

Dissertação apresenta à Diretoria de Pós-Graduação *Stricto Sensu* da Universidade São Judas Tadeu, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Civil

IGOR DA SILVA BRITO

COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO ALINHADAS POR MEIO DE CAMPO MAGNÉTICO

Prof. Dr. Sandro Martini Orientador

São Paulo São Paulo, SP – Brasil 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Universidade São Judas Tadeu

Bibliotecária: Cláudia Silva Salviano Moreira - CRB 8/9237

Brito, Igor da Silva.

B862c

Compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras de aço alinhadas por meio de campo magnético / Igor da Silva Brito. - São Paulo, 2019.

f.: il.; 30 cm.

Orientador: Sandro Martini.

Dissertação (mestrado) — Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2019.

1. Orientação de fibras. 2. Compósito de elevado desempenho. 3. Tenacidade. 4. alinhador magnético. I. Martini, Sandro. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título.

 $CDD\ 22 - 690.11$

COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO ALINHADAS POR MEIO DE CAMPO MAGNÉTICO

Igor da Silva Brito

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Sandro Martini	Orientador	Universidade São Judas Tadeu
Prof. Dr.	Dimas Alan Strauss Rambo	Membro interno	Universidade São Judas Tadeu
Prof. Dr.	Ricardo Pieralisi	Membro externo	Universidade Federal do Paraná

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho foram necessários importantes apoios, aos quais estarei eternamente grato.

Aos meus pais, que são para mim exemplos de superação, dedicação e coragem, sem o seu incentivo nada disso teria sido realizado. Obrigado!

Ao Professor Sandro Martini, pela excelente orientação, muita paciência, opiniões, disponibilidade e a imensa parceria e ética. Por transferir seus conhecimentos, incentivando e apoiando e tornando possível a realização deste trabalho de mestrado.

Ao Professor Flávio Maranhão, também pela excelente orientação desde o início dos trabalhos, transferindo através de suas opiniões seus conhecimentos e por demostrar grande apoio e incentivo.

Aos técnicos dos Laboratórios de Engenharia Mecânica da Universidade São Judas Tadeu (USJT), Elvis e Henrique pela parceria e auxílio na fabricação do dispositivo magnético. Ao técnico e amigo do Laboratório da Saúde, Iago pelo auxílio na execução dos exames de imagem. André Hanne, gestor dos Laboratórios Integrados da USJT, por permitir que todos os recursos necessários para a realização deste trabalho pudessem ser utilizados, e pela amizade e apoio demostrados ao longo do percurso.

A amiga e futura engenheira Samantha Martins pelo apoio e esforço no auxílio de coleta e processamento dos dados deste trabalho. Ao amigo Roberto Munhoz e Jonathan Muchon pela amizade, parceira e sempre boas ideias. Ao engenheiro elétrico Gabriel pelo auxílio nas simulações computacionais com o FEM.

A equipe do Laboratório da Microscopia de Varredura e Força Atômica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela parceria e apoio.

٠	
	٦
-	

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original" (Albert Einstein)

Resumo

Atualmente o uso de fibras metálicas em matrizes cimentícias de alto desempenho vem sendo objetivo de diversas pesquisas. A sua utilização em um concreto auto adensável possibilita o alinhamento das fibras por meio de agentes externos quando ainda na fase fluida, o que pode trazer melhorias significativas no comportamento mecânico do compósito endurecido. Este trabalho tem por objetivo alinhar fibras curtas de aço por meio de um campo magnético externo e analisar sua influência sobre as propriedades mecânicas do compósito reforçado. Ensaios destrutivos e não destrutivos foram realizados para verificar o desempenho da otimização do alinhamento de fibras. O equipamento desenvolvido mostrou-se apropriado para executar o direcionamento das fibras. Os resultados mostraram que os ensaios não destrutivos podem fornecer uma correlação na identificação entre a condição de alinhamento e não alinhamento das fibras. A técnica de resistividade elétrica mostrou-se ser útil na correlação com as análises mecânicas. Foi possível comprovar que a orientação das fibras pelo campo magnético influência significativamente a resistência pós-fissuração dos elementos. Foi observado um melhor desempenho da tenacidade do compósito devido ao alinhamento das fibras, em comparação com as amostras onde a reforço Não Alinhado.

Palavras-chave: Orientação de fibras. Compósito de elevado desempenho. Tenacidade. alinhador magnético.

Abstract

Currently, the use of metallic fibers in high-performance cementitious matrices has been the objective of several researches. Its use in a self-compacting concrete enables the alignment of fibers by external agents while still in the fluid phase, which can bring significant improvements in the mechanical behavior of the hardened composite. This work aims to align short steel fibers through an external magnetic field and analyze their influence on the mechanical properties of the reinforced composite. Destructive and non-destructive tests were performed to verify the performance of fiber alignment optimization. The equipment developed proved to be appropriate to perform fiber direction. The results show that non-destructive testing can provide a correlation in identifying fiber alignment and non-alignment conditions. The electrical resistivity technique proved to be useful in correlating with mechanical analysis. It was shown that the orientation of the fibers by the magnetic field significantly influences the post-cracking strength of the elements. Better composite toughness performance was observed due to fiber alignment compared to samples where non-aligned reinforcement.

Keywords: Fiber orientation. High performance composite. Toughness. Magnetic aligner.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Exemplo das proporções em frações volumétricas na mistura de um (a) concreto
convencional e de um (b) HPFRC. (Adaptado de RIBEIRO, 2012)20
Figura 2.2: Exemplo dos tipos de fibras para uso em compósitos
Figura 2.3: Propriedades de interesse das fibras para utilização em matrizes cimentícia
(Adaptado de NAAMAM, 2003)23
Figura 2.4: Diagrama de tensão deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo
de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2011)
Figura 2.5: Tipos de Fibras (Adaptado de NAAMAN, 2003)
Figura 2.6: Diferentes tipos de fibras com as dimensões correspondentes; l/d (comprimento das
fibras (mm)/ diâmetro das fibras (mm)) (Adaptado de RIBEIRO, 2012)26
Figura 2.7: Classes de fibras de aço associadas ao tipo de aço utilizado na fabricação
(FIGUEIREDO, 2011; ARIF, 2014)
Figura 2.8: Interface de aderência fibra-matriz (LÖFGREN, 2004)29
Figura 2.9: (A) Esquema de deformação ao longo da interface fibra-matriz e (B) distribuição
de cisalhamento (ARIF, 2014)
Figura 2.10: Distribuição de tensões na interface fibra-matriz (BENTUR; MINDESS, 2007;
PASA, 2007)31
Figura 2.11: Funcionalidade da fibra no processo de fissuração da matriz (FIGUEIREDO;
NUNES; TANESI, 2000)
Figura 2.12: Fases da interação fibra-matriz-esforço (ARIF, 2014)
Figura 2.13: Conceitos de comportamento softening e hardening para classificação de
compósitos cimentícios reforcado com fibras (Adaptado - NAAMAN, 2003)

Figura 2.14: Curvas de Tensão de Tração – Deformação; sem fibras, baixo e alto volume de
fibras na matriz (Adaptado de BENTUR; MINDESS, 2007)
Figura 2.15: Compósito reforçado com fibras em volumes abaixo (A), acima (B), igual (C) ac
volume crítico de fibras durantes o ensaio de tração na flexão (FIGUEIREDO, 2011) 39
Figura 2.16: Forças atuando sobre uma fibra de aço imersa em uma matriz cimentícia e sob a
ação de um campo magnético externo (Adaptado de MU et al., 2016)
Figura 2.17: Aparato experimental para o alinhamento magnético de fibras em concreto
(Adaptado de MU <i>et al.</i> , 2016)42
Figura 2.18: Sistema de alinhamento magnético proposto por Wijffels <i>et al.</i> (2017)42
Figura 2.19: Aparato experimental para o alinhamento magnético de fibras (ABRISHAMBAF)
PIMENTEL; NUNES, 2017)43
Figura 3.1: Núcleo magnético
Figura 3.2: Núcleo magnético com entreferro de ar
Figura 3.3:Dimensões do núcleo
Figura 3.4: Detalhes do núcleo ferromagnético utilizado na construção do alinhador
Figura 3.5: Constituição do equipamento utilizado para a orientação das fibras
Figura 3.6: Resultado da simulação numérica. A escala de cores indica a magnitude do campo
magnético em tesla (T).
Figura 3.7: Fibras (a) desalinhadas e (b) alinhadas devido ao campo magnético50
Figura 3.8: Imagens feitas por MEV do cimento CPV-ARI utilizado neste trabalho. A imagem
à esquerda foi obtida com resolução de 30 µm enquanto que a imagem à direita foi obtida com
resolução de 5 μm
Figura 3.9: Partículas de microsílica observadas através do MEV
Figura 3.10: Partículas de Metacaulim observadas através do MEV
Figure 3.11: Curva granulométrica conjunta das arejas quartzosas utilizadas

Figura 3.12: Curva granulométrica para o traço 2 ($q = 0.42$). A curva em vermelho representa
o modelo de Andreassen e a curva azul representa a distribuição do material experimental57
Figura 3.13: (a) Modelo do equipamento de ultrassom utilizado e em (b) um exemplo ilustrativo
do modo de operação.
Figura 3.14: Ensaios de resistência à flexão (a) e à compressão axial (b) para prismas63
Figura 3.15: (a) Equipamento para a medida da resistividade elétrica. (b) Princípio de
funcionamento. (c) Faces dos corpo-de-prova onde foram realizadas as medidas de
resistividade65
Figura 4.1: Velocidade de ultrassom longitudinal das pastas
Figura 4.2: Velocidade de ultrassom transversal das pastas
Figura 4.3: Resistência à compressão para as pastas71
Figura 4.4: Resistência à tração por flexão para as pastas
Figura 4.5: Curvas de carga-deslocamento para a uma fração de fibras de 1,5% e relação a/c =
0,3073
Figura 4.6: Resistividade elétrica para concentrações de fibras nas pastas74
Figura 4.7: Radiografia das amostras para diferentes valores de corrente e teores de fibras76
Figura 4.8: Velocidade de ultrassom longitudinal
Figura 4.9: Resistência à compressão para os diferentes volumes de fibras79
Figura 4.10: Carga-deslocamento para o HPFRC – 1% (a) Não Alinhado e (b) Alinhado 80
Figura 4.11: Carga-deslocamento para o HPFRC – 2% (a) Não Alinhado e (b) Alinhado 81
Figura 4.12: Carga-deslocamento para o HPFRC – 3% (a) Não Alinhado e (b) Alinhado 82
Figura 4.13: Carga-deslocamento para o HPFRC – 5% (a) Não Alinhado e (b) Alinhado 83
Figura 4.14: Valores médios da tenacidade em função do volume de fibras para os casos
Alinhado e Não Alinhados.

Figura 4.15: Imagens de MEV (a) na região da matriz ao redor da fibra de aço; (b) e (c) na
região da interface fibra-matriz; (d) os pontos coloridos são utilizados para indicar a região para
a medida de EDS85
Figura 4.16: (a) Medidas de EDS próximas da superfície da fibra ≈ 6 μm (ponto laranja da
Figura 4.15 (d)). (b) Medidas de EDS na região afastada da fibra (Matriz)
Figura 4.17: Resistividade elétrica, em função das faces do corpo-de-prova, para as amostras
(a) não alinhadas (0 A) e (b) alinhadas (12 A)
Figura 4.18: (a) Modelo (ideal) sem a presença da força da gravidade. (b) Modelo (real) em que
a ação da gravidade e o empilhamento das fibras provoca o movimento descendente das fibras
no corpo-de-prova88
Figura 4.19: Tomografías de um corpo-de-prova do compósito com 5% de fibras. O plano yz é
a face inferior do corpo-de-prova. O plano xz é uma das faces laterais

Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Nível de resistência mínima do aço e respectiva classe da fibra de acordo con	n a
(ABNT NBR 15530 (2007); FIGUEIREDO, 2011)	.28
Tabela 2-2: Ensaio para determinação da tenacidade. (Adaptado de ARIF, 2014)	.37
Tabela 3-1: Valores obtidos através da caracterização por EDS	.52
Tabela 3-2: Elementos constituintes	.53
Tabela 3-3: Propriedades físico-químicas da microsílica	.53
Tabela 3-4: Valores do material obtidos na caracterização através do EDS	.54
Tabela 3-5: Propriedades químicas do metacaulim utilizado (Fonte: Metacaulim do Brasil) .	.54
Tabela 3-6: Propriedades das microfibras utilizadas.	.56
Tabela 3-7: Traços desenvolvidos.	.57
Tabela 3-8: Análise preliminar dos resultados obtidos nos traços testes	.59
Tabela 3-9: Traços utilizados.	60
Tabela 3-10: Traços do HPFRC.	62
Tabela 4-1: Resultados da tenacidade e módulo de ruptura para o HPFRC - 1%	.80
Tabela 4-2: Resultados da tenacidade e módulo de ruptura para o HPFRC - 2%	81
Tabela 4-3: Resultados da tenacidade e módulo de ruptura para o HPFRC - 3%	.82
Tabela 4-4: Resultados da tenacidade e módulo de ruptura para o HPFRC - 5%	.83

SUMÁRIO

1	INTRO	DDUÇÃO	14
	1.1	Objetivo geral	16
	1.2	Objetivos específicos	16
	1.3	Estruturação do trabalho	17
2	COMP	OSITO CIMENTÍCIO DE ELEVADO DESEMPENHO F	REFORÇADO
	COM I	FIBRAS	18
	2.1	Matriz de elevado desempenho	19
	2.2	Fibras	21
	2.2.1	Fibras de aço	25
		Interação fibra – matriz	
	2.3.1	Tenacidade	36
	_	Fatores de influência no desempenho mecânico de compósi	
		com fibras	
	2.4.1	Volume de fibras	38
	2.4.2	Orientação e alinhamento magnético das fibras	39
3	METO	DOLOGIA E PROGRAMA EXPERIMENTAL	44
	3.1	Construção do alinhador magnético	44
	3.2	Simulação e validação do equipamento	49
	3.3	Matérias-primas	50
	3.3.1	Cimento	51
	3.3.2	Microsílica	52
	3.3.3	Metacaulim	53
	3.3.4	Aditivo	55
	3.3.5	Areia Quartzosa	55
	3.3.6	Fibras de aço	56
	3.4	Desenvolvimento da matriz	56
	3.5	Moldagem dos corpos-de-prova	58

	3.5.1	Pasta de cimento reforçada com fibras	58
	3.5.2	Compósito – HPFRC	60
	3.6	Caracterização físico-mecânica e análise de imagem	61
	3.6.1	Caracterização física de ondas de ultrassom	61
	3.6.2	Resistência à compressão e à tração por flexão	63
	3.6.3	Resistividade elétrica	64
	3.6.4	Análise de Imagem	64
	3.6.5	Microscopia Eletrônica de Varredura	65
	3.6.6	Tomografia	66
4	RESUL	TADOS E DISCUSSÕES	67
	4.1 P	Pasta de cimento reforçada com fibras	67
	4.1.1	Velocidade de ultrassom	67
	4.1.2	Resistência à compressão e à tração por flexão	70
	4.1.3	Resistividade elétrica	73
	4.1.4	Análise de imagem	75
	4.2	Compósito – HPFRC	77
	4.2.1	Velocidade de ultrassom	77
	4.2.2	Resistência à compressão	78
	4.2.3	Comportamento carga-deslocamento e tenacidade dos compósitos.	79
	4.2.4	Interface fibra – matriz	85
	4.2.5	Resistividade elétrica	87
5	CONCL	LUSÕES	90
REF	FERÊNCIA	\S	91

1 Introdução

Em concretos de alto desempenho reforçados com fibras (*High Performance Fibre Reinforced Concrete*, HPFRC), é possível identificar importantes progressos no âmbito da pesquisa científica (AFROUGHSABET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2016). Observa-se um avanço no desenvolvimento das composições dos compósitos, das fibras, melhorias das zonas de transição entre a matriz e as fibras, dos processos de produção, etc. (RIBEIRO, 2012; SOARES, 2013). Como exemplos destes avanços, destacam-se:

- A introdução no mercado de uma nova geração de aditivos, como os superplastificantes de terceira geração, permitindo a elaboração de composições de elevada resistência e com manutenção ou melhoria da trabalhabilidade.
- Aumento do uso de microfíleres, como a sílica de fumo e microsílica, cujo diâmetro médio das partículas é inferior ao do cimento, contribuindo, assim, para reduzir o volume de vazios, aumentar a resistência mecânica e diminuir a permeabilidade e porosidade do material.
- Diversos tipos e formas de fibras disponíveis; e a possibilidade de combinar diferentes tipos de fibra, numa mesma mistura, traduz-se num aumento de resistência, ductilidade e tenacidade.
- Inovações no processo de produção, principalmente, de misturas auto adensáveis que permitam uma dispersão uniforme das fibras.

No âmbito nacional, a utilização do concreto reforçado com fibras de aço está dirigida para aplicações em pavimentos industriais e concreto projetado (FIGUEIREDO, 2011). Contudo, a pesquisa e a aplicação dos concretos e compósitos auto adensáveis têm ganhado destaque pela sua flexibilidade de adaptação nas mais variadas formas, possibilitando a fabricação de elementos com sofisticação e elevado grau de desempenho e vida útil.

Embora no Brasil, a investigação e o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras tenham começado há mais de quarenta anos, a sua aplicação é bastante limitada e a sua produção representa uma pequena percentagem do total da produção do material cimentício do país (RIBEIRO, 2012).

O HPFRC é um compósito que pode ser tratado como uma extensão dos concretos convencionais reforçados com fibras e dos concretos de elevado desempenho, podendo também oferecer a vantagem de pertencer à família dos concretos auto adensáveis.

Porém, é importante destacar que a distribuição e a orientação das fibras podem ser afetadas por sua dosagem e dimensões, bem como pela trabalhabilidade da mistura fresca, e pelo método de lançamento. A orientação das fibras, no HPFRC, é um fator muito importante no comportamento mecânico. A concentração e a dispersão das fibras influenciam na resposta do material frente aos esforços aplicados. Quando orientadas na direção do esforço principal, podem ser responsáveis pela otimização do desempenho mecânico e da tenacidade. Por outro lado, caso a orientação seja inapropriada, há possibilidade de se causar vários efeitos indesejáveis ao elemento (FAIFER *et al.*, 2012).

Em razão da sua elevada fluidez, tanto o HPFRC quanto os concretos auto adensáveis (CAA), possibilitam que a orientação das fibras ocorra durante o estado fresco, podendo ser feita no processo de lançamento do material (FAIFER *et al.*, 2012; ABUKHASHABA; MOSTAFA; ADAM, 2014). Essa é uma alternativa de uso no lugar da armadura de aço tradicional. O controle da reologia assume um papel ainda mais importante, uma vez que a posição do elemento de reforço é definida durante o processo de lançamento ou, posteriormente, com alinhamento magnético, podendo assim afetar o desempenho mecânico do compósito (DI PRISCO; PLIZZARI E VANDEWALLE, 2009).

Na prática, a especificação do concreto reforçado com fibras é baseada em uma hipótese geral, com o pressuposto de provável distribuição homogênea de fibras, associada à densidade de fibras no concreto. As melhorias relacionadas à avaliação direta da distribuição e orientação das fibras são: a otimização da formulação do concreto (em termos de densidade da fibra) e o aumento do nível de confiança em relação à conformidade dos elementos fabricados.

Apesar da relevância do tema, há poucas pesquisas sobre o direcionamento das fibras por interações com agentes externos, quer seja pelo efeito parede, ocasionado pelo fluxo, ou por meio da interação com um campo magnético (TUTIKIAN, 2007). Logo, é necessário o contínuo desenvolvimento de estudos que abordem os efeitos da orientação das fibras sobre o comportamento mecânico dos elementos compósitos reforçados com fibras de aço.

O presente trabalho explora a orientação de fibras de aço, em compósitos cimentícios, através da aplicação de um campo magnético externo. Além de uma ampla aplicação na construção civil, essa técnica tem um grande potencial para ser integrada a novas tecnologias para indústria de pré-moldados. Adaptando um dispositivo magnético no formato de bico de impressora, é possível alinhar as fibras durante o processo de injeção do concreto. Entretanto,

para que esse conceito seja utilizado na prática, é necessário compreender os mecanismos básicos que regem o processo de alinhamento magnético das fibras.

O alinhador magnético construído para este trabalho foi baseado no conceito de circuito magnético. Isso permitiu a utilização de correntes elétricas elevadas, sem a necessidade de um sistema de resfriamento. Inicialmente foram realizados estudos em matrizes de pastas de cimento com diferentes relações de água/cimento e teores de fibras. Esse estudo preliminar permitiu a realização de ajustes nos parâmetros de funcionamento do equipamento, principalmente os valores das correntes elétricas para a geração do alinhamento das fibras. A orientação das fibras foi registrada por meio de imagens radiográficas feitas após o processo de cura. Além disso, ensaios de ultrassom, resistividade elétrica, resistência à tração por flexão, resistência à compressão, foram realizados para correlacionar o alinhamento e sua influência sobre as propriedades mecânicas matrizes de pasta de cimento. As análises e os resultados obtidos nesta parte inicial foram utilizados para estudar o alinhamento magnético no HPFRC. O efeito potencial do alinhamento magnético nesses compósitos foi demonstrado a partir dos resultados dos ensaios mecânicos, com destaque ao ganho de tenacidade devido ao alinhamento das fibras.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito do alinhamento magnético de fibras de aço no interior de matrizes cimentícias sobre propriedades mecânicas.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Construção de um alinhador magnético.
- Validação do funcionamento deste aparato.
- Desenvolvimento de um compósito HPFRC.
- Avaliar a influência da orientação magnética das fibras no HPFRC.

1.3 Estruturação do trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo:

- Capítulo 1: retrata o âmbito e os objetivos do trabalho.
- Capítulo 2: apresenta os aspectos característicos de compósitos cimentícios de elevado desempenho, com destaque para a composição, o comportamento mecânico e as características, além da orientação das fibras.
- Capítulo 3: disserta sobre procedimento experimental realizado onde se refere aos tipos de ensaios realizados e as matérias-primas utilizadas.
- Capítulo 4: são apresentados e discutidos os resultados obtidos.
- Capítulo 5: são apresentadas as conclusões desta dissertação.

2 Compósito Cimentício de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras

Define-se por material compósito o resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos em suas propriedades. Trata-se de uma classe de meio heterogêneo, cujo objetivo é a obtenção de um material que, combinando as características de seus materiais primários de maneira racional, apresente um melhor desempenho estrutural, sendo ele melhor do que estes constituintes primários em separado, sob condições especificas de utilização (GÒIS, 2010).

De acordo com Figueiredo (2011), um compósito cimentício é aquele que além da utilização dos materiais convencionais do concreto armado, ainda leva por adição ou substituição o emprego de fibras quer sejam elas naturais, poliméricas ou metálicas. Portanto, a estrutura que se visa obter com este novo material, deverá apresentar características homogêneas ao ser analisado macroscopicamente. Esta nova composição no âmbito dos materiais cimentícios tem como principais aspectos o aumento da rigidez, quando utilizadas fibras de alto módulo de elasticidade (exemplos, fibras de aço e aramida), ductilidade, bem como da resistência mecânica.

É importante destacar que, para o caso de compósitos cimentícios, os dois principais componentes são: as fibras e a matriz. Dentre as classes de compósitos reforçados com fibra, o HPFRC em particular pertence aqueles, os quais apresentam um comportamento *strainhardening*, que exibe um aumento de capacidade de carga/carregamento após a ocorrência da fissuração. Pertencente a classe dos compósitos de elevado desempenho reforçado com fibras (*Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*, HPFRC), o UHPFRC diferencia-se pelo fato de a matriz apresentar uma maior compacidade e, portanto, uma maior resistência aos esforços aplicados.

Normalmente as fibras estão dispostas aleatoriamente no compósito fazendo com que este apresente um comportamento isotrópico. A não uniformidade da disposição das fibras faz com que a resistência do compósito apresente variações em função da direção do carregamento. Cabe destacar a importância, no comportamento estrutural, da distribuição e da orientação das fibras, uma vez que o direcionamento delas na direção das tensões principais aumenta consideravelmente a resistência (RIBEIRO, 2012).

2.1 Matriz de elevado desempenho

No que concerne a matriz, a mesma abordagem pode ser estendida para concretos reforçados com fibras em comparação com concretos convencionais. Isto facilita o entendimento da Figura 2.1, que ilustra a composição típica de um concreto convencional e um compósito de HPFRC, as proporções expressas são referentes a frações volumétricas. Observase que, se mantendo o volume de ar nas duas composições, é possível identificar que em uma matriz da classe HPFRC, a fração correspondente a "pasta" é superior cerca de 2.8 vezes quando comparado com compósitos ou concretos convencionais.

O proporcionamento das frações constituintes para concretos e compósitos de elevado a ultraelevado desempenho é obtido através do conceito de empacotamento de partículas. De acordo com Naaman (2003), a elevada densidade de empacotamento, graças à utilização de grãos finos da matriz, muitas vezes com dimensão muito menores que as partículas de cimento, permite melhorar o arranjo e o preenchimento de quase todos os espaços, reduzindo a demanda de água necessária para permitir a movimentação das partículas e que não será utilizada para ganho de resistência do material.

Um material com densidade de empacotamento teórica máxima possuiria ausência de vazios e, consequentemente, menor porosidade, e maior seria sua resistência. Teoricamente esta condição poderia ser alcançada. Porém devido à irregularidade na morfologia (o formato das partículas não é perfeitamente esférico) e na distribuição granulométrica, torna-se muito difícil reproduzir o máximo empacotamento teórico para misturas granulares em materiais cimentícios. Mesmo assim, é possível aumentar a densidade de empacotamento do concreto para melhorar sua qualidade (TEIXEIRA e CORDON, 2015).

Féret em 1892, publicou o primeiro estudo sobre o empacotamento de partículas em materiais cimentícios. Desde então, foram apresentados modelos de distribuições granulométricas que proporcionariam o máximo empacotamento de partículas e poderiam otimizar misturas granulares em materiais cimentícios compostos. Myhre e Hundere (1996) indicam os modelos de Furnas (2004) e Andreassen & Andersen (1930) como clássicos. O Modelo de Furnas (Equação 2.1) possui abordagem discreta, ou seja, considera as partículas individualmente, e o Modelo de Andreassen (Equação 2.2) aborda as partículas como uma distribuição contínua:

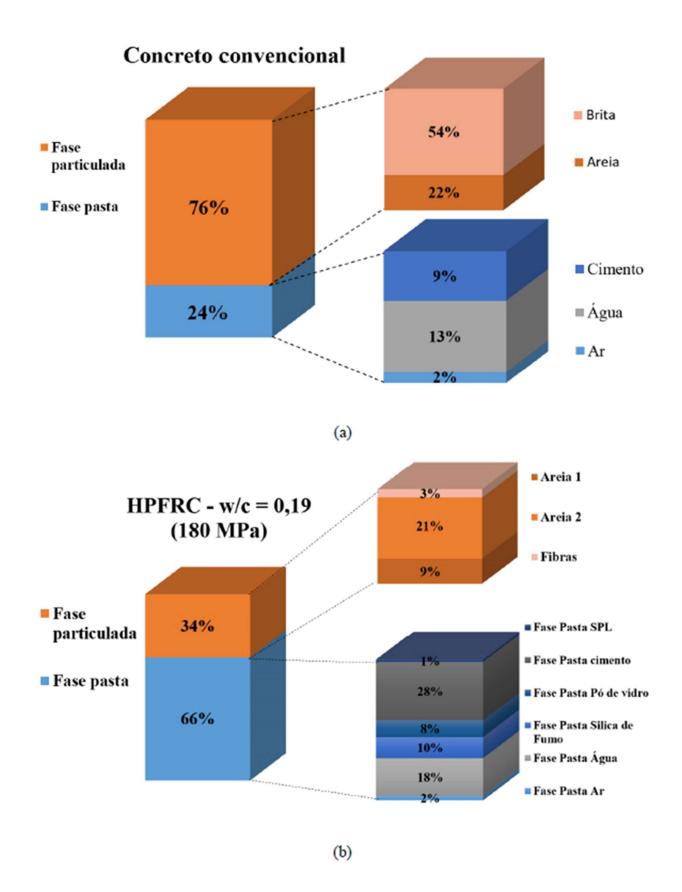


Figura 2.1: Exemplo das proporções em frações volumétricas na mistura de um (a) concreto convencional e de um (b) HPFRC. (Adaptado de RIBEIRO, 2012).

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right)$$
 (2.1)

e

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D}{D_L}\right)^q, \tag{2.2}$$

sendo:

CPFT a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D.

D_L o diâmetro da maior partícula.

D_S o diâmetro da menor partícula.

D o diâmetro da partícula de análise.

q o coeficiente de distribuição.

O Modelo de Andreassen considera que partículas infinitamente pequenas estejam disponíveis para mistura, o que não representa de fato a realidade. Buscando corrigir este fato, Funk e Dinger (1982) desenvolveram um novo modelo (Equação 2.3), também conhecido como Modelo de Alfred, um aperfeiçoamento dos modelos anteriores, onde o diâmetro da menor partícula da mistura é considerado. Sendo assim, quando o tamanho da menor partícula da mistura tende a zero, o Modelo de Alfred aproxima-se do de Andreassen:

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right)$$
 (2.3)

Cabe ainda destacar que a elevada resistência e durabilidade do HPFRC provém de outras características da composição. A reduzida relação água-ligantes existente na mistura contida na Figura 2.1, cerca de 0.19, é uma característica que minimiza os poros capilares sendo que praticamente toda a água é usada para hidratação do cimento tornando a amostra mais densa e forte. O baixo teor de água na mistura só é possível graças a adição de um aditivo modificador tensoativo, conhecido como superplastificante.

2.2 Fibras

Fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a maior dimensão da seção transversal (FIGUEIREDO, 2011). Diversos tipos de fibras podem ser incorporados a matrizes cimentícias, dependendo para isso das propriedades as quais se deseja

melhorar: resistência à tração, tenacidade, ductilidade, dentre outras. As fibras podem ser subdivididas em classes, quanto ao material constituinte:

- Poliméricas (polipropileno, polietileno e poliéster).
- Metálicas normalmente de aço.
- Vegetais/naturais (coco, sisal, piaçava e celulose).
- Minerais (carbono, amianto e vidro).

Elas ainda podem ser classificadas e subdivididas em dois grupos: microfibras chamadas de fibras curtas e as macrofibras. As microfibras ou fibras curtas, normalmente, são aquelas com diamentro entre 10 a 30 μm e comprimento entre 3 e 18 mm. O principal motivo de sua utilização é o controle de retração e fissuração de matrizes cimentícias na fase plástica. As fibras de vidro, por possuirem alto modulo de elasticidade (72 GPa), quando comparada ao concreto comum, podem ser utilizadas para diminuir os efeitos da retração de concreto na fase endurecida (SALVADOR, 2013).

As macrofibras possuem diâmetro maior que 0,30 mm e comprimento que varia entre 25 e 60 mm. Disponíveis comercialmente, desde a década de 90, e fabricadas a partir de diversos materiais, entre eles o aço, são indicadas para conferir resistência residual (pós-fissuração) ao concreto (aumento da capacidade de absorção de energia após o rompimento da matriz). A Figura 2.2 mostra alguns tipos de fibras.

Segundo Naaman (2003), para obter o melhor desempenho e eficiência nas matrizes de concreto reforçado com fibras, estas devem ter as seguintes propriedades:

- A resistência à tração deve ser maior que a do concreto (duas a quatro ordens de grandeza).
- A tensão de aderência (τ) à matriz de concreto deve ser, preferencialmente, igual ou superior do que a resistência à tração da matriz.
- O módulo de elasticidade significativamente maior do que a da matriz de concreto.

As fibras podem ser caracterizadas conforme as suas propriedades físicas e químicas, como densidade, rugosidade superficial, reatividade com o meio cimentício e resistência a altas temperaturas. A Figura 2.3 mostra uma representação esquemática das características das fibras.



Figura 2.2: Exemplo dos tipos de fibras para uso em compósitos.

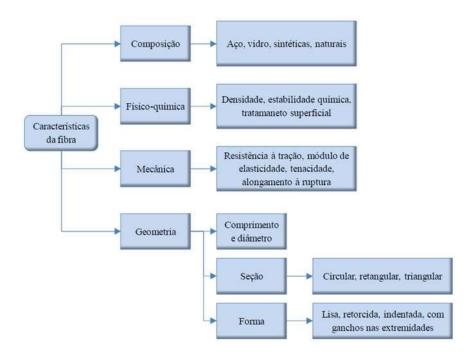


Figura 2.3: Propriedades de interesse das fibras para utilização em matrizes cimentícia (Adaptado de NAAMAM, 2003).

Um aspecto relevante da fibra é o seu módulo de elasticidade. A Figura 2.4 ilustra essa característica sobre o comportamento final do compósito. Nele existe uma matriz hipotética reforçada com três tipos de fibras, uma de baixo módulo de elasticidade (E) e duas de alto módulo, sendo uma de baixa e outra de alta resistência mecânica. Todas as fases deste compósito hipotético foram consideradas como de comportamento elástico perfeito. A curva de tensão por deformação da matriz está representada pela linha O-A, enquanto as linhas O-B e O-C representam o trabalho elástico das fibras de alto modulo com alta e baixa resistência, respectivamente. O comportamento da fibra de baixo módulo se encontra representado pela linha O-D. Considerando inicialmente, que as fibras estão perfeitamente embutidas na matriz e há uma aderência perfeita entre ambas, o compósito quando for submetido a uma tensão de tração irá se deformar com diferentes níveis de tensão para cada uma das fases. No momento em que a matriz, que está sendo carregada, chega próximo a sua tensão de ruptura (ponto A) o nível de tensão atingido pela fibra de baixo módulo (ponto D) é bem mais baixo que o da matriz. Assim, quando a matriz se rompe, surgindo uma fissura, a fibra de baixo módulo apresenta uma tensão mais baixa que a matriz nesse nível de deformação. A escolha do tipo de fibra a ser utilizada na matriz do compósito pode ser feita conforme as suas propriedades mecânicas, à exemplo, resistência a tração e o módulo de elasticidade.

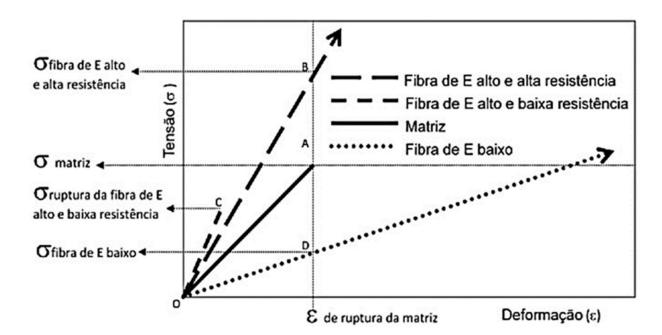


Figura 2.4: Diagrama de tensão deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2011).

2.2.1 Fibras de aço

Nesta seção, serão discutidas as características das fibras curtas de aço, as quais foram as utilizadas neste trabalho. As fibras de aço que possuem alta resistência e alto modulo de elasticidade, atuam como um reforço do concreto do concreto endurecido, podendo ser empregadas como armadura parcial ou até substituir a armadura convencional em algumas aplicações. Outras fibras de maior capacidade resistente, como é o caso das fibras de carbono, acabam por não serem utilizadas como reforço da matriz de concreto devido ao seu elevado custo. Outra vantagem das fibras de aço é que já contam com norma de especificação no Brasil, definindo as exigências que garantem sua capacidade de atuar como reforço do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo Bentur e Mindess (2007) e Arif (2014), o emprego da fibra de aço no reforço do concreto já se confirmou como uma tecnologia eficiente, alternado o processo de propagação das fissuras. As fibras atuam como pontes de transferência de tensões de áreas fissuradas para áreas menos solicitadas e, com isso, há um aumento na absorção de energia do compósito, fator que contribui para o aumento da tenacidade do material. Segundo Johnston (2001), por se mostrarem mais eficazes, econômicas e de fácil mistura à matriz, as fibras de aço são as mais utilizadas em reforços de concreto e podem ser obtidas por meio de diferentes processos de fabricação e vários tipos de seção transversal. Normalmente, as fibras de aço são comercializadas em elementos isolados (soltos) ou em forma de pentes, isto é, coladas umas às outras, embaladas em sacos.

Atualmente, a maioria das fibras de aço utilizada possui ondulações nas extremidades (fibras com ancoragem em gancho) ou ao longo do seu comprimento (fibras onduladas). As ondulações e os ganchos têm finalidade de melhorar o papel da fibra quanto a aderência e ao deslizamento, por meio da ancoragem mecânica (ARIF, 2014; NAAMAN, 2003; BENTUR E MINDESS, 1990; HANNANT, 1978). A Figura 2.5 ilustra os tipos comercialmente encontrados para aplicação em concreto, destacando a fibra de superfície lisa arredondada, na variação curta, que foi a utilizada nesta dissertação.

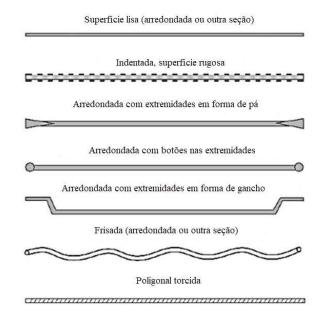


Figura 2.5: Tipos de Fibras (Adaptado de NAAMAN, 2003).

Segundo Barros (2005) e Naaman (2003), as características da superfície e o fator de forma, chamado também de razão de aspecto, são parâmetros geométricos muito importantes para a capacidade de reforço e a interação entre fibra e matriz. O fator de forma é definido como razão entre o comprimento da fibra e seu diâmetro.

A Figura 2.6 mostra vários tipos de fibras de aço com diferentes tamanhos e formas. Devido à variação dos materiais e dos processos de fabricação, as propriedades mecânicas, como a resistência à tração e o grau de ancoragem mecânica, diferem consideravelmente entre cada tipo de fibra.

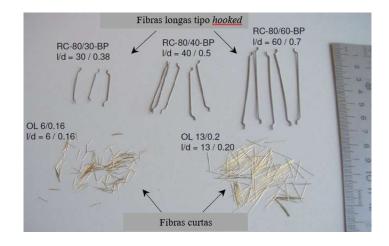


Figura 2.6: Diferentes tipos de fibras com as dimensões correspondentes; l/d (comprimento das fibras (mm)/ diâmetro das fibras (mm)) (Adaptado de RIBEIRO, 2012).

Segundo Figueiredo (2011), uma das principais preocupações observada na elaboração da especificação das fibras de aço para concreto, quando do advento da formulação da norma brasileira, foi a de evitar uma variação exagerada de desempenho do concreto reforçado com fibra provocada por fatores inerentes as fibras como por exemplo, a variabilidade do fator de forma da fibra.

A ABNT NBR 15530 (2007) indica três tipos básicos de fibras em função de sua forma geométrica:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades.
- Tipo C: fibra de aço corrugada.
- Tipo R: fibra de aço reta.

Ainda segundo a mesma norma, existem três classes previstas para fibras de aço associadas ao tipo de aço que foi utilizado na fabricação:

- Classe I: Fibra oriunda de arame trefilado a frio.
- Classe II: Fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio.
- Classe III: Fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

A Figura 2.7 apresenta as diferentes classes de fibras de aço. Por ocorrência das pequenas dimensões das fibras de aço, encontra-se grande dificuldade para normalizar a sua resistência à tração. Assim, a norma surgiu para determinar sua resistência através da matéria prima das fibras (FIGUEIREDO, 2011). A ABNT NBR 15530 (2007) regulou dois fatores principais que definem a fibra de aço; a resistência a tração do aço utilizado na sua produção e a geometria. A resistência à tração do aço que deu origem à fibra é mais significativa quão maior for a resistência do concreto. A definição de resistência mínima do aço que se apresenta em virtude da classe da fibra analisada como mostra a Tabela 2-1. De acordo com Figueiredo (2011), a determinação da resistência mínima de aço de classe I e III é realizada conforme a norma ABNT NBR 6207 (2007) – Arames de aço: Ensaio de tração e de classe II e a norma ASTM A370 (2010) – Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

Tipo	Classe de fibra	Geometria
A	I	1
A	п	T
	I	
C	п	***************************************
	Ш	Seção A-A
D	I	
R	II	* <u></u>

Figura 2.7: Classes de fibras de aço associadas ao tipo de aço utilizado na fabricação (FIGUEIREDO, 2011; ARIF, 2014).

Tabela 2-1: Nível de resistência mínima do aço e respectiva classe da fibra de acordo com a (ABNT NBR 15530 (2007); FIGUEIREDO, 2011).

Fibra	Limite de resistência à tração*
AI	1000
A II	500
CI	800
C II	500
C III	800
RI	1000
R II	500
*E + 1 + : ~ 1 C:+	1.0 1 1 1 6 1

^{*}Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final

2.3 Interação fibra - matriz

O desempenho de compósitos reforçados com fibras, depende em grande parte da ligação entre a fibra e a matriz de concreto. Também denominada de zona de transição da interface (ZTI), é a região responsável por determinar uma série de propriedades de sistemas multifásicos. Bentur e Mindess (2007) identificaram que a ZTI no compósito é rica em Ca(OH)₂ (hidróxido de cálcio), conhecida também por Portlandita. Geralmente, em contato direto com a superfície da fibra, a ZTI possui elevada porosidade em razão desta maior concentração de cristais de hidróxido de cálcio, que acabam por depositar-se em grandes cavidades. Como esse composto apresenta menor resistência mecânica que os cristais de C-S-H, a ZTI é a região limitante da resistência do compósito. A interface é, geralmente, constituída por duas camadas, como se segue:

- Filme duplex com uma espessura de 1μm, sendo subdivida em outras duas zonas (cristais de CH e gel C-S-H).
- Zona de interface com uma espessura estimada entre 10 40 μm, contendo gel C-S-H,
 etringita (C-A-S-H) e grandes cristais de CH com diversas orientações.

Uma representação esquemática da ZTI conforme Löfgren (2004) é apresentada na Figura 2.8.

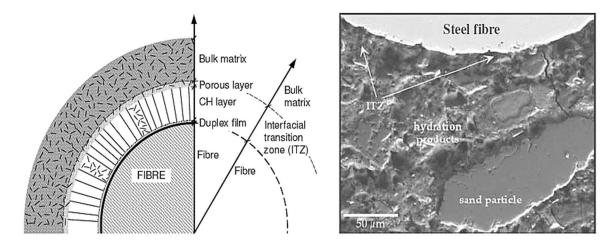


Figura 2.8: Interface de aderência fibra-matriz (LÖFGREN, 2004).

De acordo com Bentur e Mindess (2007) há dois principais mecanismos de interação entre a matriz e a fibra, a aderência química e a física, e o atrito e a ancoragem mecânica induzida por deformação na superfície da fibra. Assim como já identificado por Ferrara *et al.* (2008), concluiu-se que o desempenho à tração do compósito é fortemente influenciado pela orientação das fibras e a sua dispersão, assim como pelo processo de fabricação do próprio compósito. Os autores relatam ainda que a ligação por aderência ou por atrito é significativa somente em compósitos com fibras de alta área superfícial (microfibras, com diâmetro aproximado inferior a 10 μm) ou em matrizes com porosidade muito baixa (fator água/ligantes de cerca de 0,30), que são o enfoque principal deste trabalho.

A forma mais comum de quantificar a energia de ligação entre a fibra e a matriz é pela realização de ensaios de arrancamento (*single pull-out*). A partir desse teste, pode ser previsto o comportamento pós-fissuração do compósito e o mecanismo de ligação entre a fibra e a matriz pode ser analisado (BENTUR e MINDESS, 2007; SALVADOR, 2013).

Em compósitos cimentícios que podem ser entendidos como matrizes frágeis, os processos de transferência de tensões são diferentes nas fases pré e pós-fissuração. A Figura 2.9 ilustra esta interação. Na etapa de pré-fissuração, a aderência desenvolvida na interface distribui o carregamento externo entre ambas, sendo ela predominantemente elástica e os deslocamentos entre a fibra e a matriz na interface são geometricamente compatíveis. Devido à diferença de rigidez entre as fibras e a matriz, aparecem tensões de cisalhamento elásticas ao longo da superfície de contato, que auxiliam na transferência de parte da força aplicada nas fibras (BENTUR e MINDESS, 2007; SALVADOR, 2013; ARIF, 2014).

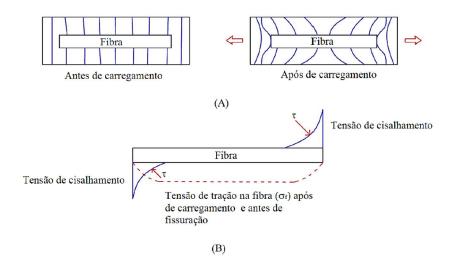


Figura 2.9: (A) Esquema de deformação ao longo da interface fibra-matriz e (B) distribuição de cisalhamento (ARIF, 2014).

Essa transição é um processo gradual, em que ambos os mecanismos de transferência de tensões podem ocorrer, dependendo da energia da ligação por aderência entre a fibra e a matriz e a resistência à tração da matriz. Em matrizes da alta resistência a tração, a quebra de ligação fibra-matriz pode ocorrer antes da formação de fissuras, quando a tensão elástica excede a energia de ligação por aderência (BENTUR; MINDESS, 2007; SALVADOR 2013).

A diferença principal entre a transferência de tensões na fase pré ou pós-fissuração é que em matrizes não fissuradas a máxima tensão de cisalhamento na interface ocorre nas extremidades da fibra, enquanto em matrizes fissuradas essa tensão é máxima no ponto em que a fibra entra na matriz. Caso a ligação fibra-matriz já tenha sido quebrada, a tensão de cisalhamento será elástica na região afastada da fissura e de atrito nas regiões próximas da fissura (BENTUR e MINDESS, 2007; PASA, 2007; SALVADOR 2013). A Figura 2.10 representa a distribuição de tensões na interface fibra-matriz.

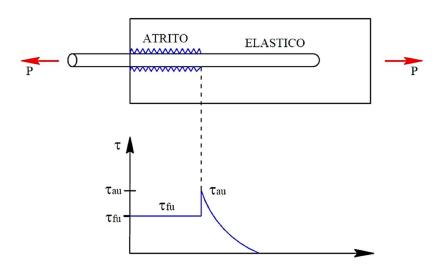


Figura 2.10: Distribuição de tensões na interface fibra-matriz (BENTUR; MINDESS, 2007; PASA, 2007).

A interação fibra-matriz pode ser melhorada através da adição de fumo de sílica, microsílica, metacaulim, escórias de alto forno ou mesmo alterando o conteúdo em agregado fino contribuindo, desta forma, para uma melhora no agrupamento entre das diversas granulometrias e inclusões, contribuindo para a compacidade da mistura (CHAN; CHU, 2004; IGARASHI *et al.*, 1996). A melhoria da ligação entre fibra e matriz pode ser alcançada através de duas formas: atuando sobre a seção, forma e superfície da fibra ou, pelo contrário, modificando a matriz cimentícia (IGARASHI *et al.*, 1996). Desta forma, a adição de fumo de sílica ou microsílica ou outro microfiller contribui para o aumento da aderência e resistência ao

arrancamento da fibra (*pullout*), consistindo num mecanismo de reforço interfacial (CHAN; CHU, 2004; FERREIRA, 2008). Neste trabalho, serão tratadas as adições minerais reagentes que tem por objetivo melhorar a compacidade e o desenvolvimento das propriedades mecânicas do compósito, através da otimização das reações de hidratação pelas suas propriedades pozolânicas e ao mesmo tempo melhorando a aderência das fibras a matriz, uma vez que ocorre a diminuição da fragilidade da ZTI próxima a fibra.

A principal função das fibras se dá na fase pós-fissuração, na qual inibem a propagação das fissuras. As fibras podem proporcionar um elemento de resistência ao compósito, por meio da transferência de tensões através das fissuras, servindo como "ponte" e contribuindo para a manutenção da integridade do material, mesmo quando fissurado. Entretanto, sua função mais importante é conferir tenacidade ao material, por meio de mecanismos de absorção de energia relacionados a quebra da sua ligação com a matriz e ao seu mecanismo de arrancamento (BENTUR; MINDESS, 2007; SALVADOR, 2013). A Figura 2.11 ilustra o esquema do mecanismo de transferência de tensões, o qual por consequência, ocasiona o aumento da capacidade resistente pós-fissuração.

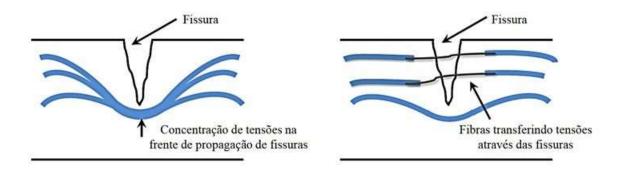


Figura 2.11: Funcionalidade da fibra no processo de fissuração da matriz (FIGUEIREDO; NUNES; TANESI, 2000).

Assim de maneira geral, num compósito reforçado com fibras, o processo de fissuração é acompanhado pelo surgimento de forças de impedimento causadas pelas tensões de aderência desenvolvidas na interface fibra-matriz. Em consequência, torna-se necessária uma maior energia para que ocorra a abertura e propagação das fissuras.

Figueiredo (1997, 2000, 2011), Salvador (2013) e Arif (2014), demonstraram as maneiras pelas quais as fibras absorvem energia e controlam a abertura das fissuras. A representação esquemática da Figura 2.12, ilustra como este mecanismo ocorre. Da esquerda para a direita, estão ilustrados o modo de ruptura da fibra, o arrancamento da fibra, a

transferência de tensões através da fibra pela ocorrência da fissura e a quebra da ligação na interface fibra-matriz, respectivamente. O efeito cumulativo de grande quantidade de fibras localizadas na região promove maior capacidade de absorção de energia, característica presente em compósitos fibrosos (SALVADOR, 2013). Nota-se que a propagação de fissuras ocorre na interface fibra-matriz, pois esta é a zona de menor resistência, pelas razões já esboçadas anteriormente.

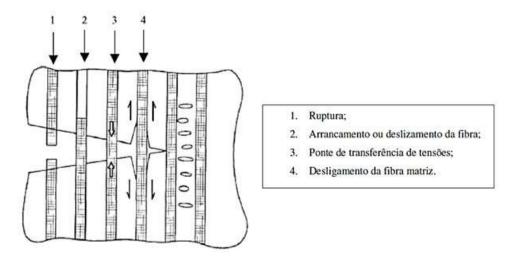


Figura 2.12: Fases da interação fibra-matriz-esforço (ARIF, 2014).

Segundo PASA (2007), quando o deslocamento das fibras ocorre após a fissuração, este é influenciado pelo desenvolvimento das fissuras, bem como a posição. Após a fissuração, o mecanismo dominante na transferência de tensões entre a matriz e as fibras passa a ser o atrito. Esta é uma tensão tangencial distribuída ao longo da interface do conjunto fibra-matriz. O aumento do carregamento provoca também o acréscimo das fissuras, de uma forma tal que provoca a separação da matriz em vários segmentos. A resposta do comportamento pós-pico do material reforçado com as fibras é muito suave, sendo que o compósito atinge níveis de deformação especificas maiores, até a ruptura (PASA, 2007; ARIF, 2014).

Na fissura podem ser identificadas três zonas (BENTUR; MINDESS, 2007; ARIF, 2014):

- Zona livre de tração, sendo que a matriz já é fissurada e as fibras se romperam.
- Zona de pontes de ligação, sendo a tensão transferida por atrito das fibras.

 Zona da matriz em processo, ocorre a microfissuração, mas com suficiente continuidade e ancoragem dos agregados, para que ocorra a transferência de tensão pela própria matriz.

O comportamento do HPFRC pode ser descrito como tendo três fases principais para o esforço de tração direta e dois para esforços de tração à flexão (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013). Como ilustra a Figura 2.13, tratando-se do comportamento do compósito em ensaio de tração, podem ser obtidas três respostas distintas:

- *Strain-softening*: há uma perda progressiva da capacidade resistente da matriz após sua ruptura. Esse fenômeno ocorre devido ao surgimento de apenas uma fissura, e normalmente para concretos que estejam utilizando volumes de fibras abaixo do volume crítico.
- Strain-hardening: o compósito apresenta um ganho de capacidade resistente após a fissuração da matriz. Esse fenômeno está associado a formação de múltiplas fissuras até a obtenção da tensão máxima de pós-fissuração. A partir desse ponto o compósito apresenta o comportamento de strain-softening, com abertura das fissuras já formadas durante a primeira fase no comportamento. Normalmente, este tipo de comportamento ocorre naqueles volumes de fibras acima do chamado volume crítico.
- Pseudo strain hardening: durante esta fase não há alterações microestruturais plásticas a acontecer, podendo ser chamada também pseudo plastic. Ao contrário, as deformações continuam a aumentar intensamente, resultando assim no aparecimento de novas pequenas fissuras (ou microfissuras) na matriz.

Para ensaios de flexão, o comportamento do compósito pode ser classificado de duas maneiras:

- Deflection-softening: após a ruptura da matriz, a carga resistida pelo compósito é menor do que a carga de pico obtida no ensaio. É acompanhado da abertura de apenas uma fissura.
- Deflection-hardening: após a ruptura da matriz, a um incremento de carga resistida pelo compósito maior que aquela necessária para romper a matriz. É acompanhado da formação de múltiplas fissuras, até atingir a carga máxima pós-fissuração. A partir desse ponto, o compósito apresenta o comportamento de defletion-softening, com a abertura das fissuras formadas.

Em ensaios de flexão, a deformação na seção não fissurada favorece a propagação estável das fissuras, induzindo o comportamento de *hardening*. Assim, se um compósito apresenta comportamento de *deflection-hardening* em um ensaio de flexão, não necessariamente apresentará o comportamento de *strain-hardening* em um ensaio de tração (NAAMAN, 2003; BENTUR; MINDESS, 2007; DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009; SALVADOR, 2013).

A ocorrência desses comportamentos depende prioritariamente do volume de fibras utilizado. Para volumes acima do volume crítico, obtém-se o comportamento de *hardening*. Contudo, volumes abaixo deste, conduzem a um comportamento *softening* (NAAMAN, 2003; BENTUR e MINDESS, 2007; DI PRISCO; PLIZZARI, VANDEWALLE, 2009; SALVADOR, 2013). A Figura 2.13 ilustra os comportamentos do compósito nos ensaios de tração e flexão, de acordo como o volume de fibras utilizado.

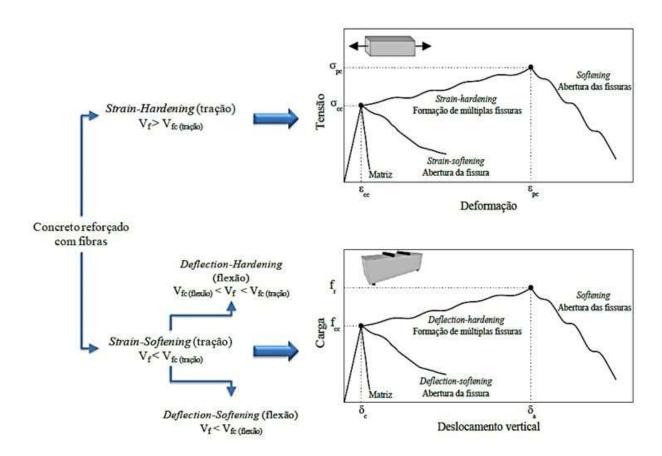


Figura 2.13: Conceitos de comportamento *softening* e *hardening* para classificação de compósitos cimentícios reforçado com fibras (Adaptado - NAAMAN, 2003).

Na ocorrência do comportamento *deflection-softening*, a carga resistida pelas fibras pode aumentar com o aumento da abertura da fissura, devido à maior resistência da fibra ao deslizamento, e é chamado de *slip-hardening* e ocorre principalmente devido à abrasão na superfície da fibra imposta pelo atrito com a matriz. Assim, fragmentos são liberados na superfície da fibra, aumentando a sua superfície de contato com a matriz e, portanto, aumentando sua resistência ao arrancamento (LIN; LI, 1997; SALVADOR, 2013). Outro motivo para a ocorrência desse fenômeno são as deformações impostas na fibra, no caso de fibras dispostas em feixe de fibras (exemplo, cordão) principalmente, pela força de torção que age nos fios. Com essa maior capacidade de carga, advinda da maior ancoragem na matriz ocorrem deformações plásticas que proporcionam uma reorganização de sua estrutura molecular, tornando-a mais resistente.

2.3.1 Tenacidade

A tenacidade (ou mais especificamente, tenacidade à fratura) é uma propriedade indicativa da resistência de um material a fraturar quando uma fissura está presente. A tenacidade à fratura é uma propriedade importante a ser observada nos materiais estruturais. No caso dos cimentícios, é através das fraturas que ocorre a entrada de agentes deteriorantes ao concreto e seus reforços. Outra maneira de definir a tenacidade é a capacidade de um material absorver energia e plasticamente deformar antes de fraturar. A tenacidade pode ser determinada a partir dos resultados de um ensaio de carga-deslocamento, calculada através da área sob a curva até o ponto de fratura.

O desempenho das fibras em um compósito pode ser avaliado por meio de sua tenacidade, pois a maior parte da energia até a ruptura provém da aderência entre a fibra e a matriz. Um dos principais motivos para incorporação das fibras no concreto é o acréscimo, na capacidade de absorção de energia da matriz.

Segundo Arif (2014) vários fatores influenciam na medida da tenacidade, entre estes destaca-se, o tipo de máquina de ensaio (*open loop* ou *closed loop*), tamanho e geometria do corpo-de-prova, taxa de carregamento, produção dos corpos-de-prova, configuração da carga (concentrada ou linear), tipo de controle de carga (força, deflexão, abertura da fissura), tipo de equipamento de medição (LVDT, *Clip Gage*).

Entre os ensaios normatizados disponíveis para medir a tenacidade destacam-se os apresentados na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Ensaio	para determinad	cão da tenacidade.	(Adaptado de	e ARIF, 2014).

Norma ou recomendação	Forma do corpo- de-prova	Dimensões do corpo-de- prova (mm)	Medida da tenacidade
ASTM C1550 (2010a)	Painel circular	D = 800 H =75	Relação entre a energia absorvida para valores solicitados da deflexão central
JSCE SF-4 (1984)	Prisma	B = 100 ou 150 H =100 ou 150 L =300 ou 450 C =380 ou 550	Energia absorvida até uma deflexão equivalente a L/150. Fator de tenacidade para uma deflexão equivalente a L/150
FIB (2010)	Prisma	B = 150 H = 150 L = 500 C = 550	Limite de proporcionalidade (LOP), Resistência residuais para valores de abertura de fissura de 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 mm
ASTM C1609 (2010b)	Prisma	B = 150 H = 150 L = 450 C = 500	Resistência de pico, resistências residuais para valores de deflexão de L/600 e L/150
EN 14651 (2007)	Prisma	B = 150 H = 150 C = 550	Resistências residuais para abertura de fissura de 0 a 0,5 (mm) de abertura com velocidade de 0,05 mm/min e 0,5 a 4 mm de a abertura de fissura de com velocidade de 0,2 mm/min

B = largura do corpo-de-prova; H = altura do corpo-de-prova; C = comprimento do corpo-de-prova;<math>L = vão livre entre cutelos e D = diâmetro do corpo-de-prova.

2.4 Fatores de influência no desempenho mecânico de compósitos reforçados com fibras

O desempenho mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras são intrinsecamente dependentes de vários fatores relacionados as fibras, entre os quais estão:

- Volume de fibras (V_f).
- Volume crítico (V_{crit}).
- Comprimento crítico.
- Características geométricas.
- Relação de aspecto ou fator de forma.
- Dispersão, distribuição e orientação.
- Resistência da matriz de concreto e tensão de aderência entre as fibras e a matriz.
- Relação entre dimensão máxima do agregado e comprimento da fibra.

Nesta seção, serão destacadas as questões relacionadas ao volume de fibras, volume crítico e orientação das fibras, parâmetros estes mais influentes neste trabalho.

2.4.1 Volume de fibras

Em princípio, quanto maior o teor de fibras, melhor será o desempenho do compósito aos esforços de tração, pois ocorrerá um aumento do módulo de elasticidade e da tensão máxima do compósito. O maior número de fibras que intercepta cada microfissura, evitará a propagação delas e contribuirá na eficiência do controle de fissuração da matriz. De acordo com Figueiredo (2011), quanto maior o teor de fibra, maior o número de filamentos que podem transferir tensões através das fissuras.

Contudo, uma falta de equilíbrio entre o volume de fibras e reologia da matriz, quer seja ela para o concreto auto adensável ou para o compósito de alto desempenho, pode conduzir a uma segregação dessas fibras em direção ao fundo do molde. Para os concretos auto adensáveis, que são convencionalmente vertidos no local de aplicação por meio de bombeamento, podem ocorrer a formação de aglomerados de fibras que dificultam o lançamento da mistura, por vezes, inviabilizando esse tipo de método devido ao entupimento dos tubos.

O efeito do teor de fibras é ilustrado na Figura 2.14, onde se observa que dependendo volumes de fibras, ocorrerão mudanças, principalmente, no comportamento plástico e na tenacidade do compósito, expressos pelo aumento da curva tensão – deformação, em razão da maior dificuldade para abertura de fissuras no estágio pós-fissuração.



Figura 2.14: Curvas de Tensão de Tração – Deformação; sem fibras, baixo e alto volume de fibras na matriz (Adaptado de BENTUR; MINDESS, 2007).

Conforme Figueiredo (2011), a definição conceitual de volume crítico, apesar de ser um conceito empírico, é a de que ele corresponde ao teor de fibras que mantem a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Ou seja, abaixo do volume crítico, quando ocorre a ruptura da matriz, ocorre necessariamente uma queda na carga que o material tem capacidade de suportar. Acima do volume crítico, o material continua aceitando incremento de carregamentos crescentes mesmo após a ruptura da matriz. Este conceito se encontra ilustrado na Figura 2.15 onde estão representadas as curvas de carga por deflexão em prismas de concretos com fibras rompidas à flexão. Existe um trecho elástico linear inicial corresponde ao estágio pré-fissurado da matriz do compósito e outro, similar a um patamar de escoamento, sendo se pode diferenciar o comportamento do concreto reforçado com teores abaixo, acima é igual ao volume crítico.

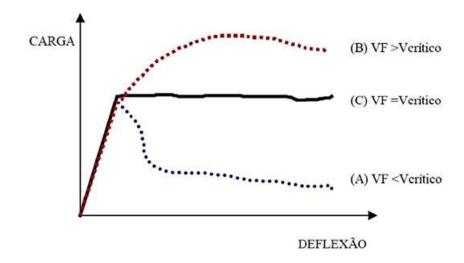


Figura 2.15: Compósito reforçado com fibras em volumes abaixo (A), acima (B), igual (C) ao volume crítico de fibras durantes o ensaio de tração na flexão (FIGUEIREDO, 2011).

2.4.2 Orientação e alinhamento magnético das fibras

A eficiência das fibras, na melhoraria das propriedades mecânicas, é significativamente influenciada por sua orientação em relação às fissuras formadas no concreto (WUEST *et al.*, 2009). Como discutido anteriormente, sua eficiência é maximizada quando as fibras estão alinhadas perpendicularmente às aberturas da fissura (TEJCHMAN; KOZICKI, 2010).

A orientação das fibras é geralmente caracterizada pelo fator de eficiência de orientação $(\eta_{ heta})$:

$$\eta_{\theta} = \sum a_{\theta} \cos^4(\theta), \tag{2.4}$$

em que a_{θ} é a proporção de fibras orientadas em um ângulo θ . Esse fator varia de 0 a 1, denotando, respectivamente, fibras paralelas e ortogonais ao corte transversal analisado (DE LARANJEIRA, 2010).

Alguns parâmetros que afetam a orientação das fibras em compósitos incluem as propriedades no estado fresco, método de mistura, vibração, direção do fluxo de escoamento e geometria (WILLE; TUE; PARRA-MONTESINOS, 2014). Existem diferentes técnicas para medir o alinhamento de fibras de aço em concreto, que podem ser classificados como métodos destrutivos e não destrutivos. Dentre eles podemos citar a contagem manual (GETTU *et al.*, 2005), a análise de imagem (LAPPA, 2007), a medição elétrica de impedância (FERRARA; PARK; SHAH, 2008), a resistividade elétrica (MARTINIE; LATASTE; ROUSSEL, 2015), tomografia computadorizada (HERRMANN, et al., 2016).

A orientação das fibras de aço, por meio do alinhamento magnético, em uma matriz cimentícia fresca, pode ser controlado quando um campo magnético externo é aplicado. Uma fibra de aço, imersa em um campo magnético uniforme, sofrerá um torque magnético fazendo com que a fibra se alinhe na mesma direção do campo externo. Esso processo é denominado de magnetização, ou seja, as fibras de aço (material ferromagnético) são magnetizadas devido à ação do campo. Assim sendo, as fibras podem ser representadas como ímãs. A fibra magnetizada possui um polo magnético sul e um polo magnético norte. Em um campo magnético, a fibra magnetizada fica sujeita à ação de um par de forças em cada um dos seus polos. As forças magnéticas que atuam sobre os polos possuem a mesma magnitude, mas sentidos opostos. A intensidade do campo magnético dever ser uniforme na região da matriz cimentícia para poder alinhar as fibras. Caso contrário, as fibras de aço podem ser atraídas e concentradas em uma região onde o campo magnético é mais intenso.

As forças que atuam sobre a fibras estão representadas na Figura 2.16. A força da gravidade (\mathbf{G}) e o empuxo (\mathbf{E}) estão atuando na direção na vertical. Para alinhar as fibras de aço na matriz cimentícia, a força magnética (\mathbf{f}_m) deve ser intensa o suficiente para superar a força de resistência viscosa do meio (\mathbf{f}_r). Tanto a força magnética quanto a força de resistência viscosa que atuam sobre a fibra de aço, são os pares de força que vão acionar e impedir a rotação da fibra de aço, respectivamente.

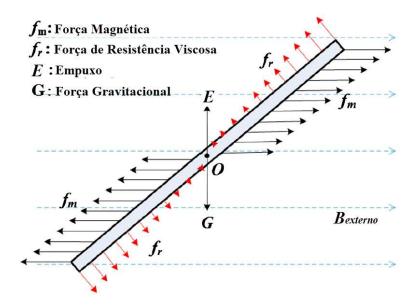


Figura 2.16: Forças atuando sobre uma fibra de aço imersa em uma matriz cimentícia e sob a ação de um campo magnético externo (Adaptado de MU *et al.*, 2016).

O mecanismo de alinhamento apresentado acima indica que não só as características geométricas da fibra e a intensidade do campo são importantes, mas a viscosidade do meio é parâmetro que tem influência sobre o processo de alinhamento.

A proposta do alinhamento de fibras metálicas em concreto, através de um campo magnético externo, remonta ao trabalho patenteado por Miller e Björklund (1977). Nesse trabalho, as fibras foram orientadas em concreto fresco movendo-se através de uma bobina eletromagnética retangular. Posteriormente, o método foi modificado e patenteado por Svedberg (2011), e aplicado no alinhamento das fibras em lajes e pavimentos. Mais recentemente, amostras de argamassa frescas com as fibras foram colocadas em uma bobina espiral e submetidas a um campo para otimizar a orientação das fibras (MICHELS; GAMS, 2016).

Mu *et al.* (2017) investigaram os efeitos do alinhamento magnético de fibras metálicas, em matrizes cimentícias de alto desempenho, utilizando volumes de 0,8%, 1,2% e 2,0% de fibras. A intensidade do campo magnético externo foi cerca de 1,5x10⁻⁴ T para promover o alinhamento ao longo da direção desejada. Os autores mostraram que a resistência a flexão amentou em 38,9%, 98,1% e 101,6% para os teores de fibra de aço em 0,8%, 1,2% e 2,0%, respectivamente. Ao realizar o alinhamento, observou-se uma melhora na utilização das fibras como reforço, tendo maior eficiência em comparação com as amostras contendo fibras distribuídas aleatoriamente. A Figura 2.17 ilustra o arranjo experimental utilizado pelos autores para o alinhamento das fibras.

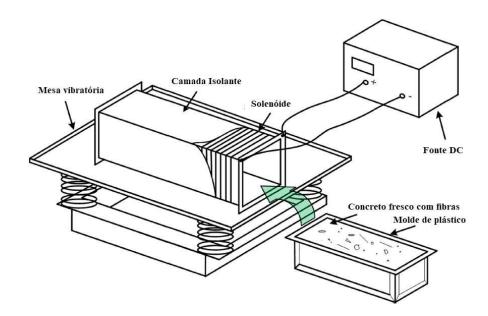


Figura 2.17: Aparato experimental para o alinhamento magnético de fibras em concreto (Adaptado de MU *et al.*, 2016).

Wijffels *et al.* (2017) estudaram o efeito da orientação das fibras de aço em vigas de concreto. Movendo o corpo-de-prova (cp) com uma velocidade constante, sobre um rolamento de apoio, a orientação das fibras ocorreu através da passagem do cp ao longo do eixo de uma bobina eletromagnética circular, como ilustra a Figura 2.18.



Figura 2.18: Sistema de alinhamento magnético proposto por Wijffels et al. (2017).

Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2017) investigaram o efeito da orientação das fibras no comportamento de tração de um UHPFRC. A estratégia foi alinhar as fibras de aço dentro da matriz a partir de um campo magnético externo. Recorrendo a uma técnica de análise de imagem, os autores puderam validar suas análises e quantificar a influência da orientação sobre a resistência à tração do UHPFRC. A Figura 2.19 ilustra o arranjo experimental utilizado pelos autores.

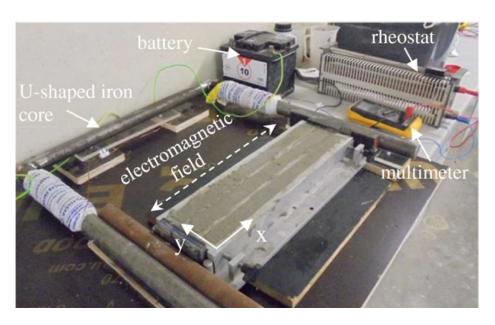


Figura 2.19: Aparato experimental para o alinhamento magnético de fibras (ABRISHAMBAF; PIMENTEL; NUNES, 2017).

3 Metodologia e Programa Experimental

Nesta seção, será detalhada a construção do alinhador, os materiais e os métodos de ensaio. Cabe destacar que o procedimento experimental foi composto por duas etapas. A primeira etapa consistiu na produção de amostras de pasta de cimento reforçadas com fibra. O intuito desta etapa foi averiguar o alinhamento das fibras, através das análises destrutivas e não-destrutivas em um composto simples, com diferentes razões de água/cimento (a/c) e correntes elétricas, para que fosse possível identificar os parâmetros de funcionamento do equipamento, que seriam aplicados para na fabricação dos compósitos. A segunda parte do procedimento experimental consistiu no desenvolvimento de um HPFRC e análise da influência da orientação das fibras sobre as propriedades mecânicas.

Dentro do âmbito desta pesquisa, foram realizados ensaios de ultrassom para a determinação da velocidade de propagação nas matrizes, resistividade elétrica, resistência à compressão e resistência à tração por flexão. Ensaios de raio-X e tomografia computadorizada também foram realizados para a verificar do alinhamento das fibras.

3.1 Construção do alinhador magnético

A proposta deste trabalho foi utilizar um circuito magnético para a geração do campo magnético. Esse modelo tem a vantagem de utilizar um núcleo ferromagnético com o objetivo de produzir um intenso campo magnético, a partir de uma bobina com um número reduzido de espiras. A redução permite que se utilize um fio de cobre com um diâmetro maior e, consequentemente, maiores correntes podem ser aplicadas sem aquecimento das bobinas. Entretanto, a desvantagem está em utilizar um corpo-de-prova com uma seção transversal menor.

Considere o arranjo da Figura 3.1, constituído basicamente de um núcleo (material ferromagnético com uma forma geométrica regular) e duas bobinas ou enrolamento (fio de cobre) em uma das partes desse núcleo.

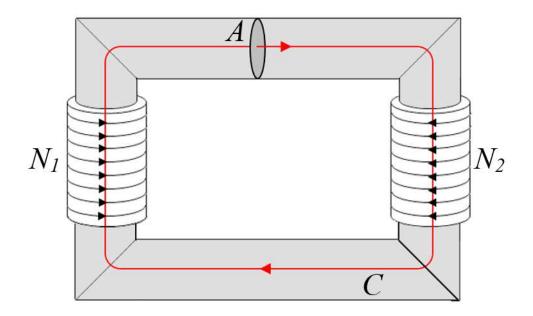


Figura 3.1: Núcleo magnético.

No sistema apresentado, quando uma corrente elétrica (I) começa a circular pela bobina, o campo \vec{H} produzido pela corrente nas espiras se estabelecerá no seu interior e se estenderá por todo o comprimento do núcleo.

Podemos calcular o campo H, utilizamos a Lei de Ampere para meios magnéticos:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I \,, \tag{3.1}$$

sendo \vec{H} o vetor campo produzido pela corrente, $d\vec{\ell}$ é o vetor elemento infinitesimal de comprimento e I a corrente livre. Para o núcleo da Figura 3.3, teremos:

$$H = \frac{\left(N_1 + N_2\right)I}{\ell} \,,\tag{3.2}$$

sendo N_1 e N_2 o número de espiras das bobinas 1 e 2 e ℓ o comprimento médio do núcleo. Como o núcleo possui uma permeabilidade magnética relativa μ_r , o módulo do campo magnético B será dado por:

$$B = \mu_0 \mu_r H \,, \tag{3.3}$$

sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$). Substituindo a Equação (3.2) na Equação (3.3) temos:

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r \left(N_1 + N_2 \right) I}{\ell} \,. \tag{3.4}$$

A partir da Equação (3.4) observamos que o campo magnético será função não somente do número de espiras e corrente, mas também da permeabilidade magnética relativa do material

do núcleo. Por exemplo, um núcleo de aço-silício possui uma permeabilidade magnética relativa de 4000μ. Isso permite obter campos magnéticos mais intensos.

A Equação (3.4) pode ser reescrita em termos do fluxo magnético (ϕ_M). Assumindo que o campo B está perpendicular à área de seção reta A_c e que seja uniforme em toda a área, o fluxo será dado por:

$$\phi_{\scriptscriptstyle M} = BA. \tag{3.5}$$

Substituindo a Equação (3.4) na Equação (3.5), o fluxo magnético será dado em função dos parâmetros geométricos e das características físicas do núcleo:

$$\phi_M = \frac{\mu_0 \mu_r \left(N_1 + N_2 \right) IA}{\ell}. \tag{3.6}$$

Entretanto, para que haja o alinhamento das fibras no interior da matriz cimentícia, é necessário introduzir um entreferro de ar, conforme ilustra a Figura 3.2

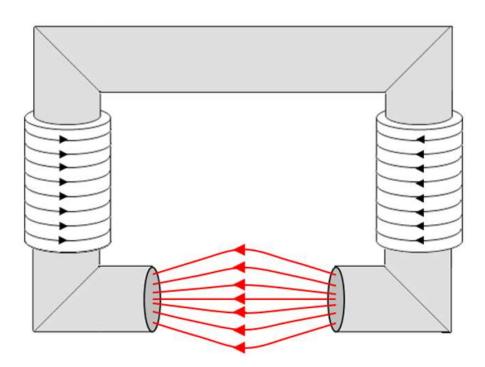


Figura 3.2: Núcleo magnético com entreferro de ar.

Quando o comprimento do entreferro for muito menor que as dimensões do núcleo, o fluxo magnético seguirá o caminho definido pelo núcleo e pelo entreferro. Entretanto, quando o comprimento do entreferro for muito grande, observa-se uma dispersão do fluxo magnético pelos lados do entreferro como ilustra a Figura 3.2.

O equipamento capaz de orientar as fibras, por intermédio de um campo magnético, foi desenvolvido pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade São Judas Tadeu e é constituído pelos seguintes componentes:

- Núcleo ferromagnético de aço-silício: direciona o fluxo magnético e, desta forma,
 controla o campo magnético. As dimensões do núcleo estão apresentadas na Figura 3.3.
- Fio condutor: proporciona a circulação da corrente. Foi utilizado um fio de cobre com um diâmetro de 2,5 mm (AWG 10). Cada bobina foi confeccionada com 126 espiras.
- Fontes de alimentação: geram corrente para circuito. Cada fonte de alimentação tem uma tensão de saída de 12 V e corrente máxima de 16 A.
- Reostatos: dispositivos utilizados para variar a resistência de um circuito e controlar a intensidade de corrente aplicada ao circuito. Os reostatos são do tipo toroidal, com resistência final de 10 Ω e potência de 1000 W.
- Multímetros: medem a intensidade da corrente nas bobinas. Os multímetros utilizados são da Minipa.

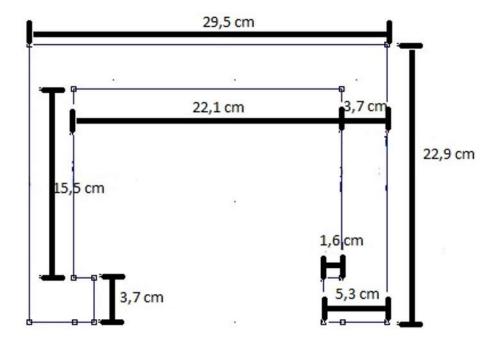


Figura 3.3:Dimensões do núcleo.

Na Figura 3.4 é possível observar a forma real do núcleo e as bobinas. Foram utilizadas duas bobinas para garantir um fluxo magnético mais intenso e uniforme em todo o núcleo.

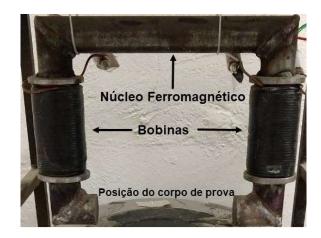


Figura 3.4: Detalhes do núcleo ferromagnético utilizado na construção do alinhador.

O aparato experimental completo utilizado para a orientação das fibras e a identificação dos componentes anteriormente descritos, é ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Constituição do equipamento utilizado para a orientação das fibras.

Com o alinhador magnético posicionado acima da mesa vibratória é possível executar a vibração das amostras ao mesmo tempo em que se aplica o campo magnético externo.

3.2 Simulação e validação do equipamento

Após o equipamento de orientação das fibras estar concluído, foi realizada uma simulação numérica para estimar o valor do campo magnético. Para isso, foi utilizado o programa de elementos finitos denominado FEMM (*Finite Element Method Magnetics*). O FEMM é um conjunto de programas para resolver problemas eletromagnéticos de baixa frequência em domínios planares e assimétricos. Atualmente, o programa aborda comportamentos magnetostáticos lineares e não-lineares, problemas magnéticos harmônicos lineares e não-lineares, problemas eletrostáticos lineares, e problemas de fluxo de calor no estado estacionário (MEEKER, 2018).

A Figura 3.6 mostra o resultado da simulação numérica para o equipamento. Os dados de entrada para a simulação são os parâmetros geométricos do núcleo (Figura 3.3), o valor da corrente em cada bobina (12 A) e o material do núcleo (aço-silício). É possível observar uma uniformidade do fluxo magnético no interior do núcleo magnético. Observa-se uma dispersão das linhas de campo, provocada pelo comprimento do entreferro. Contudo, é importante observar que tal condição será alterada ao se posicionar a amostra para que possa ser realizada o alinhamento das fibras.

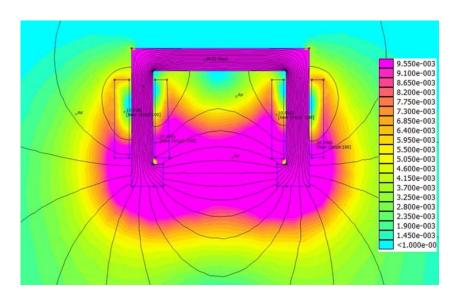


Figura 3.6: Resultado da simulação numérica. A escala de cores indica a magnitude do campo magnético em tesla (T).

Após a simulação, foi realizada uma mistura de gel com fibras de aço, as mesmas utilizadas para fabricação dos compósitos, com o objetivo de observar a orientação pretendida das fibras no interior da matriz. Para isso utilizou-se um molde de acrílico transparente (Figura 3.7 (a)) para que seja possível observar o efeito do campo magnético nas fibras. Na Figura 3.7 (b) é possível observar uma orientação privilegiada das fibras segundo a direção do campo magnético produzido pelo equipamento.

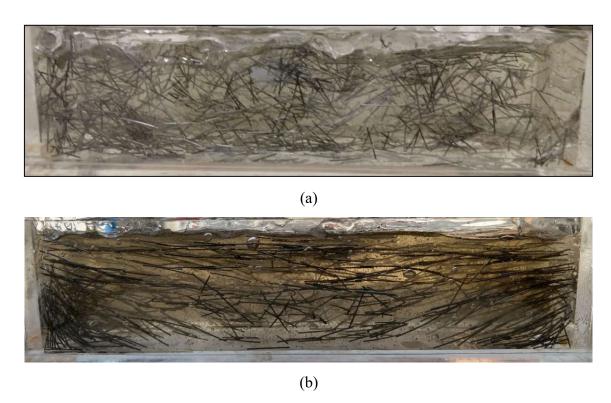


Figura 3.7: Fibras (a) desalinhadas e (b) alinhadas devido ao campo magnético.

3.3 Matérias-primas

Para fabricação dos compósitos foram utilizados os seguintes materiais: cimentos CPV-ARI, CPII-Z, microsílica, metacaulim, quartzos, aditivo superplastificante, água e fibras de aço.

Os materiais ligantes utilizados (cimento, microssílica e metacaulim) foram caracterizados através da sua massa específica e distribuição granulométrica. A distribuição granulométrica dos materiais mais grossos foi realizada através de peneiramento por peneiras padronizadas pela ABNT 7211 (2005). As quatro faixas granulométricas do quartzo foram caracterizadas através do seu diâmetro máximo, no qual o fabricante atesta que 95% da amostragem está contida nesta dimensão (1,2 mm; 0,60 mm; 0,30 mm e 0,15 mm). A distribuição granulométrica dos materiais finos foi determinada a partir de ensaios de

granulometria a laser realizados no Laboratório de Microestrutura do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3.3.1 Cimento

Para a primeira etapa experimental, pasta de cimento reforçada com fibras, foi utilizado o cimento CPII-Z, de massa específica 3,00 g/cm³. Para a segunda etapa experimental foi utilizado o CPV-ARI com massa específica 3,10 g/cm³. O cimento CPV-ARI foi o adotado para a fabricação dos compósitos, pois se trata de um cimento mais puro e de alta resistência inicial, uma vez que os ensaios de desempenho mecânico e das propriedades do compósito endurecido se deram aos 7 dias.

Para o cimento CPV-ARI foi realizada uma caracterização mais criteriosa, visando verificar suas propriedades. A Figura 3.8 mostra as imagens obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Devido ao processo de moagem do cimento, as suas partículas apresentam dimensões e formas muito diversas. Este aspecto pode ser observado nas imagens. O Tabela 3-1 informa os valores da caracterização por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS). Nota-se que os valores quantitativos estão condizentes com a tipologia de um cimento CPV-ARI que possui baixas frações de outras adições e possui maior proporção de elementos encontrados em maior proporção no clínquer.

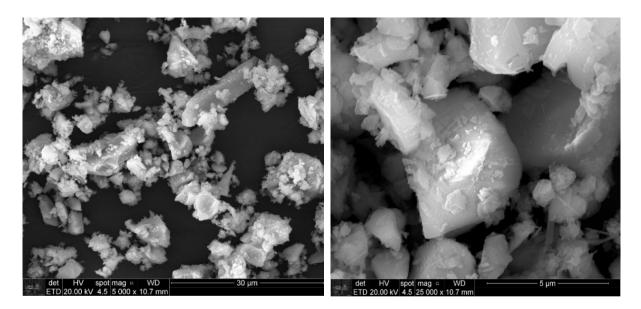


Figura 3.8: Imagens feitas por MEV do cimento CPV-ARI utilizado neste trabalho. A imagem à esquerda foi obtida com resolução de 30 μm enquanto que a imagem à direita foi obtida com resolução de 5 μm.

Elemento	Peso(%)	Atômico(%)	Erro(%)	Relação K	Z	A	F
С	6,06	11,71	14,35	0,0171	1,1268	0,2503	1,0000
О	36,12	52,38	10,9	0,0572	1,0811	0,1465	1,0000
Mg	2,01	1,91	9,89	0,0087	1,002	0,4321	1,0023
Al	8,43	7,25	6,67	0,0462	0,9654	0,5655	1,0032
Si	3,04	2,51	7,48	0,019	0,9871	0,63	1,0049
P	0,44	0,33	10,56	0,003	0,9486	0,718	1,0082
S	1	0,73	11,09	0,0079	0,9676	0,8058	1,0125
K	0,43	0,25	19,45	0,0039	0,917	0,9508	1,045
Ca	32,01	18,53	2,11	0,2935	0,9341	0,9723	1,0098
Ti	0,51	0,24	28,95	0,8472	0,8472	0,9019	1,0219
Fe	9,95	4,14	4,56	0,0828	0,8344	0,9745	1,0229

Tabela 3-1: Valores obtidos através da caracterização por EDS.

3.3.2 Microsílica

A Microsílica (SiO₂) é um subproduto da fabricação do silício metálico e das ligas de ferrosilício em fornos elétricos a temperaturas de aproximadamente 2000°C. Por se tratar de uma adição com propriedades pozolânicas, ela influencia as propriedades reológicas do concreto fresco e as propriedades mecânicas do concreto endurecido. A composição da matriz de HPFRC formulada neste trabalho, incorporou a Microsilica® 920U fornecida pela empresa Elkem, possuindo densidade específica de 2,20 g/cm³. As partículas apresentam uma forma esférica com dimensões de 50 à 150 vezes menores do que o cimento, sendo da ordem de 0,01 à 0,5μm, como pode ser observado através das imagens de MEV na Figura 3.9. Na Tabela 3-2 estão os elementos constituintes e na Tabela 3-3 estão as propriedades físico-químicas.

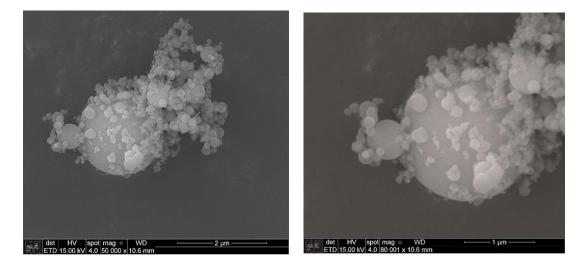


Figura 3.9: Partículas de microsílica observadas através do MEV.

Tabela 3-2: Elementos constituintes.

Componente	% em massa
SiO_2	97,5
С	0,5
Fe_2O_3	0,1
AL_2O_3	0,4
CaO	0,2
MgO	0,1
K ₂ O	0,3
Na ₂ O	0,1
P_2O_5	0,1
SO_3	0,1
Cl	0,1

Tabela 3-3: Propriedades físico-químicas da microsílica.

Propriedades	Resultado Médio
Perda ao fogo (750 °C)	0,6
Retenção peneira #325 (0,045 mm)	> 0,2
B.E.T.	$35 \text{ m}^2/\text{g}$
рН	6,0
Densidade	550 kg/m^3

3.3.3 Metacaulim

A metacaulim é uma adição com características semelhantes à microsílica, tendo, no entanto, partículas de dimensões maiores e forma muito distinta da microsílica. Para este trabalho, utilizou-se o metacaulim fornecido pela Metacaulim do Brasil, cuja densidade específica é 2,56 g/cm³. A Figura 3.10 mostra as imagens de MEV. Pela análise MEV pode ser identificada a superfície irregular do material, com elevada área superfícial. A Tabela 3-4 apresenta a caracterização por EDS e a Tabela 3-5 apresenta as especificações fornecidas pelo fabricante.

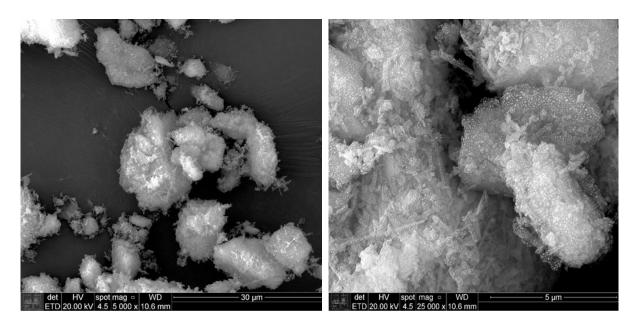


Figura 3.10: Partículas de Metacaulim observadas através do MEV.

Tabela 3-4: Valores do material obtidos na caracterização através do EDS

Elemento	Peso (%)	Atômico (%)	Erro (%)	Relação K	Z	A	F
С	19,07	27,31	12,71	0,0332	1,0632	0,164	1,0000
О	50,14	53,9	9,09	0,1401	1,0175	0,2746	1,0000
Sil	30,41	18,62	3,2	0,2335	0,9248	0,8292	1,0012
K	0,37	0,16	26,7	0,003	0,8571	0,9267	1,0123

Tabela 3-5: Propriedades químicas do metacaulim utilizado (Fonte: Metacaulim do Brasil)

Propriedades físico-químicas	Valores típicos	Valores limites
SiO_2	57 %	44 % a 65 %
Al_2O_3	34 %	32 % a 46 %
CaO+MgO	< 0,1 %	< 1,5 %
SO_3	< 0,1 %	< 1,0 %
Na ₂ O	< 0,1 %	< 0,5 %
Eq. Alcalino Na ₂ O	< 1,5 %	< 1,5 %
Fe ₂ O ₃	2 %	-
TiO ₂	1,5 %	-
Umidade	0,5 %	< 2,0 %
Perda ao fogo	3 %	< 4,0 %
Resíduo #325	6 %	< 10,0 %
Desempenho com cimento (7 dias)	115 %	> 105 %
Atividade pozolânica chapelle	880 mg Ca(OH) ₂ /g	> 750 mg Ca(OH) ₂ /g
Área específica BET	$230.000 \text{ cm}^2/\text{g}$	$150.000 \text{ cm}^2/\text{g}$
Massa específica	$2,56 \text{ kg/dm}^3$	-

3.3.4 Aditivo

O aditivo superplastificante ADIMENT PREMIUM foi utilizado para atingir a trabalhabilidade e fluidez desejada, para que fosse possível efetuar a aplicação do campo magnético e, consequente, alinhar as fibras, sem que ocorresse alterações significativas no tempo de pega ou nas propriedades da matriz. As características do aditivo, fornecidas pelo fabricante são:

• Formato: líquido

• Tipo: Policarboxilato

• pH (aproximado) de 7,5

• Densidade aproximada de 1,09 g/cm³

• Cor: rubro clara

• 30 % de teor de sólidos (Copolímero Policarboxílico)

3.3.5 Areia Quartzosa

Para elaboração deste trabalho foram utilizadas areias de quartzo fornecidas pela empresa Brasilminas, já fracionada nas peneiras #100 (0,15 mm), #50 (0,30 mm), #30 (0,60 mm) e #16 (1,20 mm). Após a definição da proporção de cada fração, foram misturadas gerando a curva granulométrica apresentada na Figura 3.11. Esta curva permanece constante para todos os traços dos compósitos ensaiados experimentalmente.

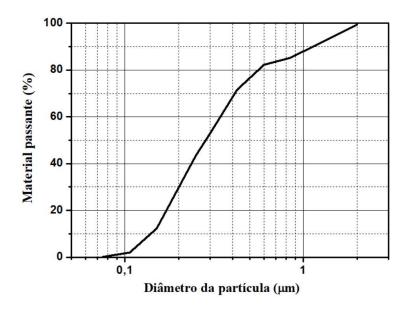


Figura 3.11: Curva granulométrica conjunta das areias quartzosas utilizadas.

3.3.6 Fibras de aço

As fibras utilizadas são da empresa ASTRA e suas características estão apresentadas na Tabela 3-6.

Fibra Metálica Astra - 12,5 mm Fator de Forma (l/D)25 Diâmetro do arame 0,50 mm 12,5 mm Comprimento Resistencia à tração do aço > 1100 MPa < 4%Deformação na ruptura Módulo de elasticidade 210.000 MPa Tolerâncias médias 5% Embalagens - Tonel 25 kg Tipo e classe ABNT NBR 15530:2007 R-I Massa especifica 7850 kg/m³

Tabela 3-6: Propriedades das microfibras utilizadas.

3.4 Desenvolvimento da matriz

A determinação da matriz de alto desempenho utilizada no trabalho, ocorreu através da análise de cinco composições distintas, obtidas através dos métodos de empacotamento, de Alfred, Andersen e Andreassen, usando os coeficientes de distribuição (q) 0,25; 0,37 e 0,42. Deste modo, a influência do empacotamento e dos coeficientes foi investigada nas propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido. As formulações foram refinadas através do software disponibilizado pela empresa Elkem, chamado EMMA (Elkem Materials Mixture Analyser, EMMA), e estão apresentadas na Tabela 3-7.

Os dados de entrada foram as caracterizações granulométricas, a massa específica dos materiais, no modelo de empacotamento a ser utilizado (Andreassen ou Alfred), o valor do diâmetro da maior e menor (no caso do modelo de Alfred) partícula da mistura e o coeficiente q. Como saída o programa fornece a curva granulométrica resultante do modelo teórico utilizado. A Figura 3.12 mostra um exemplo da curva obtida através do programa para o traço 2 (Andreassen).

Tabela 3-7: 7	Traços	desenvo	lvidos.
---------------	--------	---------	---------

Materiais	Alf	red	A	Andreassen		
Diâmetro máximo - 1,2 mm	Traço 1	Traço 2	Traço 1	Traço 2	Traço 3	
q (coeficiente de distribuição)	0,25	0,37	0,37	0,42	0,42	
Cimento (CPV-ARI)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Microsílica	0,551	0,547	0,587	0,430	0,430	
Metacaulim	0,050	0,110	0,113	0,110	0,100	
Quartzo 1,2 mm	0,840	0,833	0,739	0,330	1,013	
Quartzo 0,6 mm	0,930	1,126	0,800	0,450	0,800	
Quartzo 0,3 mm	0,860	1,237	0,760	0,690	0,693	
Quartzo 0,15 mm	0,753	1,210	0,587	0,730	0,693	
Aditivo - Adiment Premiun	0,035	0,035	0,043	0,043	0,035	
Consumo de cimento (kg/m³)	859,50	630,00	618,75	599,25	642,50	
Fator a/c	0,35	0,35	0,30	0,30	0,30	

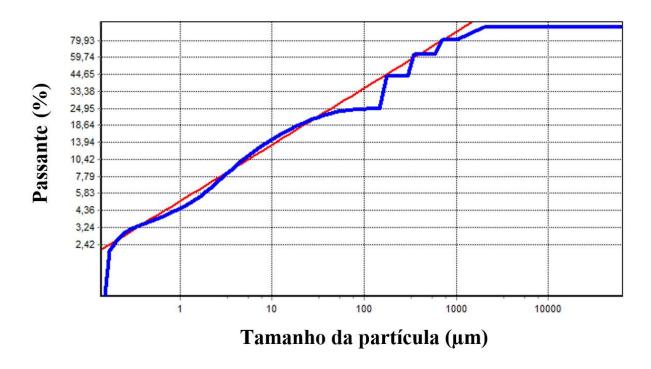


Figura 3.12: Curva granulométrica para o traço 2 (q = 0,42). A curva em vermelho representa o modelo de Andreassen e a curva azul representa a distribuição do material experimental.

Após o desenvolvimento dos traços, foi realizada uma verificação das propriedades mecânicas. Foram fabricados corpos-de-prova prismáticos, 160x40x40 mm. Inicialmente foram realizadas análises de resistência a tração por flexão e, em seguida, com as duas extremidades geradas, foram realizados de ensaios de resistência à compressão. A Tabela 3-8 apresenta os resultados do consumo de cimento e da resistência à compressão obtida para a idade de 7 dias. Para o desenvolvimento da matriz considerou-se o traço que apresentasse menor consumo de cimento e maior resistência desenvolvida, sendo este apresentado em destaque na Tabela 3-8. Importante destacar ainda que, para o coeficiente de empacotamento de 0,42 foram efetuadas duas configurações de mistura, na qual foi variada a proporção de finos e inertes, buscando obter uma maior empacotamento e melhora na fluidez.

3.5 Moldagem dos corpos-de-prova

3.5.1 Pasta de cimento reforçada com fibras

Para a fabricação da pasta de cimento reforçada com fibras, a mistura dos constituintes foi realizada em misturador mecânico para argamassa, denominado popularmente de "argamassadeira", dotada de duas velocidades. Os materiais foram inseridos na seguinte ordem:

- 1. Adição do cimento e água. Em seguida foram misturados durante 2 minutos e 30 segundos.
- 2. Adição das fibras metálicas, quando utilizadas, e misturadas em rápida velocidade por 40 segundos;
- 3. Descanso por um minuto dentro da cuba.

Uma vez executada a fase de mistura, foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 160x40x40 mm, para cada um dos traços destacados na Tabela 3-9. Em seguida, cada corpo-de-prova foi levado ao alinhador magnético. Os corpos-de-prova foram colocados sobre a mesa vibratória e posicionados no entreferro das bobinas, que já estavam calibradas na intensidade de corrente elétrica a ser utilizada. Importante destacar que para posicionamento das amostras, nem o alinhador magnético nem a mesa vibratória estavam ligados. Os equipamentos somente são ligados com os corpos-de-prova já posicionados,

Tabela 3-8: Análise preliminar dos resultados obtidos nos traços testes.

Méto coefic		Consumo de Cimento (kg/m³)	Corpo-de-prova	f _{ck} (7 d		
			A	71,18	72,96	
	T 1		В	72,25	68,10	
	Traço 1 $q = 0.25$	859,50	С	69,35	70,34	
	q = 0,23		Média	70,	70	
A 1fnod			Rendimento (kg/m³ - MPa-¹)	12,	16	
Alfred			A	65,26	67,32	
	Tropp 2		В	59,96	61,20	
	Traço 2 $q = 0.37$	630,00	С	68,38	67,30	
	q = 0.37		Média	64,90		
			Rendimento (kg/m³ - MPa-¹)	9,71		
	Traço 1 q = 0,37	618,75	A	71,10	72,52	
			В	70,35	69,23	
			С	72,96	68,98	
	q = 0,37		Média	70,	36	
			Rendimento (kg/m³ - MPa-¹)	8,73		
		599,25	A	85,14	89,10	
	Тиоло 2		В	80,38	83,23	
Adreassen	Traço 2 $q = 0.42$		С	78,25	80,75	
	q - 0,42		Média	82,81		
			Rendimento (kg/m³ - MPa-¹)	7,2	4	
			A	75,95	72,69	
	Traço 3		В	69,76	68,17	
	q = 0.42	642,50	С	71,35	73,10	
	q - 0,42		Média	71,	71,84	
			Rendimento (kg/m³ - MPa-¹)	8,94		

^{*}Ensaios executados nas duas metades provenientes dos ensaios de resistência à tração por flexão

Tabela 3-9: Traços utilizados.

Corrente Elétrica (A)	Relação a/c	Teor de Fibras (%)		(6)	
0	0,30	0	1,0	1,5	2,0
(Sem campo magnético)	0,35	0	1,0	1,5	2,0
(Sem campo magnetico)	0,37	0	1,0	1,5	2,0
	0,30	-	1,0	1,5	2,0
2	0,35	-	1,0	1,5	2,0
	0,37	-	1,0	1,5	2,0
	0,30	-	1,0	1,5	2,0
4	0,35	-	1,0	1,5	2,0
	0,37	-	1,0	1,5	2,0
	0,30	-	1,0	1,5	2,0
6	0,35	-	1,0	1,5	2,0
	0,37	-	1,0	1,5	2,0
	0,30	-	1,0	1,5	2,0
8	0,35	-	1,0	1,5	2,0
	0,37	-	1,0	1,5	2,0
	0,30	-	1,0	1,5	2,0
10	0,35	-	1,0	1,5	2,0
	0,37	-	1,0	1,5	2,0
	0,30	-	1,0	1,5	2,0
12	0,35	-	1,0	1,5	2,0
	0,37	-	1,0	1,5	2,0

seguindo-se a aplicação do campo magnético, simultaneamente com uma vibração por 40 segundos. Após esse período, interrompeu-se a vibração e a corrente elétrica (Tabela 3-9). Em seguida as amostras foram retiradas do alinhador e armazenadas em câmara úmida pelas primeiras 24 horas. Depois foram desmoldadas e mantidas em cura por 28 dias.

3.5.2 Compósito – HPFRC

A mistura dos constituintes do compósito obedeceu a seguinte ordem:

- 1. Mistura de todos os ligantes anidros por 1 minuto em velocidade lenta;
- 2. Adição de 2/3 da água e 2/3 do aditivo superplastificante, e mistura em velocidade rápida por 2 minutos e 30 segundos;
- Adição dos agregados (areias) durante 1 minuto em velocidade lenta e após mistura por 30 segundos em velocidade rápida;
- As fibras metálicas, quando utilizadas, foram adicionadas durante 1 minuto com o equipamento em velocidade lenta, e adicionados o restante da água e aditivo superplastificante;
- 5. Mistura final por 1 minuto em velocidade lenta e descanso por 1 minuto dentro da cuba.

Após a mistura, foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 160x40x40 mm, para cada um dos traços apresentados na

Tabela 3-10, além do consumo de cimento e outras características dos traços. O mesmo procedimento descrito anteriormente para a pasta foi aplicado aqui, porém depois de desmoldadas, as amostras foram colocadas em cura térmica, submersa com água saturada de cal, a temperatura de $(53,0\pm0,5)$ °C, durante sete dias. Após esse período foram realizados os ensaios de caracterização.

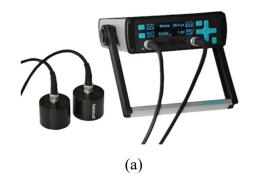
3.6 Caracterização físico-mecânica e análise de imagem

3.6.1 Caracterização física de ondas de ultrassom

O princípio do ensaio de ultrassom baseia-se na interação das ondas sonoras com a estrutura interna do material, uma vez que quando um sinal sonoro é emitido por uma fonte há transferência de energia mecânica para as partículas que constituem o meio material fazendo com que estas oscilem em torno da sua posição de equilíbrio.Neste trabalho, foi utilizado o equipamento de ultrassom, modelo Pundit Lab da empresa PROCEQ. Como pode ser observado Figura 3.13 (a), o equipamento de medição é composto por dois transdutores. Um dos transdutores produz e introduz a onda no interior do compósito (transmissor) e o outro detecta a chegada da onda (receptor). Na análise longitudinal, os transdutores foram posicionados nas faces de 40x40 mm, enquanto que na análise transversal, os transdutores ficaram posicionados no centro das faces de 160x40 mm. Figura 3.13 (b) ilustra um esquema do funcionamento do equipamento utilizado nas medições do tempo de propagação de onda.

Tabela 3-10: Traços do HPFRC.

Traços							
				Teor de	fibras (%)	
Materiais	Massa especifica (kg/m³)	Padrão	1,0	2,0	3,0	5,0	
Cimento	3100	599,25	593,25	587,26	581,27	569,28	
Metacaulim	2560	257,68	255,1	252,52	249,95	244,79	
Microsílica	2200	65,92	65,26	64,6	63,94	62,62	
Areia #100 (0,15 mm)	2640	437,45	433,07	428,7	424,32	415,57	
Areia #50 (0,30 mm)	2640	413,48	409,34	405,21	401,07	392,8	
Areia #30 (0,60 mm)	2640	269,65	266,95	264,26	261,56	256,17	
Areia #16 (1,20 mm)	2640	194,76	192,81	190,86	188,92	185,02	
Água	1000	179,77	177,97	176,18	174,38	170,78	
Fibra de aço	7850	0	78,5	157	235,5	392,5	
Aditivo	1205	25,77	25,51	25,25	24,99	24,48	
Espalhamento (mm)		390	340	321	365	385	



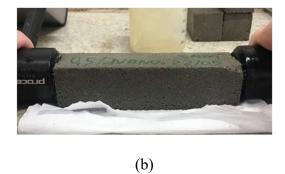


Figura 3.13: (a) Modelo do equipamento de ultrassom utilizado e em (b) um exemplo ilustrativo do modo de operação.

3.6.2 Resistência à compressão e à tração por flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão (a três pontos) e o ensaio de resistência à compressão foram realizados em uma prensa Kratos, com servo atuador com capacidade de 20 kN e a uma velocidade de 0,50 mm/min. Estes ensaios estão descritos na NBR 13279 (2005). A Figura 3.14 ilustra os dois ensaios.

A resistência à tração (R_f) na flexão é calculada segundo a equação:

$$R_f = \frac{1.5F_f L}{40^3},\tag{3.7}$$

em que:

 R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascals.

 F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons.

L é a distância entre os suportes, em milímetros.

Após a realização do ensaio à flexão, é possível a realização de ensaios de resistência à compressão nas duas metades resultantes. A resistência à compressão dos prismas (R_c) é calculada segundo a equação:

$$R_c = \frac{F_c}{1600},\tag{3.8}$$

em que:

 R_c é a resistência à compressão, em megapascals.

 F_c é a carga máxima aplicada, em newtons.





(b)

Figura 3.14: Ensaios de resistência à flexão (a) e à compressão axial (b) para prismas.

3.6.3 Resistividade elétrica

O desenvolvimento do HPFRC, levantou a novas questões relativas à orientação e dispersão das fibras. Estudos realizados por Barnett (2010) *et al.* demonstram que o ensaio da resistividade elétrica fornece informações qualitativas sobre à orientação das fibras. Neste trabalho buscou-se verificar a influência do alinhamento das fibras sobre a resistividade do material. Será utilizado o método de aferição através de quatro eletrodos, que faz referência ao equipamento utilizado para realização dos ensaios.

O instrumento utilizado neste trabalho é o modelo Resipod da empresa PROCEQ, possuindo resolução entre 0.1 kΩcm até 1000 kΩcm e frequência de trabalho de 40 Hz. A Figura 3.15 mostra o modelo do equipamento e seu princípio de funcionamento. A resistividade calculada depende do espaçamento destas sondas, sendo dada pela expressão:

$$\rho = \frac{2\pi aV}{I},\tag{3.9}$$

sendo:

ρ a resistividade, em ohms vezes centímetro;

V é o potencial elétrico medido, em volts;

I é a corrente aplicada, em ampere;

a é a distância entre as sondas, em centímetros.

Foram realizadas análises em cada uma das quatro faces laterais nos corpos-de-prova, como ilustra a Figura 3.15 (c).

3.6.4 Análise de Imagem

A fim de visualizar o alinhamento das fibras nas matrizes cimentícias, foram realizadas imagens através de um equipamento de radiografia. Este é um tipo de ensaio não destrutivo que se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante na peça inspecionada. Devido às diferenças de densidade e variações de espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorvem quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada da radiação pode ser detectada por meio de um filme, ou de um tubo de imagem ou mesmo medida por detectores eletrônicos de radiação. A variação de quantidade de radiação absorvida indica a existência de uma falha interna ou descontinuidade no material. O princípio

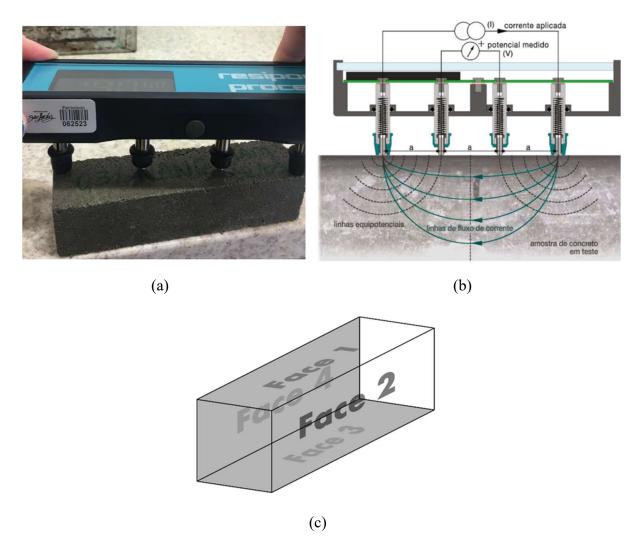


Figura 3.15: (a) Equipamento para a medida da resistividade elétrica. (b) Princípio de funcionamento. (c) Faces dos corpo-de-prova onde foram realizadas as medidas de resistividade.

de funcionamento é a atenuação dos raios-x depender em grande parte da densidade do material que o raio-x penetra. Neste trabalho, as radiografias foram realizadas no laboratório de medicina veterinária da Universidade São Judas Tadeu.

3.6.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Neste trabalho foram realizadas caracterizações através de MEV e EDS. As amostras foram analisadas, sem efetuar os procedimentos de lixamento e/ou polimento, a fim de que não fosse alterada a superfície de fratura nas regiões de proximidade com a fibra. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica e de Força Atômica (LabMicro) do

66

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade

de São Paulo (EPUSP). O modelo utilizado foi o Quanta 250 – FEG A, da FEI Company.

3.6.6 Tomografia

Neste trabalho foram realizadas caracterizações através de tomografias. Essas análises

foram realizadas em parceria com Instituto de Inovação SENAI por meio do Departamento de

Manufatura Avançada. O tomógrafo de raios-x utilizado é o modelo Metrotom 800 da Carl

Zeiss. As amostras foram ensaiadas sob com os parâmetros abaixo e as imagens reconstruídas

através do software Metrotom OS:

Tensão: 130 kV

Corrente: 200 µA

Tempo de integração: 500 ms

Voxel: 56,06 um

Spot: 40 um

4 Resultados e Discussões

4.1 Pasta de cimento reforçada com fibras

4.1.1 Velocidade de ultrassom

A Figura 4.1 apresenta os resultados da velocidade de ultrassom longitudinal e na Figura 4.2 estão os resultados para a velocidade de ultrassom transversal.

Observamos que o comportamento da velocidade de ultrassom longitudinal, em função da corrente elétrica aplicada (campo magnético), para razão a/c de 0,30, é mais acentuado para o volume de fibras de 2,0%. Observa-se que com o aumento da corrente, o alinhamento das fibras é mais eficiente, promovendo maiores valores da velocidade de ultrassom longitudinal.

Entretanto, para as razões a/c de 0,35 e 0,37, o efeito do alinhamento das fibras é observado em todos os volumes de fibra. Embora, o aumento da relação a/c leve a menores valores para a velocidade de ultrassom longitudinal, o alinhamento das fibras pode compensar a perda de rigidez da matriz. É importante destacar que as fibras se tornam um meio eficiente para transmissão das ondas de ultrassom, servindo como "pontes". Essa transmissão é otimizada quando as fibras estão alinhadas, tendo em vista que a propagação das ondas pelo meio metálico ocorre de maneira mais rápida do que em materiais cimentícios.

Para a velocidade de ultrassom transversal, observa-se, novamente, que o efeito do alinhamento das fibras é mais pronunciado para o volume de 2,0% e razão a/c de 0,30, para valores de corrente a partir de 8 A. Para a razão de a/c de 0,35 e volume de 1,0%, observa-se uma tendência de aumento para correntes até 4 A, sendo depois seguida por uma redução, quando correntes maiores que 6 A são aplicadas. Para os volumes de 1,5% e 2,0%, observa-se um aumento do valor do módulo para a corrente de 2, 8, 10 e 12 A.

Cabe destacar que as fibras são alinhadas ao longo da direção longitudinal do corpo-deprova, assim durante a medida no modo transversal, as ondas se propagam na direção perpendicular à direção de alinhamento das fibras. Nesse caso, o espalhamento das ondas será maior, pois como servem de meio preferencial para propagação do impulso em virtude do tipo de material, dispostas nesta posição atuam de modo a retardar o deslocamento, provocando maior espraiamento, sendo tal fator dependente do grau do alinhamento na matriz. Além disso, a técnica de ultrassom pode ser empregada para avaliar o alinhamento das fibras, desde que esteja operando na direção longitudinal.

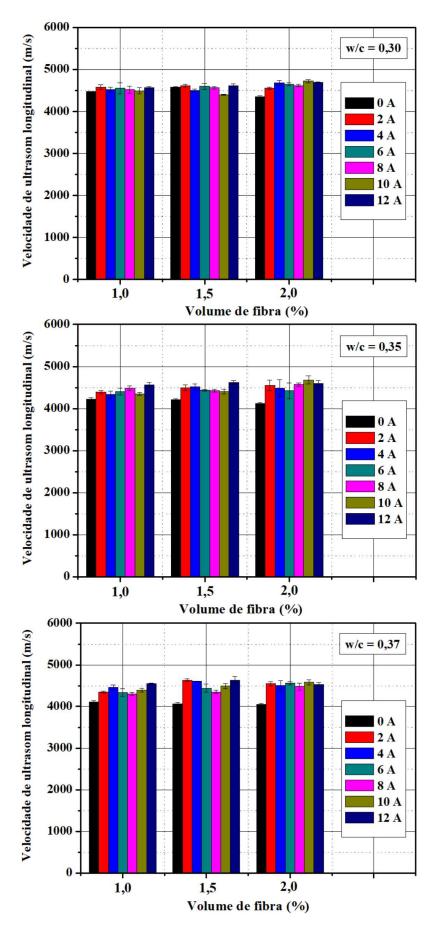


Figura 4.1: Velocidade de ultrassom longitudinal das pastas.

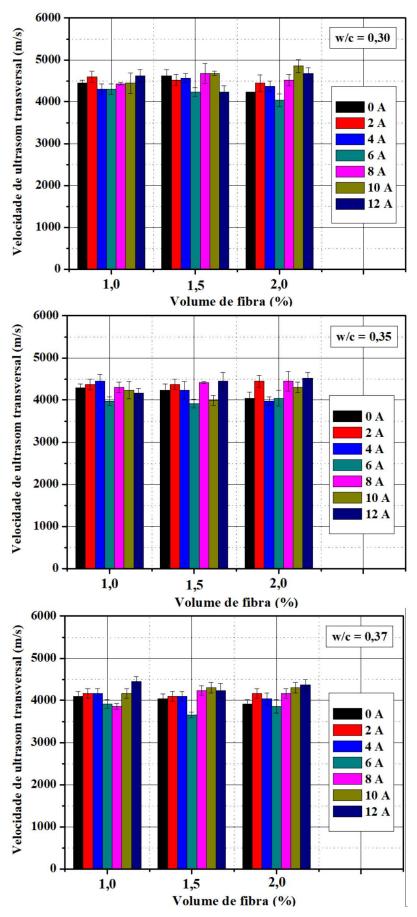


Figura 4.2: Velocidade de ultrassom transversal das pastas.

4.1.2 Resistência à compressão e à tração por flexão

Embora os ensaios para a obtenção das resistências mecânicas não sejam feitos em pasta pura de cimento, devido à dificuldade de obtenção de bons corpos-de-prova e, consequentemente, variabilidade dos resultados, o objetivo foi apenas analisar o comportamento das resistências mecânicas em função do alinhamento magnético das fibras devido à aplicação da corrente elétrica (geração do campo magnético).

Na Figura 4.3 estão os resultados dos ensaios de resistência à compressão, enquanto que na Figura 4.4 estão apresentados os resultados do módulo de ruptura (MOR) (valores de pico) obtidos a partir do ensaio de resistência à tração por flexão. É possível observar para a/c = 0,30 e com um volume de fibras de 1,0 % e 1,5 %, os valores da resistência à compressão apresentam uma tendência de queda quando o campo magnético é aplicado. Entretanto, para um volume de fibras de 2,0 % há um aumento da resistência à compressão acima de 8 A. Para as razões de a/c de 0,35 e 0,37, observa-se para todos os volumes de fibras que a resistência à compressão apresenta um valor maior para correntes de 10 A e 12 A. Tais resultados evidenciam que é possível obter um ganho na resistência à compressão para as fibras alinhadas com maiores valores de corrente elétrica.

Quanto à resistência à tração por flexão, observa-se que para a razão a/c de 0,30 a resistência cresce à medida que a corrente elétrica é aplicada para um volume de fibras de 1,0 %. Para os volumes de fibras de 1,5 % e 2,0 %, observa-se um aumento mais significativo quando uma corrente de 12 A é aplicada.

Para a razão a/c de 0,35 e para os volumes de fibra de 1,0 % e 1,5 %, observa-se um aumento de resistência à tração por flexão para uma corrente elétrica de 2 A. Entretanto, para correntes acima de 2 A, há um decréscimo do valor da resistência até 8 A e depois há novamente um aumento. Para o volume de fibras com 2,0 %, observa-se uma redução da resistência à tração por flexão com o aumento da corrente.

Para a razão a/c de 0,37, com exceção do volume de 1,5 % de fibra, que apresenta uma queda nos valores da resistência à tração por flexão quando a corrente é aplicada, os demais volumes apresentam um aumento para alguns valores de corrente.

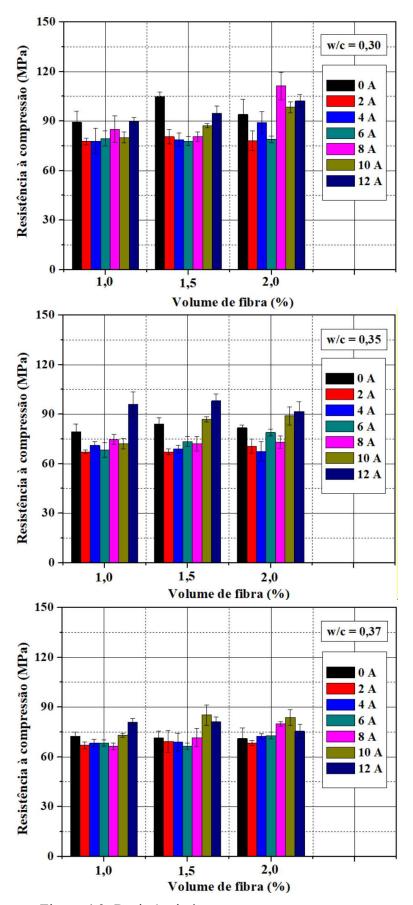


Figura 4.3: Resistência à compressão para as pastas.

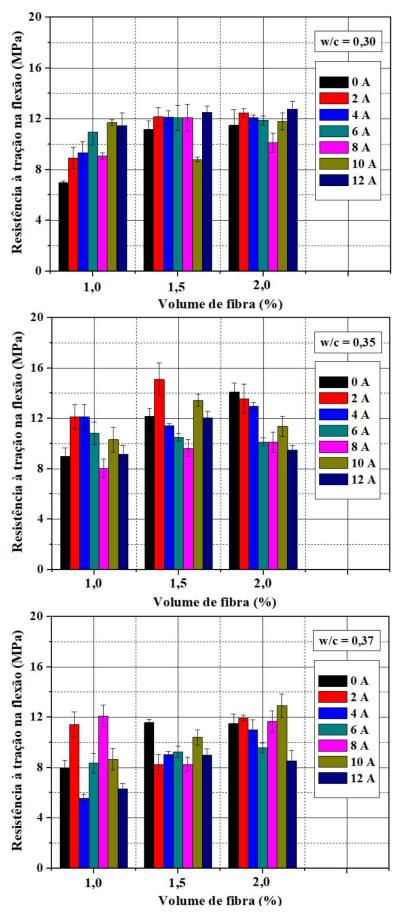


Figura 4.4: Resistência à tração por flexão para as pastas.

Para uma melhor avaliação do efeito do alinhamento das fibras, a Figura 4.5 ilustra o desempenho das amostras de pasta, à partir do gráfico carga - deslocamento, obtido no ensaio de tração por flexão, para a uma relação a/c de 0,30, com volume de fibras de 1,5% e diferentes correntes elétricas. As tenacidades obtidas foram 0,4 kN.mm, 8,3 kN.mm, 11,4 kN.mm e 13,5 kN.mm para as amostras sem fibras, 1,5% - 0 A, 1,5% - 8 A e 1,5% - 12 A, respectivamente.

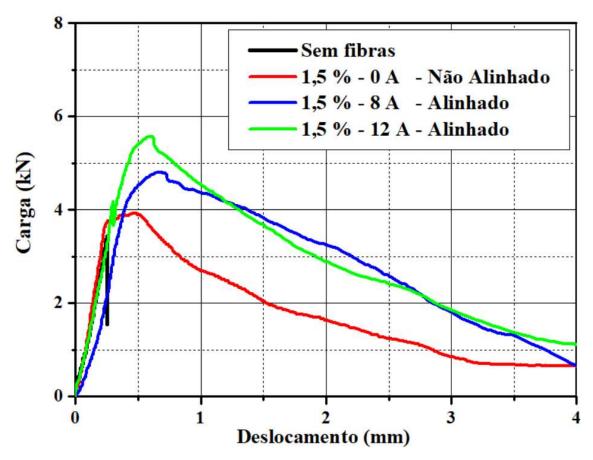


Figura 4.5: Curvas de carga-deslocamento para a uma fração de fibras de 1,5% e relação a/c = 0,30.

4.1.3 Resistividade elétrica

A Figura 4.6 apresenta os valores da resistividade elétrica para as diferentes relações a/c e volume de fibras, em função da corrente elétrica aplicada. Observa-se que sem a aplicação da corrente elétrica (0 A, sem campo magnético) as amostras apresentam uma resistividade elétrica ente 25 kΩ.cm e 35 kΩ.cm. Entretanto, o fato mais importante a ser observado é a

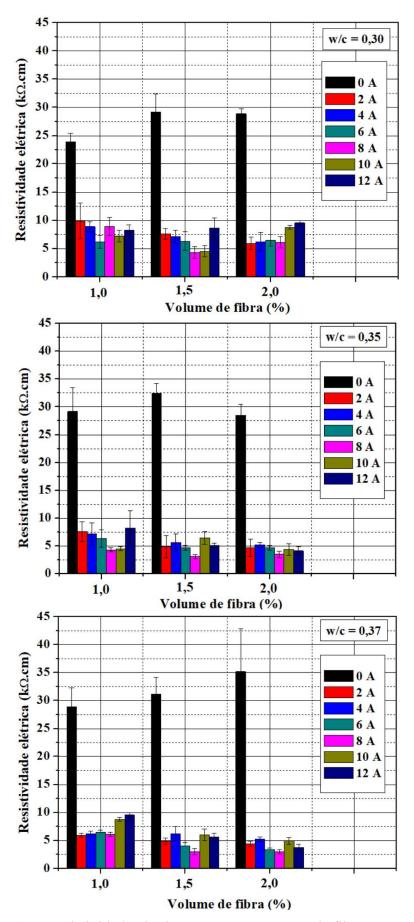


Figura 4.6: Resistividade elétrica para concentrações de fibras nas pastas.

abrupta redução do valor da resistividade elétrica quando a corrente elétrica é aplicada. A resistividade atinge valores entre 5 k Ω .cm e 10 k Ω .cm, ou seja, a resistividade elétrica é fortemente dependente do alinhamento das fibras, uma vez que ao executar o alinhamento unidirecional as fibras, estas tornam-se o meio preferencial para a passagem da corrente elétrica.

Os resultados apresentados podem ser explicados pelo princípio físico na qual a medida se baseia e pela forma como as fibras estão alinhadas. Operando pelo princípio da sonda Wernner (1915), o equipamento utilizado na medida da resistividade foi desenvolvido para medir a resistividade elétrica de compósitos cimentícios. O seu é funcionamento é baseado na aplicação de uma corrente às duas sondas nas extremidades e a diferença potencial é medida entre as duas sondas internas. Em estruturas de concreto, a corrente elétrica é transportada por íons livres em solução, contida nos poros do concreto.

Contudo, a presença das fibras metálicas pode alterar o transporte da corrente. Quando as fibras estão desalinhadas, uma parcela da corrente elétrica é transportada pelos íons presentes nos poros do volume (*bulk*) da matriz e a outra parcela é transportada pela própria fibra, que é um elemento condutivo. Entretanto, devido ao desalinhamento das fibras, a corrente elétrica não flui por um caminho contínuo, o que pode elevar a resistividade elétrica. Já quando as fibras estão alinhadas, a corrente elétrica aplicada pode ser transportada, não só pelos íons presentes nos poros, mas também pelas próprias fibras que, devido ao alinhamento, podem formar um caminho preferencial para a passagem da corrente elétrica, reduzindo assim a resistividade elétrica.

Os resultados apresentados indicam que a análise da resistividade elétrica pode ser empregada para a avaliar o alinhamento das fibras em uma matriz cimentícia. Entretanto, o grau do alinhamento não pode ser estimado a partir dos valores absolutos destas resistividades.

4.1.4 Análise de imagem

A Figura 4.7 apresenta as radiografías para algumas amostras. Pode ser observado que grande parte do volume de fibras foi efetivamente alinhada devido à aplicação da corrente elétrica, corroborando os resultados anteriores. Nas imagens pode ser observada as diferenças entre as amostras com diferentes teores de fibra que foram submetidas a aplicação de diferentes correntes elétricas.

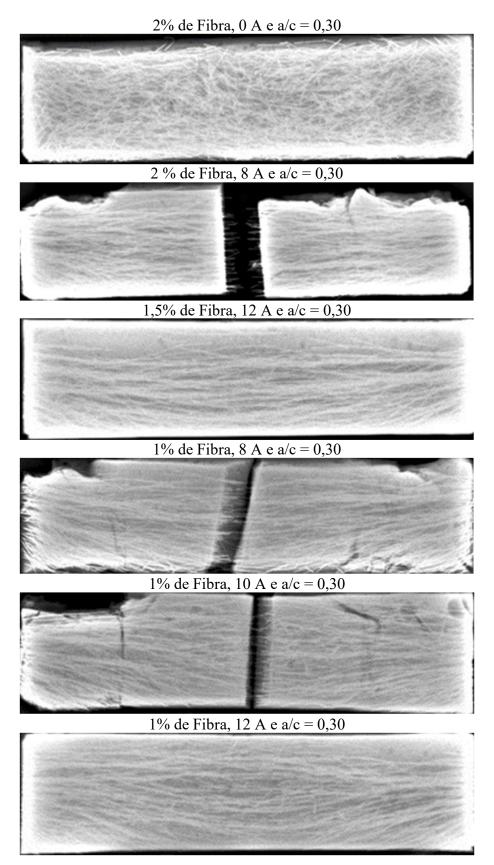


Figura 4.7: Radiografia das amostras para diferentes valores de corrente e teores de fibras.

Dos experimentos realizados e dos resultados obtidos para a pasta de cimento reforçado com fibras, observou-se que:

- (1) O alinhador magnético construído é capaz de alinhar as fibras em uma matriz cimentícia.
- (2) O módulo de elasticidade dinâmico, obtido pelo ensaio de ultrassom no modo longitudinal é mais eficiente para avaliar o alinhamento da fibra do que o no modo transversal.
- (3) O ensaio de resistividade elétrica é uma técnica capaz indicar o alinhamento das fibras;
- (4) As imagens de raios-X comprovam o alinhamento.
- (5) A pasta de cimento produzida com relação a/c de 0,30, independentemente do volume de fibra utilizado, sujeita a uma corrente entre 8 A e 12 A, foi a que apresentou resultados mais expressivos nos ensaios de resistência mecânica.
- (6) O comportamento carga deslocamento obtido no ensaio de tração por flexão indica uma alteração na tenacidade da pasta de cimento devido ao alinhamento das fibras.

4.2 Compósito - HPFRC

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais para o compósito – HPFRC. A partir das observações anteriores, o compósito foi produzido com uma relação a/c de 0,30 Para provocar/induzir o alinhamento magnético das fibras no interior do compósito foi utilizada uma corrente elétrica de 12 A, estas amostras foram denominadas: Alinhado. Para efetuar as comparações e verificar a influência do alinhamento, utilizamos um compósito de referência, sem a aplicação da corrente elétrica (0 A), que denominamos: Não Alinhado.

4.2.1 Velocidade de ultrassom

Na Figura 4.8 estão os resultados das velocidades de ultrassom longitudinais para o compósito, Não Alinhado e Alinhado. Com exceção do volume de 1% de fibras para a situação Alinhado, observa-se que a velocidade de ultrassom longitudinal não apresenta uma dependência com o volume de fibras, tanto para os casos Alinhados e Não Alinhados. Observa-se ainda que o compósito Alinhado apresenta uma velocidade maior para os volumes de 3% e 5% de fibras.

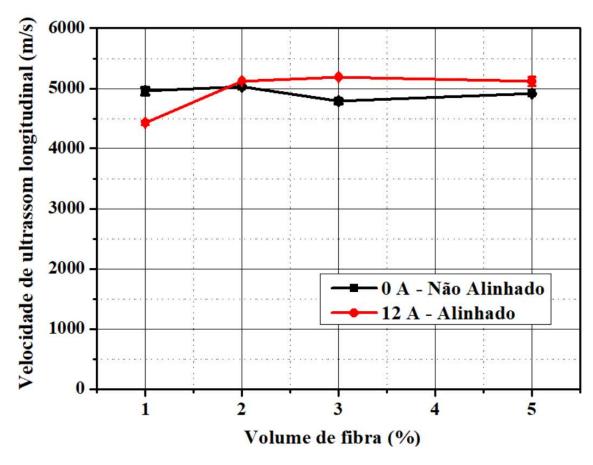


Figura 4.8: Velocidade de ultrassom longitudinal.

4.2.2 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão estão apresentados Figura 4.9. Esse resultado corrobora com os dados do módulo de elasticidade, indicando que a combinação da substituição em volume dos componentes, pelo volume equivalente em fibra somadas ao efeito do alinhamento conduz a uma melhoria no desempenho também aos esforços de compressão. Uma vez que no meio está ocorrendo a substituição de materiais com módulo de elasticidade variando entre de 10 a 40 GPa por outro material cuja valor é aproximadamente 200 GPa sendo ele o aço. Outro fator que pode ser considerado, refere-se à função desenvolvida pelas fibras de atuarem como pontes de transferência de tensões, o que dificulta a desagregação do material mesmo quando solicitado a esforços de compressão direta. Além disso, observa-se que a taxa de variação em ambos os casos, Alinhado e Não Alinhado, são praticamente idênticas. Para caso Alinhado, a taxa é de 5,3 MPa por volume de fibras, enquanto para o caso Não Alinhado, a taxa é de 6,0 MPa por volume de fibras.

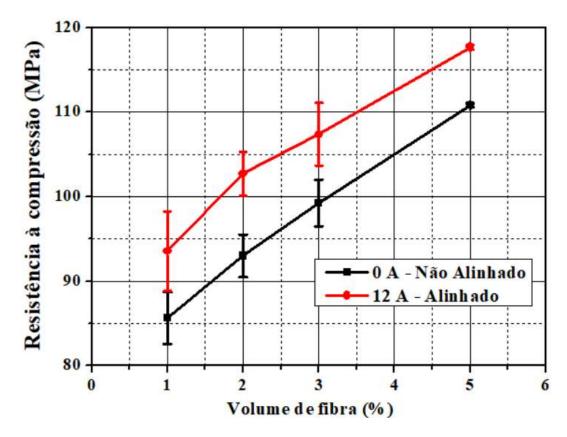


Figura 4.9: Resistência à compressão para os diferentes volumes de fibras.

4.2.3 Comportamento carga-deslocamento e tenacidade dos compósitos

Para verificar o ganho da tenacidade nos compósitos, foram obtidas as curvas de cargadeslocamento durante a realização dos ensaios de resistência à tração por flexão de cada um dos três corpos-de-prova confeccionados, para cada um dos volumes de fibras utilizados nos compósitos e para os casos Não Alinhado e Alinhado. A tenacidade foi determinada através do cálculo da área abaixo da curva de carga-deslocamento das amostras até o limite de deslocamento de 3 mm.

A Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 apresentam as curvas de cargadeslocamento para os compósitos com volumes de fibra de 1%, 2%, 3% e 5%, respectivamente. Os resultados das tenacidades e dos módulos de ruptura de cada corpo-de-prova, bem como os valores médios e desvios padrões (S_m), estão apresentados no Tabela 4-1, Tabela 4-2, Tabela 4-3 e Tabela 4-4, para os volumes de fibra de 1%, 2%, 3% e 5%, respectivamente.

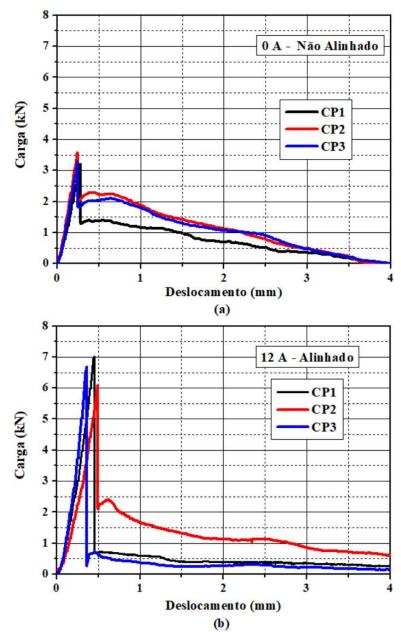


Figura 4.10: Carga-deslocamento para o HPFRC – 1% (a) Não Alinhado e (b) Alinhado.

Tabela 4-1: Resultados da tenacidade e módulo de ruptura para o HPFRC - 1%.

HPFRC – 1 %				
CPs	Tenacidade (kN.mm)		Módulo de Ruptura – MOR (MPa)	
	Não Alinhado	Alinhado	Não Alinhado	Alinhado
CP1	2,98	3,12	8,93	14,58
CP2	4,26	6,74	9,94	15,98
CP3	4,46	2,18	8,63	16,78
Média	3,90	4,01	9,16	15,78
S_m	0,66	1,97	0,56	0,91

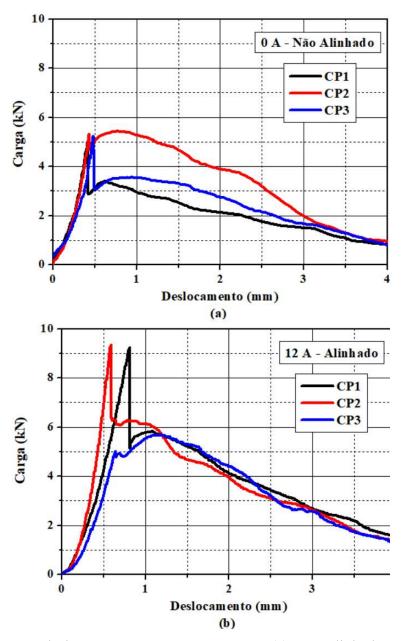


Figura 4.11: Carga-deslocamento para o HPFRC – 2% (a) Não Alinhado e (b) Alinhado.

Tabela 4-2: Resultados da tenacidade e módulo de ruptura para o HPFRC - 2%.

HPFRC – 2 %				
	Tenacidade (kN.mm)		Módulo de Ruptura – MOR (MPa)	
CPs	Não Alinhado	Alinhado	Não Alinhado	Alinhado
CP1	9,41	14,66	17,70	22,36
CP2	12,89	14,40	18,33	22,13
CP3	8,11	13,40	17,25	20,63
Média	10,14	14,15	17,76	21,70
S_m	2,02	0,54	0,44	0,77

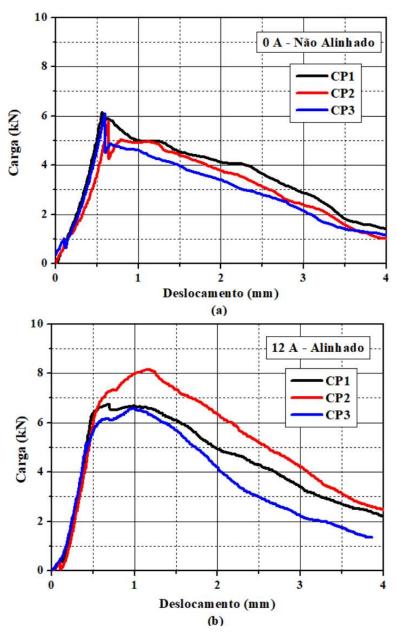


Figura 4.12: Carga-deslocamento para o HPFRC – 3% (a) Não Alinhado e (b) Alinhado.

Tabela 4-3: Resultados da tenacidade e módulo de ruptura para o HPFRC - 3%.

HPFRC – 3 %				
CPs	Tenacidade (kN.mm)		Módulo de Ruptura – MOR (MPa)	
	Não Alinhado	Alinhado	Não Alinhado	Alinhado
CP1	14,01	17,45	16,15	19,48
CP2	12,41	20,47	15,82	16,10
CP3	11,72	14,50	16,48	15,75
Média	12,71	17,47	16,15	17,11
S_m	0,96	2,44	0,27	1,68

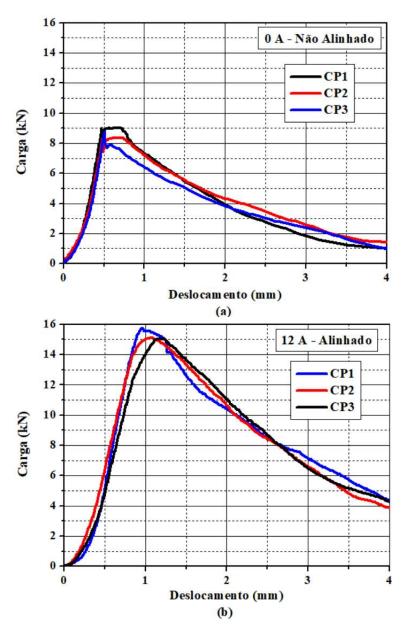


Figura 4.13: Carga-deslocamento para o HPFRC – 5% (a) Não Alinhado e (b) Alinhado.

Tabela 4-4: Resultados da tenacidade e módulo de ruptura para o HPFRC - 5%.

HPFRC – 5 %				
	Tenacidade (kN.mm)		Módulo de Ruptura – MOR (MPa)	
CPs	Não Alinhado	Alinhado	Não Alinhado	Alinhado
CP1	14,85	33,36	22,41	37,64
CP2	15,58	33,70	19,99	36,00
CP3	16,54	33,90	21,05	36,12
Média	15,66	33,65	21,15	36,59
S_m	0,69	0,22	0,99	0,75

Assim como já evidenciado na etapa preliminar, uma vez executado o alinhamento na direção perpendicular ao esforço, observa-se uma melhora no desempenho do material, quando este for solicitado a esforços de flexão. Pode ser notado que não houve ruptura de fibras em nenhuma das situações, Alinhado e Não Alinhado. Tal fato contribuiu para o aumento da tenacidade nos dois casos. Uma vez que a fibra consegue atuar por atrito, o arrancamento gradativo possibilita a transferência de esforços entre a matriz e a fibra. O alinhamento possibilitou que um maior volume de fibras esteja efetivamente contribuindo para a transferência de tensões. Tal contribuição ocorre mesmo antes do início do processo de fissuração. Além disso, o processo de vibração reduz da ocorrência de vazios. Este conjunto fatores conferiu as amostras com fibras alinhadas, um melhor desempenho mecânico diante das análises realizadas. A Figura 4.14 mostra o ganho de tenacidade devido ao alinhamento magnético, podendo ser identificada a tendência de crescimento conforme se aumenta o volume de fibras que estão efetivamente exercendo função de reforço.

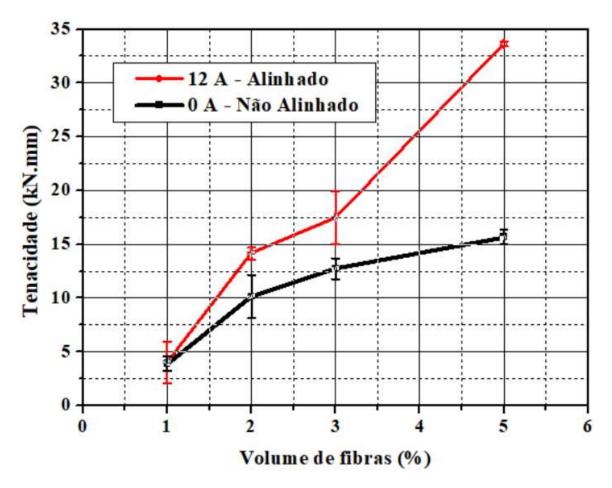


Figura 4.14: Valores médios da tenacidade em função do volume de fibras para os casos Alinhado e Não Alinhados.

4.2.4 Interface fibra – matriz

Visando caracterizar a interface fibra-matriz e as melhorias de aderência, provenientes das adições minerais utilizadas, foi realizada uma investigação da superfície de interação e das propriedades químicas das regiões próximas a fibra. Na Figura 4.15 está a imagem de MEV do compósito com 5% de fibras alinhadas. É possível identificar que ocorreu a transferência de esforço entre a matriz e a fibra metálica por meio do atrito, não ocorrendo uma aderência exacerbada que provocaria o rompimento da fibra. Na Figura 4.15, (b) e (c) pode ser verificado que a interface fibra-matriz está danificada, ocorrendo a ruptura da matriz nas bordas da fibra, acompanhadas de ranhuras na superfície da fibra.

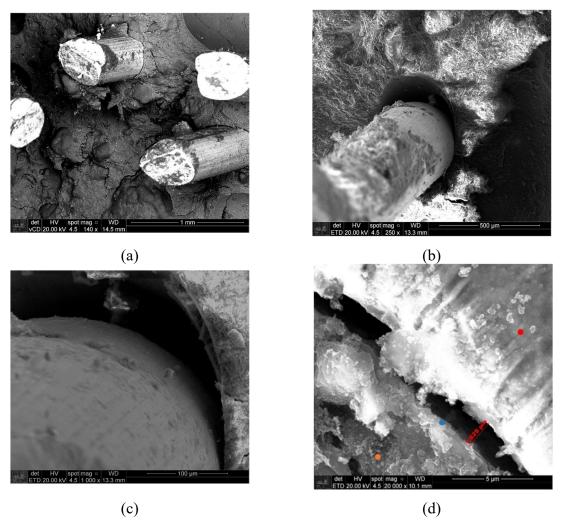


Figura 4.15: Imagens de MEV (a) na região da matriz ao redor da fibra de aço; (b) e (c) na região da interface fibra-matriz; (d) os pontos coloridos são utilizados para indicar a região para a medida de EDS.

Na Figura 4.16 estão os resultados das medidas de EDS. Com os resultados obtidos por EDS, apesar de ser um exame semi-qualitativo, foi possível notar a clara diferença nas propriedades da zona de interface entre matriz e fibra e da matriz em si. Podendo ser notado um alto valor de Ca (cálcio), e O (oxigênio) nas proximidades da fibra, componentes precursores da Portlandita, que é uma forma cristalina de baixa resistência mecânica. Confirmando as considerações que conduzem a avaliação que se trata de uma região de menor resistência mecânica que o restante da matriz.

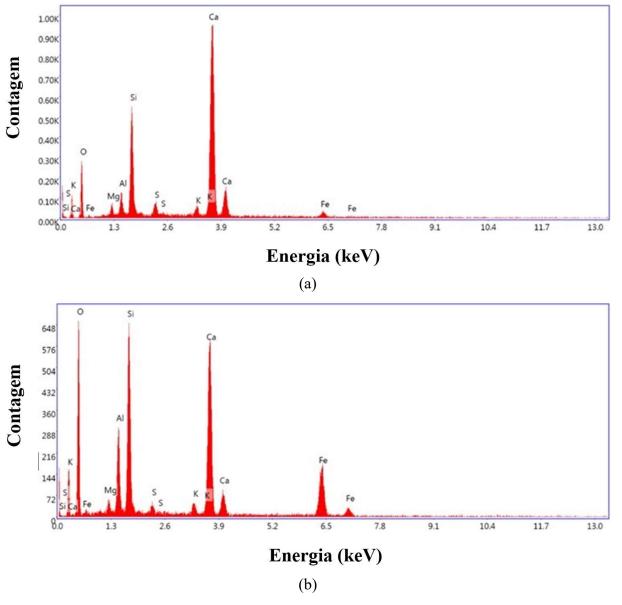


Figura 4.16: (a) Medidas de EDS próximas da superfície da fibra ≈ 6 μm (ponto laranja da Figura 4.15 (d)). (b) Medidas de EDS na região afastada da fibra (Matriz).

4.2.5 Resistividade elétrica

Na primeira parte da apresentação dos resultados, pasta reforçada com fibras, a determinação da resistividade elétrica mostrou-se ser um bom parâmetro para avaliar o alinhamento magnético. Na Figura 4.17 estão os resultados obtidos da resistividade elétrica, nas diferentes faces do corpo-de-prova, para as amostras não alinhas e alinhadas do HPFRC. A indicação das faces do corpo-de-prova está representada na Figura 3.15 (c).

Observa-se uma redução da resistividade elétrica com a aumento do volume de fibras. Para os corpos-de-prova Não Alinhados (Figura 4.17 (a)), observa-se que não há uma mudança significativa da resistividade elétrica para as faces do corpo-de-prova com mesmo volume de fibras.

Para os corpos-de-prova que foram submetidos ao campo magnético para o alinhamento das fibras, observa-se que a resistividade elétrica é fortemente dependente da face do corpo-de-prova, como pode ser observado na Figura 4.17 (b). Esse efeito pode ser explicado pela combinação da ação das linhas de fluxo magnético e da força da gravidade sobre as fibras.

A Figura 4.18 (a) ilustra o caso sem a presença da força da gravidade atuando sobre as fibras. Nota-se nesse caso ideal, que as fibras (representadas pelas linhas tracejadas em vermelho) se alinham na mesma direção das linhas de fluxo magnético (representadas pelas linhas contínuas em azul). Comportamento esperado, já que cada fibra se tornou magnetizada devido à aplicação do campo magnético. O espraiamento das linhas de fluxo se deve ao comprimento do entreferro e foram observadas na simulação com o FEM.

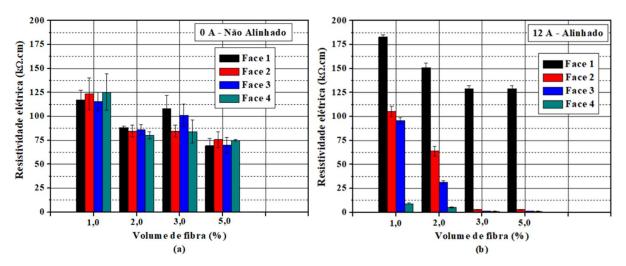


Figura 4.17: Resistividade elétrica, em função das faces do corpo-de-prova, para as amostras (a) Não Alinhadas (0 A) e (b) Alinhadas (12 A).

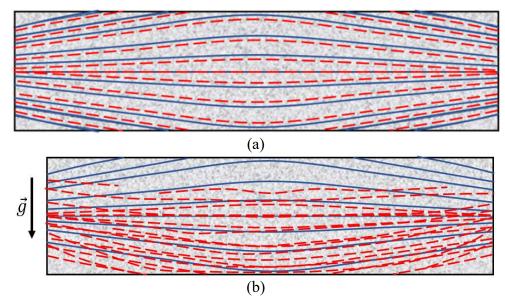


Figura 4.18: (a) Modelo (ideal) sem a presença da força da gravidade. (b) Modelo (real) em que a ação da gravidade e o empilhamento das fibras provoca o movimento descendente das fibras no corpo-de-prova.

Entretanto, devido à ação da gravidade sobre as fibras, estas ainda se alinham direção do fluxo magnético, mas são forçadas a se deslocar para a parte inferior do corpo-de-prova, como ilustra a Figura 4.18 (b). Além disso, a interação entre dipolos magnéticos (interação entre fibras magnetizadas), provoca o empilhamento das fibras, favorecendo o movimento para a parte inferior do corpo-de-prova.

Devido a esse mecanismo, a Face 1 do corpo-de-prova fica com poucas fibras e, consequentemente, a corrente elétrica é transportada somente pelos íons dos poros da matriz, aumentando a sua resistividade elétrica. Já a Face 4, fica com uma maior quantidade de fibras. Nesse caso, o transporte da corrente elétrica ocorre pelas fibras metálicas, que são elementos condutivos e, consequentemente, a Face 4 terá uma resistividade elétrica muito menor do que a Face 1. As Faces 2 e 3, possuem uma quantidade de fibras que se acumulará na parede do molde do corpo-de-prova e que dependerá do volume de fibras da matriz.

A fim de verificar visualmente o acúmulo das fibras na face inferior do corpo-de-prova, foi realizado uma imagem de tomografía em um corpo-de-prova com 5% de fibras. A Figura 4.19 mostra o resultado da tomografía, onde é possível observar que as fibras alinhadas se acumularam na face inferior.

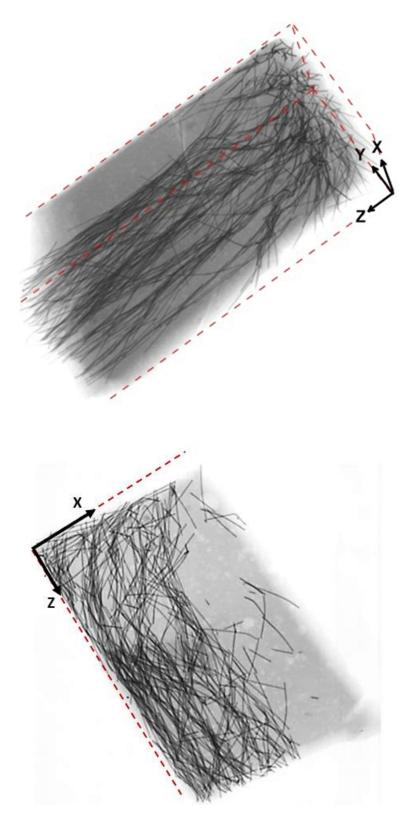


Figura 4.19: Tomografías de um corpo-de-prova do compósito com 5% de fibras. O plano yz é a face inferior do corpo-de-prova. O plano xz é uma das faces laterais.

5 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um dispositivo magnético com o propósito de alinhar fibras magnéticas em uma um compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras. Nossos resultados mostram que:

- O equipamento magnético construído se mostrou eficiente para a realização do alinhamento das fibras;
- Os ensaios de ultrassom, resistividade e raios-x, aplicados na pasta de cimento reforçada com fibras, se mostraram ferramentas que podem ser utilizadas para a verificação indireta e não-destrutiva do alinhamento pretendido;
- O HPFRC apresentou bons resultados quando as fibras são alinhadas com uma corrente de 12 A e com uma matriz com a/c = 0,30. Esses resultados foram observados no ganho da tenacidade em comparação as amostras não alinhadas.
- Os resultados de ultrassom mostram que a introdução das fibras pode causar descontinuidades no compósito afetando a compacidade e homogeneidade da mistura levando a resultados de velocidade de propagação das ondas menores. No que diz respeito à orientação das fibras este ensaio não é o mais conclusivo, no entanto, observaram-se maiores velocidades na direção coincidente à orientação das fibras.
- Nas amostras do HPFRC com o uso do alinhador, pode ser percebido uma otimização do reforço de fibras. Desta forma um maior volume de fibras passou a contribuir de forma efetiva para o ganho de resistência ao esforço de tração na flexão, bem como um ganho de tenacidade;

Dentro das análises realizadas para este trabalho fica clara a importância do alinhamento e direcionamento do reforço fibroso dentro de peças cimentícias direcionadas para aplicação de resistência a esforços de flexão. Uma vez que, ao se empregar a técnica de alinhamento magnético um volume consideravelmente maior de fibras anteriormente dispersas aleatoriamente, estarão efetivamente contribuindo para a resistência aos esforços além de proporcionar homogeneidade no desempenho em toda a peça fabricada.

REFERÊNCIAS

ABUKHASHABA, M.; MOSTAFA, A. M.; ADAM, I. A. Behavior of self-compacting fiber reinforced concrete containing cement kiln dust. **Alexandria Engineering Journal**, v.53, n2, p. 341-354, 2014.

AFROUGHSABET, V.; BIOLZI, L; OZBAKKALOGLU, T. J Mater Sci. v. 51, p. 6517, 2016.

AL-MATTARNEH, Electromagnetic quality control of steel fiber concrete Construction and Building Materials. v.73, n.1 p.350–356, 2014.

ABRISHAMBAF, A.; PIMENTEL, M.; NUNES, S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites. **Cement and Concrete Research**. v. 97, p. 28-40, 2017.

ANDREASEN, A.H.M. AND ANDERSEN, J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). Colloid & Polymer Science, v. 50, i.3, p. 217-228. 1930

ARIF, M. A. Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço, Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM A370**: Standart Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel. Pennsylvania, 2010. 47 p.

_____.ASTM C1550: Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). Pennsylvania, 2010a. 14 p.

_____. **ASTM C1609**: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforce Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). Pennsylvania, 2010b. 8 p.

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

.NBR 6207: Arames de aço: Ensaio de tração e de classe II. Rio de Janeiro, 2007. 3 p.

____.NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. 2005.

.NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. 2005.

BANTHIA, N. Fiber reinforced concrete. The Canadian Society for Civil Engineers, 1998.

BARNETT, S. J.; LATASTE, J. F; PARRY, T.; MILLARD, S. G.; SOUTSOS, M. N. Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. **Mater Struct.** v. 43, p. 1009–1023, 2010.

BARROS, J.A.O. *et al.* Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 38, 2005.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. United Kingdom: **Elsevier**, 2007.

BROWN, R.; SHUKLA, A.; NATARAJAN, K.R., Fiber Reinforcement of Concrete Structures, Urite Project n°. 536101, University of Rhode Island, September, 2002.

CALLISTER Jr., W. D. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHAN, Y.W; CHU, S.H. Effect of silica fume on steel fiber bond Characteristics in reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1167 – 1170, 2004.

DE LARANJEIRA, O. F. *Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete*. 2010. 218 f. Thesis (PhD in Civil Engineer) - University Politecnica de Catalunya.

DE LARRARD, F. *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. E & FN Spon, London, 1999.

DE LARANJEIRA, F., AGUADO, A., MOLINS, C., GRÜNEWALD, S., WALRAVEN, J., CAVALARO, S.: Framework to predict the orientation of fibers in FRC: a novel philosophy. **Cementitious Concrete Research**, v.42, n. 6, p. 752–768, 2012.

DI PRISCO, M., PLIZZARI, G.; VANDERWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new desing persperctives. **Material and Structures**, v. 42, p. 1261-1300, 2009.

DUPONT, D., VANDEWALLE, L.: Distribution of steel fibres in rectangular sections. **Cements & Concrete Composites**, v. 27,n. 3, p. 391–398, 2005.

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. 17p.

FAIFER, M; OTTOBONI, R; TOSCANI, S.; FERRARA, L. An improved method for steel fiber reinforced concrete analysis. **2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings**. p. 1896-1901, 2012.

FERET, R. Sur le Compacité des Motiers Hydrauliques. **Annales des Ponts et Chaussées**, v. 4, 2nd semester, p. 5-161., 1892.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Model Code 2010**: First Complete Darft. V. 1, Switzerland, 2010.

FERRARA, L; PARK, Y. D.; SHAH, S. P. Correlation among fresh state behavior, fiber dispersion, and toughness properties of SFRCs. **J Mater. Civ. Eng.** v. 20, p. 493–501, 2008.

FERREIRA, N.F.M. **Influência das características das fibras no desempenho do betão**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2008.

- FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras de Aço. 2000. 69 p. Boletim Técnico, Serie BT/PCC/260) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras**. 2011. 256p. Tese (Livre Docência) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de Controle e Dosagem do concreto Projetado com Fibras de Aço.** 1997. 345p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- FURNAS. Concreto **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensavél utilizando-se o cone de Abrams (slump flow test)** método de ensaio. Manual de qualidade, p.1-7, 2004.
- FUNK, J. E., DINGER, D. R. *Particle packing, part I fundamentals of particle packing monodisperse spheres*. Interceramics, V.41, i. 1, p.10-14. 1992.
- GALEOTE, E.; BLANCO, A.; DE LA FLUENTE, A. GOODIER, C. AUSTIN, S. Size effect on post-cracking strength of high performance fibre-reinforced concrete. High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, p. 182-190, 2018.
- GETTU, R; GARDNER, D. R.; SALDIVAR, H; BARRAGAN, B. E. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. **Material and Structure**. v. 38, p. 31–37, 2005.
- GÓIS, F. A. P. Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influencia do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. 2010. 158p. Dissertação (Mestrado) Universidade federal de Alagoas, Alagoas, 2010.
- GOPALARATNAM, V. S.; GETTU, R. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. **Cement & Concrete Composites**, 1995. v.17, n.3, p 239 255.
- GOPALARATNAM, V. S.; SHAH, S. P., **Properties of Steel Fiber Reinforced in Cement Based Composites**. RYLEM Technical Committee 49-TFR, Third International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, v.1.
- HANNANT, D. J. Fibre cements and fibre concretes. Chichester, Jonh Wiley, 1978.
- HERRMANN, H; PASTORELLI, E; KALLONEN, A; SUURONEN, J. P. Methods for fibre orientation analysis of X-ray tomography images of steel fibre reinforced concrete (SFRC). **J Mater Sci.** v. 51, p. 3772–3783, 2016.
- IGARASHI, S., BENTUR, A., MINDESS, S., The effect of processing on the bond and interfaces in steel reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**. v. 18, p. 312–322, 1996.

- ISLAM, S. T. Study of Same Parameters Affecting the Measured Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete. Dissertação (Mestrado). The Faculty of Graduate Studies (Civil Engeneering), The University of British Columbia, 2012.
- LAPPA, E. S. High strength fibre reinforced concrete: static and fatigue behaviour in bending. 2007. TU Delft, Delft University of Technology.
- LIN, Y. Z. Tragverhalten von Stahlfaserbeton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 494, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1999.
- LIN, Z.; LI, V. C. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. J. Mech. Phys. Solids, USA, v. 45, n. 5, 1997.
- LÖFGREN, I. (2004): "The wedge splitting test a test method for assessment of fracture parameters of FRC", in 5th International Symposium on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS), Vail, Colorado, pp. 1155-1162 (RILEM, ISBN 0-87031-135-2).
- JOHNSTON, D. C. Fiber-Reinforced Cements and Concrete. Advances in Concrete technology. **International Center for Sustainable Development of Cement and Concrete**. V.1. Canada: Ontario, Ottawa, 2001.
- MARKOVIC, I. High-Performance Hybrid-Fibre Concrete Development and Utilization. Tese (Doutorado), Delft University, 2006.
- MARTINIE, L; LATASTE, J. F.; ROUSSEL, N. Fiber orientation during casting of UHPFRC: electrical resistivity measurements, image analysis and numerical simulations. **Mater Struct**. v. 48, p. 947–957, 2015.
- MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics**. 4.2. Disponível em: < http://www.femm.info/wiki/Documentation/>. Acesso em: 10 de novembro de 2018.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.
- MICHELS, J.; GAMS M. Preliminary study on the influence of fibre orientation in fibre reinforced mortars. **Gradevinar**, v. 68, p. 645-655, 2016.
- MILLER, A. I.; BJÖRKLUND; F. R. Method of Reinforcing Concrete with Fibres, US Pat. 4062913 A, 13 dez. 1977. 5 p.
- MYHRE, B., HUNDERE, A. M. The use of particle size distribution in development of refractory castables. In: ALAFAR Congress, XXV., 1996, San Carlos de Bariloche, **Anais**... Elkem Materials, 1996.
- MU, R.; LI, H; QING, L; LIN, J.; ZHAO, Q. Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field. **Construction and Building Materials**, v.131, n.1. p. 309 316, 2017.

- NAAMAN, A. E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 239-252, Nov. 2003a.
- PASA, V. F. Análise do Comportamento de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço via Método dos Elementos Finitos. 2007. 158 p. Tese (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- PRISCO, M., FERRARA, L. Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test ro identify post-cracking behavior of the fibre reinforced, **Cementitious Composites. Material and Structures**, 2012.
- RIBEIRO, F. Betão de Elevado Desempenho forçado com fibras. 2012. 174 p. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia a Universidade Do Porto, Porto, 2012.
- SALVADOR, R. P. Analise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.
- SINGH, S.; SHUKLA, A.; BROWN, R. Pullout Behavior of Polypropylene Fibers from Cementitious Matrix. Cement and Concrete Research. n. 34, p. 1919-1925, 2004.
- SOARES, C. R. P. Ensaios não-destrutivos para a caracterização de betões de elevado desempenho reforçado com fibras. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade Porto, Portugal, 2013.
- SVEDBERG, B. **Method and Device for Magnetic Alignment of Fibres**, US Pat. EP1 089 858 B1, 25 mai. 2001. 11 p.
- TEIXEIRA, C. S., CORDON, H. C. F. Estudo da Influência do empacotamento de partículas nas propriedades do concreto. Instituto Mauá de Tecnologia, 2015.
- TEJCHMAN, J; KOZICKI, J. Experimental and theoretical investigations of steel-fibrous concrete. **Springer series in geo-mechanics and geoengineering**, Primera edição. Springer, Berlin (2010).
- THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. [S.I.]: Concrete library of JSCE, 1984, p. 58-61.
- TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 163p. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007.
- VILLARES, A. N. O. Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras. 128p. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2001.
- WENNER, F.; Bulletin of the Bureau of Standards 1915, 12, 469.

WIJFFELS, M. J. H. *et al.* Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behavior. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 342-355, 2017.

WILLE, K; TUE, N. V.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Fiber distribution and orientation in UHP-FRC beams and their effect on backward analysis. **Mater Struct**. v. 47, p. 1825–1838, 2014.

WUEST, J.; DENARIE, E.; BRUHWILER, E.; TAMARIT, L.; KOCHER, M.; GALLUCCI, E. Tomography analysis of fiber distribution and orientation in ultra-high-performance fiber-reinforced composites with high-fiber dosages. **Exp Tech**. v. 33. 50–55, 2009.