506	-0,0326676	-0,0326724	-0,032696867
1	-0,0270153	-0,0269285	-0,0269828	-0,026975533
2	-0,0213911	-0,0213024	-0,0213627	-0,021352067
3	-0,015767	-0,0156751	-0,0157456	-0,015729233
4	-0,0100625	-0,0100496	-0,0100899	-0,010067333
5	-0,00440505	-0,00432035	-0,0043954	-0,0043736
6	0,00132045	0,00138622	0,00131989	0,001342187
7	0,00702779	0,0070788	0,0070226	0,007043063
8	0,0126779	0,0127488	0,0126778	0,0127015
9	0,0183412	0,0183609	0,0183063	0,018336133
10	0,0239212	0,0239297	0,0239696	0,023940167

Fonte: Oliveira (2019)

Figura 4.3: Gráfico de calibração do LVDT direito



Fonte: Oliveira (2019)

Quadro 4.5: Dados de calibração do LVDT da direita

Deslocamento (mm)	Deslocamento (mV/V) A	Deslocamento (mV/V) B	Deslocamento (mV/V) C	Deslocamento Médio (mV/V)
0	-0,0306903	-0,030785	-0,0307875	-0,030754267
1	-0,0249125	-0,0249725	-0,0250324	-0,024972467
2	-0,0192375	-0,0192779	-0,019308	-0,019274467
3	-0,0135778	-0,0135675	-0,0136125	-0,013585933
4	-0,00781725	-0,00782258	-0,00788274	-0,007840857
5	-0,00205702	-0,00205079	-0,00210962	-0,002072477
6	0,00369991	0,00374733	0,00368751	0,003711583
7	0,00949956	0,00954103	0,00949556	0,00951205
8	0,0152696	0,0152975	0,0152397	0,015268933
9	0,0209593	0,0210071	0,0209665	0,020977633
10	0,0267856	0,0267885	0,0267475	0,026773867

Fonte: Oliveira (2019)

Portanto,

LVDT Esquerda = 176,41;

LVDT Direita = 173,82.

Esses valores de conversão serão utilizados para a obtenção da abertura de fissuras captados pelos LVDT's.

4.4 Resultados Obtidos Com o Ensaio Da Norma EN 14651 (2007)

Para uma melhor visualização das amostras, o **Quadro 4.6** fornece um resumo com as informações sobre os corpos de prova analisados no ensaio de flexão à 3 pontos.

Quadro 4.6: Informações dos corpos de prova analisados

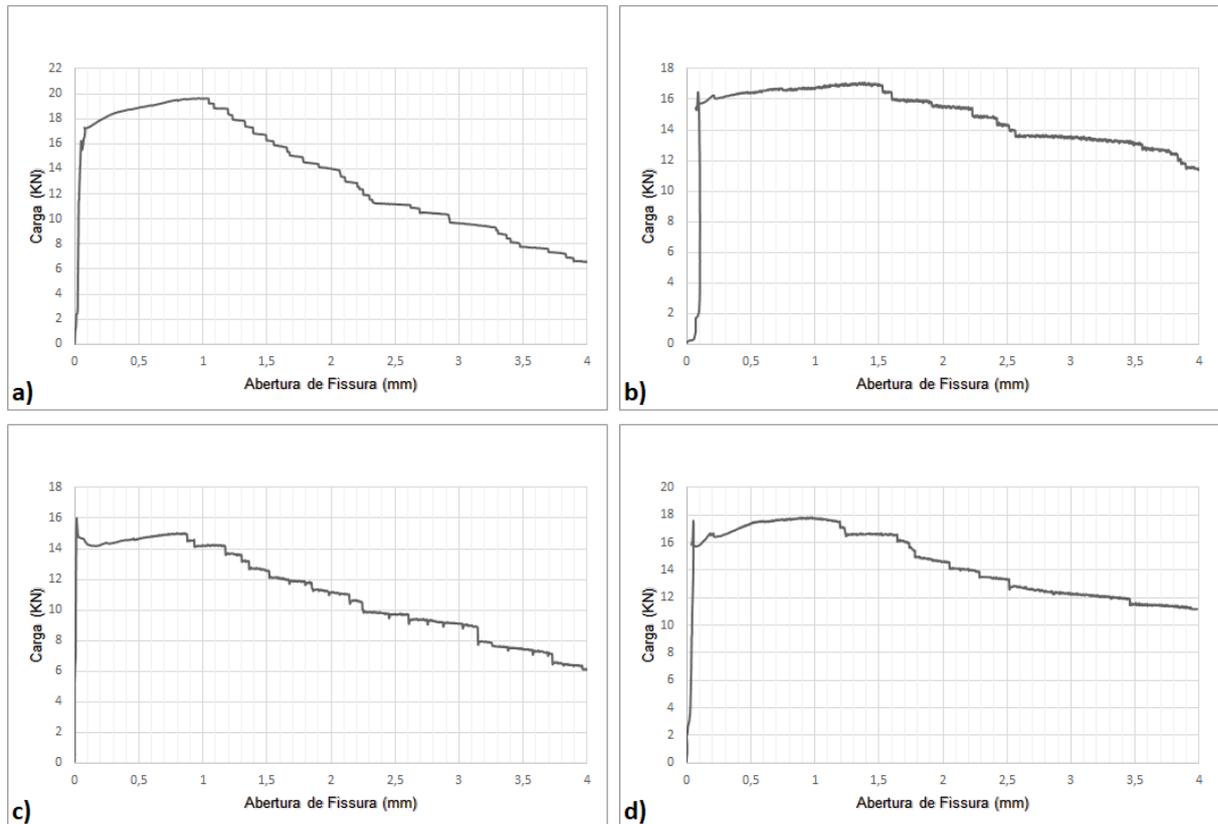
Tipo	Tipo de Fibra	Teor (Kg/m)	Teor (% em volume)	Quantidade de corpos de prova	Dimensões dos corpos de prova (cm ³)
Dupla camada (50% CAARFA e 50% CAA)	Aço	25	0,16	4	15x15x55
100% CAARFA	Aço	25	0,32	4	15x15x55

Fonte: Autor

Como já citado em capítulos anteriores deste trabalho, a partir da realização do ensaio preconizado pela EN 14651 (2007), foi possível obter valores para a abertura de fissura com o auxílio dos LVDT. O ensaio foi realizado com um deslocamento de até 4 mm, em que cada ensaio teve uma duração de aproximadamente 25 minutos (1500 segundos). Já os LVDT's captaram dados da abertura de fissura a cada 1 segundo, gerando aproximadamente 1700 valores para cada uma das vigas produzidas. Para a obtenção da abertura de fissura pelos LVDT's foi necessário a utilização dos valores de conversão para transformar os resultados de mV/V para mm , como já citado na seção anterior.

A análise dos gráficos de carga por abertura de fissura dos 4 corpos de prova com 100% de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) estão representados na **Figura 4.4**.

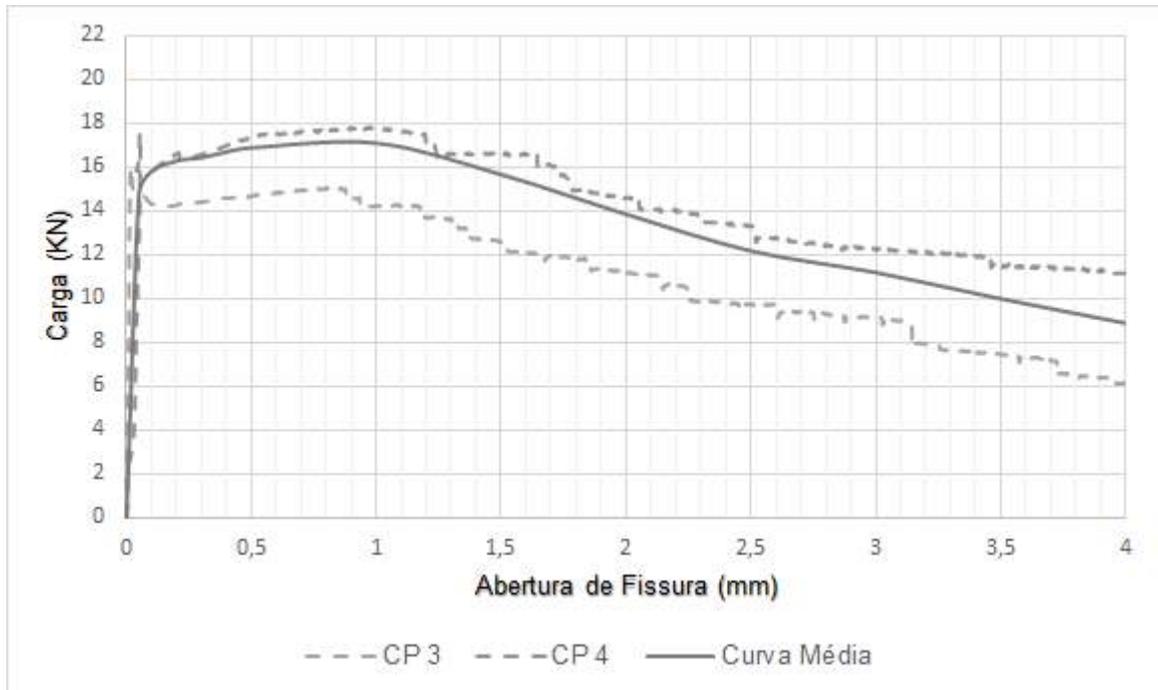
Figura 4.4: Curva de carga por abertura de fissura dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA: CP 1 (a); CP 2 (b); CP 3 (c); CP 4 (d)



Fonte: Autor

A seguir na **Figura 4.5** está representada a curva média dos 4 corpos de prova compostos por 100% de CAARFA, em que as curvas tracejadas representam os CP's que obtiverem os maiores e menores valores.

Figura 4.5: Curva média de carga por abertura de fissura dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA



Fonte: Autor

Em seguida, foram efetuados os cálculos de limite de proporcionalidade e resistência residuais em 0,5 mm e 2,5 mm de abertura de fissura utilizando a **Equação 2.2** e **Equação 2.3**, como também foram efetuadas as relações de $f_{R,1}/LOP$ e $f_{R,3}/f_{R,1}$. Os resultados dos 4 corpos de prova de 100% de CAARFA estão representados no **Quadro 4.7**.

Quadro 4.7: Resultados obtidos a partir das curvas de carga por abertura de fissura das 4 amostras compostas por 100% de CAARFA

Corpos de Prova	LOP (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,1}/LOP$	$f_{R,3}/f_{R,1}$	Classificação de desempenho
CP 1	5,15	6,04	3,59	1,17	0,59	6,0a
CP 2	4,92	5,26	4,56	1,07	0,87	5,0b
CP 3	5,13	4,7	3,13	0,92	0,66	4,0a
CP 4	5,33	5,56	4,25	1,04	0,76	5,0a
Média	5,13	5,39	3,88	1,05	0,72	5,0a

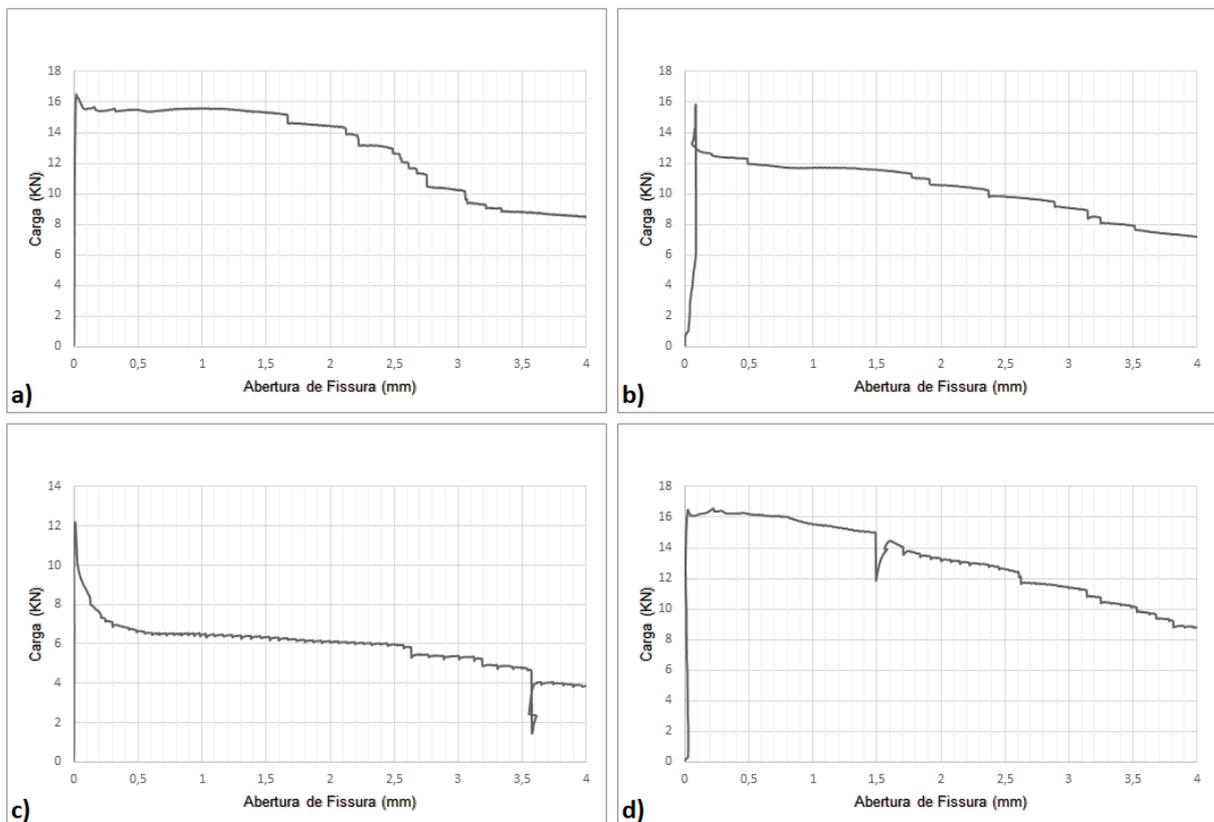
Fonte: Autor

Como observado pelo **Quadro 4.7**, as relações $f_{R,1}/LOP$ e $f_{R,3}/f_{R,1}$ foram satisfatórias quando comparadas com o **Quadro 2.4** e **Quadro 2.5**, pois foram superiores a 0,4 e 0,5, respectivamente. Portanto, existe a garantia de bom desempenho das amostras

compostas por 100% de CAARFA. Além disso, de acordo com os critérios estabelecidos pelo FIB Model Code (2013), apresentado no **Quadro 2.1**, foi verificado que a média dos resultados das amostras compostas por 100% de CAARFA recebeu uma classificação de desempenho “5,0a”.

De forma análoga, foram obtidas as curvas de carga por abertura de fissura do concreto moldado em camadas (dupla camada). A seguir na **Figura 4.6** está representado o desempenho individual de cada uma das 4 amostras de dupla camada por meio da curva de carga por abertura de fissura.

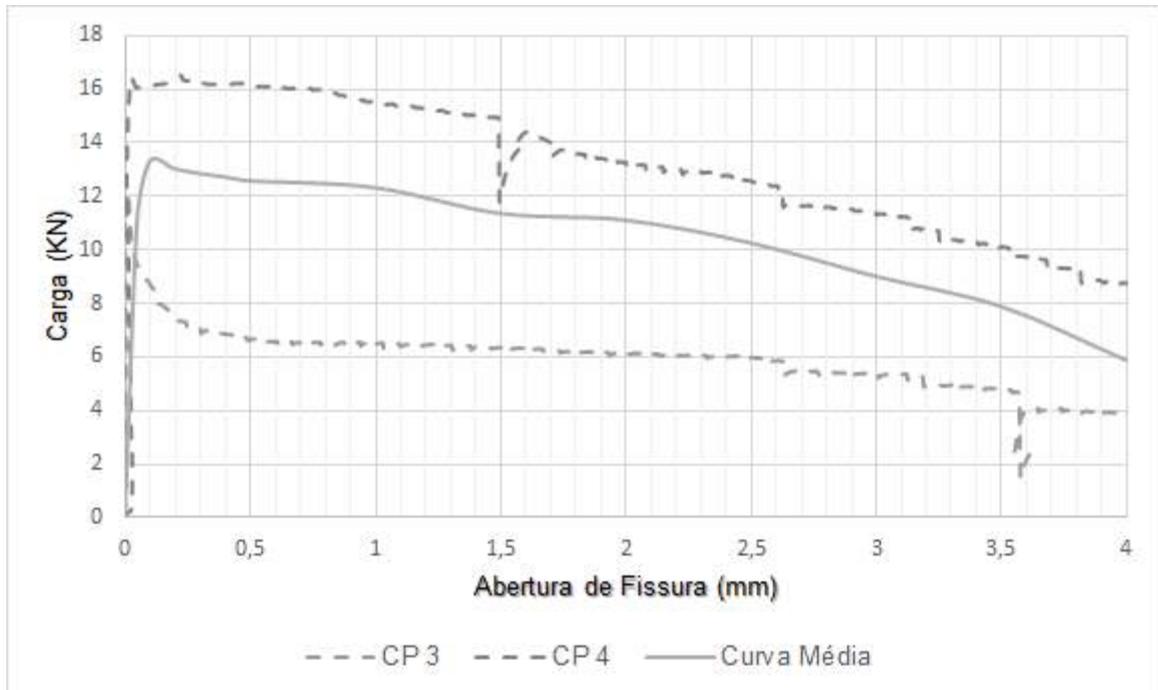
Figura 4.6: Curva de carga por abertura de fissura dos corpos de prova moldado em camadas (dupla camada): CP 1 (a); CP 2 (b); CP 3 (c); CP 4 (d)



Fonte: Autor

A seguir na **Figura 4.7** está representada a curva média dos 4 corpos de prova compostos moldados em camadas, em que as curvas tracejadas representam os CP's que obtiverem os maiores e menores valores.

Figura 4.7: Curva média de carga por abertura de fissura dos corpos de prova moldados em camadas (dupla camada)



Fonte: Autor

Como realizado com os corpos de prova de 100% de CAARFA, foram efetuados os cálculos de limite de proporcionalidade e resistência residuais em 0,5 mm e 2,5 mm de abertura de fissura para os corpos de provas moldados em camadas, assim como apresentado na **Equação 2.2** e **Equação 2.3**, além disso também foram efetuadas as relações de $f_{R,1}/LOP$ e $f_{R,3}/f_{R,1}$. Os resultados dos 4 corpos de prova moldados em camadas estão representados no **Quadro 4.8**.

Quadro 4.8: Resultados obtidos a partir das curvas de abertura de fissura das 4 amostras moldadas em camadas (dupla camada)

Corpos de Prova	LOP (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,1}/LOP$	$f_{R,3}/f_{R,1}$	Classificação de desempenho
CP 1	5,29	4,96	4,05	0,94	0,82	4,0b
CP 2	4,25	3,83	3,15	0,9	0,82	3,0b
CP 3	4,15	2,12	1,91	0,51	0,9	2,0b
CP 4	5,26	5,18	4,02	0,98	0,78	5,0a
Média	4,74	4,02	3,28	0,83	0,83	4,0b

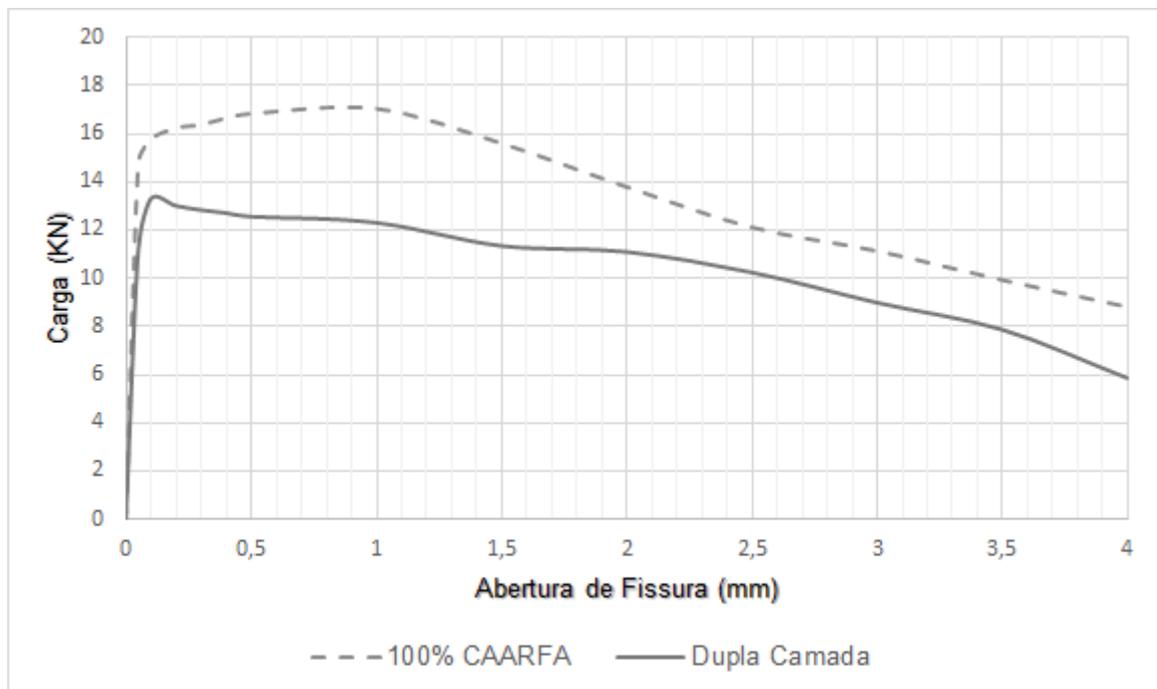
Fonte: Autor

As amostras moldadas em camadas, como pode ser observado no **Quadro 4.8**, atenderam os critérios requisitados pela **Equação 2.2** e **Equação 2.3**, portanto $f_{R,1}/LOP$

e $f_{R,3}/F_{R,1}$ foram superiores a 0,4 e 0,5 respectivamente atendendo aos critérios de garantia de bom desempenho. De acordo com os critérios definidos pela FIB Model Code (2013), apresentados no **Quadro 2.1**, verificou-se que a média dos resultados obtidos das amostras moldadas em camadas recebeu uma classificação de desempenho “4,0b”.

Para uma melhor representação, na **Figura 4.8** é ilustrada a curva média sobrepostas dos corpos de prova de 100% de CAARFA e dos corpos de prova em camadas (50% de CAA e 50% de CAARFA).

Figura 4.8: Curvas médias de carga por abertura de fissura dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA e da dupla camada



Fonte: Autor

A curva média permite identificar que existe uma diferença de desempenho mecânico entre os corpos de prova moldados com 100% de CAARFA com os moldados em camadas. Essa diferença se encontra tanto na resistência para fissuração como na resistência residual.

A seguir é demonstrado no **Quadro 4.9** uma comparação de desempenho das amostras compostas por 100% de CAARFA e de dupla camada, com base das médias dos parâmetros de resistência: limite de proporcionalidade (LOP), $f_{R,1}$ e $f_{R,3}$.

Quadro 4.9: Comparação do desempenho dos corpos de prova compostos com 100% de CAARFA e de dupla camada submetidos a EN 14651 (2007)

Parâmetros de Resistência	CP com 100% de CAARFA	CP de Dupla Camada	Diferença (%)
LOP (MPa)	5,13	4,74	-8,28
$f_{R,1}$ (MPa)	5,39	4,02	-34,08
$f_{R,3}$ (MPa)	3,88	3,28	-18,38

Fonte: Autor

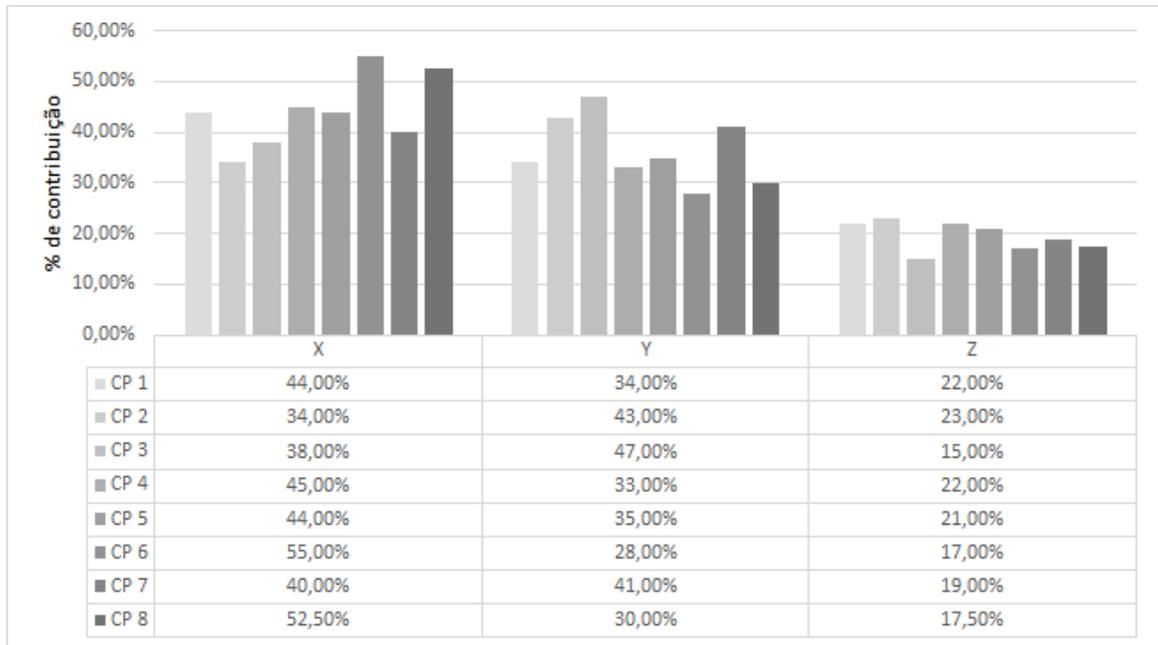
O limite de proporcionalidade da dupla camada obteve uma diminuição de 8,28% quando comparada com as de 100% CAARFA, já a resistência residual com a abertura de fissura de 0,5 mm obteve uma diminuição mais significativa de 34,08% em seu desempenho. Para a resistência residual com a abertura de fissura de 2,5 mm a diminuição foi de 18,38%.

4.5 Resultados Obtidos Pelo Método Indutivo

Para a avaliação da orientação média das fibras, foram extraídos dois testemunhos de cada viga ensaiada na EN 14651 (2007). Portanto, foram obtidos 8 testemunhos cúbicos (15 cm de aresta) com 100% de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) e outros 8 testemunhos cúbicos da dupla camada. Foi determinado o ângulo médio das fibras em relação aos três eixos coordenados utilizando a **Equação 2.8**, em que todos os resultados estão expostos no Apêndice A (**Quadro 5.1** e **Quadro 5.2**).

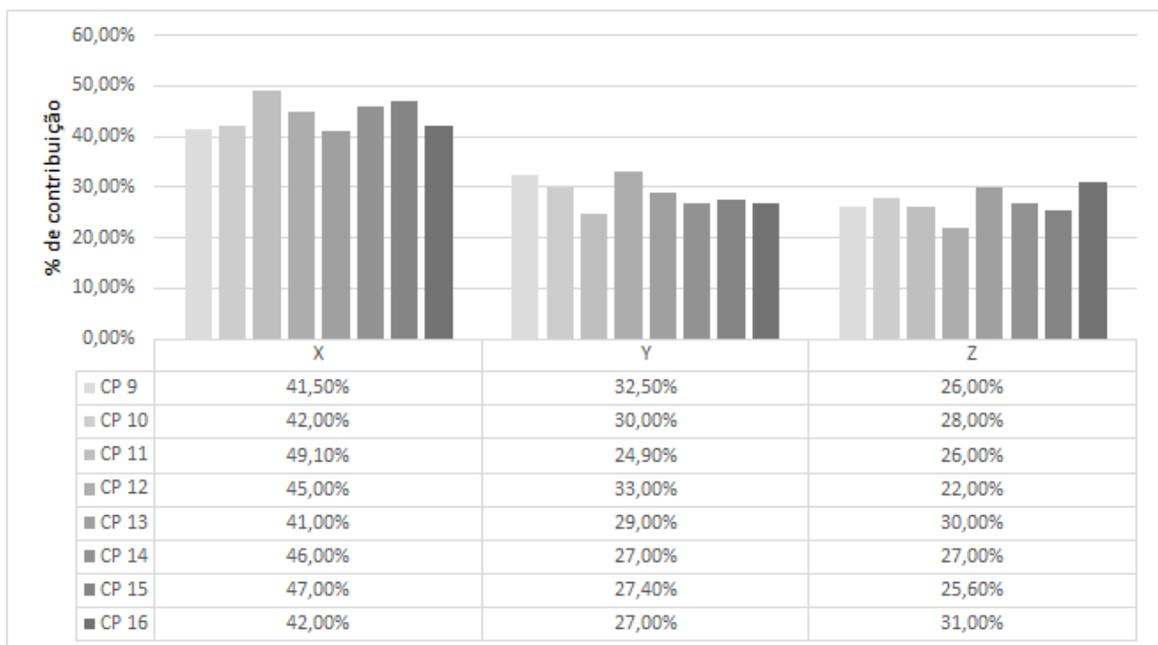
Foram determinados o percentual de contribuição das fibras em relação à cada um dos eixos coordenados, X, Y e Z, utilizando a **Equação 2.7**. Esse parâmetro identifica a contribuição das fibras, já que caso estejam paralelas ao eixo analisado, a sua contribuição com a variação de indutância é máxima. Portanto, quanto maior a contribuição da fibra no eixo, maior é a quantidade de fibras paralelas. Na **Figura 4.9** é apresentada a contribuição das fibras para os eixos coordenados dos testemunhos compostos com 100% de CAARFA, já na **Figura 4.10** são expostos os resultados relativos à dupla camada.

Figura 4.9: Contribuição por eixo de alinhamento das fibras pelas amostras de 100% de CAARFA



Fonte: Autor

Figura 4.10: Contribuição por eixo de alinhamento das fibras pelas amostras moldadas em camadas



Fonte: Autor

A partir dos resultados expostos acima, foi efetuado uma média aritmética dos percentuais de contribuição para cada eixo com seus respectivos coeficientes de varia-

ção. No **Quadro 4.10** a seguir é exposta a contribuição média das fibras para os corpos de prova de 100% de CAARFA.

Quadro 4.10: Contribuição média das fibras nas amostras compostas por 100% de CAARFA

Eixo	Contribuição média (%)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
X	44,06	0,066	0,15
Y	36,38	0,062	0,17
Z	19,56	0,027	0,14

Fonte: Autor

Ao analisar a média dos percentuais de orientação das fibras nos corpos de prova compostos com 100% de CAARFA, é perceptível que existe uma tendência de alinhamento ao plano perpendicular do fluxo de lançamento do concreto, o eixo XY. Essa maior tendência de alinhamento das fibras ao eixo XY ocorre devido à fluidez do CAARFA que proporciona o alinhamento das fibras de forma paralela às paredes das formas.

No **Quadro 4.11** é apresentada a contribuição média das fibras para os corpos de prova moldados em camadas.

Quadro 4.11: Contribuição média das fibras nas amostras moldadas em camadas

Eixo	Contribuição média (%)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
X	44,20	0,028	0,06
Y	28,85	0,026	0,09
Z	26,95	0,026	0,10

Fonte: Autor

A partir da análise do **Quadro 4.11** é perceptível que ocorreu um aumento da influência do eixo Z nos corpos de prova moldados em camadas em relação ao de 100% de CAARFA, uma dos motivos para esse aumento é a utilização da placa para moldagem da dupla camada que provocou o fenômeno denominado de efeito parede (LARANJEIRA et al., 2012), como a área de superfície das paredes das formas é maior na dupla camada devido ao uso das placas, o efeito parede ocorreu em uma escala maior quando comparado com a moldagem dos corpos de prova com 100% de CAARFA.

4.6 Análise De Resultados

4.6.1 Análise dos dados obtidos pela EN 14651 (2007)

Ao analisar os resultados obtidos pelo ensaio preconizado pela EN 14651 (2007) é perceptível que o limite de proporcionalidade (LOP), o estado limite de serviço (ELS) e o estado limite último (ELU) foram superiores nos corpos de prova compostos por 100% de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA) quando comparados com os corpos de prova moldados em camadas.

Um fator que deve ser levado em consideração é a variação dos resultados obtidos pelas vigas de 100% de CAARFA e de dupla camada, a seguir no **Quadro 4.12** e **Quadro 4.13** são apresentados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos corpos de prova com 100% de CAARFA e de dupla camada.

Quadro 4.12: Análise dos resultados dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA

	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
LOP (MPa)	5,13	0,17	0,033
$f_{R,1}$ (MPa)	5,39	0,56	0,104
$f_{R,3}$ (MPa)	3,88	0,64	0,166

Fonte: Autor

Quadro 4.13: Análise dos resultados dos corpos de prova moldados em camadas

	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
LOP (MPa)	4,74	0,62	0,13
$f_{R,1}$ (MPa)	4,02	1,4	0,35
$f_{R,3}$ (MPa)	3,28	1	0,31

Fonte: Autor

A partir dos dados expostos acima, é evidente que o valor dos corpos de prova moldados em camadas sofreu uma variação maior em relação aos de 100% de CAARFA. Analisando os resultados individuais de cada testemunho, é visível que o corpo de prova 3 (**Quadro 4.8**) apresentou um maior distanciamento em seus resultados quando comparado com os outros testemunhos. Segundo Prisco, Colombo e Dozio (2013), em elementos de concreto reforçado com fibras (CRF) que apresentam paredes finas a utilização do entalhe para a realização de ensaios como a EN 14651 (2007) pode provocar o surgimento de dispersão nos resultados, bem como também uma variação na orientação das fibras. Logo, a diferença encontrada nos resultados dos corpos de prova moldados em camadas são explicadas pela utilização do entalhe, especificada pela EN 14651 (2007).

4.6.2 Análise dos resultados obtidos pela EN 14651 (2007) e pelo método indutivo

Uma das características mais importantes do concreto reforçado com fibras (CRF) é a capacidade de redistribuição das tensões após a ruptura, formando assim as pontes de tensões entre a matriz do compósito e as fibras (FIGUEIREDO, 2011). Para que isso ocorra é necessário que exista uma orientação preferencial das fibras, e que essa orientação preferencial esteja no eixo mais demandando. Portanto no **Quadro 4.14** e **Quadro 4.15** serão expostos os resultados da EN 14651 (2007) e do método indutivo de cada corpo de prova, em que serão apresentados os resultados do limite de proporcionalidade (LOP), do estado limite de serviço (ELS), e da razão entre o ELS e o LOP, além da orientação média de cada eixo.

Quadro 4.14: Resultados dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA

Corpos de Prova	EN 14651 (2007)			Orientação média (%)		
	LOP (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,1}/LOP$	X	Y	Z
CP 1	5,15	6,04	1,17	39,0	38,5	22,5
CP 2	4,92	5,26	1,07	41,5	40,0	18,5
CP 3	5,13	4,7	0,92	49,5	31,5	19,0
CP 4	5,33	5,56	1,04	46,2	35,5	18,3

Fonte: Autor

Quadro 4.15: Resultados dos corpos de prova moldados em camadas

Corpos de Prova	EN 14651 (2007)			Orientação média (%)		
	LOP (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,1}/LOP$	X	Y	Z
CP 1	5,29	4,96	0,94	41,8	31,2	27,0
CP 2	4,25	3,83	0,9	47,0	29,0	24,0
CP 3	4,15	2,12	0,51	43,5	28,0	28,5
CP 4	5,26	5,18	0,98	44,5	27,2	28,3

Fonte: Autor

O **Quadro 4.14** apresenta os resultados dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA, por ele é possível analisar que a razão entre ELU e o LOP em 3 dos 4 corpos de prova foram maiores que 1, portanto ocorreu o processo de endurecimento, já que ocorreu um ganho de resistência após a formação da fissura. Ao analisar a orientação média das fibras em cada corpo de prova é perceptível que a orientação preferencial das fibras foi no eixo XY.

No **Quadro 4.15** são expostos os resultados relativos aos corpos de prova moldados em camadas, com base na análise da razão entre o ELU e o LOP é perceptível que em todos os corpos de prova essa razão foi abaixo de 1, indicando que ocorreu um processo de amolecimento, já que após a formação da fissura foi apresentado uma perda de resistência. Analisando os resultados obtidos pelo método indutivo é perceptível que todos os corpos de prova sofreram uma diminuição da influencia do eixo Y e um aumento ao eixo Z em relação aos testemunhos compostos por 100% de CAARFA. Portanto, a queda de resistência no pós-fissuração na dupla camada está diretamente ligada à mudança relacionada à orientação preferencial das fibras, em que o eixo de maior demandada estrutural durante o ensaio de flexão de 3 pontos é o do eixo XY.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Esse trabalho realizou uma análise de novas formas de moldagem do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA), em que é priorizada a utilização das fibras nas regiões de maior demanda estrutural. Portanto, foram moldados corpos de prova com 50% de CAARFA e 50% de concreto autoadensável (CAA), em que as fibras estão localizadas na região tracionada durante o ensaio de flexão. Assim busca-se otimizar a utilização das fibras somente nas regiões em que ela é demandada, contribuindo para a competitividade do CAARFA no cenário da construção civil brasileira em relação a outros métodos existentes. Ao analisar os resultados, é perceptível que as vigas moldadas em camadas apresentaram resultados satisfatórios, já que foram atendidos os critérios de garantia de bom desempenho, podendo assim substituir totalmente ou parcialmente barras e telas metálicas.

Para que esses resultados fossem atingidos, foi necessário a aplicação do ensaio preconizado pela EN 14651 (2007), como também o método indutivo. Em que foram produzidas vigas com dimensão de $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$ assim como especificado pela EN 14651 (2007). Logo, as vigas de dupla camada e as compostas por 100% de CAARFA foram submetidas ao ensaio de flexão de três pontos. Posteriormente, foram extraídos das vigas corpos de prova cúbicos com 15 cm de aresta, os quais foram utilizados para a obtenção da orientação das fibras com o método indutivo. A partir dos resultados foi possível analisar a influencia da orientação das fibras com o desempenho mecânico obtido com as vigas moldadas em camadas.

Os resultados demonstraram que as peças de dupla camada apresentam uma resistência inferior quando comparado com as peças moldadas com 100% de CAARFA, em relação ao limite de proporcionalidade (LOP) e as resistências residuais. Isso se deve a diminuição do teor de fibras utilizadas nas vigas moldadas em camadas, como também aos efeitos provocados na moldagem de elementos de concreto reforçado com fibras (CRF) que apresentam paredes finas. Um dos fatores que colaboram para esse efeito na moldagem de CRF com paredes finas é a mudança da orientação preferencial das fibras em relação as vigas compostas por 100% de CAARFA. Como também, para a realização do ensaio preconizado pela EN 14651 (2007) é necessário a aplicação de um entalhe na região central da viga que influencia nos resultados obtidos das vigas moldadas em camadas. Para que essa influência do entalhe nos resultados não ocorra é sugerido para trabalhos futuros a aplicação de ensaios de flexão de 4 pontos que não demandem a aplicação do entalhe (PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013).

Em relação à orientação preferencial das fibras, foi perceptível que as vigas compostas por 100% de CAARFA apresentaram uma orientação preferencial em relação ao eixo XY, já nas vigas moldadas em camadas ocorreu um aumento da influência do

eixo Z e uma diminuição do eixo Y. Isso se deve pela necessidade da utilização de uma placa para a produção da dupla camada, a sua utilização interfere diretamente com a orientação das fibras durante a moldagem devido ao denominado efeito parede (LARANJEIRA et al., 2012). Consequentemente, em seus resultados a dupla camada sofreu um processo de amolecimento na pós-fissuração, ocasionado diretamente pelo aumento da influencia do eixo Z, já que a orientação mais demandada das fibras durante a realização do ensaio à flexão é o eixo XY.

No geral, o uso da dupla camada é interessante por reduzir a quantidade de fibras de aço utilizadas e apresentar resultados satisfatórios, já que os critérios estabelecidos pelo FIB Model Code (2013) foram atendidos com uma boa margem. Portanto as vigas moldadas em camadas apresentam uma boa performance, podendo atender bem o desempenho mecânico demandado pelo campo prático.

5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuro pode-se citar:

- Avaliar o comportamento estrutural de novas formas de moldagem em camadas do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras, do concreto de ultra-alto desempenho e do concreto convencional. Afim de valida-las para a utilização no campo prático;
- Desenvolvimento de novos parâmetros para o método indutivo que correlacione a geometria da bobina com a moldagem em camadas, possibilitando assim a obtenção da massa das fibras dos testemunhos analisados;
- Análise do comportamento de elementos de concreto moldados em camadas por meio de ensaio de flexão à 4 pontos, que não necessite da aplicação de um entalhe;
- Análise do fluxo de lançamento na orientação das fibras para elementos de concreto moldados em camadas;
- Desenvolvimento de novas técnicas para a moldagem do concreto em camadas, que facilite a execução da moldagem e induza uma orientação preferencial das fibras.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15530. *Fibras de aço para concreto—Especificações*. ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT, 2007.

ABNT NBR 15823-2. *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*. ABNT, 2017.

ABNT NBR 15910. *NBR 15910: Máquinas elétricas portáteis na construção civil*. ABNT, 2010.

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

ABNT NBR 7222. *NBR 7222: Argamassa e concreto. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. ABNT, 2011.

ABNT NBR NM 248. *NBR NM 248: Agregados. Determinação da composição granulométrica*. ABNT, 2003.

ABNT NBR NM 30. *NBR NM 30: Agregado miúdo. Determinação da absorção de água*. ABNT, 2001.

ABNT NBR NM 45. *NBR NM 45: Agregados—Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios*. ABNT, 2006.

ABNT NBR NM 52. *NBR NM 52: Agregado miúdo-Determinação da massa específica e massa específica aparente*. ABNT, 2009.

ABNT NBR NM 53. *NBR NM 53: Agregado graúdo. Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. ABNT, 2003.

ACCETTI, K.; PINHEIRO, L. Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 42.

AGRA, R. R. Influência do tipo de fibra no comportamento à flexão de vigas de concreto fluido. Universidade Federal de Alagoas, 2017.

ALI, E. E.; AL-TERSAWY, S. H. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 35, p. 785–791, 2012.

AWA COMERCIAL. *Fibras de aço*. 2020. Disponível em: <<https://awacomercial.com.br/produtos/fibra-de-aco/>>. Acesso em: 19 de Novembro de 2020.

- BASF. *Super plastificante*. 2021. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/basf/glenium%2051.pdf>>. Acesso em: 06 de Janeiro de 2021.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. [S.l.]: Crc Press, 2006.
- CAETANO, L. et al. Compósito de matriz cimentícia reforçada com fibras. *II Seminário de Patologia das edificações*, UFRGS Porto Alegre, p. 4, 2004.
- CARMO, P. C. d. Detecção de danos em elementos de concreto por meio de correlação de imagens digitais. Universidade Federal de Alagoas, 2020.
- CAVALARO, S. H. P. et al. Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in sfr. *Materials and structures*, Springer, v. 48, n. 6, p. 1859–1873, 2015.
- EN 14651. 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. 15p. 2007.*
- FIB MODEL CODE. FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON - FIB. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010. Switzerland, 402p. 2013.*
- 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.
- FIGUEIREDO, A. D. d. *Concreto reforçado com fibras*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- FIGUEIREDO, E. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de resistência, fissuras e deformações. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON*, p. 985–1015, 2005.
- FILHO, R. T. *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. 1997, 93p. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Pontifícia Universidade Católica do Rio . . . , 1997.
- FREITAS, D. J. et al. Análise do comportamento de elementos estruturais em dupla camada de concreto por meio de ensaio a flexão. Congresso Brasileiro do Concreto, 2019.
- GALEOTE, E. et al. Correlation between the barcelona test and the bending test in fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 152, p. 529–538, 2017.

- GÓIS, F. A. P. et al. Avaliação experimental do comportamento do concreto fluido reforçado com fibras de aço: influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. Universidade Federal de Alagoas, 2010.
- GOMES, P. *Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete*. 2002. 139f. Tese (Doutorado) — D. Sc. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.
- GOMES, P. C. C.; BARROS, A. d. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. *São Paulo: PINI*, v. 172, 2009.
- GRÜNEWALD, S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. Delft University Press, 2004.
- GYLLTOFT. *Design methods for fibre-reinforced concrete: a state-of-the-art review*. 2008.
- HANNANT, D. Fiber-reinforced cements and concretes. *Ed. London*, 1994.
- JAMES, I. Aci committee 544, state-of-the-art report on fiber reinforced concrete, aci committee 544 report 544.1 r-96. *Detroit: American Concrete Institute*, 1996.
- LARANJEIRA, F. et al. Framework to predict the orientation of fibers in frc: a novel philosophy. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, v. 42, n. 6, p. 752–768, 2012.
- LIMA, I. E. P. Estudo dos aspectos de dimensionamento de elementos estruturais de concreto reforçado com fibras com base na teoria de flexão em vigas. Universidade Federal de Alagoas, 2020.
- LISBÔA, E. M. et al. Obtenção do concreto autoadensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. Universidade Federal de Alagoas, 2004.
- LÖFGREN, I. *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. [S.l.]: Chalmers University of Technology, 2005.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a polímeros, ed. *Edgard Blücher Ltda, SP*, 1985.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. [S.l.]: Ibracon, 2008.
- MELO, A. H. V. d. Análise experimental da influência do fluxo de lançamento na orientação das fibras em elementos planos de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço. Universidade Federal de Alagoas, 2018.

- MELO, A. H. V. d. et al. Avaliação do método indutivo na determinação da quantidade e da orientação médias das fibras em crfa. *Revista Concreto e Construções*, 2016.
- MELO, K. A. d. et al. Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário. Florianópolis, SC, 2005.
- MONTE, R. *Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015.
- NAAMAN, A.; SHAH, S. Bond studies on oriented and aligned steel fibres. In: *RILEM Symp, Fibre Reinf Cem and Concr*. [S.l.: s.n.], 1975. p. 171–178.
- NUNES, S. d. C. B. *Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades*. 2001.
- OLIVEIRA, K. C. d. S. Aplicação da correlação digital de imagens na análise de abertura de fissuras do caarfa. Universidade Federal de Alagoas, 2019.
- PRISCO, M. D.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fiber reinforced concrete in the new fib model code. In: *4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1.
- PRISCO, M. di; COLOMBO, M.; DOZIO, D. Fibre-reinforced concrete in fib model code 2010: principles, models and test validation. *Structural Concrete*, Wiley Online Library, v. 14, n. 4, p. 342–361, 2013.
- REPETTE, W. L. Concreto autoadensável. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1769–1806, 2011.
- RESENDE, F. M. *Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho*. Tese (Doutorado) — Tese de Mestrado-COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ–Brasil, 2003.
- SALVADOR, R. P. *Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- SOUZA, D. d. A. Estratégia de correlação da performance de concreto reforçado com fibras de aço com base em métodos experimentais. Universidade Federal de Alagoas, 2018.
- TANESI, J. A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração. *São Paulo, Dissertação (Mestrado)*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.
- TORRENTS, J. M. et al. Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. *Materials and structures*, Springer, v. 45, n. 10, p. 1577–1592, 2012.

TUTIKIAN, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis. 2007.

VELASCO, R. V. *Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações Volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, Físicas, mecânicas e térmicas*. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

YURTSEVEN, A. E. Determination of mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete. *MS. C. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle east technical university*, 2004.

APÊNDICE A

Apêndice A 1 - Resultados do ensaio indutivo dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA

Quadro 5.1: Dados dos corpos de prova compostos por 100% de CAARFA

Eixo	CP 1				Eixo	CP 2			
	ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C		ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C
X	1,6	0,61	52,3	0,44	X	0,8	0,42	65,1	0,34
Y	1,1	0,47	61,7	0,34	Y	1,1	0,53	58,1	0,43
Z	0,6	0,29	72,9	0,21	Z	0,5	0,29	73,4	0,23
Le	1,41E-03				Le	1,02E-03			
Eixo	CP 3				Eixo	CP 4			
	ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C		ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C
X	1,6	0,52	58,9	0,37	X	1,6	0,65	49,7	0,45
Y	2,3	0,66	49,0	0,47	Y	1,0	0,47	61,8	0,33
Z	0,6	0,23	76,8	0,16	Z	0,6	0,32	71,5	0,22
Le	1,92E-03				Le	1,37E-03			
Eixo	CP 5				Eixo	CP 6			
	ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C		ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C
X	1,6	0,59	53,9	0,41	X	1,9	0,75	41,4	0,55
Y	1,1	0,56	55,6	0,39	Y	0,7	0,38	67,6	0,28
Z	0,6	0,28	73,8	0,19	Z	0,4	0,23	76,8	0,17
Le	1,58E-03				Le	1,28E-03			
Eixo	CP 7				Eixo	CP 8			
	ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C		ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C
X	1,4	0,55	56,4	0,40	X	2,1	0,73	43,5	0,53
Y	1,5	0,58	54,8	0,42	Y	0,9	0,41	65,8	0,30
Z	0,5	0,24	75,9	0,19	Z	0,5	0,25	75,8	0,18
Le	1,45E-03				Le	1,49E-03			

Fonte: Autor

Apêndice A 2 - Resultados do ensaio indutivo dos corpos de prova moldados em camadas

Quadro 5.2: Dados dos corpos de prova moldados em camadas

Eixo	CP 9				Eixo	CP 10			
	ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C		ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C
X	2,0	0,64	50,4	0,42	X	2,1	0,61	52,4	0,42
Y	1,4	0,50	59,8	0,33	Y	1,3	0,44	63,9	0,30
Z	1,0	0,39	66,8	0,26	Z	1,2	0,41	65,5	0,28
Le	1,88E-03				Le	1,96E-03			
Eixo	CP 11				Eixo	CP 12			
	ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C		ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C
X	2,5	0,65	49,7	0,48	X	2,7	0,65	49,7	0,45
Y	1,1	0,36	68,7	0,27	Y	1,7	0,48	61,6	0,33
Z	1,0	0,34	70,4	0,25	Z	1,0	0,31	71,7	0,22
Le	1,96E-03				Le	2,31E-03			
Eixo	CP 13				Eixo	CP 14			
	ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C		ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C
X	2,4	0,72	44,1	0,41	X	2,6	0,66	48,4	0,46
Y	1,4	0,51	59,6	0,29	Y	1,2	0,39	67,1	0,27
Z	1,5	0,53	58,0	0,30	Z	1,2	0,39	67,1	0,27
Le	2,26E-03				Le	2,13E-03			
Eixo	CP 15				Eixo	CP 16			
	ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C		ΔL (mH)	η	α ($^{\circ}$)	C
X	2,8	0,67	47,9	0,47	X	2,4	0,68	46,9	0,42
Y	1,3	0,40	66,7	0,28	Y	1,2	0,43	64,6	0,27
Z	1,2	0,37	68,2	0,26	Z	1,5	0,50	59,8	0,31
Le	2,26E-03				Le	2,18E-03			

Fonte: Autor