RICARDO DOS SANTOS ALFERES FILHO

Avaliação da Influência do Direcionamento de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico de Concreto Autoadensável Aplicado em Elementos Planos

São Paulo
2016

RICARDO DOS SANTOS ALFERES FILHO

Avaliação da Influência do Direcionamento de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico de Concreto Autoadensável Aplicado em Elementos Planos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica de São Paulo para obtenção do título de Mestre Ciências

São Paulo

2016

RICARDO DOS SANTOS ALFERES FILHO

Avaliação da Influência do Direcionamento de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico de Concreto Autoadensável Aplicado em Elementos Planos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo

São Paulo

2016

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 08 de dezembro de 2016

_____

_____

Catalogação-na-publicação

Alferes Filho, Ricardo dos Santos
Avaliação da influência do direcionamento de fibras de aço no comportamento mecânico de concreto autoadensável aplicado em elementos planos / R. S. Alferes Filho -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
106 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Concreto autoadensável com fibras 2.Reologia (controle) 3.Concreto com fibras 4.Tenacidade 5.Resistência pós-fissuração I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

DEDICATÓRIAS

Aos meus pais,
à minha irmã, Larissa,
ao meu amor, Theopi
e ao meu amigo, Chico (*in memorian*)

AGRADECIMENTOS

Chegar neste ponto não foi uma tarefa fácil, e com certeza eu não teria conseguido sem o apoio de várias pessoas. Este trabalho carrega um pouquinho de cada uma delas.

Agradeço primeiramente ao meu professor e orientador, Antonio Figueiredo, por todo apoio e orientação na produção deste trabalho, e por me motivar sempre que eu estava em dúvida. Ao pessoal do departamento que me ajudou sempre que precisei, em especial Cesar Romano, pela paciência, bom humor e disponibilidade.

Ao pessoal do laboratório, Renata, Adilson, Reginaldo, Jéssica, Mário, Genício e o pessoal do PEF. E também a todos os funcionários da secretaria, limpeza, portaria e transporte, sem os quais esta universidade não funcionaria.

Agradeço aos meus pais, Clenilde e Ricardo, por serem a motivação principal que nunca me deixou desistir. À minha irmã Larissa e meu cunhado Vitor por sempre torcerem por mim. E a toda minha família, que me apoiou e ajudou no processo de me adaptar a essa nova vida.

Às pessoas que me acompanharam de perto, sou mais do que grato ao meu amor, Theopi, muito obrigado por aparecido na minha vida e por tudo que você tem sido pra mim. Obrigado Diego, por poder compartilhar problemas, risadas e caminhadas e me fazer aguentar os momentos de estresse.

A todas as amizades que fiz durante o mestrado, que valem mais que mil publicações e que pretendo carregar pra vida toda, Camila, Filipe, Winnie, Felipe, Carol, Karol, Yuri, Isabela, Débora, Lidiane, Leonardo, Marylinda, Juliana, Yazmin, Carol e Michelle. Obrigado pela conversa, pelas risadas e pela cafeína.

Aos amigos que ficaram em Aracaju mas que nunca deixaram de estar comigo, Flávio, Thiago, Pedro, Yuri, Fernanda, Tiago, Dani, Cibelle e todo o pessoal do DG, obrigado por me ajudarem a ver que pra ser amigo não precisa estar perto.

Obrigado também a Angela, pela inspiração que me fez querer chegar aqui, e Lucila, por ter me motivado a vir quando eu estava incerto.

Agradeço também a CAPES, a FUSP e a Engemix, pelo suporte na execução deste trabalho.

“We are stuck with technology when what
we really want is just stuff that works.”

(Douglas Adams)

RESUMO

O uso de fibra de aço como reforço no concreto tem sido objeto de várias pesquisas recentes. Com o surgimento do concreto autoadensável reforçado com fibras, a fluidez do concreto aumenta a possibilidade de orientação das fibras na etapa de concretagem, o que pode trazer alterações significativas no comportamento mecânico do concreto endurecido. O objetivo deste trabalho foi verificar a influência das condições de moldagem sobre a resistência residual pós-fissuração de elementos planos moldados com concreto autoadensável reforçados com fibra de aço. Também foi objetivo deste trabalho verificar previamente a combinação de ensaios reológicos com métodos convencionais para controle e caracterização do concreto autoadensável no estado fresco. A caracterização do concreto foi feita com reometria rotacional, caixa-L e espalhamento. Os resultados apontam que o estudo da reologia do concreto é desejável e a combinação dos ensaios de reologia com ensaios convencionais pode trazer mais informações sobre o efeito da adição de fibras. Foram realizados ensaios de punção de placas para avaliar o comportamento mecânico de elementos planos produzidos com concreto lançado em posições distintas. A confirmação da orientação preferencial das fibras como causa da diferença de comportamento foi realizada através de informações obtidas com os ensaios indutivo e Double Edge Wedge Splitting (DEWS) realizados em testemunhos extraídos de placas moldadas sob as mesmas condições. Além disso, comprovou-se que a orientação preferencial gerada pelas condições de lançamento do concreto pode influenciar significativamente na resistência pós-fissuração de elementos estruturais planos.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Concreto com fibras. Orientação de fibras. Controle reológico. Resistência residual pós-fissuração.

ABSTRACT

The use of steel fiber as reinforcement in concrete has been the subject of several recent studies. With the development of self-compacting fiber reinforced concrete, the fluidity of the material could increase the possibility of orientation of fibers during the casting process. That condition could bring significant changes in the mechanical behavior of hardened fiber reinforced concrete. The aim of this study was to investigate the influence of the conditions of casting on the post-cracking residual strength of flat elements molded with self-compacting concrete reinforced with steel fibers. It was also an objective of this work verify previously the combination of rheological tests with conventional methods in order to control and characterize the self-compacting concrete in the fresh state. The characterization of the concrete in fresh state was made with rotational rheometer, L-box and spreading tests. The results showed that the study of the concrete rheology is desirable and combination of rheological tests with conventional testing can provide more information about the effect of fiber addition. The evaluation of the mechanical behavior of flat elements produced under different positions of casting was conducted through test panels submitted to punching loading. The confirmation of the orientation of the fibers as a cause of the difference in the behavior was accomplished through information obtained from the inductive and DEWS tests performed on extracted cores of panels molded under the same conditions. Furthermore, the preferred orientation caused by the concrete flow significant influence on the post-cracking strength of the structural flat elements was shown. The tests carried out with extracted cores endorsed the conclusion that the cause of performance variation is fundamentally linked to the preferred orientation, which is a result of the casting procedure.

Keywords: Self compacting concrete. Fiber reinforced concrete. Fiber orientation. Rheological control. Post-crack residual strength.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo de diversos ensaios para CAA 24
Tabela 3.1 – Traço, consumo, área superficial específica e densidade das matérias primas 38
Tabela 3.2 - Teores de fibras utilizados nas misturas 38
Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios normalizados 42
Tabela 4.1 - Propriedades (nominais) da fibra de aço Dramix 65/35 BG 56
Tabela 4.2 - Traço em massa e consumo dos materiais do concreto 56
Tabela 4.3 - Calibração da fibra Dramix 65/35 BG 63
Tabela 4.4 - Características medidas no estado fresco 66
Tabela 4.5 - Cargas de pico obtidas no ensaio de punção 69
Tabela 4.6 - Média de energia absorvida para as placas de Centro e Bordo 73
Tabela 4.7 - Concentração individual de fibras (kg/m³) 74
Tabela 4.8 - Concentração média de fibras nas placas 75
Tabela 4.9 – Média das áreas sob curvas do ensaio DEWS (em MPa.mm) para placa de Bordo 88
Tabela 4.10 - Média das áreas sob curvas do ensaio DEWS (em MPa.mm) para placa de Centro 89
Tabela 4.11 - Média das áreas sob curvas do ensaio DEWS (em MPa.mm) na direção paralela 90

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Exemplo de efeito do fluxo sobrre a orientação das fibras.....22
Figura 2.2 - Seção de ruptura de CPs com fibras bem orientadas (a) e mal orientadas (b).....23
Figura 2.3 - Métodos monoponto (a) e multiponto (b) desenvolvidos para análise do concreto fresco.....25
Figura 2.4 - Ensaios com fluidos translúcidos em ensaios de espalhamento (a) e caixa L (b).....25
Figura 2.5 - Esquema simplificado dos ensaios de flexão ASTM C1609 (a) e EN14651 (b).....26
Figura 2.6 - Ensaios de flexão ASTM C1609 (a) e EN14651 (b).....27
Figura 2.7 – Configuração do ensaio Barcelona 28
Figura 2.8 – Ilustração simplificada da decomposição de forças do DEWS e exemplo de corpo de prova rompido.....29
Figura 2.9 – Arranjo experimental sugerido para o DEWS (a) e arranjo simplificado (b) 30
Figura 2.10 - Exemplos de resultados do método de análise de imagem 31
Figura 2.11 – Imagens de concreto, obtidas através de Raio X.....31
Figura 2.12 - Composição 3D por imagens de Raio-X feitas no concreto com fibras de aço. 32
Figura 2.13 – Equipamento inicialmente utilizado para ensaio indutivo (a) e bobina cilíndrica proposta 32
Figura 2.14 - Resultados de modelos de simulações numéricas para concretos com fibras 33
Figura 3.1 - Fluxograma do programa experimental 36
Figura 3.2 - Distribuição granulométrica dos materiais e ilustração da fibra 37
Figura 3.3 - Distribuição granulométrica da composição.....38
Figura 3.4 - Caixa L após realização do ensaio 40
Figura 3.5 - Medição do diâmetro de espalhamento 41
Figura 3.6 - Reômetro utilizado para o ensaio nos concretos (a) e programação utilizada para os testes (b); as setas indicam os períodos de aceleração e desaceleração da rotação. 42

Figura 3.7 - Resultado após ensaio da Caixa L para os teores de 80 kg/m³ (a) e 120 kg/m³(b) 43
Figura 3.8 - Espalhamento do concreto de referência (esq.) e do com fibras (120 kg/m³) (dir.) 44
Figura 3.9 - Perfis de cisalhamento dos concretos em função da velocidade de rotação 46
Figura 3.10 - Viscosidade plástica e torque de escoamento dos concretos em função do teor de fibras 47
Figura 3.11 - Correlação entre o torque de escoamento, obtido a partir de reometria rotacional, e o espalhamento e a habilidade passante. 48
Figura 3.12 - Correlação entre a viscosidade plástica, obtida a partir de reometria rotacional, e o espalhamento e a habilidade passante. 49
Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental..... 55
Figura 4.2 - Fibra Dramix 65/35 BG, utilizada neste trabalho, ... 56
Figura 4.3 – Métodos de lançamento do concreto: borda (a) e centro (b) 57
Figura 4.4 - Funil V e apoio adaptado para moldagem das placas..... 58
Figura 4.5 - Medidas do apoio e da placa..... 59
Figura 4.6 – Corte esquemático do conjunto e conjunto posicionado para ensaio ... 59
Figura 4.7 – Medidas (em centímetros) e marcações para corte..... 60
Figura 4.8- Serra utilizada para corte das placas 60
Figura 4.9 - Bobina e leitor do ensaio indutivo..... 61
Figura 4.10 - Sistema de eixos e posicionamento de cada eixo na bobina 61
Figura 4.11 - Exemplo de cubo de poliestireno expandido usado na calibração 62
Figura 4.12 - Reta de calibração da fibra Dramix 65/35 BG 63
Figura 4.13 –Medidas (em mm) e processo de corte dos cubos 64
Figura 4.14 - Detalhe da chapa colada no corpo de prova 64
Figura 4.15 – Ensaio como proposto inicialmente (a) (di PRISCO, 2010) e simplificação realizada neste trabalho (b) 65
Figura 4.16 - Posições e direção dos ensaios DEWS 65
Figura 4.17 - Relação da viscosidade plástica com teor de fibras 67
Figura 4.18 - Concreto após espalhamento..... 67
Figura 4.19 - Gráfico de deslocamento vertical x Força da prensa, para placa de borda 68

Figura 4.20 - Gráfico de deslocamento vertical x Força da prensa, para placa de centro 68
Figura 4.21 - Gráfico de Força x Deslocamento para as placas de bordo 69
Figura 4.22 - Gráfico de Força x Deslocamento para as placas de centro.....70
Figura 4.23 - Fissura possivelmente induzida por concentração de tensões no apoio da placa.....71
Figura 4.24 – Curva de Força x Deslocamento para as médias das placas 72
Figura 4.25 - Absorção de energia das placas em função do nível de deslocamento vertical.....72
Figura 4.26 - Tendência de absorção de energia para as placas de centro e borda.73
Figura 4.27 - Face do concreto após corte mostrando segregação do material.....74
Figura 4.28 - Concentração de fibras (kg/m³) para a placa de centro 75
Figura 4.29 - Concentração de fibras (kg/m³) para a placa de bordo 76
Figura 4.30 - Relação entre distância de moldagem e fibras no eixo Z.....77
Figura 4.31 - Contribuições nos eixos x e y das placas de centro (esq.) e bordo (dir.) 77
Figura 4.32 - Eixos nomeados para as placas de centro (esq.) e bordo (dir.).....78
Figura 4.33 - Exemplo de nomeação dos eixos de leitura do ensaio indutivo: antes (esq.) e depois (dir.) 78
Figura 4.34 - Análise do direcionamento das fibras nos eixos de fluxo da placa de centro 79
Figura 4.35 - Análise do direcionamento das fibras nos eixos de fluxo da placa de bordo 80
Figura 4.36 - Gráfico de relação entre razão Cx/Cy e ângulo adotado 81
Figura 4.37 - Angulações calculadas para tendência de alinhamento das fibras nos eixos x e y das placas de centro (esq.) e bordo (dir.).....81
Figura 4.38 - Linhas de fluxo traçadas com base no alinhamento calculado das fibras para as placas de centro (esq.) e bordo (dir.).....82
Figura 4.39 - Perfil de alinhamento obtido em outros estudos 82
Figura 4.40 - Medidas do corpo de prova para ensaio DEWS 83
Figura 4.41 - Resultado do ensaio DEWS para moldagem de Bordo 84
Figura 4.42 - Resultado do ensaio DEWS para moldagem de centro 84
Figura 4.43 - Sobreposição das fissuras com o ensaio DEWS 85

Figura 4.44 - Gráfico Tensão x Abertura de fissura para os CPs da placa de bordo ensaiados em fratura transversal às fissuras médias 85
Figura 4.45 - Gráfico Tensão x Abertura de fissura para os CPs da placa de bordo ensaiados em fratura paralela às fissuras médias 86
Figura 4.46 - Gráfico Tensão x Abertura de fissura para os CPs da placa de centro ensaiados em fratura transversal às fissuras médias 87
Figura 4.47 - Gráfico Tensão x Abertura de fissura para os CPs da placa de centro ensaiados em fratura paralela às fissuras médias 87
Figura 4.48 - Área sob curvas das amostras de DEWS para placa de bordo 88
Figura 4.49 - Área sob curvas das amostras de DEWS para placa de centro 88
Figura 4.50 - Área sob curvas das amostras de DEWS na direção paralela à fissura 89

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 JUSTIFICATIVA 18

1.2 OBJETIVOS 18

1.2.1 Geral 18

1.2.2 Específicos 19

1.3 Estruturação do texto 19

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

2.1 Reforço com fibras no concreto autoadensável 21

2.2 Reologia do concreto com fibras 21

2.3 Orientação e anisotropia 22

2.4 Métodos de análise do CAARFA 23

2.4.1 Caracterização no estado fresco 23

2.4.2 Caracterização no estado endurecido 26

2.4.2.1 Ensaios convencionais (prismas e placas) 26

2.4.2.2 Ensaios DEWS e Barcelona 27

2.4.2.3 Ensaios não destrutivos 30

3 AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REOMETRIA PARA CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM FIBRA DE AÇO 35

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL 36

3.1.1 Materiais 36

3.1.2 Composição do concreto 37

3.1.3 Mistura dos concretos 38

3.2 MÉTODOS DE ENSAIO 39

3.2.1 Caixa-L 39

3.2.2 Espalhamento 40

3.2.3 Reometria rotacional 41

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES 42
3.3.1 Ensaios monoponto (Caixa L e espalhamento)..... 42
3.3.2 Ensaio de reometria 45
3.3.3 Análise combinada dos diferentes resultados de ensaios..... 48
3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 50
4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE MOLDAGEM NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ELEMENTOS PLANOS 53
4.1 Programa Experimental 53
4.1.1 Materiais..... 55
4.1.2 Traço do concreto 56
4.1.3 Ensaios de caracterização no estado fresco..... 57
4.1.4 Método de moldagem 57
4.1.5 Ensaio de punção de placa 58
4.1.6 Corte das placas 59
4.1.7 Ensaio de indutância..... 60
4.1.8 Ensaio DEWS 63
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES 65
4.2.1 Caracterização do concreto no estado fresco..... 65
4.2.2 Ensaio de punção de placas 68
4.2.3 Ensaio de indutância..... 73
4.2.4 Ensaio DEWS 83
4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 90
5 CONCLUSÕES 93
5.1 Sugestões para trabalhos futuros..... 94
REFERÊNCIAS 95

1 INTRODUÇÃO

O uso de fibras como reforço de materiais frágeis é uma técnica de construção antiga na humanidade. Quando aplicada ao concreto, ela busca, entre outras finalidades, garantir resistência residual pós-fissuração, combatendo a fragilidade do concreto através da formação de pontes de transferência de tensão, que impedem a propagação de fissuras e a ruptura brusca, trazendo mais segurança ao material (FIGUEIREDO, 2011).

A utilização do concreto reforçado com fibras para finalidades estruturais vem sendo ampliada recentemente, especialmente após a publicação do novo código modelo da fib (fib, 2013), que é um marco na normatização do CRF. di Prisco, Plizzari e Vandewalle (2009) chamaram a atenção que a principal contribuição da fibra para o comportamento de elementos estruturais ocorre na etapa pós-fissuração. Assim, a resistência residual de elementos estruturais irá depender das condições de reforço oferecidas pelas fibras que podem ser afetadas por uma série de fatores como o seu teor, resistência e geometria (FIGUEIREDO, 2011).

A disposição das fibras no concreto é um outro fator de grande importância na definição de seu comportamento mecânico. A orientação das fibras e sua concentração podem mudar completamente a resposta do material frente aos esforços aplicados. Se bem explorada, pode ser responsável pela otimização do desempenho mecânico e da tenacidade, por outro lado, caso a orientação seja inapropriada, há a possibilidade de se causar vários efeitos indesejáveis à estrutura (FERRARA et al., 2012).

Devido à fluidez elevada, o concreto autoadensável possibilita que esta orientação das fibras ocorra durante o processo de lançamento (ABRISHAMBAF; BARROS; CUNHA, 2013; ABUKHASHABA; MOSTAFA; ADAM, 2014; AKCAY; TASDEMIR, 2012; FERRARA et al., 2012). Isto torna a etapa de produção um evento de destacada importância, visto que as condições de moldagem poderiam então ser responsáveis por comprometer o desempenho mecânico de um elemento estrutural.

Com o uso de fibras no lugar da armadura de aço, o controle da reologia do concreto fresco assume um papel ainda mais importante, uma vez que a posição do elemento de reforço é definida durante o processo de lançamento, o que pode afetar o comportamento mecânico do concreto (Di Prisco, Plizzari e Vandewalle (2009).

A verificação das propriedades do concreto no estado fresco pode ser feita por ensaios monoponto, que avaliam o comportamento do concreto em uma condição fixa, ou por ensaios multiponto, que variam a tensão de cisalhamento aplicada ao fluido. Há uma variedade de ensaios monoponto utilizados que são normatizados, embora sua concepção inicial não contemple, em sua maioria, a presença de fibras no concreto (ABNT, 2010; EFNARC, 2005).

Mesmo com o aumento do interesse por este tema, há poucas pesquisas recentes analisando o efeito da moldagem sobre o comportamento pós-fissuração de elementos planos, nos quais a maior influência atuante na orientação das fibras é dada pelo fluxo, uma vez que o efeito parede é menos presente (ZERBINO et al., 2012). Logo, é necessário o contínuo desenvolvimento de estudos que abordem os efeitos das condições de moldagem sobre o comportamento mecânico de elementos estruturais planos moldados com concreto autoadensável reforçado com fibras de aço.

1.1 JUSTIFICATIVA

A justificativa deste trabalho está na necessidade de aperfeiçoamento do domínio tecnológico sobre controle e execução de concreto autoadensável reforçado com fibras, visto que as vantagens trazidas pelo correto uso deste tipo de tecnologia podem significar grandes benefícios ao desenvolvimento da infraestrutura do país (FIGUEIREDO, 2011). No entanto, se as condições de moldagem podem influenciar seu comportamento, faz-se necessária a realização de pesquisas que contribuam para a parametrização de procedimentos que otimizem a capacidade de reforço ou, minimamente, evitem prejuízos à capacidade de reforço oferecida pelas fibras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O principal objetivo desta dissertação é avaliar, através de um estudo experimental, a influência das condições de moldagem, induzindo orientação preferencial das fibras através do fluxo do concreto, sobre a capacidade resistente pós-fissuração de

elementos planos de concreto autoadensável reforçado com fibra de aço. Com isto, deseja-se contribuir para futuras recomendações que permitam obter uma melhor qualidade dos elementos estruturais produzidos com este tipo de compósito.

1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos elaborados para esta dissertação têm como meta proporcionar um embasamento melhor para a obtenção do objetivo principal e são os seguintes:

- Parametrizar o comportamento reológico e o impacto da adição de fibras no concreto autoadensável através de ensaio multiponto e monoponto.
- Avaliar o comportamento mecânico no que diz respeito à absorção de energia de elementos planos através do ensaio de punção em placas moldadas com concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA), com duas distintas posições de lançamento do concreto no molde.
- Medir, através da realização de ensaios de indutância em corpos de prova extraídos das placas, a concentração e orientação de fibras conforme sua posição e direção relativa ao ponto de lançamento do concreto na placa.
- Quantificar, com o ensaio DEWS, a resistência pós-fissuração de testemunhos extraídas das placas em diferentes pontos e relacionar o comportamento mecânico destes testemunhos com as informações dos ensaios de indutância e punção.

1.3 Estruturação do texto

O texto desta dissertação foi estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1 traz a introdução, os objetivos e a estruturação do trabalho. O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica, na qual são abordados alguns dos principais temas referentes ao assunto e que contribuíram para estabelecer o programa experimental desta dissertação.

No capítulo 3 é abordada a parametrização reológica do concreto através de um estudo experimental envolvendo ensaios reológicos convencionais não

convencionais. Assim, neste capítulo é explorada a aplicabilidade do ensaio de reometria rotacional como ferramenta de avaliação do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço no estado fresco e seus resultados são contrastados com os obtidos a partir de ensaios convencionais.

No capítulo 4 é avaliado o efeito das condições de moldagem sobre a capacidade resistente pós-fissuração em um estudo experimental que envolveu a produção de elementos planos moldados com concreto autoadensável reforçado com fibras de aço. A análise é feita com base nos ensaios de punção nas placas inteiras e aprofundada com base nos resultados dos ensaios indutivo e DEWS, realizados em testemunhos extraídos de placas moldadas sob as mesmas condições.

Os capítulos 3 e 4 apresentam suas conclusões individuais e, no capítulo 5 são apresentados os comentários finais e as conclusões gerais do trabalho desenvolvido, bem como também traz sugestões para trabalhos futuros de pesquisa nesta área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reforço com fibras no concreto autoadensável

O reforço com fibras pode ser aplicado tanto no concreto convencional vibrado (CCV), como no concreto autoadensável (CAA). O uso de fibras no CAA é apontado como vantajoso por Aydin (2007), uma vez que a maior fluidez do concreto viabiliza a incorporação de um maior volume de fibras com a manutenção de sua trabalhabilidade. O aumento no volume de fibras colabora para uma maior resistência pós-fissuração e aumento na tenacidade do concreto, assegurando a redução da densidade de armaduras ou até a sua substituição completa para determinadas aplicações (GRÜNEWALD, 2004).

Pesquisas como a de Ozyurt, Mason e Shah (2007) compararam a resistência à segregação de fibras em concretos vibrados e autoadensáveis, e apontaram que o CAA obteve melhor desempenho no estado fresco e, consequentemente, no endurecido. Além de poder resultar em concretos mais trabalháveis para altos teores de fibras (AYDIN, 2007), a eliminação da etapa de vibração e a estabilidade reológica do CAA podem permitir uma distribuição mais uniforme e controlada das fibras no concreto em comparação ao convencional (FERRARA, PARK e SHAH, 2007).

2.2 Reologia do concreto com fibras

As vantagens da combinação do concreto reforçado com fibras (CRF) com o concreto autoadensável (CAA) estão bem descritas na literatura, embora a capacidade desta mistura manter suas condições de trabalhabilidade constantes após a adição de fibras ainda requeira estudos mais aprofundados – como foi apontado por alguns autores, a presença das fibras resulta em alterações na consistência dos materiais cimentícios (EL-DIEB e REDA TAHA, 2012; MARTINIE, ROSSI e ROUSSEL, 2010).

O impacto do uso de fibras em pasta de cimento foi avaliado por Martinie, Rossi e Roussel (2010), cujo trabalho aponta que o aumento do teor de fibras leva ao aumento da tensão de escoamento em pastas. Os autores afirmam ainda que os resultados podem ser extrapolados para situações com argamassas e concretos. Kamal et al.

(2014), por sua vez, concluíram que a presença de fibras no concreto pode atuar na redução da exsudação.

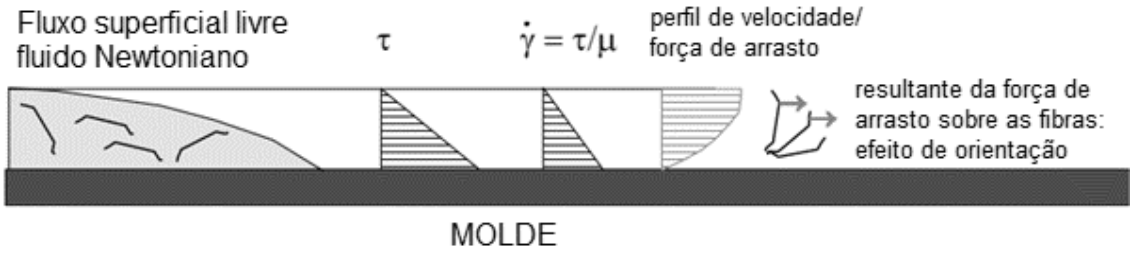
Swamy e Mangat (1974) descrevem que fibras com distintas geometrias afetam de maneira diferente o concreto, de maneira que quanto maior for o fator de forma da fibra, maior impacto ela trará para a trabalhabilidade do material (FIGUEIREDO e CECCATO, 2015). De modo similar, Kamal et al. (2014) descrevem que uma mesma mistura de concreto com variação no teor de fibra, pode sofrer alterações na sua viscosidade que compromete o comportamento autoadensável.

Os diversos trabalhos publicados na área de análise da reologia do concreto com fibras apontam uma variedade de efeitos advindos da adição de fibras ao concreto, bem como a necessidade de estudos mais aprofundados no que diz respeito ao posicionamento e orientação das fibras e seu efeito nas propriedades do CAA.

2.3 Orientação e anisotropia

No uso de concreto autoadensável, uma grande diferença entre o reforço com fibras e a armadura convencional é a possibilidade de orientação das fibras durante o processo de moldagem (FERRARA, 2015). A orientação pode ser influenciada por variados fatores, principalmente com relação ao fluxo (STÄHLI, CUSTER e VAN MIER, 2007), como exemplificado na Figura 2.1, e o contato das fibras com o molde – efeito parede (ZERBINO et al., 2012).

Figura 2.1 - Exemplo de efeito do fluxo sobrre a orientação das fibras

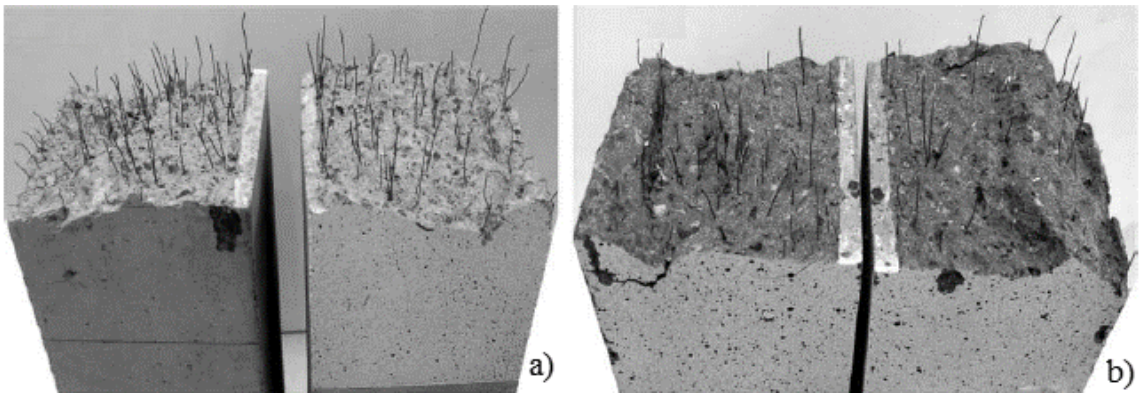


Fonte: Traduzido de Ferrara (2015)

Com a orientação das fibras numa direção preferencial, observa-se no concreto um comportamento claramente anisotrópico. Esta anisotropia causa notável efeito no comportamento mecânico do concreto (ŠVEC et al., 2014) e pode ser utilizada em favor do desempenho do concreto quando as fibras estão alinhadas com o eixo de

solicitação (Figura 2.2), conferindo maior tenacidade ao conjunto (BOULEKBACHE et al., 2010). Da mesma forma, negligenciar esta propriedade pode comprometer o desempenho mecânico, alterando completamente a resposta do material às solicitações previstas.

Figura 2.2 - Seção de ruptura de CPs com fibras bem orientadas (a) e mal orientadas (b)



Fonte: Boulekbache et al. (2010)

Devido à possibilidade de orientação das fibras, autores como Ferrara et al. (2012) afirmam que o processo de moldagem do concreto deve ser otimizado para garantir que se atinjam as propriedades desejadas e seja obtido o máximo de desempenho do reforço com fibras no concreto. Desta maneira, será possível viabilizar o desenvolvimento de normas regulamentadoras, estimulando a utilização do CAA reforçado com fibras por parte dos projetistas e construtores (PRISCO, PLIZZARI e VANDEWALLE, 2009).

2.4 Métodos de análise do CAARFA

2.4.1 Caracterização no estado fresco

O controle do concreto autoadensável no estado fresco visa avaliar, através de diversos ensaios, a aptidão do concreto para cumprir as exigências de projeto sem apresentar defeitos como segregação ou exsudação (EFNARC, 2005). Muitos dos ensaios de caracterização do CAA são padronizados e normatizados, a Tabela 2.1 apresenta um resumo dos parâmetros medidos e característica avaliada de cada ensaio.

Tabela 2.1 - Resumo de diversos ensaios para CAA

Característica	Método de ensaio	Valor medido
Fluidez / Habilidade de preenchimento	Espalhamento	Espalhamento total
	Fill-Box	Preenchimento visual
Viscosidade / fluidez	T500	Tempo de espalhamento
	Funil-V	Tempo de espalhamento
	Funil-O	Tempo de espalhamento
	Orimet	Tempo de espalhamento
Habilidade passante	Caixa-L	Taxa de passagem
	Caixa-U	Diferença de altura
	Anel-J	Fluxo total
	Fill-Box	Habilidade passante visual
Resistência à segregação	Penetração	Profundidade
	Peneira de segregação	Porcentagem segregada
	Coluna de assentamento	Taxa de segregação

Fonte: Traduzido de EFNARC (2005)

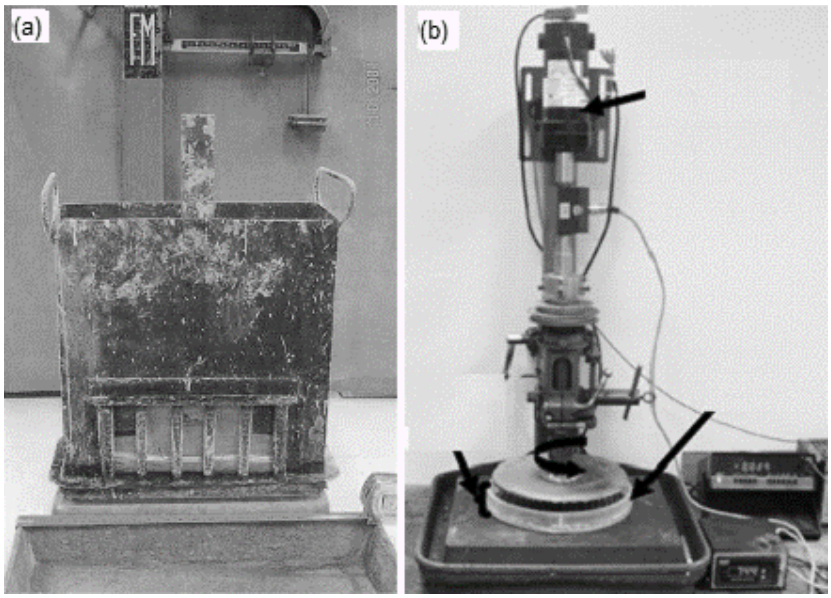
Ensaios como caixa L, espalhamento e funil V, são comumente utilizados para a caracterização desse tipo de suspensão devido à praticidade das técnicas, porém somente resultam em informações pontuais sobre as características no estado fresco. Além disso, os resultados não são expressos em parâmetros físicos (DAMINELI et al., 2010; ROUSSEL, 2007), e há estudos que apontam que estes ensaios não são apropriados para o reforço de concreto com fibras (EL-DIEB e REDA TAHA, 2012).

Entretanto, eles têm sido utilizados como base de análise da trabalhabilidade de CAA reforçado com fibras em vários trabalhos experimentais (ABUKHASHABA, MOSTAFA e ADAM, 2014; EL-DIEB e REDA TAHA, 2012; MADANDOUST, RANJBAR e YASIN MOUSAVI, 2011; MEHDIPOUR et al., 2013; NURUDDIN, CHANG e MOHD AZMEE, 2014; SAHMARAN, YURTSEVEN e OZGUR YAMAN, 2005), de modo que alguns estudos buscam desenvolver novos métodos monoponto para avaliar características acerca da autoadensabilidade do concreto, como o apresentado na Figura 2.3a (DHONDE; MO; HSU, 2006).

Diferente dos ensaios monoponto, os reômetros, em geral, permitem medidas de propriedades reológicas em diferentes níveis de solicitação, resultando numa análise mais completa do concreto fresco. Alguns autores buscam relacionar as propriedades reológicas medidas em reômetros, já conhecidos ou recém desenvolvidos (Figura 2.3b) com os resultados obtidos em ensaios monoponto – tanto com pastas (KUDER

et al., 2007; MARTINIE, ROSSI e ROUSSEL, 2010; SAAK, JENNINGS e SHAH, 2004), quanto com concretos (NGUYEN, ROUSSEL e COUSSOT, 2006).

Figura 2.3 - Métodos monoponto (a) e multiponto (b) desenvolvidos para análise do concreto fresco

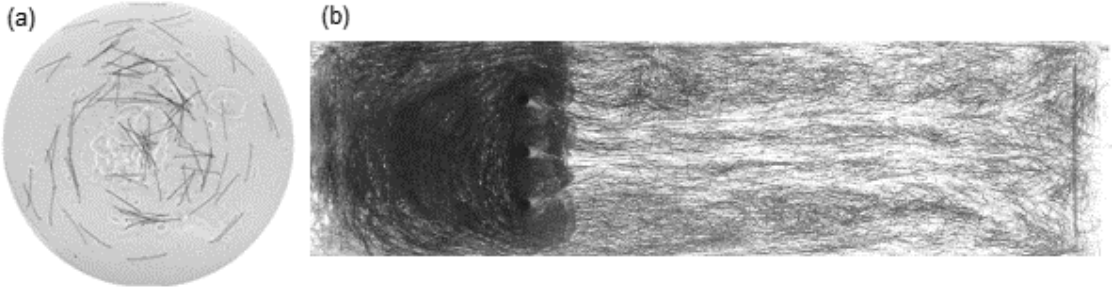


Fonte: Dhonde, Mo e Hsu, 2006 (a); Kuder et al., 2007 (b)

Além do uso de reômetros, alguns estudos buscam investigar o comportamento das fibras em tempo real. No entanto, devido à opacidade do concreto, este tipo de avaliação é conduzida com o uso de matrizes translúcidas com propriedades reológicas próximas às do concreto (BOULEKBACHE et al., 2010; SVEC et al., 2012).

Embora esta não seja uma abordagem comum – tampouco totalmente precisa devido à ausência de agregados tipicamente presentes no concreto – através dela é possível observar a influência do fluxo do material sobre a orientação das fibras, particularmente as fibras de aço, como é mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Ensaios com fluidos translúcidos em ensaios de espalhamento (a) e caixa L (b)



Fonte: Boulekbache et al.,2010 (a); Svec et al.,2012 (b).

A caracterização do concreto no estado fresco, como foi apontado, pode ser abordada de diversas formas. Muitos dos ensaios convencionais são simples e acessíveis, mas

acabam apresentando limitações na sua análise. Enquanto isso, os ensaios de reometria possuem uma diferente capacidade de análise física. A combinação destes dois tipos de ensaios pode permitir que se compreenda melhor os parâmetros físicos e as limitações relacionados à análise do concreto autoadensável com fibras.

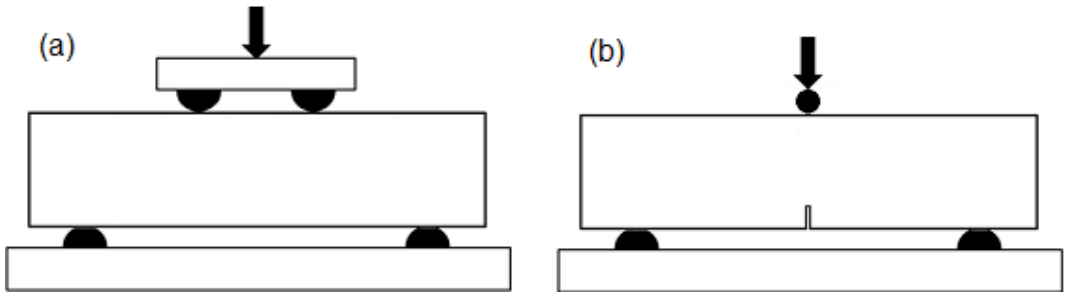
2.4.2 Caracterização no estado endurecido

2.4.2.1 Ensaios convencionais (prismas e placas)

O uso de fibra de aço como reforço ao concreto tem grande influência na capacidade resistente pós-fissuração das estruturas. Esta característica mecânica pode ser avaliada através de diversos ensaios, alguns dos quais já estabelecidos por normas e diretrizes (ASTM, 2005; ASTM, 2010; CEN, 2007; EFNARC, 1996)

Entre os tipos arranjos de ensaios, destacam-se os de flexão em prismas, que consistem na realização de uma carga vertical sobre uma viga bi-apoiada, cuja configuração pode variar em relação à forma de aplicação da carga, medição de deslocamento ou presença de entalhes. A Figura 2.5 apresenta, de forma simplificada, duas configurações, entre as diversas existentes, de execução do ensaio de flexão em primas.

Figura 2.5 - Esquema simplificado dos ensaios de flexão ASTM C1609 (a) e EN14651 (b)



Fonte: ASTM, 2005 (a). CEN, 2007 (b)

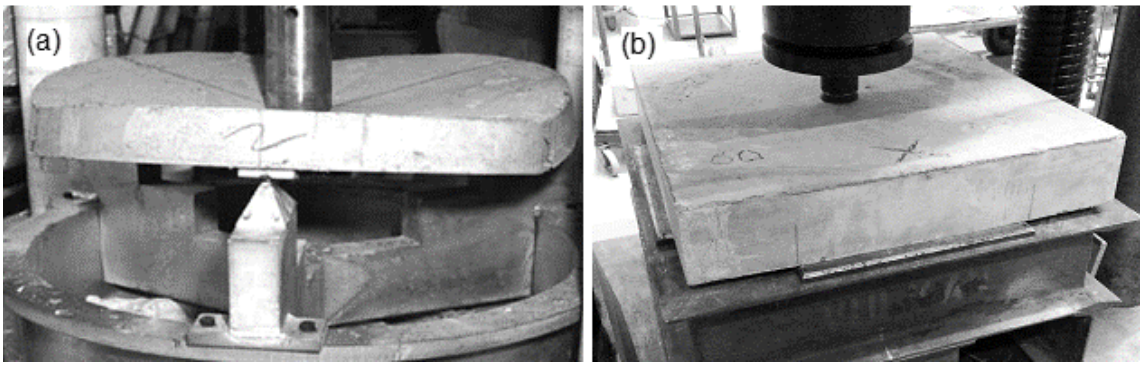
Os ensaios de flexão de prismas são bastante utilizados, porém, devido às suas dimensões, não são tão viáveis para ser executados com amostras extraídas de uma estrutura. Desta maneira, amostras de concreto devem ser moldadas especificamente para o ensaio e a moldagem de concreto com fibras em elementos longos é influenciada pelo efeito parede (BORGES, MONTE e FIGUEIREDO, 2014;

PONIKIEWSKI et al., 2015; ZERBINO et al., 2012), tal efeito pode superestimar a real capacidade de resistência pós-fissuração do concreto.

Uma outra forma de análise do concreto com fibras é através do ensaio em placas (ASTM, 2005; EFNARC, 1996). Os métodos consistem na punção de placas por uma carga central concentrada (Figura 2.6). As placas podem ser redondas (ASTM, 2005), quadradas (EFNARC, 1996) ou assumir outros formatos.

O ensaio proposto por EFNARC (1996) foi descrito inicialmente para análise de concreto projetado. Figueiredo e Helene (1997) propuseram o uso deste ensaio para avaliação de concreto com fibras, com algumas alterações em sua execução como, por exemplo, o uso de apoios metálicos no lugar de apoio de argamassa.

Figura 2.6 - Ensaios de flexão ASTM C1609 (a) e EN14651 (b)



Fonte: ASTM, 2005 (a). Foto do autor (b)

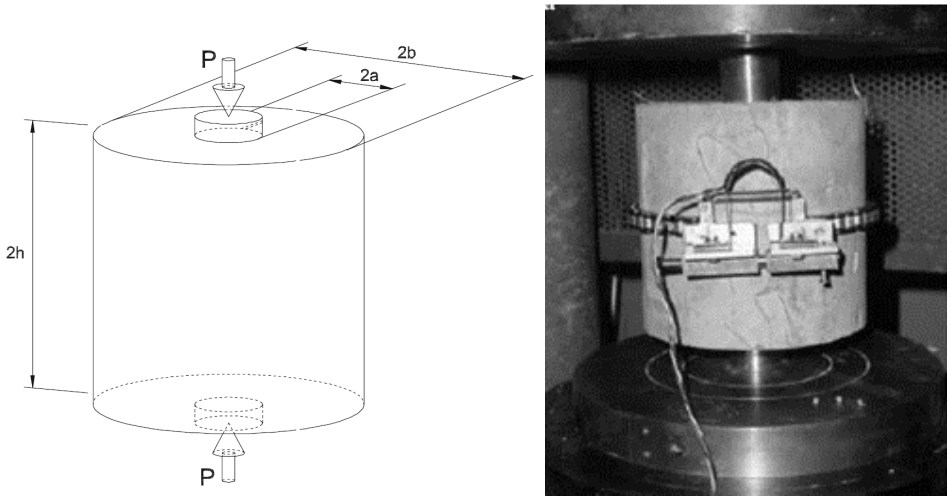
Durante o ensaio, são registrados os valores de carga e deslocamento vertical da prensa. Depois do ensaio, é feita a análise de energia absorvida através do cálculo da área sob a curva Carga x Deslocamento, como parâmetro principal de avaliação da carga. Esta medida pode ser feita em valores específicos de deslocamento vertical, a fim de servir como base de comparação para níveis de fissuração como por exemplo os estados limite de serviço e estado limite último.

2.4.2.2 Ensaios DEWS e Barcelona.

O teste Barcelona, proposto por Molins, Aguado e Saludes (2008) é considerado uma extensão do teste DPT – *Double Punch Test* (CHEN, 1970), e busca avaliar o comportamento de concretos reforçados com fibras através do duplo puncionamento de amostras cilíndricas de concreto, por dois cilindros metálicos concêntricos, com a

medição do aumento da circunferência através de uma cinta extensométrica posicionada no centro do corpo de prova (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Configuração do ensaio Barcelona



Fonte: Molins, Aguado e Saludes (2008)

O teste Barcelona foi desenvolvido e apresentado como alternativa aos métodos convencionais de avaliação de concreto, pois estes geralmente são caracterizados por ensaios em corpos de prova grandes e de difícil manuseio. Devido às dimensões reduzidas dos corpos de prova, os testes podem feitos em amostras extraídas direto de uma estrutura (CARMONA, AGUADO e MOLINS, 2012).

Pujadas et al. (2013), propõem uma adaptação do modelo de ensaio que relaciona os valores de deslocamento vertical da prensa aos da extensão circunferenciais, buscando viabilizar a realização do ensaio com equipamentos de menor complexidade e aumentando a sua acessibilidade.

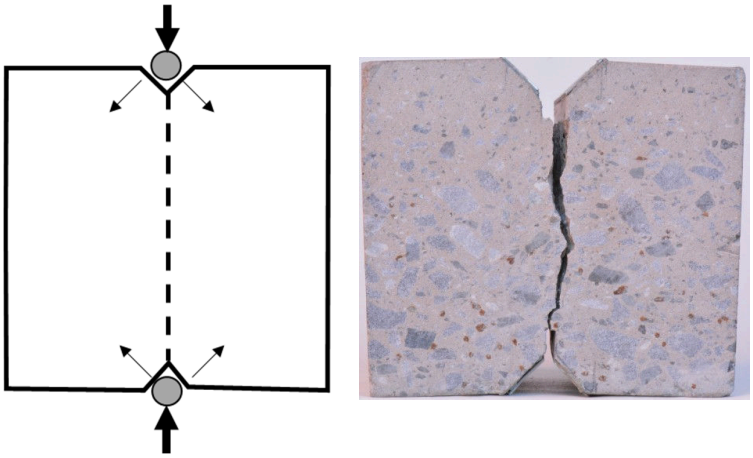
No que diz respeito à orientação de fibras, estudos afirmam que o ensaio permite analisar a existência de planos preferenciais de orientação e fornece boa correlação com os ensaios de flexão em vigas (BLANCO, 2013; MONTE; TOALDO; FIGUEIREDO, 2014), visto que apenas as fibras que não estiverem alinhadas com o plano da carga aplicada serão solicitadas na resistência pós-fissuração.

Por outro lado, outros estudos contestam esta informação. Há autores que afirmam não ser possível obter nenhuma informação sobre orientação de fibras e sua influência no comportamento do material através do ensaio de Barcelona (DI PRISCO;

FERRARA; LAMPERTI, 2013), devido à imprevisibilidade na formação dos planos de ruptura, assim como o tamanho e a forma dos corpos de prova.

Outra possibilidade de análise para a resistência pós-fissuração de amostras em pequenas dimensões é a execução do ensaio *Double Edge Wedge Splitting Test* – DEWS (di PRISCO, LAMPERTI e LAPOLLA, 2010). Análogo ao arranjo do ensaio *Wedge Splitting Test* (BRÜHWILER; WITTMAN, 1990), o DEWS consiste num ensaio de tração indireta através da compressão de um corpo de prova com cunhas e entalhes em duas faces opostas. A decomposição das forças verticais através das faces inclinadas induz a formação de um plano de ruptura no meio do corpo de prova (Figura 2.8).

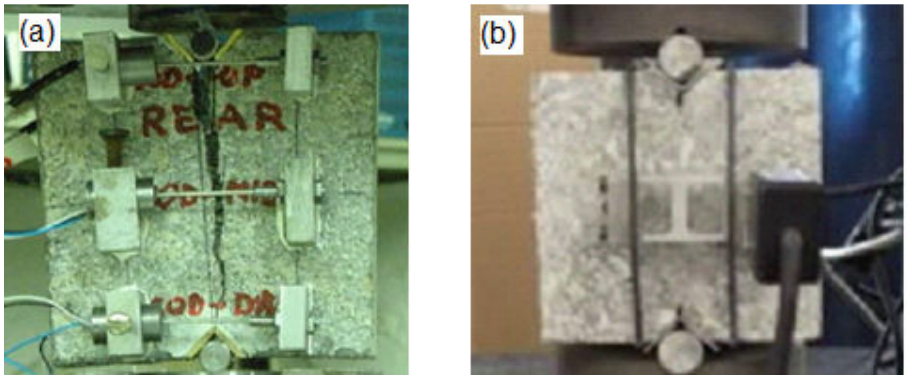
Figura 2.8 – Ilustração simplificada da decomposição de forças do DEWS e exemplo de corpo de prova rompido



Por utilizar corpos de prova de pequenas dimensões (cubos com 10 cm de lado, por exemplo) o ensaio DEWS pode ser realizado em amostras extraídas de estruturas existentes, bem como de corpos de prova de maiores dimensões (BORGES, MONTE e FIGUEIREDO, 2014; FERRARA, di PRISCO e LAMPERTI, 2010; SALEHIAN, BARROS e TAHERI, 2014).

Com a ruptura da matriz de concreto e a formação de um plano de fratura, é possível observar o comportamento pós-fissuração do concreto conduzido pela resistência das fibras que estiverem cruzando o plano. Com o deslocamento vertical da prensa, o afastamento lateral das partes rompidas pode ser medido por três LVDTs em cada face do corpo de prova (Figura 2.9a). Borges, Monte e Figueiredo (2014) utilizaram uma variação simplificada desta metodologia (Figura 2.9b) com um par de extensômetros no centro de cada face do corpo de prova.

Figura 2.9 – Arranjo experimental sugerido para o DEWS (a) e arranjo simplificado (b)



Fonte: di Prisco e Ferrara (2013) (a); Borges, Monte e Figueiredo (2014)(b)

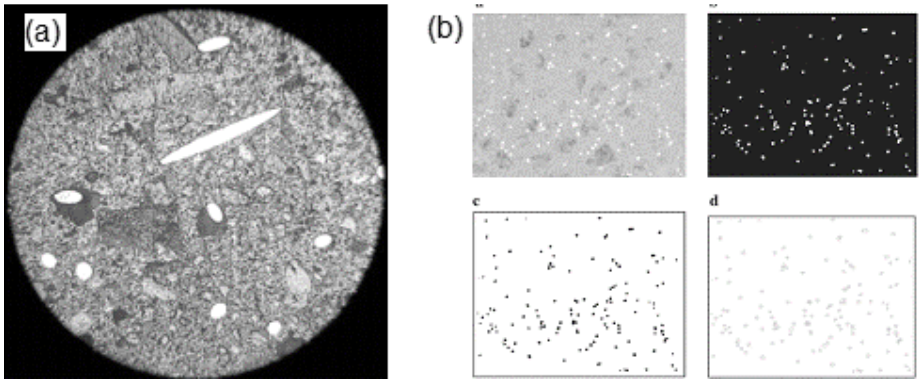
O DEWS, por conta de sua configuração e seu formato de ruptura, é um ensaio capaz de avaliar a tenacidade dos corpos de prova em função da orientação das fibras. Uma vez que só atuarão na resistência pós-fissuração as fibras alinhadas transversalmente ao plano de ruptura. (BORGES, MONTE e FIGUEIREDO, 2014; di PRISCO, LAMPERTI e LAPOLLA, 2010; SALEHIAN, BARROS e TAHERI, 2014)

Em linhas gerais, ensaios de menor escala se mostram importantes como possibilidade de análise da capacidade resistente em testemunhos extraídos, bem como caminham para o desenvolvimento de ensaios que utilizem corpos de prova em menores dimensões (CARMONA, AGUADO e MOLINS, 2012; di PRISCO, FERRARA e LAMPERTI, 2013). No entanto, ainda se faz necessário o maior domínio sobre seus parâmetros de controle.

2.4.2.3 Ensaios não destrutivos

Outra possível abordagem de estudo sobre a orientação de fibras é o uso de ensaios não-destrutivos. Abrishambaf, Barros e Cunha (2013) e Ferrara, Ozyurt e di Prisco (2011), por exemplo utilizaram do método de análise de imagem (Figura 2.10). Este método parte da avaliação visual de uma face seccionada do concreto e não compromete a integridade do corpo de prova, que pode ser posteriormente submetido a outros ensaios.

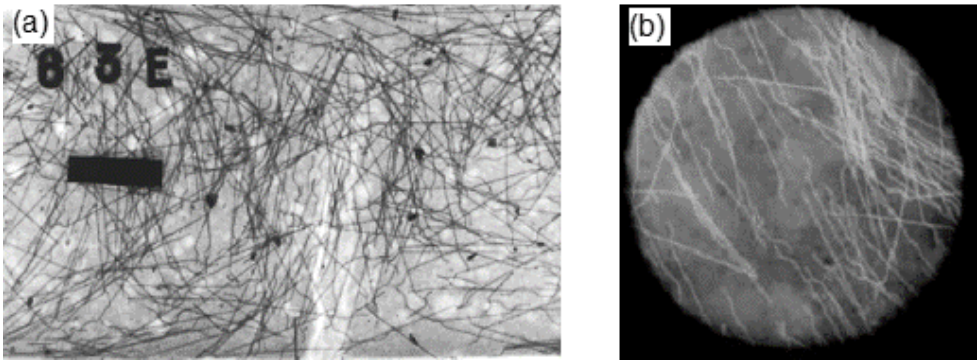
Figura 2.10 - Exemplos de resultados do método de análise de imagem



Fonte: Ferrara, Ozyurt e di Prisco, 2011 (a); e Abrishambaf, Barros e Cunha, 2013 (b)

A análise visual também pode ser conduzida através de imagens 2D obtidas por Raio-X (Figura 2.11). Jones, Robins e Austin (2003) e Ferrara e Meda (2006) utilizaram destes métodos. Com o Raio-X, é possível obter imagens de camadas mais internas do concreto. Este tipo de ensaio pode, por exemplo, ser aliado ao uso de ferramentas estatísticas para análise da distribuição espacial de fibras (JONES, ROBINS e AUSTIN, 2003), mas é uma técnica que ainda requer melhor desenvolvimento (FERRARA e MEDA, 2006).

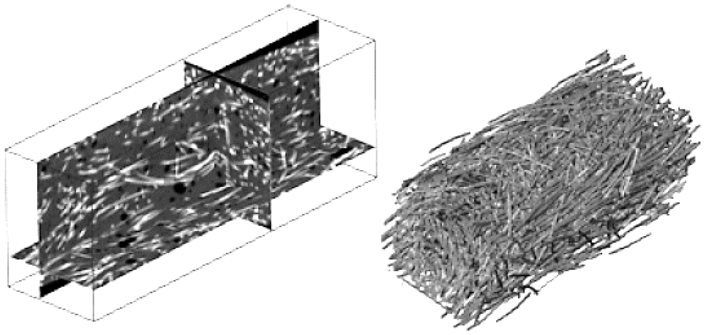
Figura 2.11 – Imagens de concreto, obtidas através de Raio X



Fonte: Jones, Robins e Austin, 2003 (a); Ferrara e Meda, 2006 (b)

Estudos com uso de Raio-X também podem utilizar tomografia computadorizada para composição de imagens 3D (Figura 2.12) (PONIKIEWSKI et al., 2015; STÄHLI; CUSTER; VAN MIER, 2007). Este tipo de análise utiliza a imagem de várias “fatias” do concreto para composição de um modelo tridimensional das fibras.

Figura 2.12 - Composição 3D por imagens de Raio-X feitas no concreto com fibras de aço.

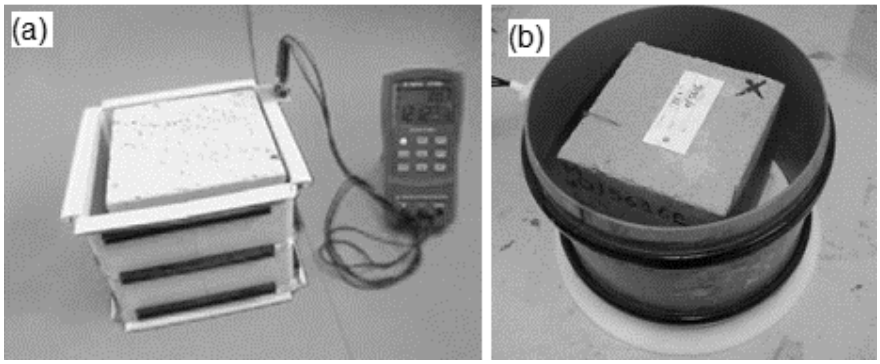


Fonte: Stäli, Custer e Van Mier (2007)

Diferente de ensaios com análises visuais, outros estudos buscaram aproveitar das propriedades elétricas das fibras de aço em seus métodos de ensaio. Lataste, Behloul e Breysse (2008) mediram variação na resistividade elétrica em várias posições de lajes moldadas com concreto reforçado com fibras de aço. Al-Mattarneh (2014), por sua vez, mediu variações na impedância, também buscando informações sobre orientação de fibra de aço em lajes de concreto.

Torrents et al. (2012), em sua pesquisa, discutem um método de medição da concentração e orientação de fibras em amostras cúbicas de concreto, com 15 cm de lado (Figura 2.13a), através da medição da influência das fibras em um campo eletromagnético. Posteriormente, Lopez (2013) desenvolveu uma adaptação do método que otimiza a estabilidade do campo eletromagnético ao adaptar o formato da bobina geradora do campo eletromagnético (Figura 2.13b).

Figura 2.13 – Equipamento inicialmente utilizado para ensaio indutivo (a) e bobina cilíndrica proposta

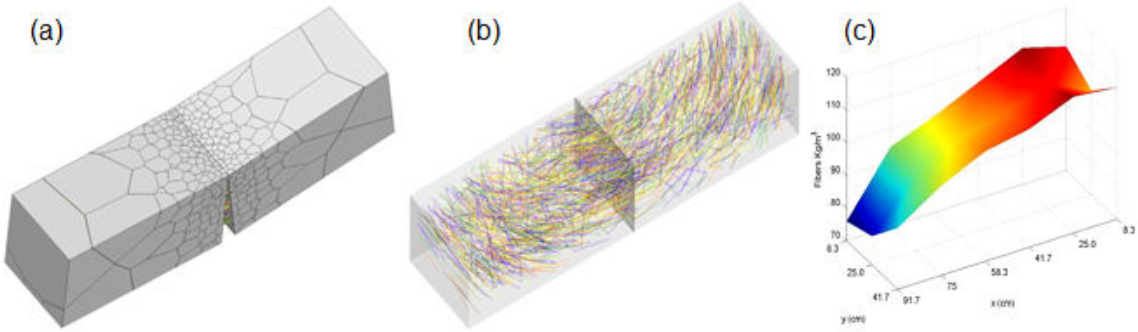


Fonte: Torrents et al., 2012 (a); Lopez, 2013 (b)

Por utilizar corpos de prova com pequenas dimensões, o ensaio de indutância é viável como forma de análise voltada para testemunhos extraídos de estruturas ou peças maiores (Lopez, 2013). Assim como, por ser um ensaio não-destrutivo, permite que os corpos de prova sejam posteriormente utilizados nos ensaios DEWS ou Barcelona, por exemplo.

Além dos métodos citados, vale mencionar o uso de simulações numéricas como uma outra forma de estudo, embora este tipo de abordagem não constitua em ensaios propriamente ditos. Através de modelos desenvolvidos em computador é possível desenvolver métodos que busquem prever a disposição das fibras e evolução das fissuras (Figura 2.14a e b), bem como a concentração de fibras prevista por ocorrência do fluxo de moldagem (Figura 2.14c)

Figura 2.14 - Resultados de modelos de simulações numéricas para concretos com fibras



Fonte: Švec et al., 2014 (a)(b); Ferrara, 2015 (c)

Dado o exposto, é possível observar que os ensaios não destrutivos apresentam grande potencial de aplicação, principalmente como análise complementar aos ensaios de caracterização no estado endurecido. Por este motivo, é importante que haja interação entre dados obtidos pelos ensaios não destrutivos com ensaios que avaliem comportamento mecânico das fibras no concreto endurecido.

Há, portanto, diversas alternativas de caracterização do CAARFA nos estados fresco e endurecido. Foram selecionados métodos que permitissem a caracterização da alteração de comportamento devido a adição de fibras no estado fresco, e ensaios que avaliassem os efeitos da condição de moldagem na capacidade resistente pós-fissuração no estado endurecido, o que está melhor descrito nos capítulos seguintes.

3 AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REOMETRIA PARA CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM FIBRA DE AÇO

A utilização do concreto autoadensável (CAA) traz alterações importantes no processo de moldagem do concreto ao alterar seu comportamento no estado fresco. Uma vez que o CAA dispensa o uso de vibração, acaba por facilitar a moldagem de peças com maior densidade de armadura ou com geometrias mais complexas (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

O concreto autoadensável, apesar das vantagens quando à capacidade de ser compactado sob atuação apenas do peso próprio, pode apresentar defeitos advindos de excessiva fluidez, ou erros de dosagem, tais como segregação e exsudação (EFNARC, 2005).

Com o uso de fibras como forma de reforço, é necessário dirigir mais atenção à prevenção destes defeitos, visto que, como já citado, a disposição errônea das fibras pode comprometer o comportamento mecânico do concreto (PRISCO, PLIZZARI e VANDEWALLE, 2009). É, portanto, necessário caracterizar bem o concreto em termos de comportamento reológico para ser possível verificar a influência das condições de moldagem no estado endurecido

Como forma de controle, diversos ensaios são normatizados com o objetivo de avaliar a estabilidade do concreto autoadensável (ABNT, 2010; EFNARC, 2005). Estes ensaios são, em geral, simples, porém avaliam a resposta do concreto sob apenas uma solicitação fixa, e podem não ser totalmente apropriados para avaliar o concreto autoadensável quando há adição de fibras (EL-DIEB e REDA TAHA, 2012).

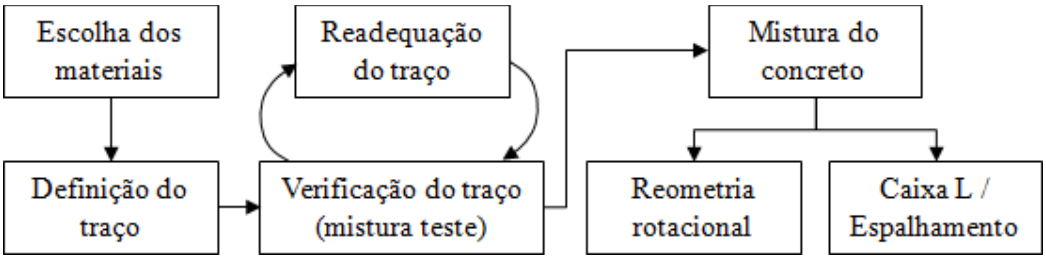
Os reômetros, por outro lado, são equipamentos capazes de exercer variações nos esforços de cisalhamento aplicados aos fluidos (DAMINELI et al., 2010). A investigação baseada em reologia pode então servir como base de critérios físicos que complementem a análise dos resultados obtidos pelos ensaios convencionais (KUDER et al., 2007).

Desta forma, este trabalho experimental foi realizado com o objetivo de avaliar o potencial de aplicação da reometria rotacional planetária na avaliação da trabalhabilidade de CAA reforçado com fibras de aço e correlacionar seus resultados com os obtidos pelos ensaios convencionais aplicados aos CAAs.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para atender aos objetivos deste estudo, foi selecionada uma única fibra de aço, variando-se então o teor aplicado da mesma. Isto possibilitou tornar evidentes as alterações no comportamento do concreto fresco influenciado pelo teor de fibra. Os teores foram mantidos abaixo de 120 kg/m³. Outros estudos abordaram a influência de distintas fibras no comportamento reológico do concreto. O trabalho foi então desenvolvido segundo o planejamento apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma do programa experimental



As diferentes misturas produzidas para este estudo foram misturadas em betoneira convencional como detalhado adiante. Após a mistura, o material foi destinado aos ensaios convencionais e de reometria rotacional que foram executados simultaneamente. Estes ensaios estão mais bem descritos no item 3. Adotou-se a realização simultânea dos ensaios para assegurar que não houvesse influência pela perda do efeito do aditivo superplastificante ou da reação de hidratação do cimento nas propriedades no estado fresco.

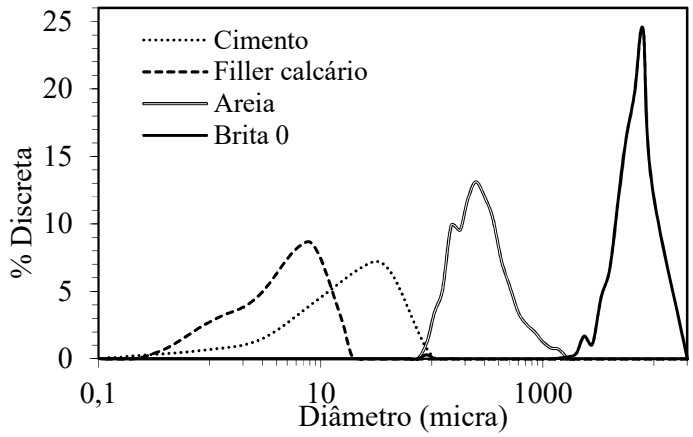
3.1.1 Materiais

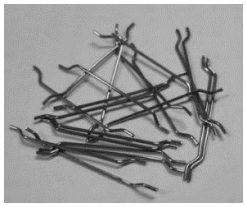
Os concretos autoadensáveis foram formulados com brita 0, areia rosa, cimento Portland composto (CP II F 32, Votoran) e filler calcário (Profine 1, Provale), com distribuições granulométricas, determinadas por análise dinâmica de imagem em um equipamento Qicpic (Sympatec), conforme ilustrado na Figura 3.2a.

Foram utilizadas fibras de aço com comprimento de 30 mm e fator de forma 47,6 com ganchos nas pontas (Figura 3.2b). Optou-se por fibras curtas seguindo-se a recomendação empírica tradicional para o comprimento mínimo de fibra, que deve ser

maior ou igual ao dobro do diâmetro máximo do agregado graúdo (Lfibra ≥ 2ϕmáx) que, neste estudo, foi de 9,5mm, visando torná-la mais eficiente para o reforço (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 3.2 - Distribuição granulométrica dos materiais e ilustração da fibra





Além das matérias-primas descritas, foi utilizado também um teor fixo de aditivo superplastificante de alto desempenho à base de policarboxilato de sódio, Grace ADVA 585. Este aditivo é normalmente aplicado para estabilização das partículas mais finas e redução da quantidade de água de amassamento.

3.1.2 Composição do concreto

A formulação base dos concretos utilizados neste trabalho é apresentada na Tabela 3.1, desenvolvida a partir de composições encontradas em literatura para o mesmo tipo de concreto, com teores semelhantes de fibra (FERRARA, PRISCO e LAMPERTI, 2010; SAHMARAN, YURTSEVEN e OZGUR YAMAN, 2005). Não foi utilizado, portanto, um método convencional de dosagem.

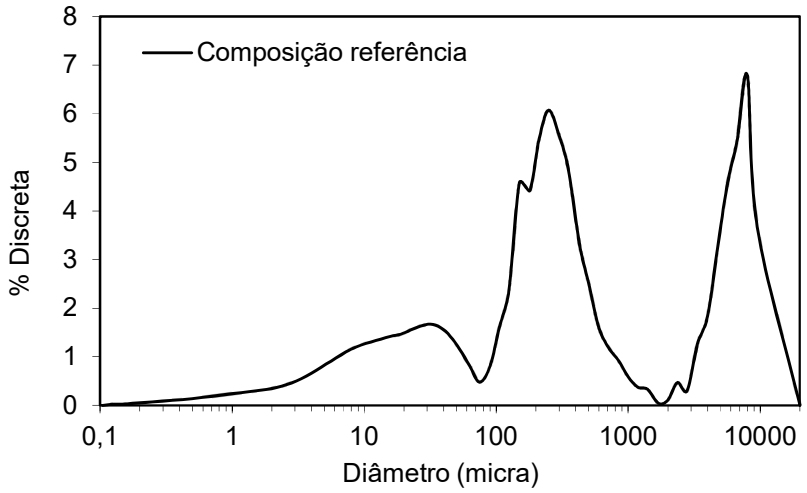
Na mesma tabela, são ilustrados também a área superficial específica (ASE), quantificada em um equipamento Belsorp Max (Bel Japan) e a densidade real de cada material, determinada em um picnômetro de gás He (Quantachrome MVP 5DC).

A distribuição granulométrica resultante na composição é ilustrada na Figura 3.3 e a relação água/cimento de 0,4 foi mantida constante para todas as misturas.

Tabela 3.1 – Traço, consumo, área superficial específica e densidade das matérias primas

Matéria-prima	Traço em massa	Consumo (kg/m³)	ASE (m²/g)	Densidade (g/cm³)
Cimento	1,0	522	1,2	2,96
Filler calcário	0,12	63	3,6	2,69
Areia rosa	2,0	1044	0,6	2,40
Brita 0	1,2	626	0,1	2,60

Figura 3.3 - Distribuição granulométrica da composição



A Tabela 3.2 fornece os valores de consumo de fibras em kg/m³ e os correspondentes teores de fibras em volume utilizados no experimento. A escolha dos valores buscou contemplar uma faixa ampla de variação, para que fosse mais evidente a mudança no comportamento, em função do aumento da quantidade de fibras.

Tabela 3.2 - Teores de fibras utilizados nas misturas

Mistura		1	2	3	4
Teor de fibra	(kg/m³)	0	20	80	120
	(% vol)	0,00%	0,25%	1,02%	1,53%

3.1.3 Mistura dos concretos

A mistura dos concretos foi realizada em betoneira convencional de eixo inclinado com capacidade de 120 l, o procedimento adotado foi o mesmo para todas as misturas para evitar qualquer influência de variáveis intervenientes originadas na produção das misturas e seguiu a sequência abaixo:

1. Umedeceu-se a betoneira;
2. Colocaram-se os agregados graúdos;
3. Adicionou-se 50% da água e ligou-se a betoneira por 1 minuto;
4. Colocou-se o agregado miúdo e misturou-se por mais 1 minuto;
5. Adicionaram-se os finos, cimento e filler, e misturou-se por mais 1 minuto;
6. O restante da água e o aditivo foram adicionados na sequência;
7. Durante os 5 minutos seguintes, as fibras foram colocadas aos poucos, visando evitar a formação de embolamentos.

Após a completa mistura, o concreto foi separado em partes para a utilização nos ensaios de caixa-L, espalhamento e reometria rotacional, realizados concomitantemente, conforme o fluxograma (Figura 3.1).

3.2 MÉTODOS DE ENSAIO

3.2.1 Caixa-L

O ensaio de Caixa L busca avaliar a habilidade passante do concreto autoadensável, que é a capacidade de fluir entre espaços estreitos e barras da armadura e manter a capacidade de adensamento sem apresentar separação de fases, causada pelo bloqueio de seus materiais (EFNARC, 2005). A manutenção das barras durante ocorreu pela intenção de avaliar uma condição de trabalhabilidade particularmente importante para elementos estruturais em que se empregue sistema híbrido de reforço, ou seja, o uso conjunto de fibras e barras de aço. Esta alternativa técnica vem sendo empregada em uma série de aplicações (DE LA FUENTE et. al. 2012; FIGUEIREDO e ESCARIZ, 2011; MAKITA e BRÜHWILER, 2014) com o objetivo de otimizar o comportamento mecânico do concreto. No entanto, também é interessante avaliar a ação combinada de fibras e barras em termos de trabalhabilidade.

Na realização deste ensaio, foi feito o preenchimento da coluna prismática com 600 mm de altura, com aproximadamente 12 litros de concreto. Após 60 segundos de repouso, foi aberta a comporta que libera a passagem do concreto, restringida por três barras metálicas com diâmetros de 12 mm espaçadas a cada 40 mm. A lateral da

caixa permite observar o comportamento do concreto no fluxo pelo equipamento, conforme ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Caixa L após realização do ensaio

O resultado deste ensaio consiste em uma relação entre a espessura da camada de concreto atingida na extremidade do vão e aquela obtida na sua parte inicial, junto às barras. Quanto maior o valor, maior terá sido a habilidade passante apresentada pelo concreto. Os valores considerados aceitáveis para concreto autoadensável situam-se entre 0,8 e 1 (EFNARC, 2005).

3.2.2 Espalhamento

O ensaio de espalhamento, ou slump flow, apresenta semelhanças com o ensaio de abatimento do cone de Abrams, e é utilizado para avaliar a capacidade de fluidez do concreto não confinado, sob ação do peso próprio (MELO, 2005).

Para este estudo, foi realizado o preenchimento do cone invertido com a intenção de tornar o fluxo inicial de saída mais orientado e restritivo. Assim, embora esta posição difira da sugerida por algumas normas e haja a indicação de que há pouca influência oriunda da orientação do cone (FARES, 2015), optou-se pela condição mais crítica de avaliação. Com a retirada do cone e o espalhamento do concreto, mediram-se os diâmetros em dois eixos perpendiculares entre si, conforme mostrado na Figura 3.5. Não há consenso na literatura técnica acerca dos limites de espalhamento. Para este trabalho, foram considerados os valores de EFNARC (2005), que variam de 650 a 800 mm, limites semelhantes aos considerados por Akcay e Tasdemir (2012).

Figura 3.5 - Medição do diâmetro de espalhamento

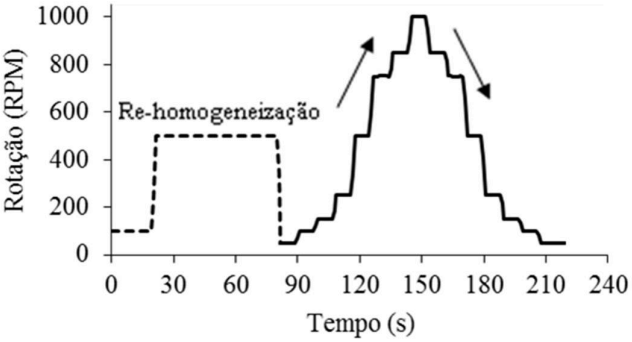
Embora o resultado do espalhamento seja expresso apenas pelo diâmetro medido, este ensaio permite analisar visualmente a ocorrência de segregação de materiais ou exsudação da água do concreto em fluxo livre. Contudo, este é um indicativo qualitativo e, portanto, não quantificável para a aceitação ou não de um concreto (EFNARC, 2005), mas pode ajudar na avaliação da adequação das misturas utilizadas.

3.2.3 Reometria rotacional

Para o ensaio de reometria, foi utilizado um reômetro tipo planetário construído na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ilustrado na Figura 3.6a. O ensaio consiste no cisalhamento de um volume de aproximadamente 18 litros de material, utilizando-se uma cuba metálica e hélices adaptadas para o ensaio em concreto, especialmente projetadas para diminuição da segregação.

Durante os primeiros 80 segundos do ensaio, o material foi re-homogeneizado, para evitar que o teste fosse realizado com material sedimentado, visto que a mistura foi realizada na betoneira e o concreto foi deslocado até o equipamento. Em seguida, foi aplicado um ciclo de cisalhamento, variando-se a velocidade de rotação de 50 a 1000 rpm e retornando a 50 rpm. Em cada patamar adotado a velocidade foi mantida por 7 segundos, conforme procedimento ilustrado na Figura 3.6b.

Figura 3.6 - Reômetro utilizado para o ensaio nos concretos (a) e programação utilizada para os testes (b); as setas indicam os períodos de aceleração e desaceleração da rotação.



Os resultados obtidos foram compilados em um gráfico de torque em função da rotação aplicada. O torque de escoamento e a viscosidade plástica foram obtidos a partir do modelo reológico de Bingham, aplicado na etapa de desaceleração da rotação, ou seja, após a imposição da maior condição de cisalhamento e melhor dispersão das partículas. Os parâmetros foram então determinados através da inserção de uma linha de tendência linear para estes pontos sendo o coeficiente angular da reta um parâmetro para a avaliação da viscosidade e a interseção com o eixo das ordenadas um parâmetro de avaliação da tensão de escoamento.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 Ensaios monoponto (Caixa L e espalhamento)

Os resultados obtidos para os ensaios de caixa-L e espalhamento são apresentados na Tabela 3.3 em função do teor de fibra utilizado. Como parâmetro de avaliação foi adotado o critério de aceitação proposto pela EFNARC (2005).

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios normalizados

Teor de fibra (kg/m³)	0 (Ref)	20	80	120	Limites (EFNARC)	
					mín.	máx.
Caixa – L (h2/h1)	1,0	1,0	0,74	0	0,8	1,0
Espalhamento (mm)	785	795	775	780	650	800

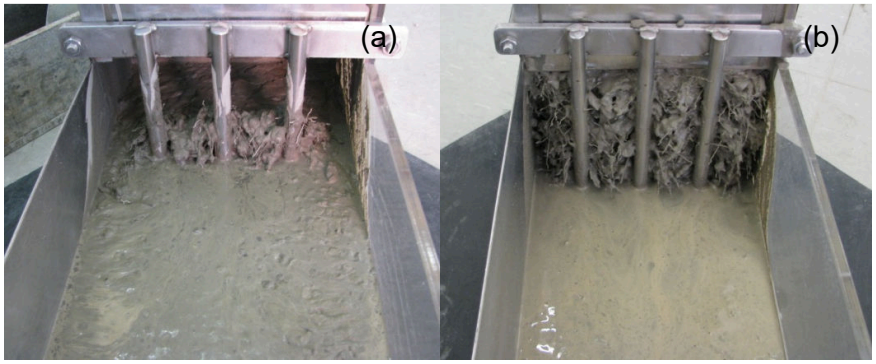
No caso dos resultados do ensaio de Caixa-L, à medida que se aumentou o teor de fibra, diminuiu a relação entre as alturas, ou seja, aumentou a diferença entre a altura de concreto no início e no final do canal. Isto comprova que as fibras dificultam a mobilida de do CAA. Assim, somente os concretos de referência e com 20 kg/m³ de fibra de aço apresentaram resultados dentro dos limites recomendados segundo EFNARC (2005). Dessa forma, apenas estes concretos poderiam ser considerados como autoadensáveis por este critério.

Para o teor de 80 kg/m³, obteve-se a relação h2/h1 de 0,74, inferior ao limite mínimo recomendado para aplicação como autoadensável (EFNARC, 2005). Foi constatado bloqueio parcial do material provocado pelas barras metálicas (Figura 3.7a), resultando em heterogeneidade na distribuição das fibras pelo concreto fresco.

Para o teor de 120 kg/m³ (Figura 3.7b) o impacto da presença das barras foi ainda maior e não houve fluxo considerável, observando-se a quase totalidade de material retido nas barras, com uma pequena quantidade de pasta ao longo do canal e com altura desprezível. O resultado, portanto, foi quantificado como uma relação h2/h1 igual à zero.

Estas observações são importantes pelo fato de não ser possível avaliar a capacidade passante do material em ensaios reológicos que utilizam sistemas planetários como o utilizado neste estudo. Assim, acaba-se por demonstrar que o material não é aplicável para teores muito altos. Resultado semelhante foi obtido no estudo de Dhonde, Mo e Hsu (2006).

Figura 3.7 - Resultado após ensaio da Caixa L para os teores de 80 kg/m³ (a) e 120 kg/m³(b)



Todavia, foi mantida a configuração conforme indica a EFNARC (2005), semelhante à dos concretos com menor teor de fibras, para critérios de comparação do método,

mas cabe apontar a possibilidade de execução deste ensaio sem a utilização de barras, quando se busca avaliar a fibra como reforço único.

A partir dos ensaios de espalhamento, diferente do que fora observado nos resultados da caixa L, todos os concretos avaliados estariam dentro da faixa recomendada para autoadensáveis (EFNARC, 2005), se fosse levado em consideração somente o diâmetro de espalhamento. Os resultados convergem com o trabalho de Akcay e Tasdemir (AKCAY e TASDEMIR, 2012) no qual os diâmetros obtidos não apresentaram grandes variações, mesmo com grande quantidade de fibras.

No entanto, foi notável a segregação no concreto com maior teor de fibras, em comparação ao concreto de referência, conforme visto na Figura 3.8, com a ocorrência de aglomeração na porção central durante o espalhamento, devido ao travamento das fibras entre si, criando uma barreira para o escoamento dos agregados graúdos.

Com isso, foi observada considerável separação de fases e fluxo dos materiais mais finos (e parte dos mais grossos) para as bordas, similar ao que fora observado por Grünewald e Walraven (2001).

Embora seja descrito em norma técnica, o critério para a definição da segregação durante o ensaio de espalhamento é muito subjetivo e depende do bom senso dos responsáveis durante a interpretação do resultado do ensaio, mesmo sendo um critério para a aceitação para o CAA. No caso dos concretos com 120 kg/m³ de fibra esse fenômeno foi muito nítido, mas nos demais casos essa observação não ficou muito evidente. Logo, devido às restrições normativas, tal concreto não deveria ser tratado na classe de autoadensável.

Figura 3.8 - Espalhamento do concreto de referência (esq.) e do com fibras (120 kg/m³) (dir.)

A partir destes resultados, é possível ilustrar as limitações no ensaio de espalhamento, pois o parâmetro de medida pode ser afetado por fatores como a aglomeração de

fibras, fato que, embora possa ser visualizado, não é quantificado. Além disso, os valores medidos não foram influenciados significativamente pelo teor de fibra, mostrando que o ensaio é incapaz de avaliar o efeito da mesma na mobilidade do compósito. Dessa forma, apesar de poder avaliar o potencial risco de segregação do material, o que foi impossível para este ensaio de reometria, o ensaio de espalhamento passa a ter um caráter mais qualitativo que quantitativo para a avaliação do CRF.

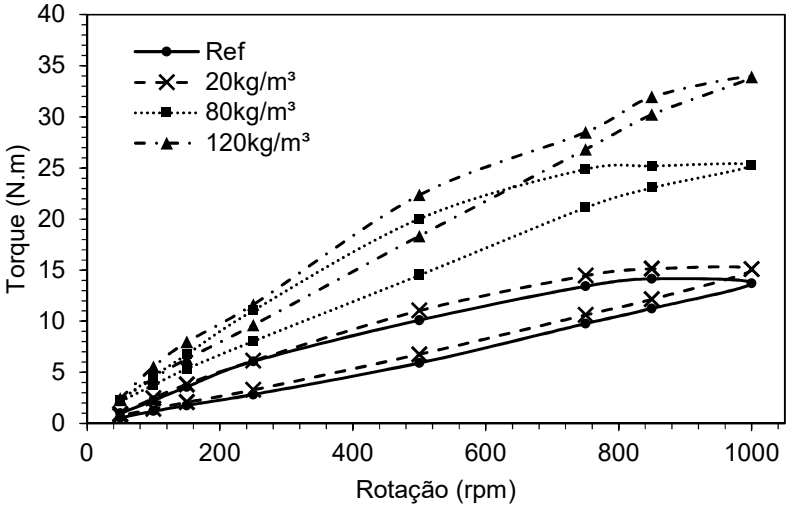
Independente do teste que foi utilizado até aqui, os ensaios monoponto avaliam o concreto somente em uma única solicitação, na qual o material flui somente em função da ação da gravidade, reduzindo seus resultados a um número que deve estar dentro de uma faixa de valores. Esta forma de avaliação, embora muito utilizada para a qualificação dos concretos, não possibilita a análise de variações no comportamento sob condições distintas de cisalhamento.

Além disso, os resultados dos ensaios de espalhamento e caixa L podem ser influenciados por fatores como a velocidade de execução (NGUYEN, ROUSSEL e COUSSOT, 2006). Isto os torna extremamente dependentes da qualidade do técnico encarregado de sua execução, o que não acontece com o ensaio de reometria. Dessa forma, pode-se afirmar também que o desenvolvimento dos concretos através destes ensaios seja baseado no empirismo e na experiência dos profissionais que o utilizam.

3.3.2 Ensaio de reometria

No ensaio de reometria rotacional é possível a obtenção de resultados mais completos e não pontuais, como os apresentados até agora. Com a aplicação de distintas velocidades de rotação, há a resposta do material em diferentes solicitações, na forma de torque de cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Perfis de cisalhamento dos concretos em função da velocidade de rotação

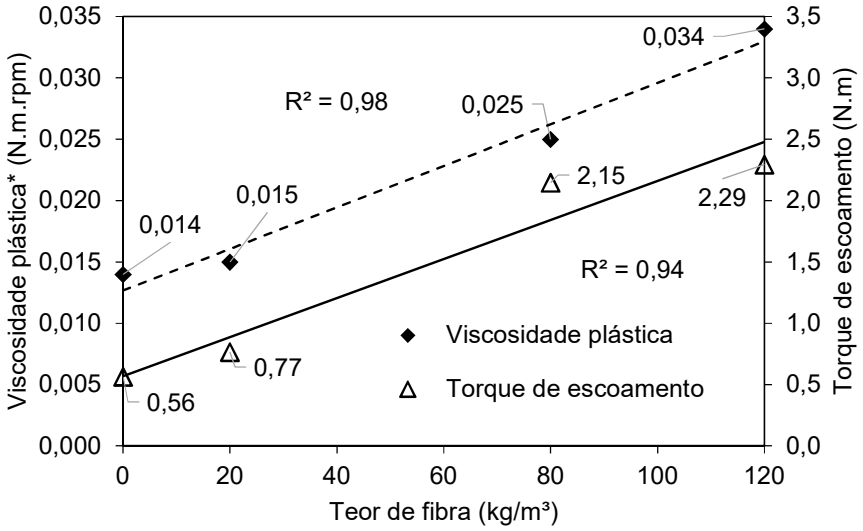


Todos os concretos apresentam comportamento reológico de materiais pseudoplásticos, e perfil de tixotropia positiva (área de histerese positiva).

A utilização de 20 kg/m³ de fibra não apresentou impacto significativo no perfil de cisalhamento, mas com teores maiores ou iguais a 80 kg/m³ a influência foi muito clara. O aumento no torque de cisalhamento foi proporcional ao aumento no teor de fibras, devido ao aumento na frequência de contato entre as partículas e alteração das linhas de fluxo.

Os resultados são apresentados na Figura 3.10 e apontam para uma tendência de crescimento da viscosidade plástica diretamente proporcional com o aumento do teor de fibra. É importante ressaltar que a viscosidade apresentada não está de acordo com o sistema internacional de medidas, por isso, é definida neste tipo de ensaio como uma relação entre o torque de cisalhamento e a rotação.

Figura 3.10 - Viscosidade plástica e torque de escoamento dos concretos em função do teor de fibras



Kuder *et al.* (2007) afirmam que, com pouca adição do reforço, prevalece o efeito de quebra estrutural do material sólido. A partir do momento em que se atinge um volume crítico de fibras, predomina-se o efeito de intertravamento mecânico. Essas informações podem servir para explicar o ocorrido durante o ensaio de espalhamento, onde houve aglomeração de fibras no interior da suspensão e espalhamento da fase mais fina para as bordas do concreto. No entanto, de acordo com as medidas deste ensaio, todos os concretos eram similares e estavam em conformidade com a referida norma técnica. Por isso, a associação de métodos e utilização de ensaios que permitem a obtenção de respostas mais completas são alternativas para o desenvolvimento mais coerente e correto das formulações dos concretos e previsão das propriedades no estado fresco. Isto fica especialmente claro neste experimento pelo fato do ensaio de reometria ter sido incapaz de indicar os riscos de problemas com a capacidade passante e possibilidade de ocorrência de segregação que os outros ensaios foram capazes de demonstrar. Assim, não houve nenhum sinal de segregação durante o ensaio do reômetro, tornando-o capaz de quantificar o efeito da adição das fibras em todos os teores utilizados. Isto mostra a eficiência do equipamento utilizado que garante a manutenção da homogeneidade do concreto reforçado com fibras durante todo o ensaio. Isto é especialmente eficaz quando se analisa as condições de mistura do material. Por outro lado, a capacidade passante ainda não é parametrizável diretamente por um ensaio de reometria.

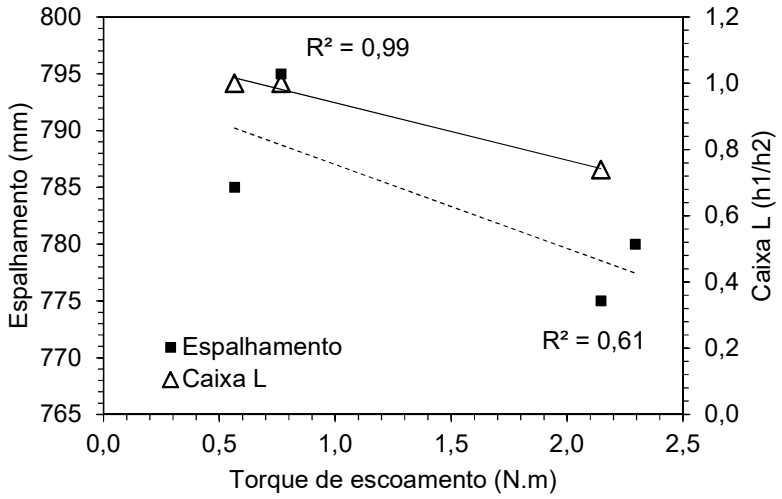
3.3.3 Análise combinada dos diferentes resultados de ensaios

As informações obtidas pelos métodos de espalhamento e caixa L são muito limitadas e pontuais, avaliando apenas uma condição de cisalhamento aplicada. Por outro lado, os dados de reometria permitem observar claramente o perfil reológico, a alteração na viscosidade plástica e no torque de escoamento dos concretos em função do aumento da quantidade de fibras. Isso não significa que os ensaios pontuais não podem ser utilizados, somente que resultam em informações mais qualitativas e limitadas para os concretos com fibras avaliados. Dessa forma, o uso complementar das distintas metodologias pode conferir uma avaliação mais abrangente e eficaz do comportamento do material.

Na sequência são apresentadas as correlações entre os resultados obtidos nos ensaios monoponto e os resultados de reometria rotacional. Deve ser salientado que o resultado do ensaio da caixa L com o máximo teor de fibra foi retirado das análises conjuntas, visto que a configuração utilizada para o ensaio não foi adequada ao volume de fibras utilizado.

Na Figura 3.11 é ilustrada a correlação entre o torque de escoamento obtido a partir de reometria rotacional e o espalhamento e a habilidade de adensamento e na Figura 3.12 é ilustrada a correlação das mesmas variáveis com a viscosidade plástica.

Figura 3.11 - Correlação entre o torque de escoamento, obtido a partir de reometria rotacional, e o espalhamento e a habilidade passante.



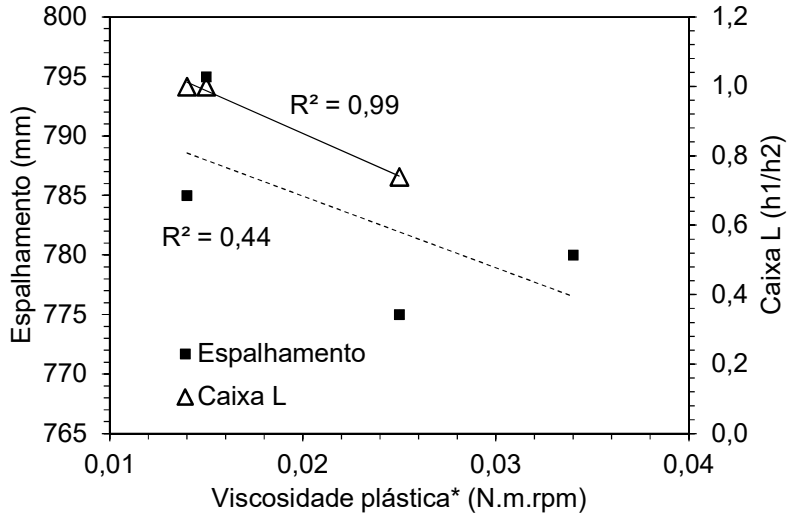
O espalhamento apresentou coeficiente de correlação mais baixo quando avaliado em função dos parâmetros medidos por reometria rotacional, enquanto a caixa L apresentou R^2 mais significativo tanto com a viscosidade quanto com a tensão de escoamento dos concretos.

Conforme já estudado por Damineli et al. (2010), a partir de análise do perfil reológico de concretos dosados em central através de reometria aplicada em campo, o espalhamento de concretos autoadensáveis tem boa correlação com a tensão de escoamento, porém baixa relação com a resistência do fluido ao fluxo.

No caso deste estudo, os resultados não convergiram com o obtido pelos autores, pois a presença das fibras atuou dificultando o fluxo livre, gerando barreiras para a movimentação conjunta dos materiais.

Isto se deve à configuração dos ensaios, pois o espalhamento avalia apenas o fluxo livre de concreto, enquanto o reômetro avalia o material em situação de confinamento, havendo interação com os bordos e com a hélice, aproximando-se mais das características apresentadas na caixa L.

Figura 3.12 - Correlação entre a viscosidade plástica, obtida a partir de reometria rotacional, e o espalhamento e a habilidade passante.



Desta forma, pode se dizer que a perda da habilidade passante em função do aumento do teor de fibras, medida a partir do ensaio de caixa L, pode ser explicada tanto pelo aumento da tensão de escoamento quanto da viscosidade do concreto, mensuradas a partir do ensaio de reometria rotacional.

A reometria, por sua vez, mostrou-se mais sensível a variações na quantidade de fibras do concreto, detectando alterações inclusive na adição de 20 kg/m³ de fibra, além de não ter apresentado limitação para a quantidade de 120 kg/m³ de fibra. Pois, para o ensaio de caixa L, na forma como foi apresentado neste estudo, há uma quantidade crítica de fibras a partir da qual há limitação em sua aplicação.

Parâmetros como torque de escoamento, área de histerese e viscosidade plástica somente puderam ser quantificados através da reometria, e foram válidos para todos os valores de fibras utilizados, mostrando que há boa aplicabilidade de ensaios reológicos para concretos autoadensáveis reforçados com fibras, no entanto, devido ao fato de o reômetro manter o concreto constantemente em movimento, não houve possibilidade de se avaliar o potencial de segregação do concreto.

3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O entendimento da influência da presença de fibras no concreto autoadensável é de grande importância para viabilizar o uso da tecnologia. Os ensaios monoponto comumente utilizados podem apresentar limitações e falta de relações com parâmetros físicos. A reometria rotacional aparece como recurso adicional para esta investigação, avaliando vários níveis de solicitação e oferecendo a possibilidade de relação com os ensaios monoponto para compreensão dos parâmetros reológicos predominantes nestes ensaios.

O resultado do espalhamento apresentou pouca variação em função do teor de fibras e classificou todas as misturas como autoadensáveis segundo a norma utilizada. Por isso, não foi observada boa correlação nem com a tensão de escoamento, nem com a viscosidade. No entanto, a análise visual dos resultados permitiu observar a ocorrência de segregação em fluxo livre nos teores de 80 e 120 kg/m³, embora esta seja uma avaliação subjetiva.

O ensaio de caixa L, por outro lado, mostrou boa correlação com parâmetros reológicos e detectou perda na habilidade passante com o aumento de fibras, associada ao aumento na viscosidade plástica e na tensão de escoamento. Além disso, foi capaz de demonstrar claramente as dificuldades passantes do compósito quando o teor de fibras era elevado, o que não é possível de avaliar com o ensaio de reometria. Isto demonstra claramente que a utilização conjunta dos ensaios pode

proporcionar uma avaliação mais abrangente da aplicabilidade do material. Além disso, há também a possibilidade de realização do ensaio sem uso das barras quando não for prevista a necessidade de lançamento em estruturas com reforço híbrido.

O resultado obtido através da reometria possibilitou uma leitura mais abrangente das características do concreto, com variação de parâmetros básicos acordo com a quantidade de fibras e o torque utilizado. Isto permitiu a classificação do comportamento pseudoplástico e de tixotropia positiva, além da quantificação da alteração da viscosidade plástica e torque de escoamento de acordo com a quantidade de fibras. Por outro lado, não foi possível obter informações sobre segregação em fluxo livre e as limitações da capacidade passante do material quando maiores teores de fibras foram utilizados.

Sendo assim, pode se dizer que os ensaios monoponto, apesar de apresentarem limitações, são capazes de fornecer informações complementares que auxiliem no conhecimento de algumas propriedades do concreto utilizado, aprofundando a análise de aplicação do material. Por outro lado, por permitir melhor leitura dos parâmetros reológicos independentemente do teor de fibras utilizado, é possível afirmar que ensaios reológicos são aplicáveis e seus resultados são essenciais para a avaliação do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço. Por isso, é muito interessante a utilização conjunta destes ensaios de modo a se obter uma avaliação mais abrangente do material de modo a minimizar os riscos de insucesso na aplicação dos mesmos.

4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE MOLDAGEM NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ELEMENTOS PLANOS

O aço é o material mais utilizado como reforço para combater a fragilidade apresentada pelo concreto simples, com diversas formas de utilização. Enquanto no reforço convencional, com barras, fios ou cordoalhas, a posição e direção do aço são fixadas em projeto, no reforço com fibras estes parâmetros variam devido à dispersão das fibras, que é influenciada por vários fatores.

O efeito parede, característico de elementos estruturais longos e o fluxo de concreto são exemplos de fatores que geram orientação preferencial das fibras (GETTU et al., 2005; ZERBINO et al., 2012). A orientação das fibras pode ser responsável alterações na capacidade resistente pós-fissuração (FERRARA; DI PRISCO; LAMPERTI, 2010), em alguns casos, uma mesma mistura de concreto pode apresentar redução na resistência à flexão apenas por conta da orientação das fibras (STÄHLI; CUSTER; VAN MIER, 2007).

Por este motivo, diversos estudos têm sido dedicados a desenvolver e aperfeiçoar métodos de controle e análise das propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras. Dentre as diversas abordagens da questão, há ensaios *in loco* (AL-MATTARNEH, 2014), com amostras extraídas (FERRARA; MEDA, 2006); feitos no concreto fresco (DHONDE; MO; HSU, 2006) ou em corpos de prova moldados em laboratório, para ensaios destrutivos ou não-destrutivos (LOPEZ, 2013).

Com o objetivo de contribuir para o aperfeiçoamento dos métodos de análise do efeito das fibras na capacidade resistente do concreto, este estudo buscou realizar uma prospecção da capacidade resistente pós-fissuração em elementos planos sob diferentes condições de moldagem, através do ensaio de punção de placas, e relacionar os resultados com avaliações pontuais de orientação de fibra e tenacidade feitas pelos ensaios de indutância e DEWS.

4.1 Programa Experimental

O programa experimental deste trabalho teve como foco principal avaliar o efeito de diferentes formas de orientação do fluxo do concreto na moldagem de elementos

planos sobre a capacidade resistente na fase pós-fissuração do concreto com fibras de aço.

Utilizou-se concreto autoadensável para que as fibras fossem orientadas apenas pelo fluxo do concreto, sem a necessidade de vibração. A caracterização do concreto no estado fresco foi feita com os ensaios de espalhamento e reometria rotacional, seguindo os mesmos prodecimentos descritos no capítulo anterior.

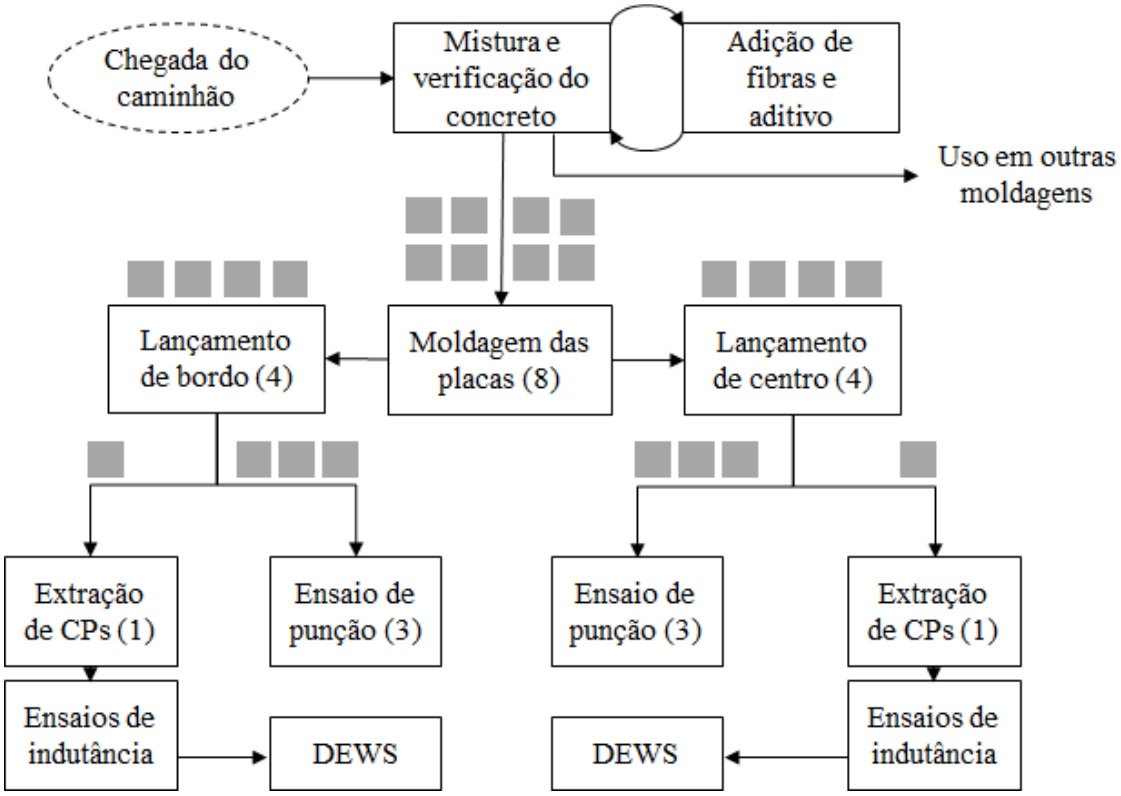
O programa experimental foi fundamentado na produção de placas moldadas com o lançamento de concreto realizado em duas posições diferentes, nomeadas “Lançamento de centro” e “Lançamento de bordo”. Com isto, procurou-se introduzir orientações distintas para as fibras através da indução de linhas de fluxo preferencias distintas em cada um dos grupos de placas. Para cada grupo foram concretadas quatro placas no total (Figura 4.1).

A avaliação da capacidade resistente pós-fissuração foi feita pelo ensaio de punção de placas, o qual foi baseado no método proposto pela EFNARC (1996). Para tal, foram produzidas três placas para cada condição de moldagem, e todas as placas foram ensaiadas com idade superior a 30 dias.

Uma quarta placa de cada grupo foi encaminhada para ensaios de menor escala realizados em testemunhos extraídos. Estes ensaios tinham por objetivo quantificar o grau de orientação das fibras e o nível de anisotropia do CAARFA no comportamento pós-fissuração.

As informações obtidas por estes ensaios buscaram explicitar de que forma a condição de moldagem afetou a orientação preferencial das fibras e a sua capacidade de reforço. Para tal, cada placa foi cortada em cubos e encaminhada ao método de indução eletromagnética para contagem e verificação das fibras. Posteriormente, alguns dos cubos foram direcionados ao ensaio de tração indireta – DEWS.

Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental



4.1.1 Materiais

O concreto utilizado neste trabalho está inserido em um contexto de diversas pesquisas sobre concreto com fibras. Devido ao do grande volume transportado, foi misturado e fornecido pela concreteira Engemix. Foram utilizadas as matérias primas que a concreteira usa para obter seu melhor desempenho nas especificações apresentadas em relação a resistência e espalhamento (descritas na seção 4.1.2).

A mistura teve início na saída do caminhão da concreteira, e prosseguiu durante o percurso até o laboratório da Universidade (percurso estimado em 30 minutos). À chegada, foram adicionadas as fibras e o aditivo superplastificante. Para este trabalho, foi utilizado teor de 20 kg/m³ da fibra de aço Dramix 65/35-BG (Figura 4.2). Esta fibra é fornecida colada e com ancoragem nas pontas, e apresenta as características descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades (nominais) da fibra de aço Dramix 65/35 BG

Resistência à tração	1.345 N/mm²
Módulo de Young	210.000 N/mm²
Comprimento (l)	35 mm
Diâmetro (d)	0,55 mm
Fator de forma (l/d)	65

(Fonte: Fabricante)

Utilizou-se aditivo superplastificante GRACE ADVA 525, baseado em policarboxilato para garantir as condições de fluidez e autoadensabilidade no concreto.

Figura 4.2 - Fibra Dramix 65/35 BG, utilizada neste trabalho

Fonte: Foto própria

4.1.2 Traço do concreto

A proporção dos materiais utilizados está indicada na Tabela 4.2, e apresenta consumo de cada material e, também, a massa específica do concreto.

Tabela 4.2 - Traço em massa e consumo dos materiais do concreto

Material	Traço	Consumo (kg/m³)
Cimento CPII E 40	1,00	404
Areia artificial	1,01	410
Ar. Quartzo	1,41	569
Brita 0	2,14	864
Fibra de aço 65/35	0,05	20
Água	0,45	182
Polifuncional	0,56%	2
Hiperfluidificante	1,13%	5
Massa específica	2455 (kg/m³)	

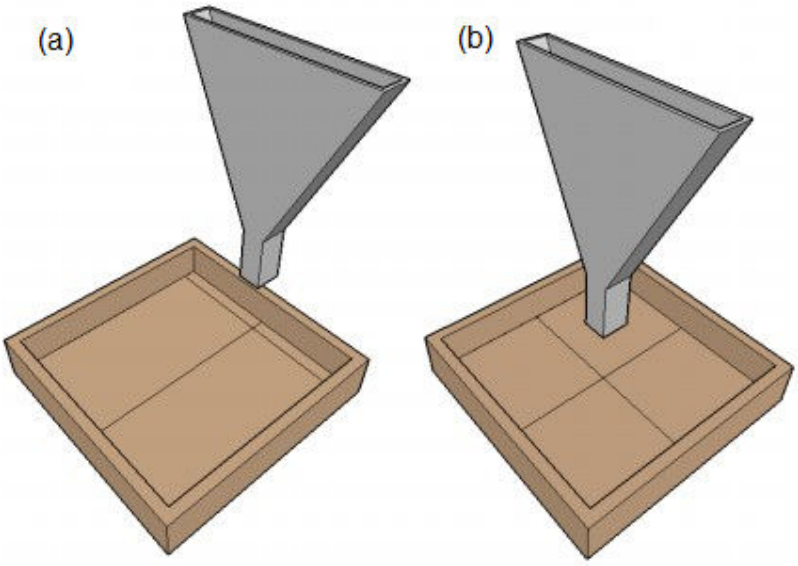
4.1.3 Ensaios de caracterização no estado fresco

Após a mistura dos materiais o concreto foi destinado aos ensaios de caracterização no estado fresco. Neste sentido, foi feito inicialmente o ensaio de espalhamento – *slump flow* – com medição do T_{500}, conforme descrito nas diretrizes da EFNARC (2005). Outra porção de concreto também foi destinada ao ensaio de reologia, no reômetro para medição de concretos em obra (DAMINELI et al., 2010). Com isto, procurou-se avaliar o comportamento básico do material e a possibilidade de ocorrência de segregação, conforme os resultados obtidos no estudo experimental descrito no Capítulo 3. Assim, seguiu-se a mesma metodologia de caracterização do comportamento reológico utilizada no capítulo anterior.

4.1.4 Método de moldagem

Foram moldadas lajes quadradas, com 60 cm de lado e 10 de altura. As lajes foram moldadas de duas formas diferentes: na primeira, o lançamento do concreto foi feito a partir de um ponto na extremidade lateral da forma, no outro, a partir do ponto central, conforme demonstrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Métodos de lançamento do concreto: borda (a) e centro (b)



Fez-se necessário o uso de uma metodologia que mantivesse fixo o ponto de lançamento e assegurasse que o fluxo de concreto fosse o mais uniforme possível. Desta forma, optou-se pela utilização de um Funil V, em madeira, com apoio adaptado,

com a extremidade inferior a uma distância aproximada de 20 cm do fundo da forma, conforme Figura 4.4. O apoio permitiu que a posição do funil fosse alterada de acordo com a forma desejada de moldagem.

Figura 4.4 - Funil V e apoio adaptado para moldagem das placas

4.1.5 Ensaio de punção de placa

Para análise da absorção de energia nas placas, foram realizados os ensaios de punção em placa sugeridos para concreto projetado (EFNARC, 1996) com adaptações semelhantes às propostas no trabalho de Figueiredo e Helene (1997). Neste método, os corpos de prova foram ensaiados sobre um apoio quadrado rígido, com 0,50 m de vão, e comprimidos por uma carga concentrada em uma área circular, de diâmetro de 0,06 m (Figura 4.5). Sob a placa, apoiado nas laterais do suporte, é posicionado um LVDT, para registrar o deslocamento vertical da placa em direção ao apoio (Figura 4.6). Assim, é possível levantar uma curva de carga por deslocamento da placa. Isto permite avaliar o nível de absorção de energia para distintos níveis de deslocamentos que têm correspondência com o nível de abertura de fissura (FIGUEIREDO e HELENE, 1997), que é uma forma convencional de avaliação da capacidade resistente residual do compósito tradicionalmente associada ao concreto projetado (EFNARC, 1996; MORTON, VILLAESCUSA e THOPMSON, 2009).

Figura 4.5 - Medidas do apoio e da placa

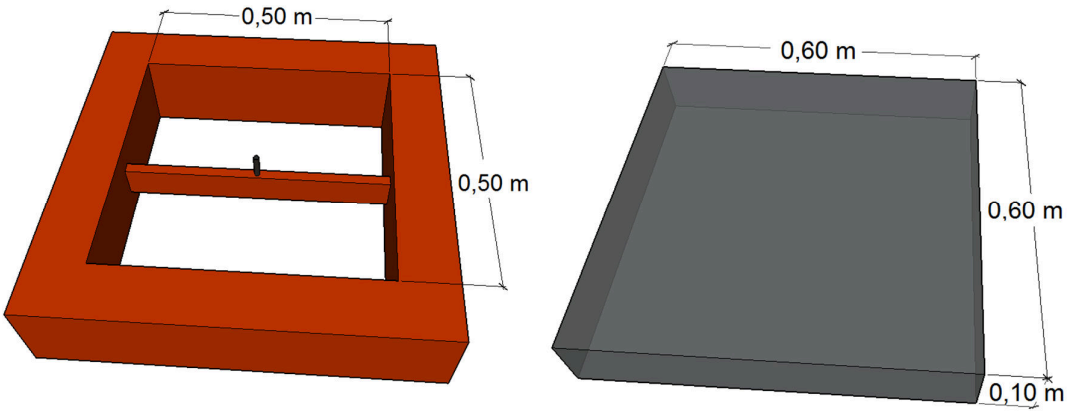
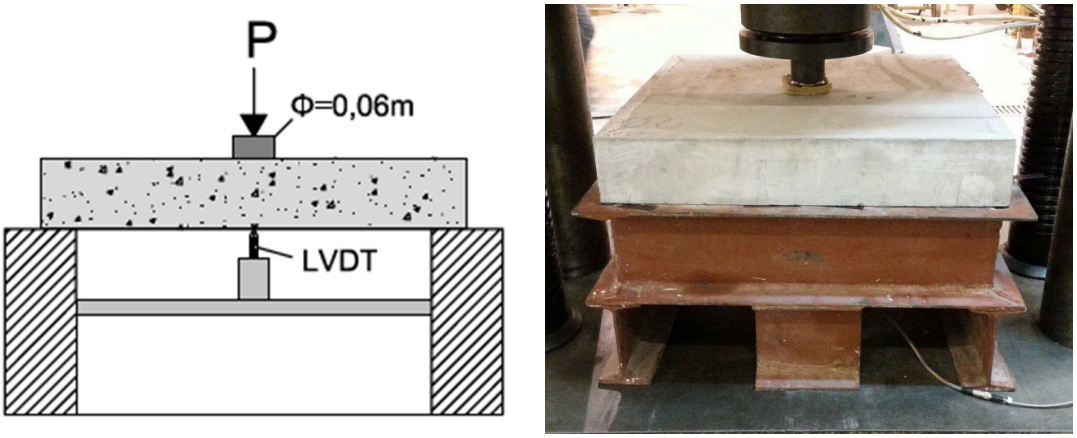


Figura 4.6 – Corte esquemático do conjunto e conjunto posicionado para ensaio



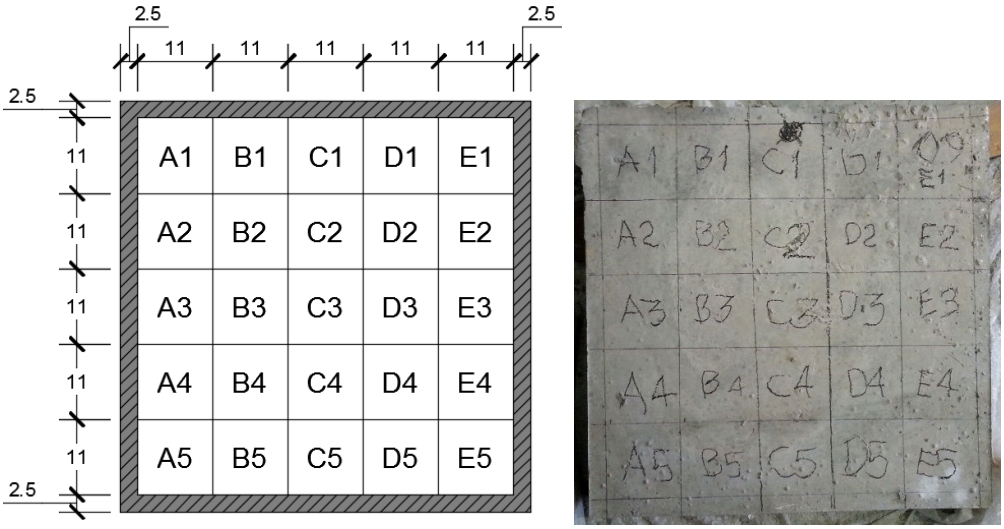
4.1.6 Corte das placas

Como complemento às informações de tenacidade (absorção de energia) em placa obtidas pelo ensaio de punção, previu-se a realização de ensaios voltados para corpos de prova em menor escala. Desta maneira, seria possível acompanhar a variação de algumas propriedades em função da posição destes corpos e suas direções em relação ao ponto de moldagem. Isto contribuiria para a confirmação do efeito de orientação preferencial das fibras no comportamento pós-fissuração dos elementos.

Na superfície da placa não utilizada no ensaio de punção foi marcada uma matriz de 5x5 com uma borda externa de 2,5 cm e 25 quadrados de 11 cm. Cada quadrado foi

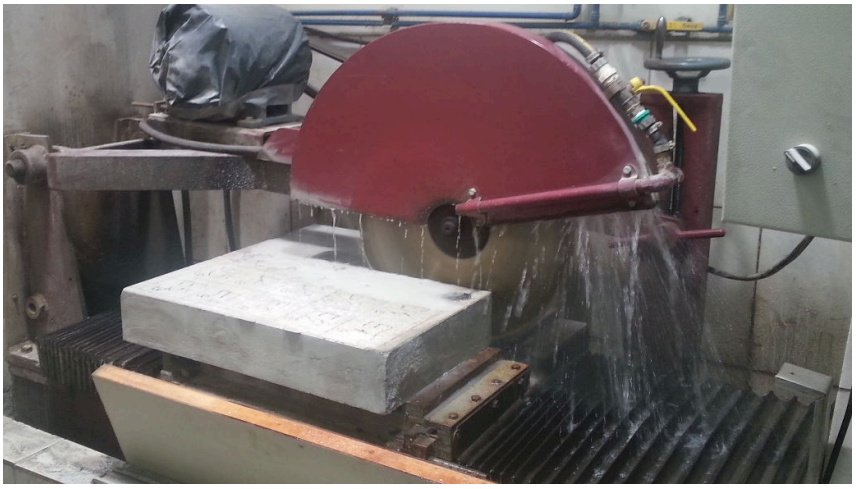
marcado de forma que, após o corte, fosse possível identificar a posição das suas faces segundo a moldagem inicial (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Medidas (em centímetros) e marcações para corte



O corte do concreto foi feito em serra de pavimentos com base móvel (Figura 4.8). Por conta da espessura do disco de serra, a medida final das laterais ficou próxima de 10 cm, o que permitiu que os cubos precisassem ser retificados apenas para os ensaios DEWS

Figura 4.8- Serra utilizada para corte das placas



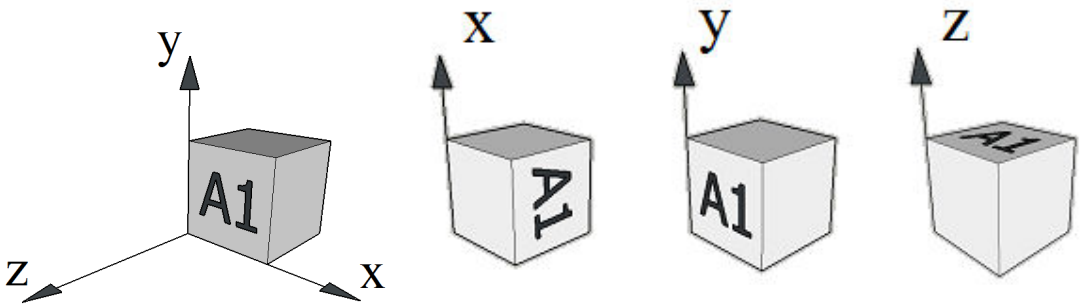
4.1.7 Ensaio de indutância

O ensaio indutivo (TORRENTS et al., 2012) foi realizado com o objetivo de compor uma análise não-destrutiva sobre a presença e orientação das fibras dentro da matriz de concreto. Esta análise consiste na leitura das alterações causadas pela presença do metal das fibras em um campo magnético gerado em uma bobina.

Figura 4.9 - Bobina e leitor do ensaio indutivo

Para a realização do ensaio, convencionou-se um sistema de eixos padrão para os cubos utilizados. Cada cubo foi colocado na bobina em três posições distintas, alinhando cada eixo paralelamente com o campo magnético, o valor exibido no leitor é anotado para cada posição, como apontado na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Sistema de eixos e posicionamento de cada eixo na bobina



Para interpretação dos dados, é necessária a realização de uma etapa prévia de calibração. Nesta etapa, foi utilizado um cubo de material não metálico (poliestireno expandido) e de mesma conformação geométrica que os corpos de prova que foram avaliados no estudo. Em seguida, uma massa conhecida do mesmo tipo de fibra

utilizada no estudo experimental é distribuída no corpo de prova de calibração (cubo de poliestireno expandido), que é submetido à leitura da mesma forma dos cubos de concreto que configuram os testemunhos extraídos das placas. Assim, para este trabalho foram utilizados cubos de poliestireno expandido conforme o ilustrado na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Exemplo de cubo de poliestireno expandido usado na calibração

Para o ensaio em bobina cilíndrica, a eq.(1) relaciona as medidas lidas à massa de fibras, calculada através da soma da indutância lida em cada eixo.

$$\Delta_t = \Delta_z + \Delta_x + \Delta_y \quad \textbf{(1)}$$

A calibração consiste em relacionar a massa de fibras com o valor do somatório de indutância em uma regressão linear. O coeficiente angular da reta obtida é a constante de relação entre o somatório das leituras no ensaio com a massa de fibras presente no cubo, conforme a eq.(2).

$$m_{fibras} = \Delta_t . k \quad \textbf{(2)}$$

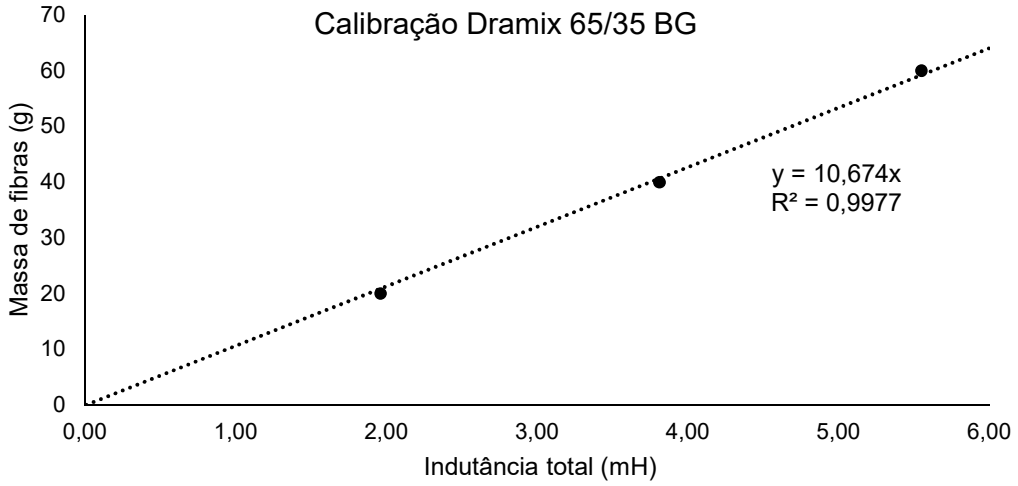
Onde *k* é a constante obtida pelo coeficiente angular da reta.

O resultado da calibração da fibra do presente trabalho está representado na Tabela 4.3. Com o valor de massa e a soma das leituras, foi elaborada a reta de calibração (Figura 4.12), da qual foi extraído o coeficiente angular, utilizado como constante para relacionar a soma das leituras com a massa de fibras.

Tabela 4.3 - Calibração da fibra Dramix 65/35 BG

Massa(g)	Δz	Δx	Δy	Soma
20,03	0,624	0,733	0,604	1,961
40,01	1,191	1,315	1,304	3,811
60,01	1,837	1,862	1,852	5,550

Figura 4.12 - Reta de calibração da fibra Dramix 65/35 BG



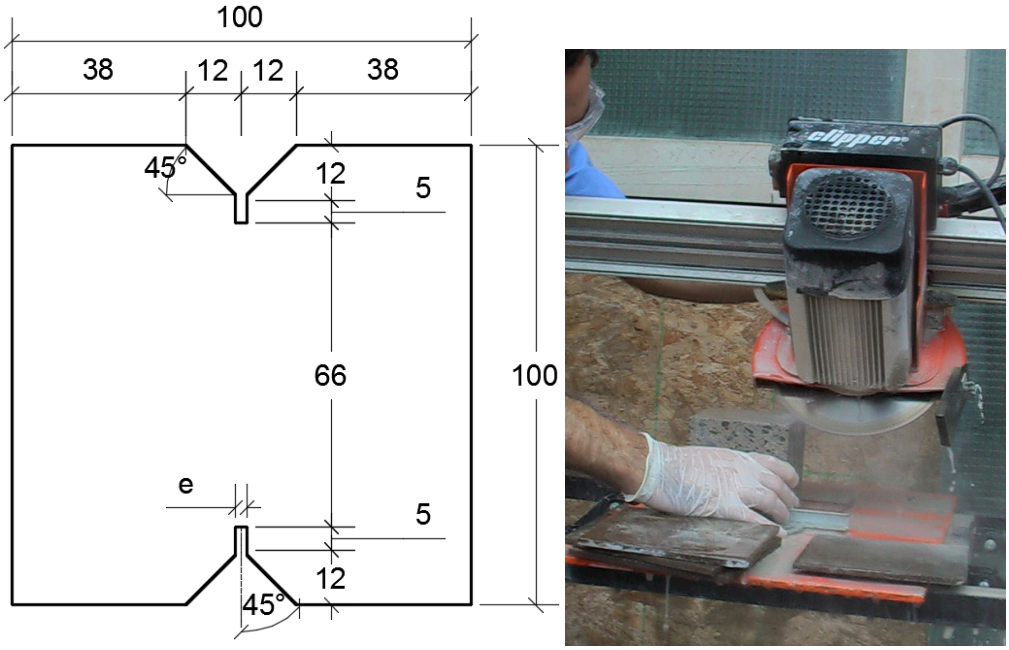
4.1.8 Ensaio DEWS

Após a realização dos ensaios de indutância, procedeu-se a execução do ensaio DEWS (di Prisco; Lamperti e Lapolla, 2010). O ensaio consiste na realização de tração indireta através do esforço de compressão em um corpo de prova com entalhes e cunhas nas duas faces comprimidas.

A concentração de tensões na região entre os cortes induz a formação de um plano de ruptura no meio do corpo de prova. A continuidade do deslocamento vertical da prensa resulta na abertura da fissura, resistida pelas fibras que estiverem atuando como ponte de transferência de tensões no plano de ruptura. Esta configuração de ensaio permite avaliar a orientação de fibras associada à capacidade resistente pós-fissuração (FERRARA, PRISCO e LAMPERTI, 2010).

Anterior ao ensaio, foi necessária a retificação das faces dos cubos que seriam ensaiados a fim de garantir melhor contato com as superfícies da prensa e dos extensômetros. Em seguida, em uma serra angular de bancada, foram feitos cortes inclinados e verticais, conforme as medidas do corpo de prova (Figura 4.13).

Figura 4.13 –Medidas (em mm) e processo de corte dos cubos

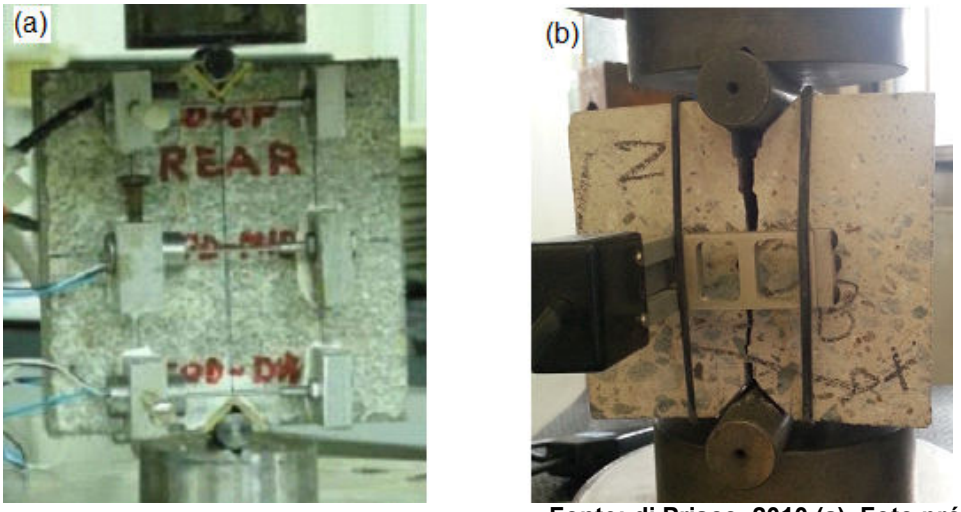


Depois de cortados, foram coladas chapas metálicas nas faces inclinadas (Figura 4.14), visando a redução do atrito entre o cutelo da prensa e o corpo de prova. As chapas foram coladas com massa plástica, com tempo mínimo de secagem de 24h para realização dos ensaios.

Figura 4.14 - Detalhe da chapa colada no corpo de prova

Na proposição inicial deste ensaio, é feita a leitura da abertura da fissura através de medições em 6 pontos diferentes (di Prisco; Lamperti e Lapolla, 2010). Neste estudo foi realizada uma versão simplificada, semelhante à executada por Borges, Monte e Figueiredo (2014), na qual a abertura de fissura foi obtida através da média entre dois extensômetros posicionados nas faces do corpo de prova.

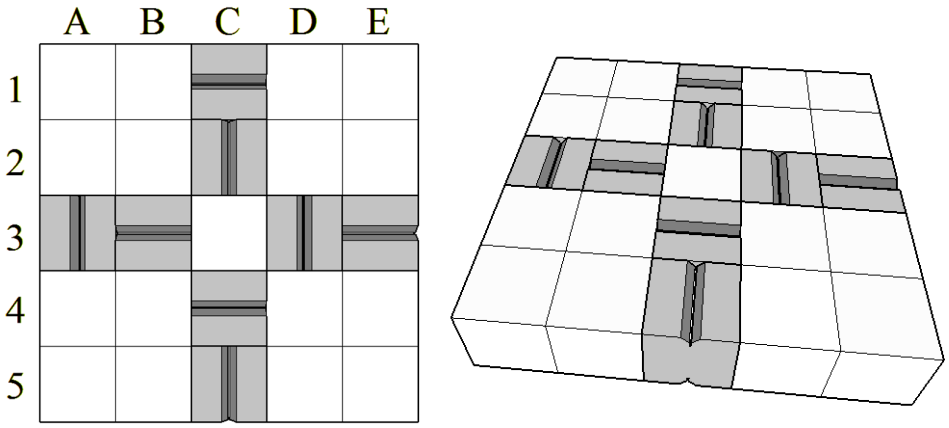
Figura 4.15 – Ensaio como proposto inicialmente (a) (di PRISCO, 2010) e simplificação realizada neste trabalho (b)



Fonte: di Prisco, 2010 (a). Foto própria (b)

Definiu-se a posição e direção do ensaio DEWS, buscando garantir que ele fosse realizado nos principais pontos da placa, em direções ortogonalmente opostas, e próximos aos pontos de moldagem: C1 para a placa de bordo e C3 para a placa de centro, conforme visto na Figura 4.16. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC com velocidade de deslocamento de 0,30mm/min e limite de 3 mm para abertura da fissura.

Figura 4.16 - Posições e direção dos ensaios DEWS



4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.2.1 Caracterização do concreto no estado fresco

As características do concreto no estado fresco estão presentes na Tabela 4.4 Do espalhamento foram obtidos os valores do diâmetro total de concreto e o tempo necessário para o espalhamento de 500 mm. Foram tomadas como base de avaliação as medidas sugeridas pela EFNARC (2005). Da reologia foram calculados os valores de viscosidade plástica e torque de escoamento. Os parâmetros reológicos foram obtidos segundo o mesmo procedimento experimental descrito no capítulo 3.

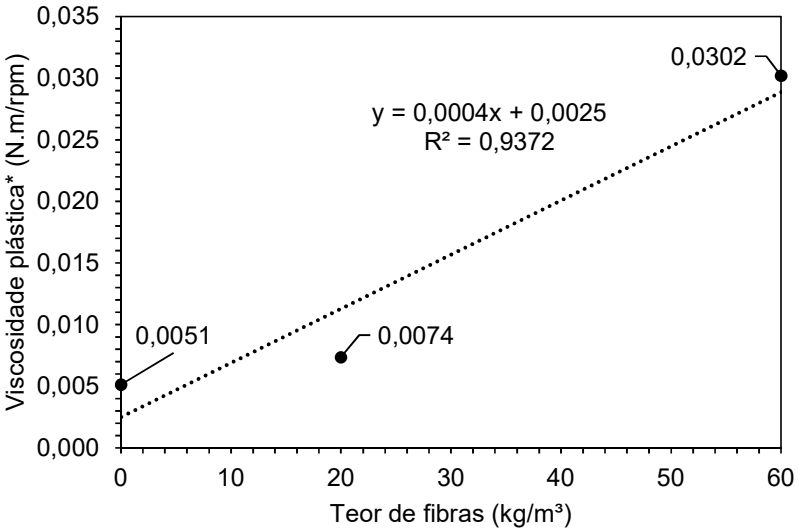
No ensaio de espalhamento, o concreto apresentou diâmetro de espalhamento superior ao limite sugerido de 900 mm (EFNARC, 2005). Isto caracteriza convencionalmente o material como autoadensável. Porém as recomendações são voltadas à moldagem de concretos lançados em formas de grandes dimensões e com armaduras de aço, o que não foi o caso deste trabalho.

O ensaio de reometria rotacional também foi realizado em outras amostras deste mesmo concreto, sem a adição de fibra e com o teor de 60 kg/m³, que foram utilizadas em outras pesquisas. A Figura 4.17 apresenta os valores de viscosidade plástica em função do teor de fibras, o resultado é coerente com o estudo anterior ao indicar aumento da viscosidade com maiores volumes de fibra. Além disso, houve a demonstração de que a adição de um baixo teor de fibras (20 kg/m^3) pouco influenciou nas características do material no estado fresco uma vez que a viscosidade plástica foi pouco alterada.

Tabela 4.4 - Características medidas no estado fresco

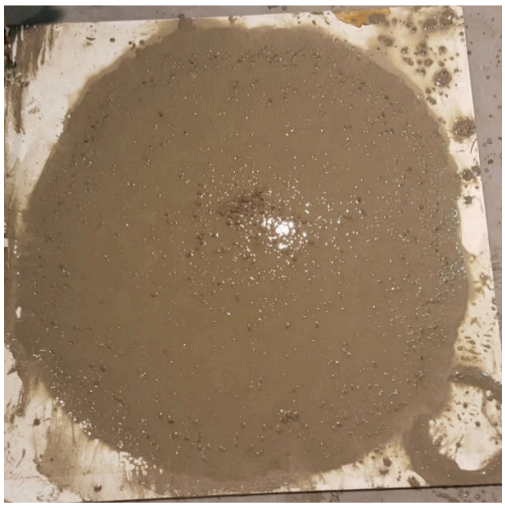
Parâmetro	Valor medido
Espalhamento (mm)	965
T_{500} (s)	2
Viscosidade plástica* (N.m/rpm)	0,0074
Torque de escoamento (N.m)	2,378

Figura 4.17 - Relação da viscosidade plástica com teor de fibras



Ressalte-se que não foi observada qualquer tendência de segregação nos ensaios aqui realizados para caracterização do comportamento no estado fresco. Isto ocorreu tanto no ensaio de reometria, por manter o concreto em constante movimento, quanto na análise visual do concreto espalhado durante o ensaio de espalhamento conforme se pode observar na foto da Figura 4.18. No entanto, após o processo de corte das placas para extração dos testemunhos a serem utilizados no ensaio indutivo, foi possível fazer uma análise visual da segregação. A observação da segregação ocorreu de maneira generalizada para todos os testemunhos extraídos, um exemplo dessa condição é apresentado na Figura 4.27.

Figura 4.18 - Concreto após espalhamento



4.2.2 Ensaio de punção de placas

Do ensaio de punção foram obtidos dados do deslocamento vertical, registrado pelo LVDT, em função da força da prensa. As curvas da Figura 4.19 e Figura 4.20 apresentam os resultados obtidos para os dois grupos de placas, destacando-se, com a linha tracejada, o trecho anterior à fissuração do concreto. Neste trecho é clara a acomodação da placa gerando distorções no comportamento elástico linear previsto para esta região. Como as placas não possuíam contato perfeito com o apoio, houve uma série de acomodações no carregamento inicial das placas gerando essa distorção no comportamento dos elementos.

Figura 4.19 - Gráfico de deslocamento vertical x Força da prensa, para placa de borda

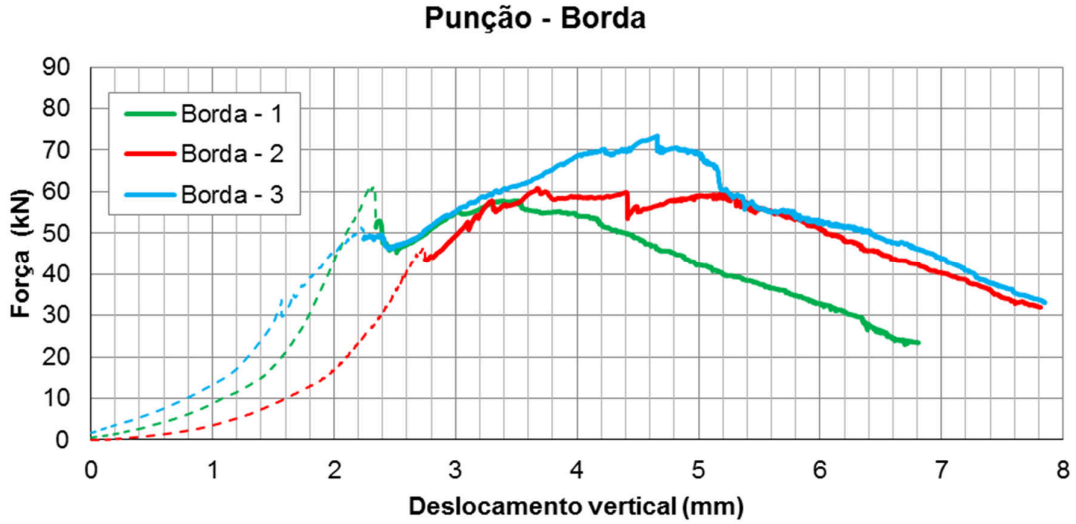
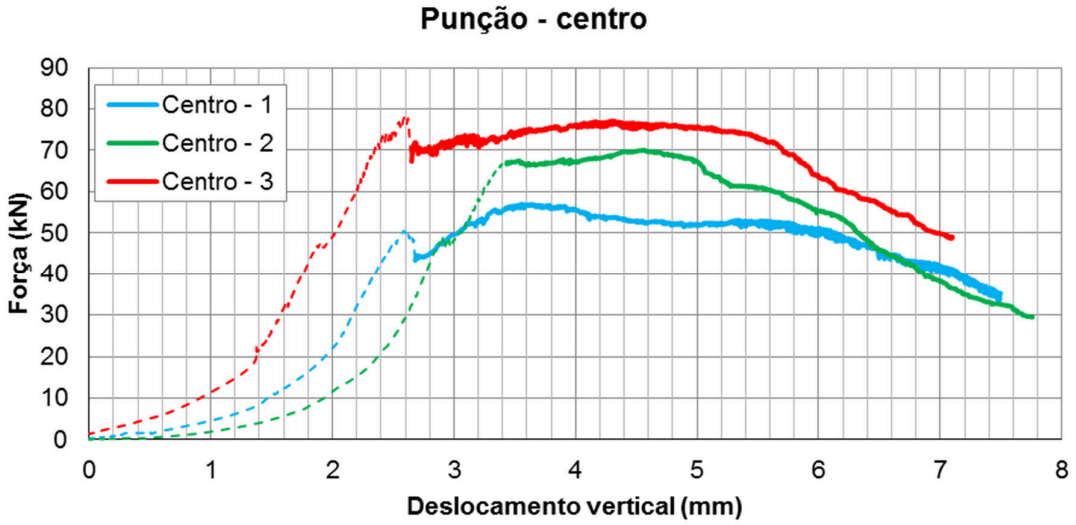


Figura 4.20 - Gráfico de deslocamento vertical x Força da prensa, para placa de centro



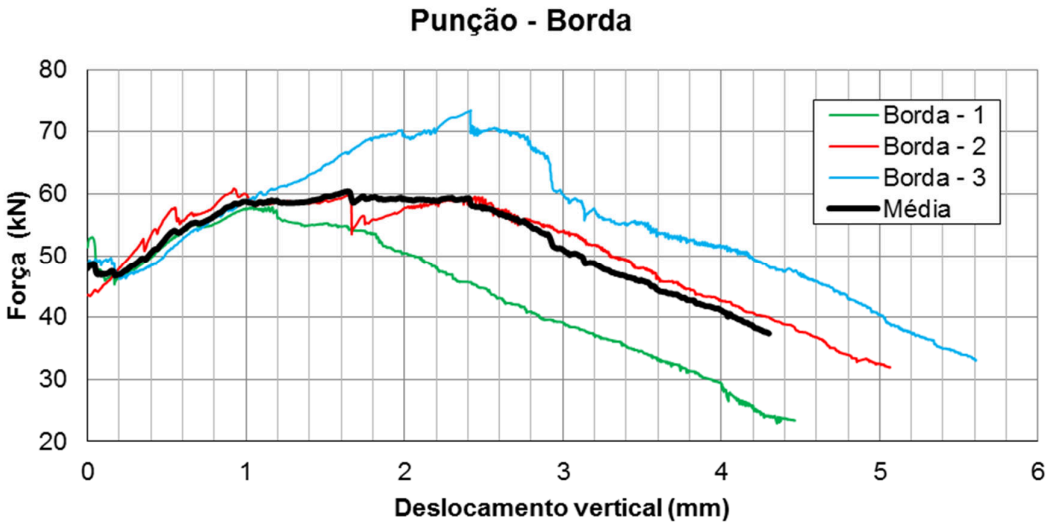
A carga de pico para cada placa é apresentada na Tabela 4.5. Observa-se que apesar da variação, a carga média dos dois grupos estão em valores próximos e não há como apontar uma relação entre o tipo e moldagem e a carga de pico. Isto já era previsto, uma vez que a disposição das fibras não deve afetar a resistência da matriz.

Tabela 4.5 - Cargas de pico obtidas no ensaio de punção

Carga de pico (kN)		
	Borda	**Centro**
Placa - 1	61,4	57,0
Placa - 2	60,9	70,1
Placa - 3	73,5	78,3
Média (kN)	65,2	68,5
Desvio padrão (kN)	7,1	10,7
Variância (%)	10,9%	15,6%

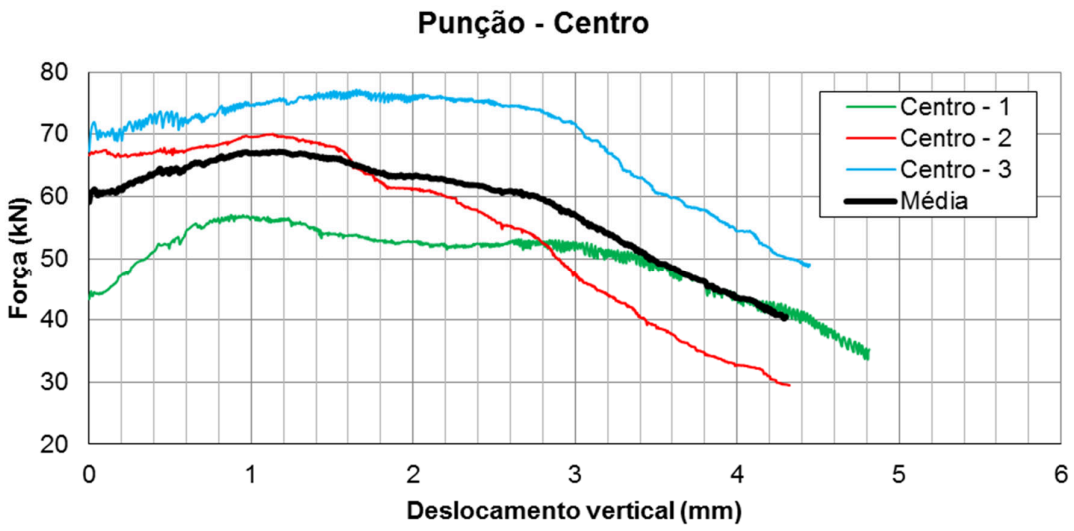
Como a influência das fibras ocorre, fundamentalmente, no trecho pós-fissuração, optou-se por eliminar o trecho inicial de cada uma das curvas de carga por deslocamento correspondente ao trabalho da matriz de concreto. Com isto, facilitou-se a condição de comparação de desempenho no comportamento pós-fissuração. Isto pode ser mais bem observado pelas curvas pós-fissuração apresentadas nas figuras Figura 4.21 e Figura 4.22. Para as duas condições de moldagem foi estabelecida uma curva média, que aparece na cor negra e com maior espessura em cada uma das figuras anteriormente referidas.

Figura 4.21 - Gráfico de Força x Deslocamento para as placas de bordo



Como é possível observar nas curvas de punção da moldagem de borda, as três placas apresentaram comportamento muito próximo até o deslocamento vertical de 1 mm, a partir do qual há uma dispersão dos valores. Esta diferença de comportamento é atenuada a partir de 3 mm de deslocamento vertical e assume uma queda constante e paralela para as três curvas. Estas diferenças podem estar associadas aos diferentes padrões de fissuração das placas, o que também é influenciado pelas condições de apoio das mesmas.

Figura 4.22 - Gráfico de Força x Deslocamento para as placas de centro

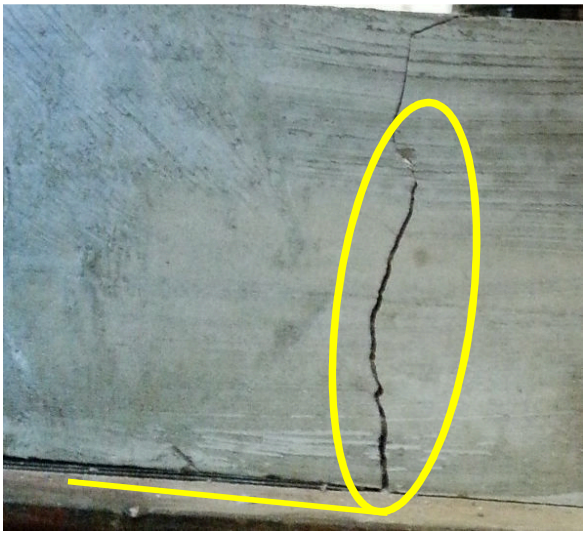


Dentre as curvas da moldagem de centro, a placa “Centro - 1” apresentou comportamento notadamente diverso das demais. A curva permanece com um desempenho distanciado das outras placas do mesmo grupo até o nível de 3,4 mm de deslocamento, a partir do qual assume um comportamento semelhante às outras curvas.

Uma possível explicação para este resultado está relacionada a falhas no apoio entre placa e suporte. Apesar de terem sido utilizadas pequenas chapas metálicas para ajustar as condições de apoio, pode ter havido concentração de tensões e indução de fissuras precoces em função de descontinuidades no apoio (Figura 4.23).

Quando comparadas as curvas médias dos dois grupos de moldagem (Figura 4.24), observa-se que as placas moldadas pelo ponto central apresentaram maior capacidade de carga, principalmente nos estágios iniciais de deslocamento.

Figura 4.23 - Fissura possivelmente induzida por concentração de tensões no apoio da placa



Assim como nas placas de bordo, a diferença na inclinação da queda das curvas é atenuada e as curvas assumem inclinações parecidas à medida que as placas se aproximam do deslocamento vertical de 3 mm, quando as fissuras já estão plenamente estabelecidas, e a resistência à punção é dada pelo arrancamento das fibras atuando como pontes de transferência de tensão nas fissuras com padrão já estabelecido em cada placa.

Como se pode observar também a partir da Figura 4.24, que apresenta as curvas médias das duas formas de moldagem, o ensaio de punção placas demonstrou efetivamente que há diferença para a capacidade resistente residual pós-fissuração entre os dois grupos de placas. Esta diferença é maior durante a primeira etapa de fissuração inicial, que equivale ao estado limite de serviço. À medida que os deslocamentos se aproximam do estado limite último (maior nível de fissuração para maiores níveis de deslocamento), a diferença relativa na capacidade resistente pós-fissuração diminui.

Para o cálculo de absorção de energia, foram calculadas as áreas sob as curvas dos gráficos de Força x Deslocamento, considerando apenas o deslocamento após a carga de pico, e feitos os cálculos para três níveis de deslocamento diferentes – 0,5mm, 1mm e 3mm, respectivamente. O resultado é apresentado na Figura 4.25.

Figura 4.24 – Curva de Força x Deslocamento para as médias das placas

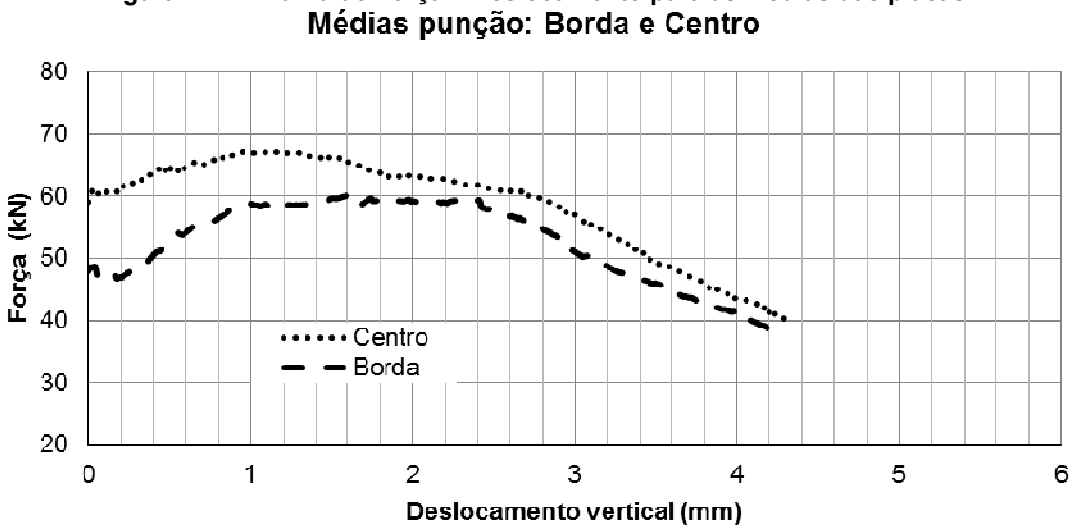
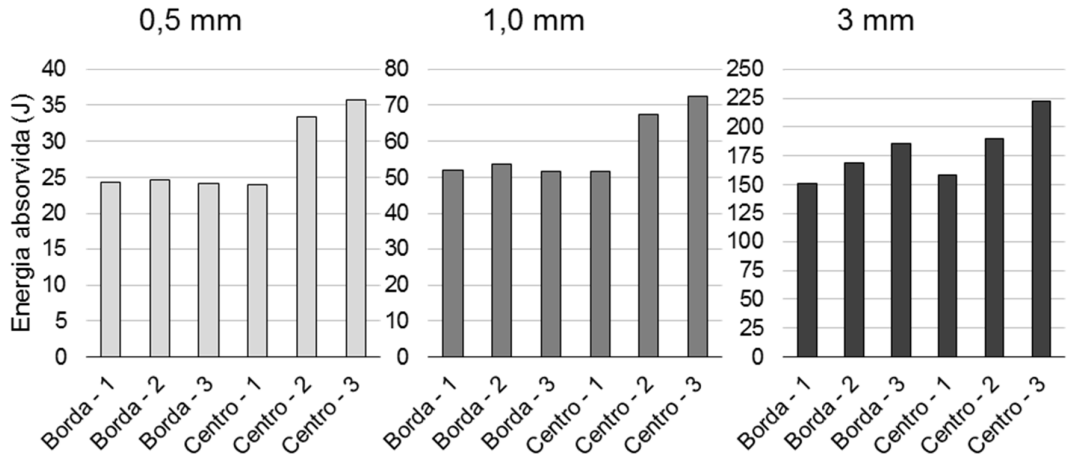


Figura 4.25 - Absorção de energia das placas em função do nível de deslocamento vertical



Os valores de energia absorvida obtidos para o deslocamento de 0,5mm e 1mm apontam desempenho ligeiramente superior das placas 2 e 3 da moldagem de centro. A análise do nível de deslocamento de 3 mm aponta uma redução nesse distanciamento de desempenho, seguindo a tendência apontada pela análise das curvas de carga e deslocamento.

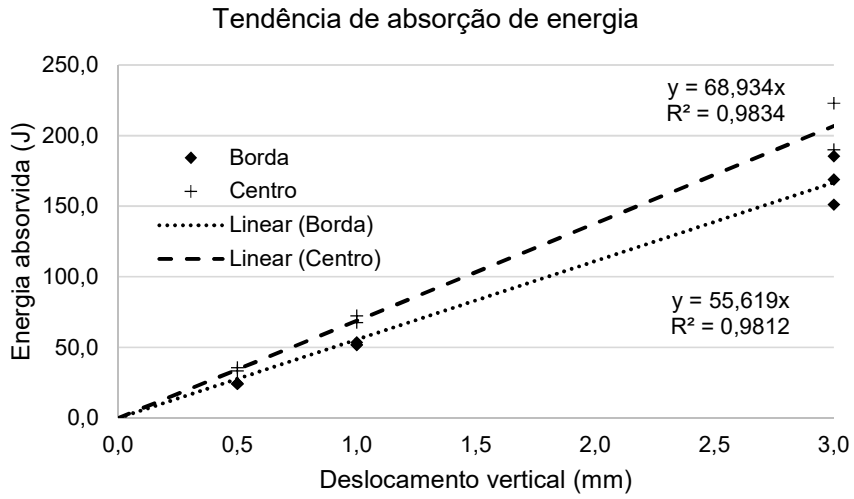
A tabela apresenta os resultados da energia absorvida pelas placas nos três níveis de deslocamento e a diferença percentual entre as moldagens de bordo e de centro. A placa moldada pelo centro apresentou maior capacidade resistente pós-fissuração para os três níveis, mesmo quando contabilizada a placa de menor valor. A diferença foi 21,5% para o estágio de 0,5 mm e 11,5% para o maior nível de deslocamento.

Tabela 4.6 - Média de energia absorvida para as placas de Centro e Bordo

Deslocamento (mm)	Energia absorvida (J)		Diferença (%)
	Bordo	Centro	
0,5	24,40	31,08	+21,5%
1,0	52,41	63,91	+18,0%
3,0	168,50	190,42	+11,5%

A Figura 4.26 apresenta a análise da absorção de energia dos dois grupos de placas, da qual foi excluída a placa “Centro - 1”. Esta análise apresenta a energia absorvida de acordo com o nível de abertura de fissura. As regressões lineares apresentaram excelentes coeficientes de correlação (0,98 para ambos), e o coeficiente angular das retas demonstra desempenho 19,3% superior das placas de centro em relação às placas de bordo. Em suma, as placas moldadas a partir do centro da forma foram capazes de absorver e dissipar maior quantidade de energia do que aquelas que tiveram o concreto lançado a partir de um ponto localizado na borda lateral.

Figura 4.26 - Tendência de absorção de energia para as placas de centro e borda

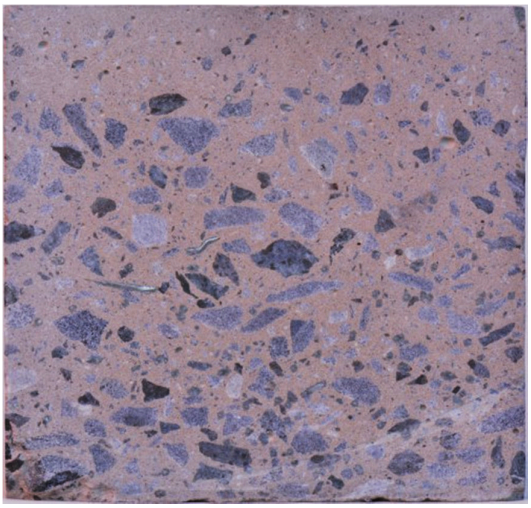


4.2.3 Ensaio de indutância

Durante a etapa de corte dos cubos para o ensaio de indutância, foi possível observar que, mesmo não tendo apresentado segregação no ensaio de espalhamento, o concreto exibiu maior concentração de agregado graúdo e fibras na porção inferior do concreto do que na porção superior, como exemplificado na Figura 4.27. Ocorrência de segregação de fibras foi observada também por Abrishambaf, Barros e Cunha (2013). Estes fenômenos de segregação podem estar associados a um excesso no

teor de aditivo plastificante que reduz a tensão de escoamento inicial e facilita a movimentação dos agregados e fibras para a parte inferior da fôrma.

Figura 4.27 - Face do concreto após corte mostrando segregação do material



Com os dados de calibração, foi calculada a massa de fibra presente em cada cubo analisado. Medidas as dimensões de cada cubo, foi calculada a concentração de fibras. O resultado é apresentado na Tabela 4.7, ressaltando que o ponto de concretagem das placas estava localizado sobre o cubo C3 para a placa de centro e C1 para a placa de bordo.

Tabela 4.7 - Concentração individual de fibras (kg/m³)

	Localização	A	B	C	D	E
Centro	**1**	17,4	22,1	22,5	18,9	17,5
	2	23,5	24,8	27,3	24,2	21,7
	3	26,3	31,0	**27,6**	27,5	23,9
	4	21,8	22,5	20,9	21,2	19,2
	5	14,2	17,2	19,8	16,8	13,8
	Localização	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
Bordo	**1**	22,6	22,4	**22,1**	23,6	23,9
	2	27,6	24,3	21,6	25,2	28,5
	3	27,7	27,4	22,0	27,2	26,7
	4	23,3	26,0	23,9	26,2	25,8
	5	22,7	23,1	24,1	21,1	21,9

A concentração de fibras foi dosada em 20 kg/m³ para este trabalho. A Tabela 4.8 exibe os valores médios medidos nas duas placas. Ambas apresentaram valores acima da concentração dosada. Esta diferença pode ser explicada pela variação na

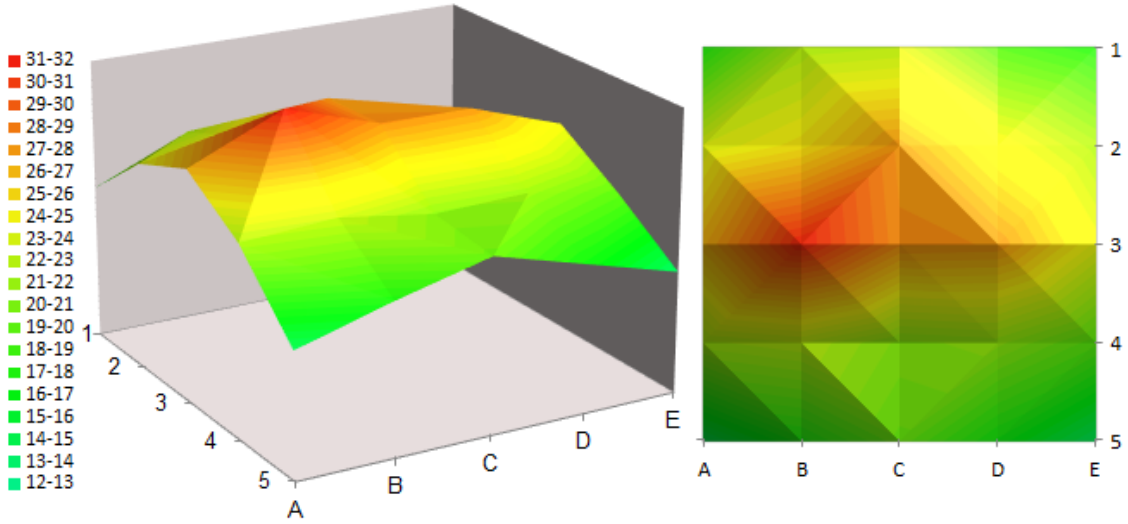
quantidade de material adicionado ao caminhão, uma vez que a medição é feita em massa, há a possibilidade de erros na dosagem do caminhão.

Tabela 4.8 - Concentração média de fibras nas placas

Concentração de fibras (kg/m³)	Bordo	Centro
No ponto de moldagem	22,12	27,62
Máxima	28,54	31,05
Mínima	21,10	13,80
Média	24,44	21,75
Desvio Padrão	2,22	4,33
Variância	9,1%	19,9%

Para melhor visualização dos resultados, os valores de concentração de fibras foram colocados num gráfico 3D de superfície, no qual é possível notar que a distribuição das fibras na placa moldada pelo centro (Figura 4.28) apresentou uma maior concentração de fibras na porção central, com valores ligeiramente menores para as extremidades da forma. Por outro lado, a distribuição apresentada pela moldagem na borda da forma (Figura 4.29) resultou em uma distribuição mais uniforme de fibras.

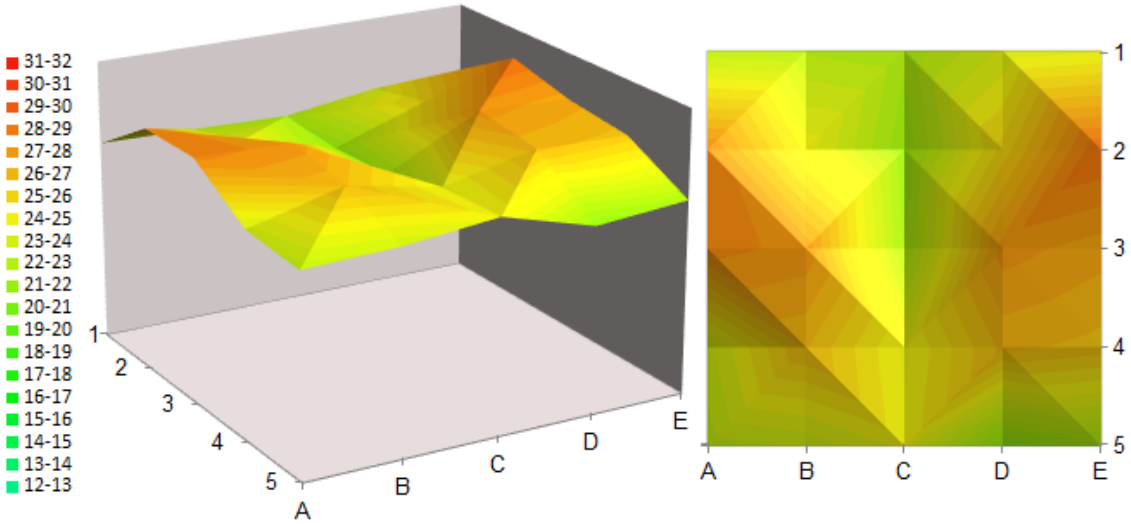
Figura 4.28 - Concentração de fibras (kg/m³) para a placa de centro



Este tipo de desigualdade na distribuição das fibras não era esperado, especialmente para a moldagem de bordo, onde se esperava uniformidade na concentração, devido à centralização do fluxo. No entanto, a concentração de fibras para a placa de centro

propõe uma condição vantajosa em comparação à placa de bordo, uma vez que concentra a maior parte das fibras na porção mais solicitada ao ensaio de punção.

Figura 4.29 - Concentração de fibras (kg/m³) para a placa de bordo



Para a análise da orientação das fibras através do método indutivo, deve-se inicialmente calcular o número de orientação médio (n_i), dado pela eq (3):

$$n_i = 1{,}03 \cdot \sqrt{\frac{\Delta L_i \cdot (1 + 2 \cdot \gamma) - \Delta L \cdot \gamma}{\Delta L \cdot (1 - \gamma)}} - 0{,}1 \qquad \textbf{(3)}$$

De posse do número de orientação (n_i) e assumindo um valor de γ igual a 0,03 (adotado em função do fator de forma da fibra utilizada neste estudo ser semelhante ao utilizado por Cavalaro et al. (2014))) calculou-se a contribuição média real das fibras em cada um dos eixos (C_i) através da eq. 4 (Cavalaro et al., 2014 e López et al., 2015).

$$C_i = \frac{n_i}{\sum_{i=X,Y,Z} n_i} \qquad \textbf{(4)}$$

O gráfico da Figura 4.30, relaciona a contribuição do eixo vertical (z) com a distância entre o ponto de moldagem com o centro de cada cubo estudado. Os maiores valores de alinhamento com o eixo z estão a até 15cm do ponto de moldagem, e a continuidade do fluxo de concreto tende a reduzir a verticalidade das fibras. Este resultado condiz com o estudo de (R. Deeb, B.L. Karihaloo, S. Kulasegaram, 2014).

O mapa de orientação das duas placas (Figura 4.31), aponta o ponto de moldagem em cinza e a contagem das fibras na direção de cada eixo – escrito na direção vertical para o eixo *y* e horizontal para o eixo *x*.

Figura 4.30 - Relação entre distância de moldagem e fibras no eixo Z

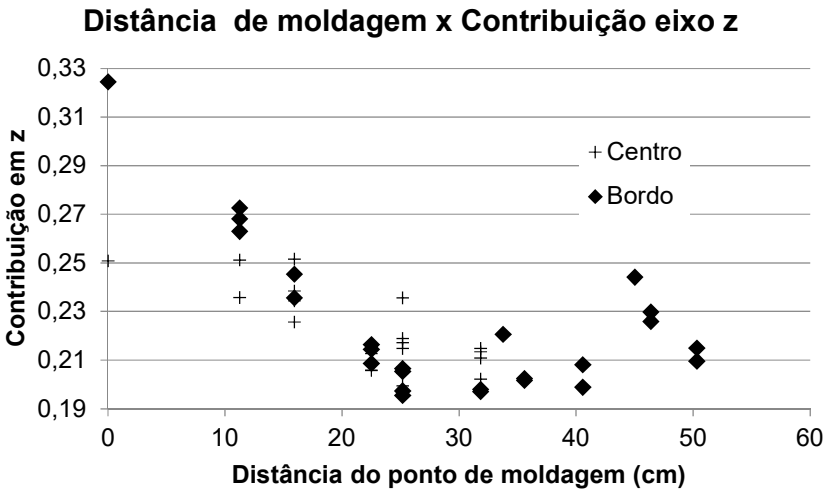


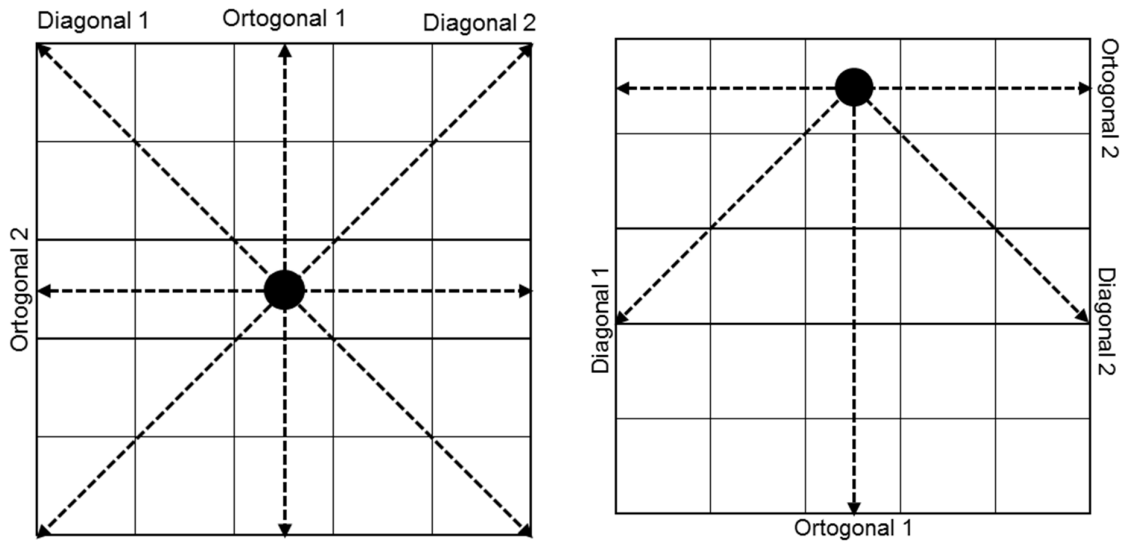
Figura 4.31 - Contribuições nos eixos x e y das placas de centro (esq.) e bordo (dir.)

0,40 / 0,39	0,34 / 0,44	0,32 / 0,47	0,33 / 0,46	0,39 / 0,40
0,47 / 0,33	0,39 / 0,39	0,30 / 0,44	0,36 / 0,40	0,46 / 0,34
0,48 / 0,32	0,47 / 0,30	0,39 / 0,36	0,43 / 0,32	0,50 / 0,30
0,46 / 0,33	0,40 / 0,37	0,31 / 0,42	0,37 / 0,38	0,46 / 0,33
0,39 / 0,39	0,33 / 0,43	0,32 / 0,47	0,33 / 0,45	0,40 / 0,39

0,47 / 0,31	0,40 / 0,33	0,33 / 0,34	0,40 / 0,33	0,45 / 0,33
0,48 / 0,32	0,39 / 0,37	0,35 / 0,39	0,40 / 0,36	0,47 / 0,32
0,47 / 0,34	0,39 / 0,41	0,37 / 0,42	0,40 / 0,41	0,47 / 0,33
0,45 / 0,36	0,36 / 0,43	0,33 / 0,44	0,37 / 0,43	0,45 / 0,35
0,39 / 0,40	0,34 / 0,44	0,30 / 0,46	0,33 / 0,44	0,40 / 0,39

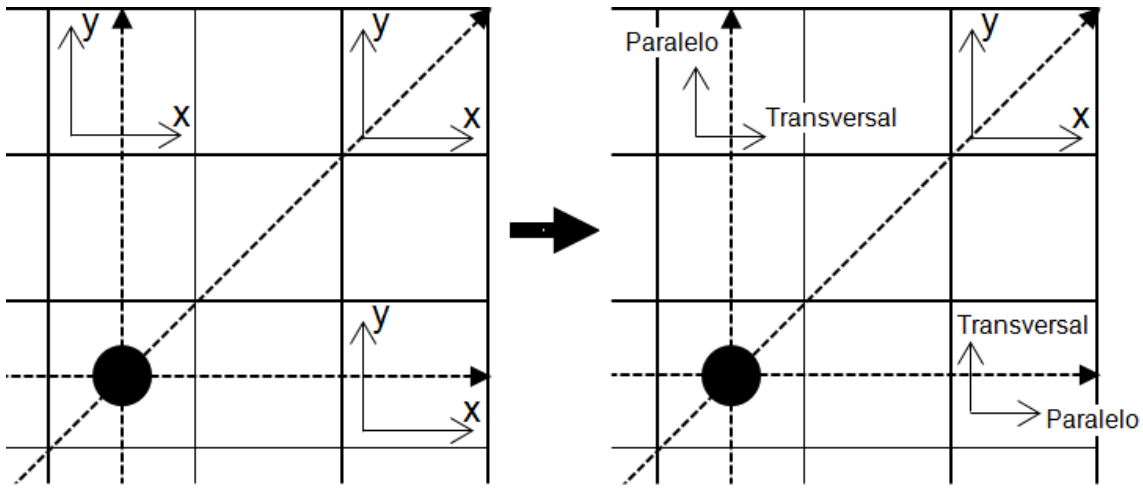
Para análise da influência do fluxo sobre a orientação de fibras foi nomeado um sistema de eixos, partindo do ponto de moldagem. O sistema foi dividido em quatro eixos, dois ortogonais às leituras, nomeados de eixos ortogonais 1 e 2 e diagonais 1 e 2 (Figura 4.32).

Figura 4.32 - Eixos nomeados para as placas de centro (esq.) e bordo (dir.)



Definidos os eixos da análise, considerou-se o ponto de moldagem como ponto de origem. A orientação nos eixos ortogonais foi dividida entre paralela ou transversal ao sentido do fluxo. Já nos eixos diagonais, por manterem sempre o ângulo de 45°, não houve alteração do nome. A figura ilustra a classificação utilizada para avaliação dos eixos (Figura 4.33).

Figura 4.33 - Exemplo de nomeação dos eixos de leitura do ensaio indutivo: antes (esq.) e depois (dir.)

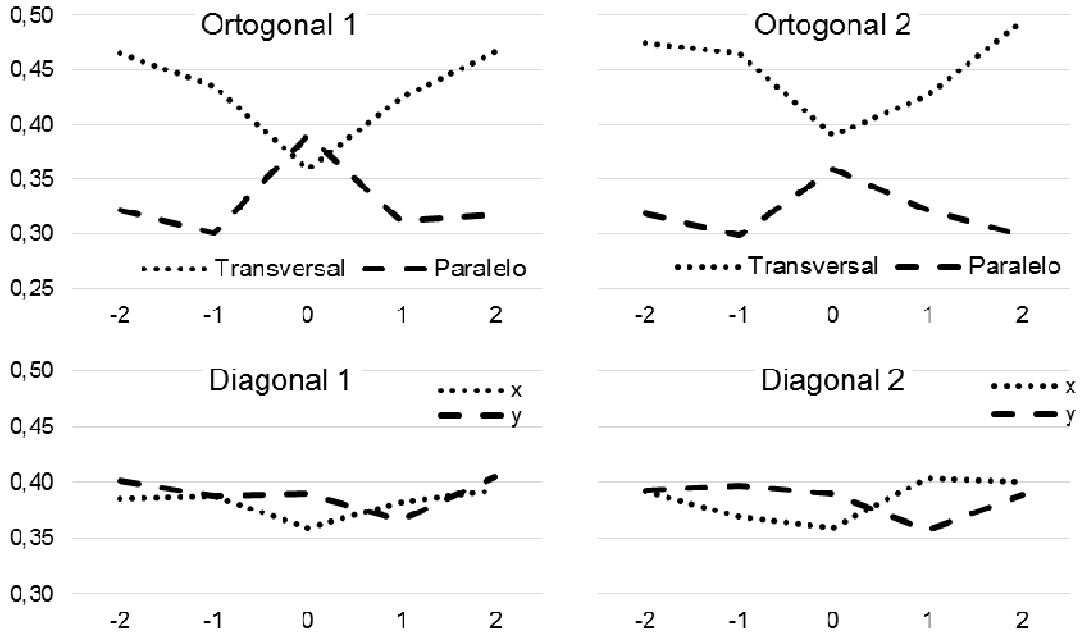


A contagem de fibras foi, então, analisada para cada placa. O cubo sob o ponto de lançamento do concreto foi numerado como 0, e os demais cubos foram numerados de -2 a +2.

Na análise das fibras para a placa moldada pelo centro (Figura 4.34), é possível observar uma tendência semelhante dos eixos ortogonais. Nos dois casos, à medida que o fluxo parte do centro para as laterais da forma, as fibras tendem a reduzir a orientação no sentido paralelo enquanto aumentam a orientação no sentido transversal ao fluxo.

Os eixos diagonais também apresentam comportamentos semelhantes entre si, pois nos eixos analisados, as fibras não apresentaram mudanças significativas na orientação medida, tendo valores quase iguais nas direções *x* e *y*.

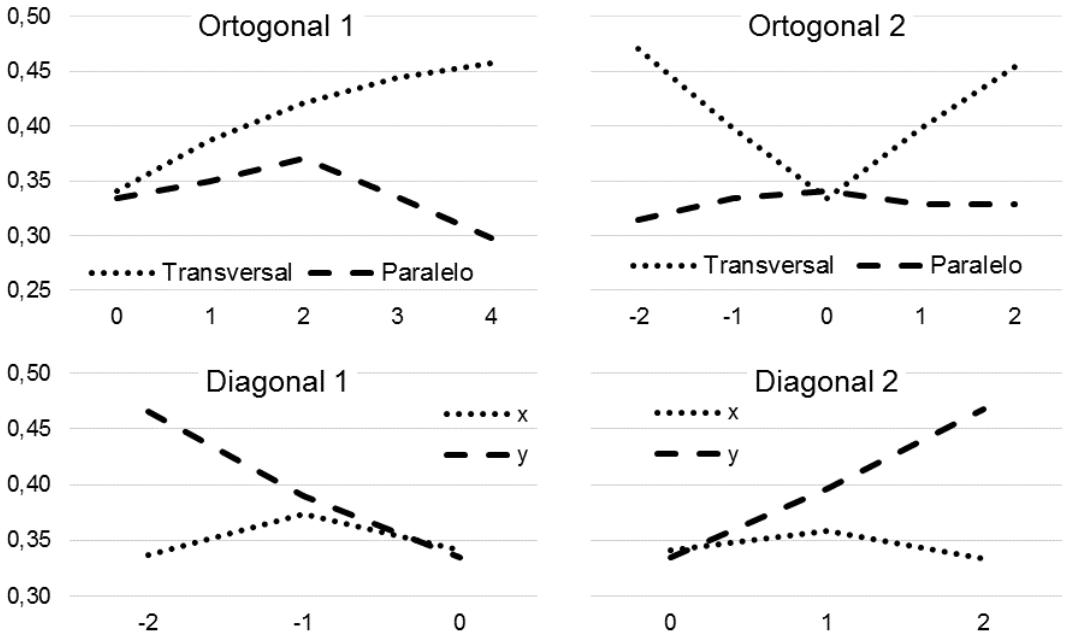
Figura 4.34 - Análise do direcionamento das fibras nos eixos de fluxo da placa de centro



Na análise da placa moldada pela borda (Figura 4.35), é possível observar que os eixos ortogonais apresentam comportamento semelhante, no qual as fibras apresentam tendência a orientar-se transversalmente ao fluxo.

Por outro lado, as diagonais da placa de bordo apresentam comportamento diferente do visto na placa de centro, pois as fibras tendem a assumir a orientação no eixo *y*, provavelmente por conta da influência do fluxo, que segue além dos pontos que abrangem os eixos diagonais.

Figura 4.35 - Análise do direcionamento das fibras nos eixos de fluxo da placa de bordo



De modo a indicar de maneira visual a orientação preferencial das fibras, a proporção relativa entre os eixos x e y foi calculada, analisando-se apenas a variação da direção das fibras no plano horizontal.

No cálculo da proporção, quando x e y são aproximadamente iguais, a razão entre os valores é próxima de 0,5. Considerando-se que as fibras estariam igualmente alinhadas com o eixo x e o eixo y, este valor foi associado ao ângulo de 45° (Figura 4.36). De forma análoga, a proporção mais desigual entre eixos foi associada aos ângulos de 90º e 0º, pois indicam a condição do alinhamento hipotético das fibras em uma direção.

Uma vez atribuídos os ângulos de orientação preferencial, a representação dos ângulos com linhas posicionadas no centro de cada cubo foi feita, com a inclinação mais provável correspondente. O resultado, apresentado na Figura 4.37 indica a tendência de direcionamento das fibras presentes no plano horizontal daquele cubo, não levando em consideração a inclinação no eixo z.

A partir da tendência individual do alinhamento hipotético das fibras de cada cubo, é possível traçar linhas de fluxo que descrevem a orientação preferencial nas placas partindo do ponto de lançamento do concreto (Figura 4.38). Observa-se que a moldagem a partir do centro da forma gera uma distribuição mais uniforme de fibras,

enquanto a moldagem a partir do bordo resulta em uma tendência assimétrica de direcionamento.

Figura 4.36 - Gráfico de relação entre razão Cx/Cy e ângulo adotado

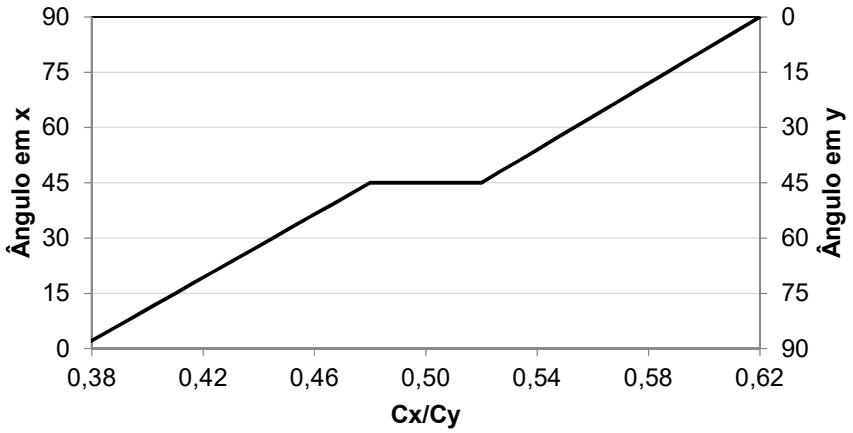


Figura 4.37 - Angulações calculadas para tendência de alinhamento das fibras nos eixos x e y das placas de centro (esq.) e bordo (dir.)

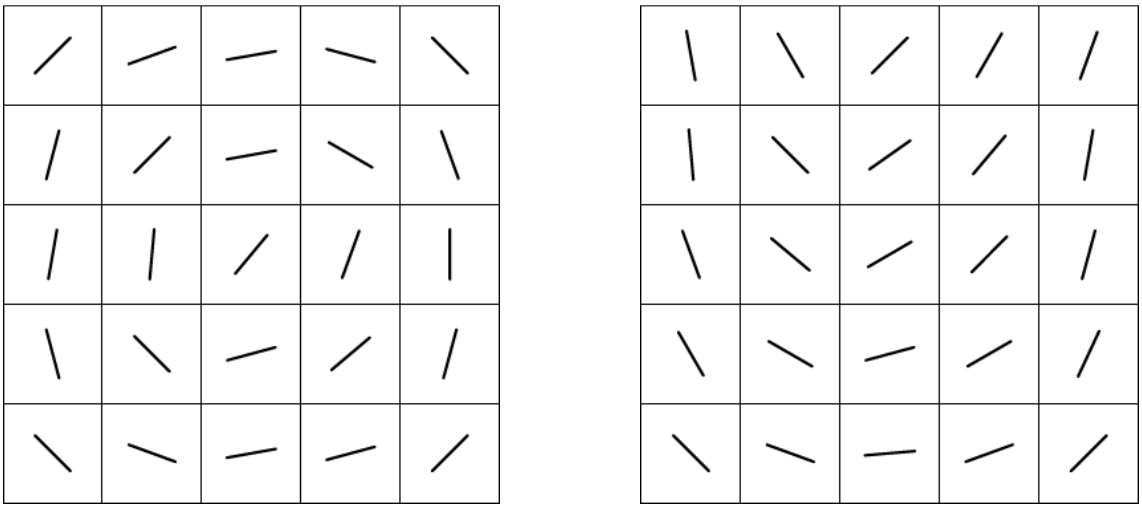
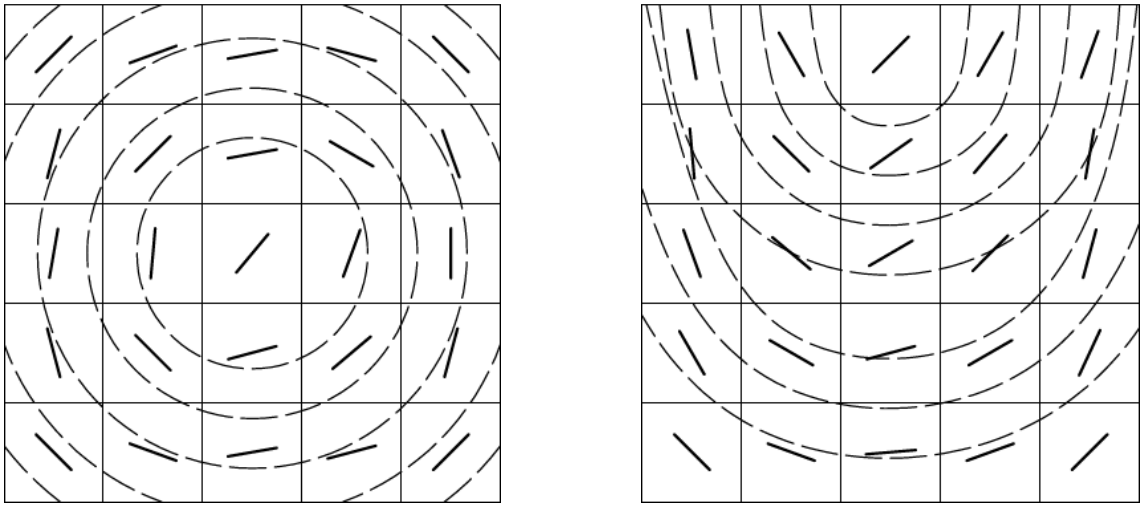
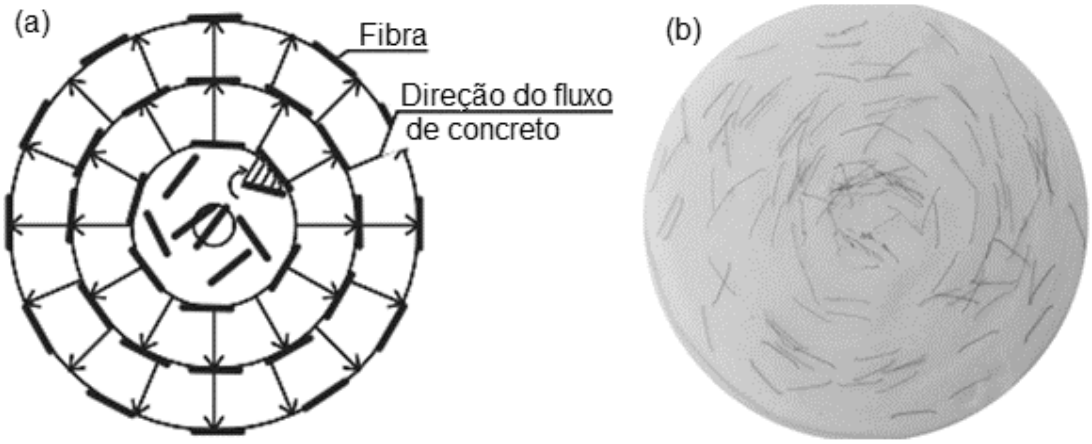


Figura 4.38 - Linhas de fluxo traçadas com base no alinhamento calculado das fibras para as placas de centro (esq.) e bordo (dir.)



Vale ressaltar que esta metodologia não define o ângulo em que as fibras estão no concreto, apenas indica a tendência de alinhamento nos planos x e y em relação à posição de moldagem. No entanto, as linhas de fluxo para a placa de centro se assemelham à proposição de Abrishambaf, Barros e Cunha (2013) feita com base em análise de imagens (Figura 4.39a), aos resultados obtidos por Ponikiewski et al. (2015) com análise feita por tomografia computadorizada, e ao espalhamento obtido por Boulekbache et al. (2010) com fluido translúcido incorporado com fibras de aço (Figura 4.39b).

Figura 4.39 - Perfil de alinhamento obtido em outros estudos

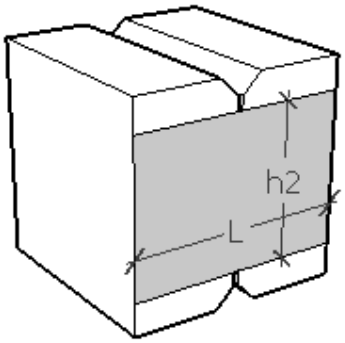


Fonte: Abrishambaf, Barros e Cunha (2010)(a) e Boulekbache et al (2010) (b)

4.2.4 Ensaio DEWS

Para análise do ensaio DEWS, primeiramente é necessário que se obtenha a área da superfície de fratura dos corpos de prova, uma vez que, por conta das cunhas e entalhes, a fratura está prevista para ocorrer em uma área diferente da face lateral do cubo. A área efetiva (Figura 4.40) é o produto da altura entre cunhas (h2) e a largura do corpo de prova (L).

Figura 4.40 - Medidas do corpo de prova para ensaio DEWS



A força atuante no ensaio também deve ser calculada, uma vez que há dissipação de energia no atrito entre o cutelo cilíndrico e chapas metálicas inclinadas a 45º. A eficiência do conjunto, nomeada como *k,* é calculada segundo a eq. (4):

$$k = \frac{(\cos\theta - \mu\sin\theta)}{(\sin\theta + \mu\cos\theta)} \quad \textbf{(4)}$$

Onde μ é o coeficiente de atrito – calculado por Borges (2010) como 0,15 – e θ é o ângulo de inclinação das chapas (45º). O valor de *k* foi calculado em 0,739, ou 73,9%.

O ensaio DEWS resultou em curvas de Tensão x Abertura de fissura, os gráficos na Figura 4.41 e Figura 4.42 trazem os resultados para os cubos das placas de bordo e centro, respectivamente. O corpo de prova C2 da moldagem de centro foi excluído da amostra devido a erros na execução do ensaio ocorridos aos 0,70mm de abertura de fissura.

Figura 4.41 - Resultado do ensaio DEWS para moldagem de Bordo

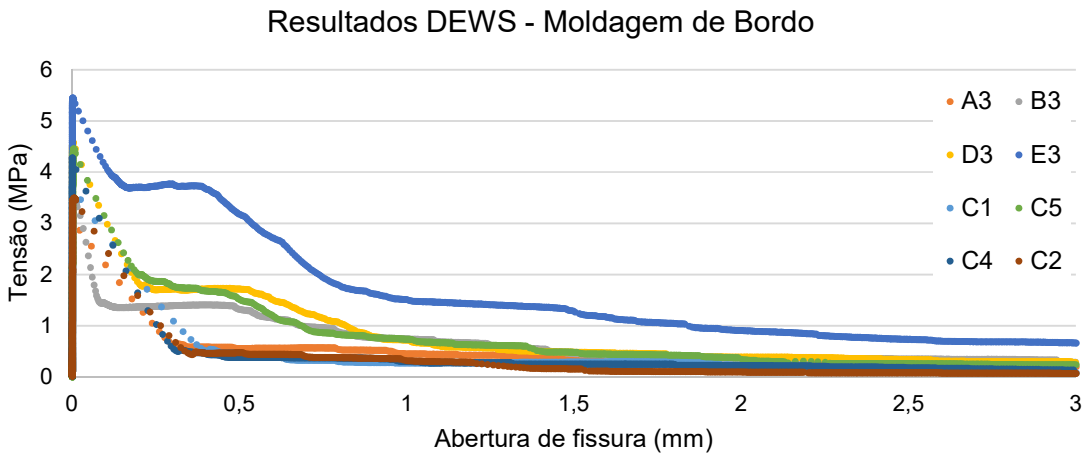
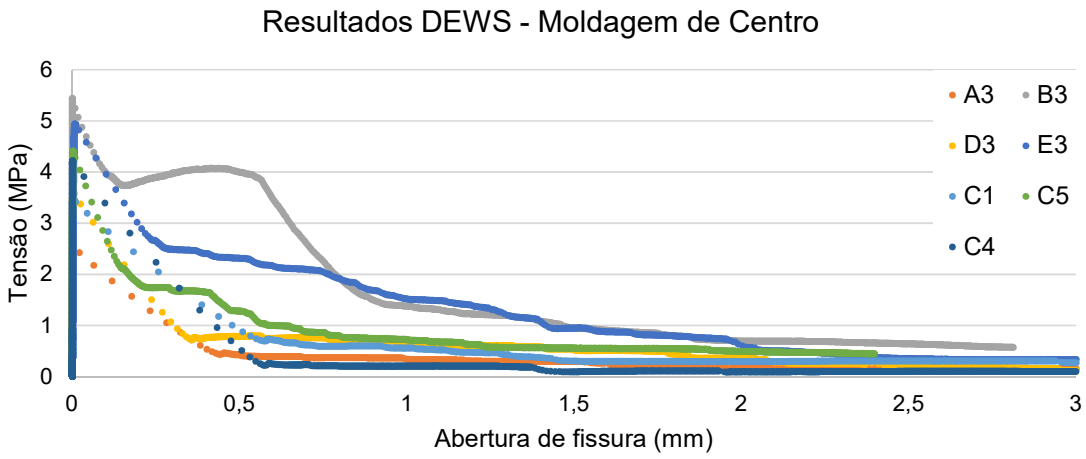
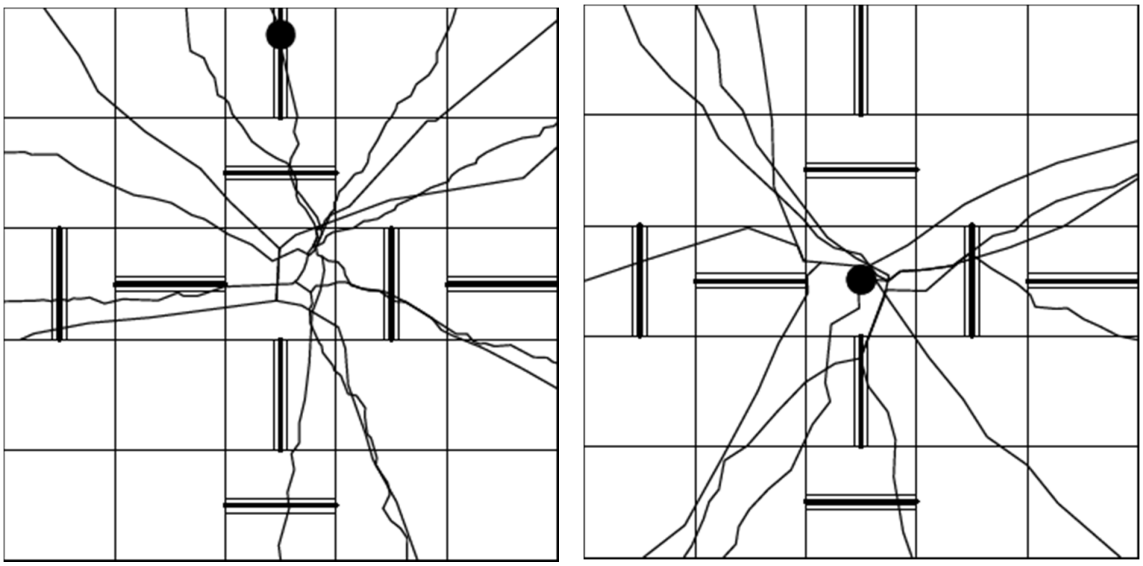


Figura 4.42 - Resultado do ensaio DEWS para moldagem de centro



Devido ao padrão de fissuração obtido no ensaio de punção (Anexo A), no qual as fissuras apresentaram formação radial, o plano de fratura do ensaio DEWS pode adotar 2 possíveis posições: transversal ou paralelo às fissuras que as placas apresentam. A Figura 4.43 sobrepõe as fissuras do ensaio de punção com a posição e orientação do ensaio DEWS.

Figura 4.43 - Sobreposição das fissuras com o ensaio DEWS



Os corpos de prova foram separados nos dois grupos. As posições A3, D3, C1 e C4 sendo transversais às fissuras e as posições B3, E3, C2 e C5 sendo paralelas. Os gráficos da Figura 4.44 até a Figura 4.47 apresentam os resultados destes dois grupos para os cada tipo de moldagem e suas respectivas curvas médias.

A representação das curvas em linha foi escolhida pois, embora não permita a visualização da instabilidade pós pico como no gráfico de pontos, facilita a avaliação visual do comportamento de cada amostra, que é o foco deste trabalho.

Figura 4.44 - Gráfico Tensão x Abertura de fissura para os CPs da placa de bordo ensaiados em fratura transversal às fissuras médias

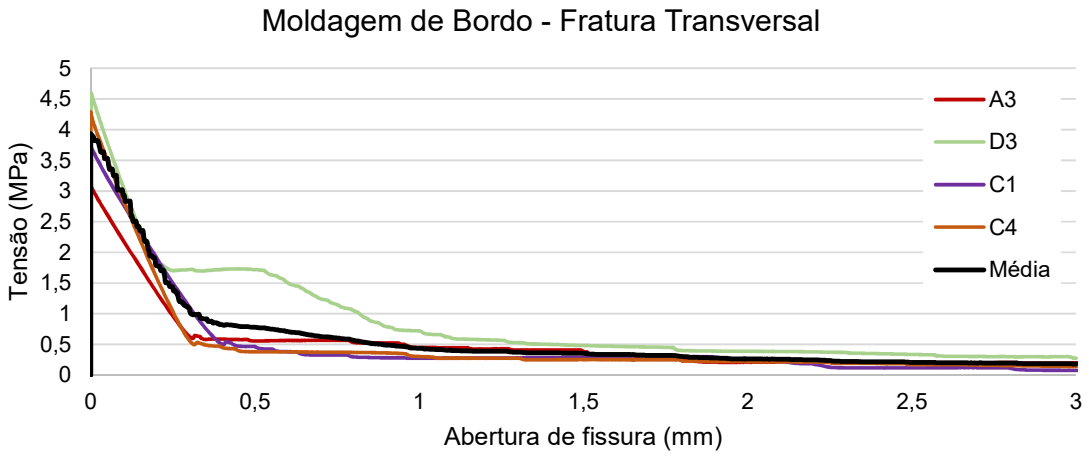
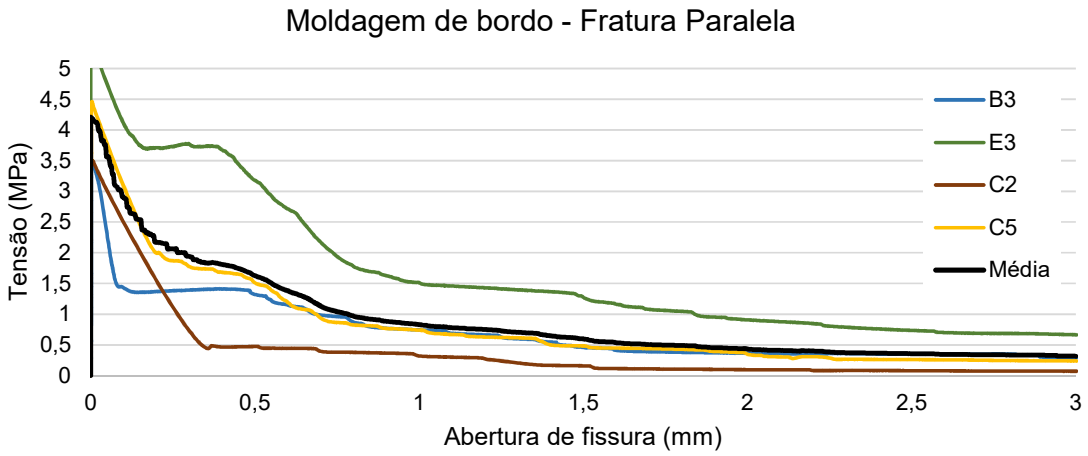


Figura 4.45 - Gráfico Tensão x Abertura de fissura para os CPs da placa de bordo ensaiados em fratura paralela às fissuras médias



Há uma ligeira diferença na capacidade pós-fissuração apresentada por alguns CPs ensaiados. Entre os corpos de prova D3 e B3 da moldagem de bordo (Figura 4.44 e Figura 4.45), esta diferença pode ser explicada pela orientação de fibras, uma vez que estes CPs estão equidistantes ao eixo de simetria, e foram ensaiados em direções opostas, ou seja, as fibras que estariam orientadas para resistir à abertura da fissura de um lado, estariam na direção oposta no outro.

Da mesma forma, os CPs A3 e E3 (Figura 4.44 e Figura 4.45), apresentam tendência semelhante, na qual a grande diferença de comportamento seja provavelmente causada pela orientação das fibras, embora a amostra A3 parece estar presente em um patamar mínimo de resistência.

A amostra C2 (Figura 4.45), não possui oposto em relação à simetria que lhe permita comparar a possível orientação das fibras, mas sua localização muito próxima do ponto de moldagem pode ter sido responsável por uma distribuição aleatória das fibras e baixa capacidade resistente pós-fissuração.

Figura 4.46 - Gráfico Tensão x Abertura de fissura para os CPs da placa de centro ensaiados em fratura transversal às fissuras médias

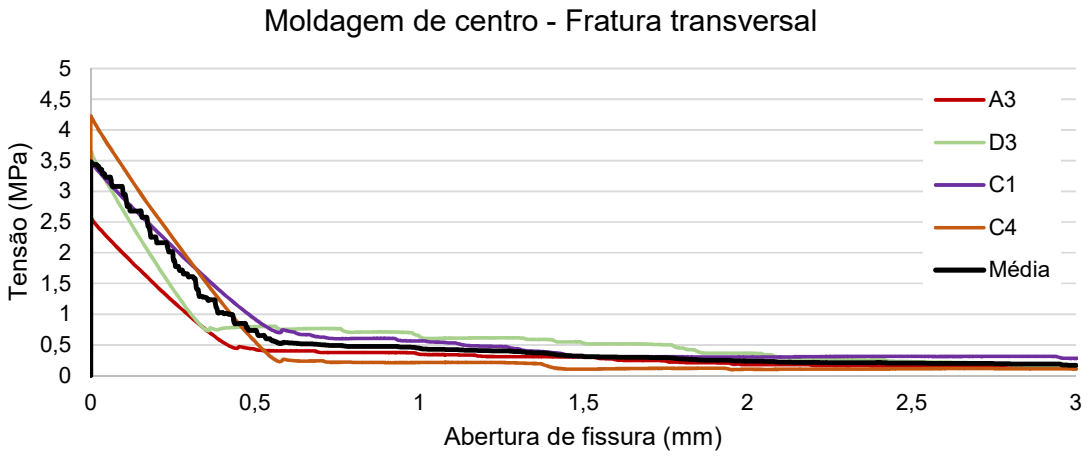
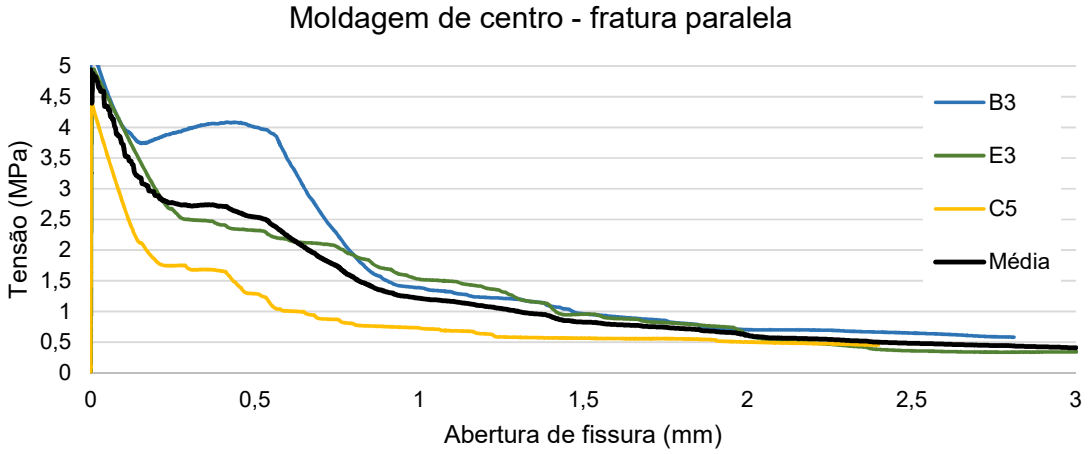


Figura 4.47 - Gráfico Tensão x Abertura de fissura para os CPs da placa de centro ensaiados em fratura paralela às fissuras médias



Calculou-se a área sob as curvas de Tensão x Abertura de fissura dos ensaios DEWS para os intervalos de 0,5mm, 1mm e 3mm como forma de parametrização da capacidade resistente pós-fissuração. Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 4.48 para a moldagem de bordo e da Figura 4.49 para a moldagem de centro, além das médias das amostras para cada nível de abertura de fissura.

Para a análise da área sob as curvas da placa de Centro (Figura 4.49), foi necessária a remoção dos dados da amostra C2 para os valores acima de 0,5mm, uma vez que, conforme já citado, o ensaio desta amostra apresentou falhas a partir de 0,70mm de abertura de fissura.

Figura 4.48 - Área sob curvas das amostras de DEWS para placa de bordo

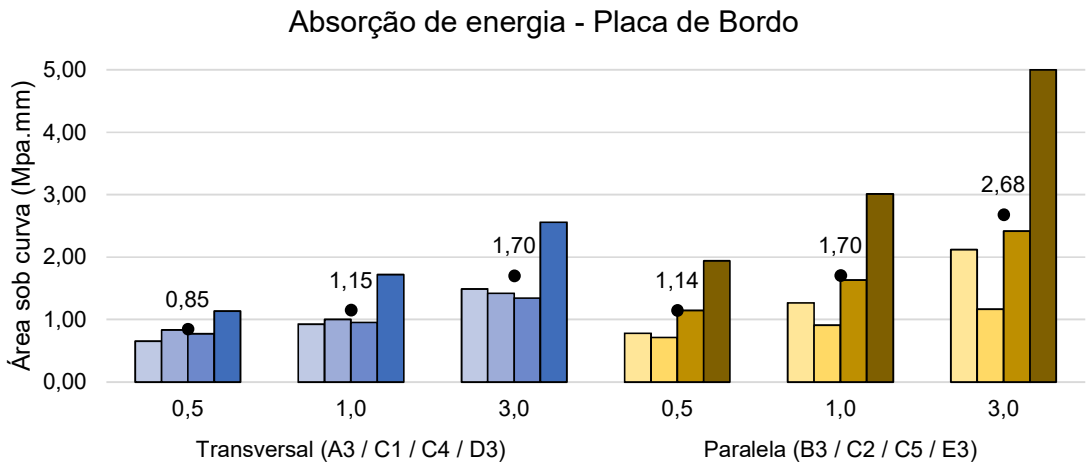
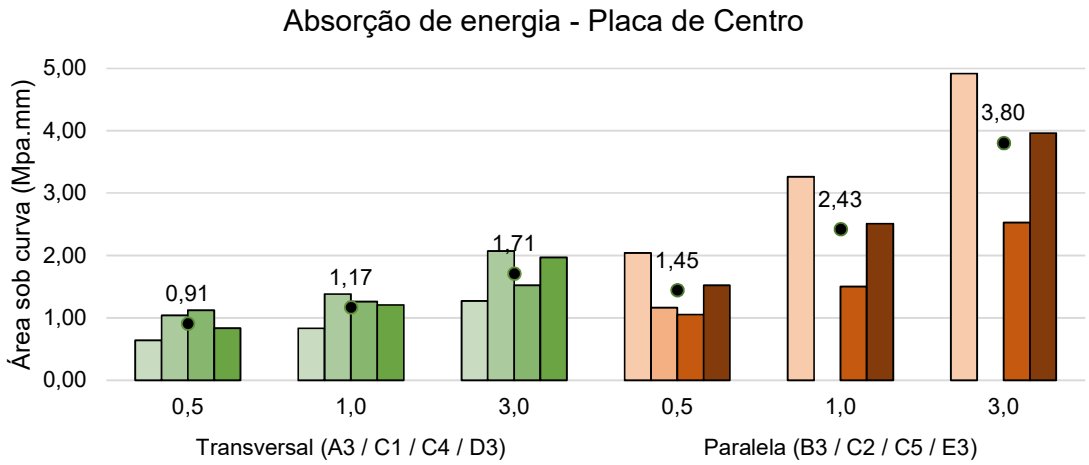


Figura 4.49 - Área sob curvas das amostras de DEWS para placa de centro



Os resultados dos ensaios DEWS para a moldagem de bordo indicam que há uma grande diferença na capacidade resistente entre as duas direções de ensaio. Quando comparados os valores médios para cada estágio de abertura de fissura (Tabela 4.9), observa-se que a absorção de energia chegam a aumentar 36,5% quando avaliada na direção transversal.

Tabela 4.9 – Média das áreas sob curvas do ensaio DEWS (em MPa.mm) para placa de Bordo

Fissura (mm)	Transversal	Paralela	Diferença (%)
0,5	0,85	1,14	+26,0%
1,0	1,15	1,70	+32,6%
3,0	1,70	2,68	+36,5%

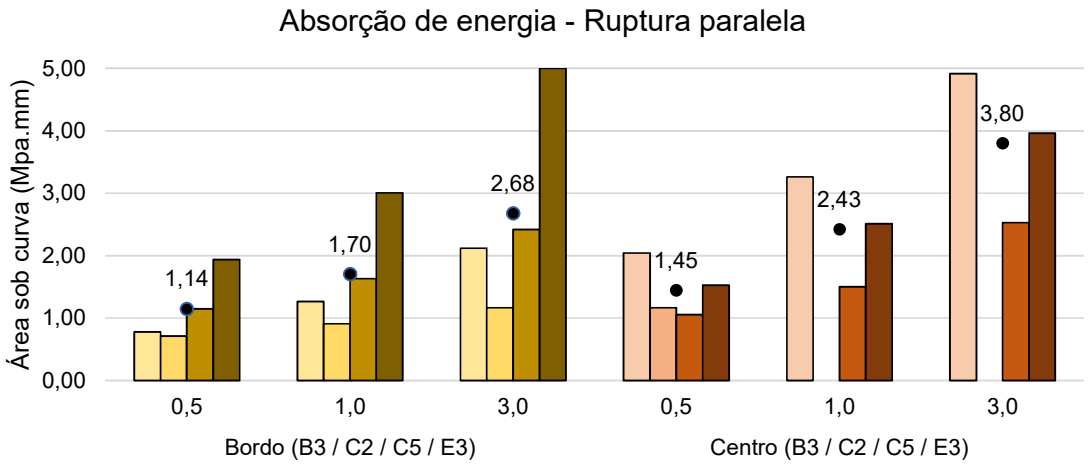
O resumo dos resultados para a moldagem de centro (Tabela 4.10) também apontam valores superiores da moldagem na posição paralela em relação à transversal, porém com maior diferença relativa, que aumenta de 37,1% no valor de abertura de 0,5mm até 55,0% para o valor fixado em 3mm de abertura de fissura.

Tabela 4.10 - Média das áreas sob curvas do ensaio DEWS (em MPa.mm) para placa de Centro

Fissura (mm)	Transversal	Paralela	Diferença
0,5	0,91	1,45	+37,1%
1,0	1,17	2,43	+51,7%
3,0	1,71	3,80	+55,0%

Como já apontado na Figura 4.43, o ensaio realizado na direção paralela à fissura apresenta a reprodução do esforço mecânico de forma mais próxima àquela presente no ensaio de punção, quando comparado à direção transversal. A Figura 4.49 compara o desempenho entre os ensaios DEWS ensaiados na direção paralela para as placas de Centro e Bordo.

Figura 4.50 - Área sob curvas das amostras de DEWS na direção paralela à fissura



Comparando-se os valores calculados dos dois tipos de moldagem (Tabela 4.11), observa-se que a moldagem de centro representa aumento de capacidade resistente pós fissuração em todos os níveis de abertura de fissura, com valores 20,9%, 22,4% e 17,1% maiores para as medidas de fissura de 0,5, 1 e 3 mm, respectivamente. Esta diferença condiz com o resultado obtido no ensaio de punção.

Tabela 4.11 - Média das áreas sob curvas do ensaio DEWS (em MPa.mm) na direção paralela

Fissura (mm)	Bordo	Centro	Diferença
0,5	1,14	1,45	+20,9%
1,0	1,70	2,20	+22,4%
3,0	2,68	3,23	+17,1%

A diferença observada no desempenho pós-fissuração entre as duas direções do ensaio DEWS indica que há diferença na distribuição de fibras entre os eixos x e y, conforme apontado pelo ensaio de indutância. Além disso, o ensaio DEWS indica que a uniformidade no fluxo do espalhamento do concreto atribuiu mais tenacidade aos corpos de prova extraídos da placa moldada pelo centro, do que os corpos extraídos da placa moldada pelo bordo.

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A avaliação do concreto no estado fresco, embora conduzida com a combinação dos ensaios de slump flow e reometria rotacional como recomendado no capítulo anterior, ainda mostrou-se insuficiente na previsão de segregação. Mesmo com os resultados dos ensaios apontando homogeneidade no concreto, foi possível observar concentração de agregados e fibras após o corte das placas. Isso mostra que, mesmo a combinação de diferentes ensaios pode não ser o suficiente para prever o comportamento do concreto.

Há que se ressaltar que os padrões de segregação foram distintos em relação ao capítulo anterior, em que as fibras não acompanharam o fluxo da matriz. No caso do presente capítulo, houve uma nítida tendência de assentamento das fibras juntamente com os agregados graúdos. Tais problemas devem ser melhor avaliados em pesquisas futuras para melhor parametrização do CAARFA no estado fresco.

O ensaio de punção de placas, apesar das dificuldades naturais associadas às condições de apoio, mostrou-se capaz de evidenciar a diferença no desempenho entre as placas. A moldagem das placas feita a partir do centro da forma, medida a partir do ensaio de punção, apresentou aumento de energia absorvida, variando de 11,5% até 21,5%, de acordo com o nível de deslocamento observado. As diferenças nas capacidades resistentes pós-fissuração observadas no ensaio de punção de

placas foram corroboradas pelos resultados obtidos nos testemunhos extraídos. Isto confirma a possibilidade levantada na proposição deste estudo quanto às alterações de comportamento estrutural dos elementos estruturais de concreto reforçado com fibras oriundas de fatores de moldagem como a orientação preferencial das fibras, bem como pelo possível acúmulo de fibras em determinadas regiões do elemento.

O ensaio indutivo demonstrou que a orientação das fibras era mais favorável à condição de reforço das placas com moldagem pelo centro. A avaliação do ensaio indutivo realizada em cubos cortados de placas não puncionadas indicou que a distribuição de fibras da placa moldada pelo centro apresentou maior acúmulo de fibras próximo ao ponto de moldagem, enquanto a placa cujo concreto foi lançado pela borda lateral da forma teve distribuição mais equilibrada de fibras ao longo da placa.

Quando os corpos de prova foram submetidos aos ensaios DEWS, a orientação das fibras representou aumentos de até 55% na tenacidade pós-fissuração de amostras em posições diferentes de uma mesma placa. Quando comparados os corpos de prova que representavam de forma mais próxima o esforço aplicado pelo ensaio de punção, a placa de centro obteve aumento de até 20,9% no desempenho. Este valor é da mesma ordem de grandeza daquele obtido pelos ensaios de punção, o que mostra que há coerência no conjunto de resultados. Isto também confirma o potencial de utilização do ensaio DEWS para verificar a anisotropia do concreto reforçado com fibras, o que pode vir a ser muito útil em trabalhos experimentais futuros.

O controle de execução na moldagem mostra-se assim tão importante quanto o controle tecnológico do concreto, uma vez que um mesmo material, lançado de posições distintas, pode apresentar perda de capacidade resistente pós-fissuração. Portanto, é essencial que fatores referentes à movimentação das fibras no concreto sejam cuidadosamente analisados, a fim de garantir a viabilidade e aproveitamento do potencial aumento da resistência pós-fissuração com uso de fibras.

5 CONCLUSÕES

É possível afirmar que este estudo demonstrou que a forma como é feita a concretagem de um elemento com concreto autoadensável reforçado com fibras é responsável por induzir a orientação predominante das fibras, o que afeta a capacidade resistente do elemento. O ensaio de punção em placas mostrou que esta diferença pode chegar a até 20%, e os ensaios indutivos e DEWS foram capazes de atribuir esta alteração à quantidade de fibras posicionadas de forma a conter a propagação de fissuras em condições mais favoráveis de reforço.

Ensaios de reometria demonstraram que a inserção de fibras afeta a viscosidade e o torque de escoamento do concreto, e que ensaios convencionais podem não apresentar estas alterações com a mesma sensibilidade. Por outro lado, a reometria rotacional não detectou tendência de segregação das fibras, diferente do ensaio de espalhamento, que pode indicar segregação em algumas das misturas, embora não em todas. Isto foi possível de ser realizado através de ensaios convencionais nos estudos prévios de trabalhabilidade do compósito, mas não foi possível durante a caracterização do concreto que foi efetivamente utilizado na produção das placas para ensaio. Assim, os efeitos de orientação em conjunto com a concentração de fibras causada por sua segregação alteram o comportamento pós-fissuração dos elementos estruturais de concreto reforçado com fibras.

O ensaio de indutância foi eficiente em analisar a concentração e a tendência da orientação de fibras nos testemunhos extraídos das placas de concreto. A concentração da moldagem pelo bordo foi mais uniforme que a de centro. E na análise de orientação, foi possível estabelecer linhas de tendência de orientação das fibras. Os resultados da leitura foram coerentes com os DEWS e de punção de placas.

O ensaio DEWS executado nos testemunhos das placas foi eficiente em detectar diferença na capacidade resistente pós-fissuração dos elementos analisados, ainda que utilizado com baixo teor de fibras no concreto analisado e com uma metodologia simplificada. E apresentou resultados coerentes com o ensaio de punção, quando analisado de acordo com a orientação das fissuras. O resultado mostrou diferenças da mesma ordem de grandeza no comportamento mecânico pós-fissuração.

Em linhas gerais, o comportamento reológico e as condições de moldagem são fatores de grande importância no desenvolvimento tecnológico do CAARFA, pois podem

causar influência sobre a capacidade resistente pós-fissuração e o desempenho mecânico da estrutura como um todo. Por este motivo, é imprescindível que se busque o constante aperfeiçoamento dos métodos de controle e execução do CAARFA, a fim de se obter o máximo desempenho deste material.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Visto que o teor de fibras foi mantido fixo neste estudo, é importante que se busque a realização de estudos com outros teores de fibras, pois teores diferentes podem apresentar outro padrão de influência em decorrência da frequência de contato entre as fibras e o fluido. O mesmo pode ser dito de diferentes tipos e tamanhos de fibras.

Conforme os resultados obtidos por este trabalho, a orientação das fibras foi influenciada pela distância percorrida pelo concreto, uma vez que para maiores distâncias houve maior influência do fluxo. Portanto, recomenda-se também a execução de pesquisas com elementos planos de maiores dimensões que os tratados neste trabalho.

Também é sugerido o estudo do sistema híbrido de reforço, com uso de fibras e armadura de aço. Pois o efeito das barras sobre o fluxo de concreto e, por consequência, sobre a orientação das fibras, pode causar comportamentos mecânicos distintos que merecem ser melhor estudados.

Conforme os resultados apontaram, fazem-se necessários estudos sobre a avaliação da trabalhabilidade do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço que permitam avaliar e, principalmente, prevenir os riscos de segregação das fibras ou mesmo outros constituintes.

REFERÊNCIAS

ABRISHAMBAF, A.; BARROS, J. A. O.; CUNHA, V. M. C. F. Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. **Cement and Concrete Research**, v. 51, p. 57–66, 2013.

ABUKHASHABA, M. I.; MOSTAFA, M. A.; ADAM, I. A. Behavior of self-compacting fiber reinforced concrete containing cement kiln dust. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, n. 2, p. 341–354, jun. 2014.

AENOR. UNE 83515:2010. **Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.** Asociación Española de Normalización y Certificación Madrid, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C-1550. **Flexural thoughnes of fiber-reinforced concrete (using centrally loaded round panel)**., United States, 2005

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C-1609. **Flexural performance of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading)**. United States, 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15823-2: **Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, 2010

AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 287–293, mar. 2012.

AL-MATTARNEH, H. Electromagnetic quality control of steel fiber concrete. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 350–356, 2014.

AYDIN, A. C. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p. 1149–1154, jun. 2007.

BORGES, L. A. C.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. DE. Análise do efeito da orientação das fibras na resistência pós-fissuração por meio do ensaio de compressão de corpos de prova com duplo corte em cunha. In: **56º congresso brasileiro do concreto**, São Paulo. Anais... p. 1–15, 2014.

BOULEKBACHE, B. et al. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1664–1671, set. 2010.

BRÜHWILER, E; WITTMAN, F. H; The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics test. **Engineering Fracture Mechanics,** v 35 p. 117-125, 1990.

CARMONA, S.; AGUADO, A.; MOLINS, C. Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 45, n. 7, p. 1053–1069, 2012.

CHEN, W. F. **Double punch test for tensile strength of concrete** , Sept . 1969 (70-18) PB224770 / AS (NTIS). 1970.

DAMINELI, B. L. et al. Análise do perfil reológico de concretos dosados em central atraves de reometria aplicada em campo. In: **IV Congreso Internacional de Tecnologia Del Hormigon**, Mar del Plata. Anais... 2010.

DE LA FUENTE, A. et al. Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v.27, n.1, 2012, p. 60–71.

DHONDE, H.; MO, Y.; HSU, T. Passing Ability Tester for Self-Consolidating Concrete. **Journal of ASTM International**, 2006.

DI PRISCO, M.; FERRARA, L.; LAMPERTI, M. G. L. Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites. **Materials and Structures**, v. 46, n. 11, p. 1893–1918, 20 fev. 2013.

DI PRISCO, M.; LAMPERTI, M. G. L.; LAPOLLA, S. Double-edge wedge splitting test: preliminary results. In: **Seventh International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, p. 1579–1586, 2010.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and Structures**, v. 42, p. 1261–1281, 2009.

EFNARC. European Specification for Sprayed Concrete. **European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures** (EFNARC), 1996.

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete; specification, production and use. **European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures** (EFNARC), 2005.

EL-DIEB, A. S.; REDA TAHA, M. M. Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 585–596, fev. 2012.

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, 2007. 15p.

FARES, G. Effect of slump cone orientation on the slump flow time (T50) and stability of sustainable self-compacting concrete containing limestone filler. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 145–153, fev. 2015.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. **Fib Model Code for Concrete Strutuctures 2010**. Switzerland, 2013. 402p.

FERRARA, L. et al. A comprehensive methodology to test the performance of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFR-SCC). **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 406–424, dez. 2012.

FERRARA, L. Tailoring the orientation of fibers in High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites : part 1 - experimental evidence , monitoring and prediction. **International Journal of Materials and Structural Integrity**, v. 9, p. 72–91, 2015.

FERRARA, L.; DI PRISCO, M.; LAMPERTI, M. G. L. Identification of the stress-crack opening behavior of HPFRCC : the role of flow-induced fiber orientation. **Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, p. 1541-1550, 2010.

FERRARA, L.; MEDA, A. Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements. **Materials and Structures**, v. 39, n. 4, p. 411–420, 8 jun. 2006.

FERRARA, L.; OZYURT, N.; PRISCO, M. High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of “casting-flow induced” fibre orientation. **Materials and Structures**, v. 44, p. 109–128, 2011.

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

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011, 248p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. **Materials Research**, 2015.

FIGUEIREDO, A. D; ESCARIZ, R. C. Drainage concrete pipes with hybrid reinforcement. In: **Second RILEM International Conference on Strain Hardening Cementitous Composites (SHCC2-Rio)**, p. 391-398, Rio de Janeiro, 2011.

FIGUEIREDO, A. D., HELENE, P. R. L. O ensaio de punção de placas para o controle da tenacidade no concreto com fibras de aço. v.2 p.469 – 476, In: **Iv Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle da Qualidade - CONPAT 97**, Porto Alegre. 1997.

GETTU, R. et al. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. **Materials and Structures**, v. 38, n. 1, p. 31–37, 2005.

GRÜNEWALD, S. **Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete**, 2004, 165p Tese (Doutorado) - Delft University of Technology, Netherlands. 2004.

GRÜNEWALD, S.; WALRAVEN, J. C. Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1793–1798, 2001.

JONES, P. A.; ROBINS, P. J.; AUSTIN, S. A. Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 55, n. 3, p. 225–235, 6 jan. 2003.

KAMAL, M. M. et al. Mechanical properties of self-compacted fiber concrete mixes. **HBRC Journal**, v. 10, n. 1, p. 25–34, 2014.

KUDER, K. G. et al. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 191–199, fev. 2007.

LATASTE, J. F.; BEHLOUL, M.; BREYSSE, D. Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. **NDT & E International**, v. 41, n. 8, p. 638–647, dez. 2008.

LOPEZ, R.D. **Determinación de cuantía y orientación de fibras en HRFA por inducción magnética: mejora de un método existente e implantación para probetas cilíndricas**, 2013, 158p Dissertação (Mestrado). - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2013

LOPEZ, R.D. et al. Assessment of Fibre Content and Orientation in SFRC with the Inductive Method. Part 1 : Theoretical Basis of the Method and Study of the Influence of the Type of Coil and Temperature on its Accuracy. **International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering**. 2015.

MADANDOUST, R.; RANJBAR, M. M.; YASIN MOUSAVI, S. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 9, p. 3721–3731, set. 2011.

MAKITA, T.; BRÜHWILER, E. Tensile fatigue behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete combined with steel rebars (R-UHPFRC). **International Journal of Fatigue**, v.59, 2014, p. 145–152.

MARTINIE, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 226–234, fev. 2010.

MEHDIPOUR, I. et al. Effect of workability characteristics on the hardened performance of FRSCCMs. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 611–621, mar. 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. 183p Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MOLINS, C.; AGUADO, A.; SALUDES, S. Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p. 415–425, 24 maio 2009.

MONTE, R., TOALDO G. S. e FIGUEIREDO A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. **Revista Matéria**, v. 19, n 2, jun, 2014.

MORTON, E. C.; VILLAESCUSA, E.; THOPMSON, A. G. Determination of energy absorption capabilities of large scale shotcrete panels. **Engineering Conferences International**, 2009.

NGUYEN, T. L. H.; ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1789–1796, out. 2006.

NURUDDIN, M. F.; CHANG, K. Y.; MOHD AZMEE, N. Workability and compressive strength of ductile self compacting concrete (DSCC) with various cement replacement materials. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 153–157, mar. 2014.

OZYURT, N.; MASON, T. O.; SHAH, S. P. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 2, p. 70–79, fev. 2007.

PONIKIEWSKI, T. et al. Determination of steel fibres distribution in self-compacting concrete beams using X-ray computed tomography. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 15, n. 2, p. 558–568, 2015.

PUJADAS, P. A. **Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas**. 2013, 263p. Tese (Doutorado) - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2013

PUJADAS, P. BLANCO, A. CAVALARO, S. de la FUENTE, A. AGUADO, A. New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 19, 259-271. 2013

ROUSSEL, N. Correlation between Yield Stress and Slump: Comparison between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results. **Materials and Structures**, v. 39, p. 501-509, 2006.

SAAK, A. A. W.; JENNINGS, H. M. H.; SHAH, S. P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. **Cement and concrete research**, v. 34, p. 363–371, 2004.

SAHMARAN, M.; YURTSEVEN, A.; OZGUR YAMAN, I. Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. **Building and Environment**, v. 40, n. 12, p.

1672–1677, dez. 2005.

SALEHIAN, H.; BARROS, J. A. O.; TAHERI, M. Evaluation of the influence of post-cracking response of steel fibre reinforced concrete (SFRC) on load carrying capacity of SFRC panels. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 289–304, dez. 2014.

STÄHLI, P.; CUSTER, R.; VAN MIER, J. G. M. On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. **Materials and Structures**, v. 41, n. 1, p. 189–196, 22 fev. 2007.

ŠVEC, O. et al. Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. **Cement and Concrete Composites**, v. 50, p. 60–72, jul. 2014.

SWAMY, R. N.; MANGAT, P. S. Inluence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete. **Cement and concrete research**, v. 4, p. 451–465, 1974.

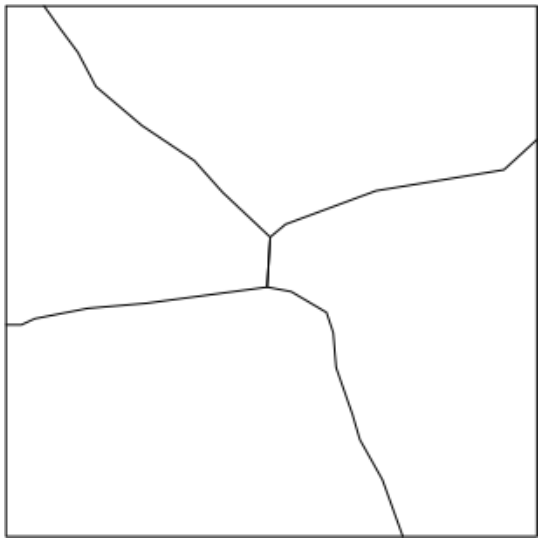
TORRENTS, J. M. et al. Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. **Materials and Structures**, v. 45, n. 10, p. 1577–1592, 24 abr. 2012.

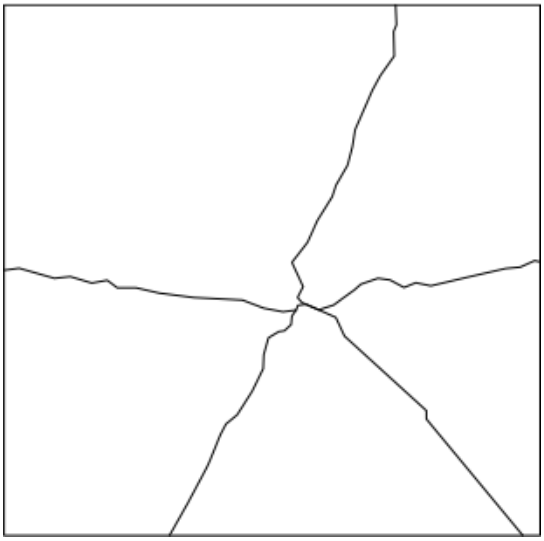
ZERBINO, R. et al. On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 2, p. 191–200, fev. 2012.

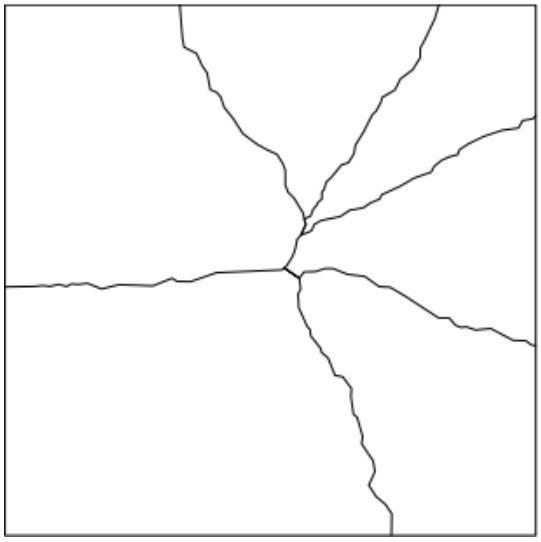
ANEXO A

Resultado dos ensaios de punção

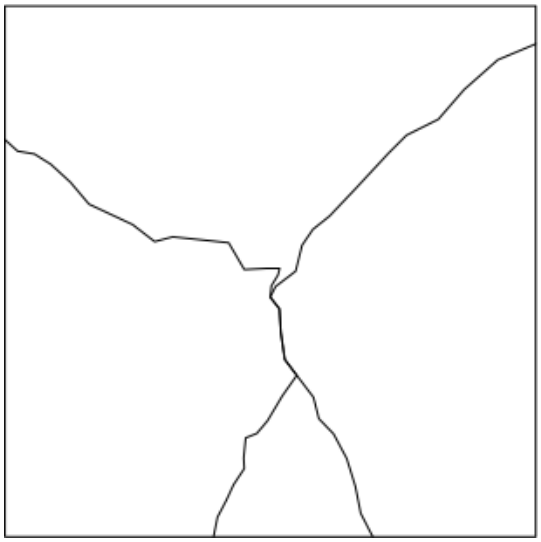
ANEXO A.1 – Resultado para as placas de bordo

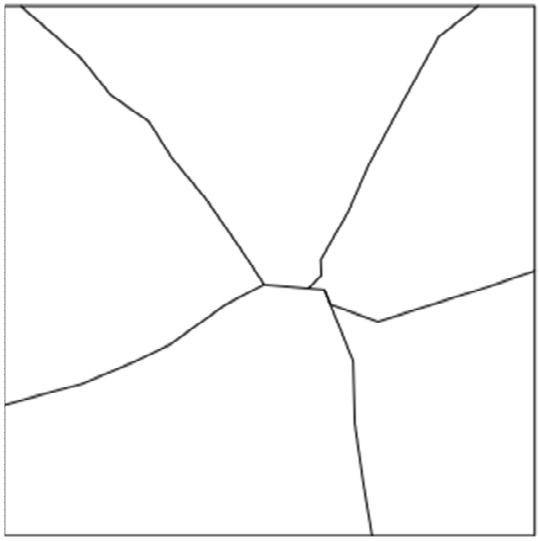


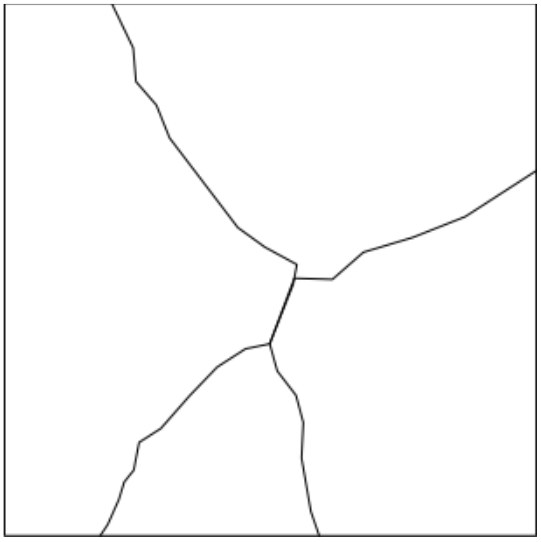




ANEXO A.2 – Resultado para as placas de centro







ANEXO B

Tabelas do resultado do ensaio indutivo

ANEXO B.1 – Resultados do ensaio indutivo para placa de bordo

Cubo	Distância (cm)	Lados (mm)			Volume (dm³)	Indutância (mH)				Massa fibra (kg)	Fibras (kg/m³)	Distribuição nos eixos (%)		
		L1	L2	L3		ΔZ	ΔX	ΔY	ΔTotal			Cz	Cx	Cy
A1	22,5	104,78	110,02	102,37	1,18	0,3141	0,6760	1,5133	2,5034	26,72	22,64	0,21	0,31	0,47
A2	25,16	106,83	109,17	102,42	1,19	0,3509	0,8339	1,8994	3,0842	32,92	27,56	0,21	0,32	0,48
A3	31,82	108,52	107,06	102,07	1,19	0,3235	0,9475	1,8042	3,0752	32,82	27,68	0,20	0,34	0,47
A4	40,56	106,71	100,92	102,14	1,10	0,2612	0,8371	1,3079	2,4062	25,68	23,35	0,20	0,36	0,45
A5	50,31	106,62	112,19	101,76	1,22	0,3378	1,1581	1,0953	2,5912	27,66	22,72	0,21	0,40	0,39
B1	11,25	107,55	108,95	102,82	1,20	0,5327	0,8280	1,1714	2,5321	27,03	22,43	0,27	0,33	0,40
B2	15,91	106,68	109,79	102,49	1,20	0,4368	1,1014	1,1991	2,7373	29,22	24,34	0,24	0,37	0,39
B3	25,16	105,81	106,14	103,56	1,16	0,3147	1,4039	1,2621	2,9807	31,81	27,35	0,20	0,41	0,39
B4	35,58	107,90	102,85	102,70	1,14	0,3127	1,4518	1,0169	2,7814	29,69	26,05	0,20	0,43	0,36
B5	46,38	109,59	110,59	102,33	1,24	0,3851	1,4397	0,8583	2,6831	28,64	23,09	0,23	0,44	0,34
C1	0	109,16	109,15	104,10	1,24	0,8118	0,8955	0,8634	2,5707	27,44	22,12	**0,32**	0,34	0,33
C2	11,25	109,13	107,12	102,44	1,20	0,4903	1,0630	0,8684	2,4217	25,85	21,58	0,26	0,39	0,35
C3	22,5	108,57	108,82	103,14	1,22	0,3050	1,2395	0,9615	2,5060	26,75	21,95	0,21	0,42	0,37
C4	33,75	108,71	104,56	103,60	1,18	0,3585	1,4536	0,8258	2,6379	28,16	23,91	0,22	0,44	0,33
C5	45	110,67	105,26	102,63	1,20	0,4507	1,5823	0,6718	2,7048	28,87	24,15	0,24	0,46	0,30
D1	11,25	108,02	108,89	102,93	1,21	0,5832	0,8478	1,2466	2,6776	28,58	23,61	0,27	0,33	0,40
D2	15,91	108,81	108,23	103,97	1,22	0,5037	1,0727	1,3137	2,8901	30,85	25,19	0,25	0,36	0,40
D3	25,16	108,02	105,83	102,52	1,17	0,3228	1,3696	1,2979	2,9903	31,92	27,23	0,20	0,41	0,40
D4	35,58	106,06	106,39	102,53	1,16	0,3220	1,4362	1,0765	2,8347	30,26	26,15	0,20	0,43	0,37
D5	46,38	107,71	108,71	102,23	1,20	0,3520	1,2776	0,7371	2,3667	25,26	21,10	0,23	0,44	0,33
E1	22,5	106,79	108,00	103,98	1,20	0,3482	0,8052	1,5346	2,6880	28,69	23,92	0,22	0,33	0,45
E2	25,16	106,57	106,75	103,01	1,17	0,3634	0,8944	1,8756	3,1334	33,44	28,54	0,21	0,32	0,47
E3	31,82	105,75	107,25	102,08	1,16	0,3073	0,8739	1,7179	2,8991	30,94	26,73	0,20	0,33	0,47
E4	40,56	106,60	108,09	101,92	1,17	0,3401	0,9370	1,5623	2,8394	30,31	25,81	0,21	0,35	0,45
E5	50,31	108,24	104,64	101,82	1,15	0,2921	1,0100	1,0650	2,3671	25,27	21,91	0,21	0,39	0,40

ANEXO B.2 – Resultados do ensaio indutivo para placa de centro

Cubo	Distância (cm)	Lados (mm)			Volume (dm³)	Indutância (mH)				Massa fibra (kg)	Fibras (kg/m³)	Distribuição nos eixos (%)		
		L1	L2	L3		ΔZ	ΔX	ΔY	ΔTotal			Cz	Cx	Cy
A1	31,82	110,72	108,59	102,97	1,24	0,2590	0,8445	0,9138	2,0173	21,53	17,39	0,21	0,39	0,40
A2	25,16	109,06	103,9	101,42	1,15	0,2901	0,7377	1,5064	2,5342	27,05	23,54	0,21	0,33	0,47
A3	22,5	109,07	109,79	100,39	1,20	0,3399	0,8141	1,8136	2,9676	31,67	26,35	0,21	0,32	0,48
A4	25,16	109,35	107,71	99,4	1,17	0,3040	0,6997	1,3898	2,3935	25,55	21,82	0,21	0,33	0,46
A5	31,82	108,59	105,81	98,49	1,13	0,1959	0,6529	0,6560	1,5048	16,06	14,19	0,21	0,39	0,39
B1	25,16	106,62	109	103,21	1,20	0,3260	1,3639	0,7916	2,4815	26,49	22,08	0,22	0,44	0,34
B2	15,91	107,22	104,44	103,49	1,16	0,3907	1,1476	1,1501	2,6884	28,69	24,76	0,23	0,39	0,39
B3	11,25	103,98	109,28	101,71	1,16	0,5168	0,8320	2,0132	3,3620	35,88	31,05	0,24	0,30	0,47
B4	15,91	106,66	107,3	100,82	1,15	0,3837	0,9495	1,1001	2,4333	25,97	22,51	0,23	0,37	0,40
B5	25,16	106,72	107,24	100,14	1,15	0,2914	0,9701	0,5871	1,8486	19,73	17,22	0,24	0,43	0,33
C1	22,5	106,47	107,65	103,76	1,19	0,3103	1,4841	0,7114	2,5058	26,75	22,49	0,21	0,47	0,32
C2	11,25	106,53	105,92	103,12	1,16	0,5916	1,6131	0,7723	2,9770	31,78	27,31	0,26	0,44	0,30
C3	0	107,47	108,49	102,96	1,20	0,5683	1,1666	1,3710	3,1059	33,15	27,62	0,25	0,36	0,39
C4	11,25	109,31	107,78	101,82	1,20	0,4690	1,2156	0,6591	2,3437	25,02	20,85	0,26	0,42	0,31
C5	22,5	108,69	105,73	101,07	1,16	0,2755	1,2884	0,5955	2,1594	23,05	19,84	0,22	0,47	0,32
D1	25,16	109,23	108,28	104,62	1,24	0,2573	1,2889	0,6463	2,1925	23,40	18,91	0,21	0,46	0,33
D2	15,91	109,39	107,4	104,28	1,23	0,4536	1,3019	1,0189	2,7744	29,61	24,17	0,24	0,40	0,36
D3	11,25	107,62	107,71	103,01	1,19	0,5555	0,9113	1,6057	3,0725	32,79	27,46	0,25	0,32	0,43
D4	15,91	105,8	107,8	102,62	1,17	0,4280	0,9894	0,9062	2,3236	24,80	21,19	0,25	0,38	0,37
D5	25,16	105,79	106,3	102,79	1,16	0,2423	1,0290	0,5504	1,8217	19,44	16,82	0,22	0,45	0,33
E1	31,82	107,97	107,56	104,37	1,21	0,2486	0,8949	0,8453	1,9888	21,23	17,51	0,21	0,40	0,39
E2	25,16	106,81	107,6	104,42	1,20	0,2635	0,7511	1,4255	2,4401	26,04	21,70	0,20	0,34	0,46
E3	22,5	106,98	106,8	104,11	1,19	0,2987	0,6290	1,7313	2,6590	28,38	23,86	0,21	0,30	0,50
E4	25,16	107,83	108,1	104,26	1,22	0,2491	0,6569	1,2787	2,1847	23,32	19,19	0,20	0,33	0,46
E5	31,82	106,88	106,57	102,53	1,17	0,1718	0,6495	0,6887	1,5100	16,12	13,80	0,20	0,39	0,40