

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
Mestrado Profissional em Engenharia Civil

MARCOS FABRÍZIO DE MENEZES FREITAS

**Desenvolvimento de processo para alinhamento magnético de fibras curtas
de sisal em matriz cimentícia e influência no comportamento mecânico**

São Paulo

2020

MARCOS FABRÍZIO DE MENEZES FREITAS

**Desenvolvimento de processo para alinhamento magnético de fibras curtas
de sisal em matriz cimentícia e influência no comportamento mecânico**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador:
Prof. Dr. Dimas Alan Strauss Rambo

Área de concentração: Materiais de construção

São Paulo
2020

Marcos Fabrízio de Menezes Freitas

Desenvolvimento de processo para alinhamento magnético de fibras curtas de sisal em matriz cimentícia e influência no comportamento mecânico. / Marcos Fabrízio de Menezes Freitas. — São Paulo: Universidade São Judas Tadeu, 2020.

80 p.

Dissertação de Mestrado Profissional – Universidade São Judas Tadeu. Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil, São Paulo, SP, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Alan Strauss Rambo

1. Alinhamento magnético de fibras. 2. Fibras curtas de sisal. 3. Compósitos cimentícios. 4. Comportamento mecânico. I. Universidade São Judas Tadeu. Mestrado Profissional em Engenharia Civil. II. Título

MARCOS FABRÍZIO DE MENEZES FREITAS

**Desenvolvimento de processo para alinhamento magnético de fibras curtas
de sisal em matriz cimentícia e influência no comportamento mecânico**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador:
Prof. Dr. Dimas Alan Strauss Rambo

Área de concentração: Materiais de construção

Banca avaliadora:

Prof. Dr. Dimas Alan Strauss Rambo
Orientador

Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo
Avaliador

Prof. Dr. Sandro Martini
Avaliador

São Paulo, 24 de junho de 2020.

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus amores
Marina Antonio Freitas e Patricia Antonio de
Menezes Freitas que me transmitem força e
determinação para que eu prossiga nesse
caminho com foco, fé e coragem.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre estar presente nos momentos mais difíceis me transmitindo força para não desistir e superar os obstáculos que a vida nos proporciona.

Ao amor da minha vida, Patricia Antonio de Menezes Freitas pelo incentivo, apoio incondicional em realizar este trabalho e companheirismo que transborda energia e alto astral.

A razão da minha vida, minha filha Marina Antonio Freitas, por sempre estar junto de mim com seu jeito doce e carinhoso, me transmitindo força.

Aos meus pais Marcos Antonio de Menezes Freitas e Antonia Aparecida Teixeira de Menezes por terem me proporcionado meus estudos sempre com muito esforço e apoio. Por serem meu porto seguro e por sempre estarem ao meu lado me incentivando e apoiando as minhas decisões.

Ao professor doutor Dimas Alan Strauss Rambo, pelo acolhimento, ensinamentos, orientação, incentivo, confiança e entusiasmo com o trabalho desenvolvido.

Aos alunos de TCC, Aline Paixão de Moraes, Julio Cezar Gomes Maciel Batista, Lucas Cardoso da Silva, Silas José de Oliveira, Takashi Nakano e o aluno de iniciação científica Mateus Bonansea pela enorme colaboração no desenvolvimento experimental do trabalho.

Aos técnicos de laboratório de engenharia civil da USJT, Fernando Nestor Santana e Clayton Marinho pelo auxílio na realização dos ensaios experimentais.

Ao professor Fernando Russo pela sua enorme colaboração com a utilização do robô industrial Kuka utilizado no estudo.

Ao Renan Patrício, pela colaboração na operação do robô durante a moldagem dos compósitos.

Ao professor doutor Antonio Domingues de Figueiredo pelo apoio na realização dos testes de flexão no laboratório de engenharia civil da Universidade de São Paulo.

À Vanessa Meloni Massara pela imensa contribuição e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Angelo Eduardo Battistini Marques pela oportunidade e confiança.

Ao departamento de veterinária da Universidade São Judas Tadeu pelo apoio na execução das radiografias dos compósitos cimentícios.

A Universidade de São Paulo pelo apoio na execução dos testes de flexão e ao Instituto Ânima de Educação pelo apoio e infraestrutura disponibilizada pelos ensaios experimentais.

Ao CNPq pelo apoio financeiro, conforme processo 421509/2018-0.

A todos os professores do curso de mestrado profissional de Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu, unidade Mooca, São Paulo pelas aulas, dedicação e pelo conhecimento transmitido.

EPÍGRAFE

*Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que
você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.*

Martin Luther King

RESUMO

Nos últimos anos o interesse pela utilização de fibras naturais em materiais compósitos tem aumentado significativamente. Tal fato deve-se às boas propriedades mecânicas encontradas nas fibras naturais, a sua disponibilidade, baixo custo e seu caráter sustentável. O uso de fibras naturais como agente de reforço em compósitos cimentícios torna-se ainda mais interessante quando o arranjo espacial deixa de ser aleatório (caso mais comum) para se tornar orientado, possibilitando uma melhora das propriedades mecânicas do compósito. O objetivo desse trabalho é desenvolver um compósito cimentício reforçado com fibras curtas de sisal alinhadas por meio de campo magnético. A pesquisa foi desenvolvida em três etapas, sendo a primeira destinada ao desenvolvimento de um processo de tratamento superficial da fibra (*coating*) com material ferromagnético (resíduos industriais provenientes do corte de ferro e aço) na forma de pó, de modo que a fibra natural de sisal fosse capaz de reagir, embebida no compósito, a um campo magnético gerado por ímãs de neodímio. A segunda etapa da pesquisa aborda o método para obtenção do alinhamento das fibras imersas na matriz cimentícia. Nesta fase, foi desenvolvida uma matriz com propriedades reológicas adequadas à ação do campo sobre as fibras tratadas. Por fim, na terceira fase, os compósitos produzidos foram submetidos à caracterização física e mecânica por meio de ensaios não destrutivos, tais como velocidade de propagação da onda ultrassônica e resistividade elétrica e ensaios destrutivos, tais como, resistência à flexão e compressão. Por meio dos ensaios mecânicos e análise de imagem foi possível avaliar a influência da orientação das fibras de sisal no desempenho pré e pós-fissuração dos compósitos cimentícios produzidos.

Palavras chave: Alinhamento magnético de fibras; fibras curtas de sisal; compósitos cimentícios; comportamento mecânico.

ABSTRACT

In recent years, the interest in the use of natural fibers in composite materials, has increased significantly. This is due to the good mechanical properties found in natural fibers, its availability, low cost and its sustainability character. The use of natural fibers as reinforcement agent in cementitious composites becomes even more interesting when the spatial arrangement is oriented, allowing an improvement in the mechanical properties of composite. The objective of this work is to develop a cementitious composites reinforced with short sisal fibers aligned by means of magnetic field. The research was carried out in three stages. First, a process of fiber surface treatment was developed with ferromagnetic powder material (industrial residues from iron and steel cutting), making the natural sisal fibers able to react to a magnetic field generated by neodymium magnets. The second stage of the research addresses the method for obtaining the alignment of fibers immersed in cementitious matrix. In this phase, a matrix was developed with rheological properties suitable for the field action on the treated fibers. Finally, in the third phase, the composites were subjected to physical and mechanical characterization by means of non-destructive tests, such as ultrasound propagation velocity and electrical resistivity and destructive tests, such as flexural and compressive strength. Through the mechanical tests and image analysis it was possible to evaluate the influence of fiber orientation in the pre and post cracking performance of the cementitious composites.

Keywords: magnetic alignment; sisal fibers; cementitious composites; mechanical behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de fibras naturais.	7
Figura 2. Procedimento de moldagem do compósito (a) a primeira camada da matriz sendo derramada no molde; (b) posicionamento da primeira camada de fibra;(c) posicionamento da segunda camada da matriz e; (d) uma visão geral das camadas dos compósitos.	9
Figura 3.Método <i>Hatschek</i> para produção de placas planas e telhas onduladas(a); máquina formadora e desenforme (b).	10
Figura 4. Resíduo de corte de metal (pó de ferro).	13
Figura 5. Ímã de Neodímio.....	15
Figura 6. Processo de desembaraçamento das fibras de sisal.....	16
Figura 7. Utilização do ímã de neodímio para separação magnética do resíduo de corte de metal.	16
Figura 8. Fibras de sisal desembaraçadas (a); Adesivo químico (b); Placa para aplicação do adesivo na fibra.	17
Figura 9.Impregnação da fibra com resíduo magnético (a); Fibras de sisal revestidas com resíduo magnético (b).....	18
Figura 10. Resíduo não magnético e pó de ferro.	19
Figura 11. Massa das fibras com material ferromagnético aderido, de acordo com o adesivo químico utilizado.	20
Figura 12. Razão de m_{Fe}/m_{fibra} versus tipos de adesivos.	21
Figura 13. Fibras de sisal revestidas com o adesivo <i>Compound Gel</i> e partículas ferromagnéticas.	21
Figura 14. Absorção de água pelas fibras de acordo com o adesivo químico utilizado.	22
Figura 15. Ímãs de neodímio separados por um bloco de madeira.	27
Figura 16. Esquema do processo piloto de alinhamento magnético.....	28
Figura 17. Resultado da ação do campo magnético em vários tamanhos de fibras revestidas no gel.....	29

Figura 18. (a) Fôrma de acrílico e (b) fôrma com divisões em isopor para recebimento da mistura.....	33
Figura 19. Braço robótico.....	34
Figura 20. Moldagem em corpo de prova de acrílico preparado para cinco amostras de 240 x 50 x 13 mm.....	35
Figura 21. (a) Braço robótico e suporte para corpo de prova; (b) bloco de madeira com imãs fixados na garra do robô; (c) deslocamento dos imãs sob o molde e (d) acabamento de superfície.	38
Figura 22. Amostras em câmara úmida após processo de moldagem.	39
Figura 23. Ensaio de resistividade nos compósitos.	42
Figura 24. Funcionamento da sonda <i>Wenner</i>	43
Figura 25. Ensaio para determinação da velocidade do pulso ultrassônico.	44
Figura 26. Posicionamento dos transdutores para o ensaio de ultrassom.	44
Figura 27. Velocidade de propagação do pulso ultrassônico.	45
Figura 28. Demonstração do ensaio de compressão	45
Figura 29. Ensaio de resistência à compressão (a) máquina de ensaio Kratos (b) corpos de prova.	46
Figura 30. Amostras do lote CC_S_IN_RA, CC_S_R_RA e CC_S_R_OR sendo submetidas à radiografia.....	47
Figura 31. Resistividade elétrica <i>versus</i> tipos de compósitos.	49
Figura 32. Velocidade de propagação do pulso ultrassônico <i>versus</i> tipos de compósitos.....	51
Figura 33. Velocidade de propagação do pulso ultrassônico nos compósitos obtido pelo método indireto.	51
Figura 34. Corpos de provas da (a) matriz,	53
Figura 35. Curvas de tensão <i>versus</i> deslocamento resultantes do ensaio de flexão dos compósitos.....	54
Figura 36. Curvas típicas dos compósitos submetidas ao ensaio de flexão.	55

Figura 37. Imagens radiográficas de amostras dos compósitos CC_S_R_RA e CC_S_R_OR.
..... 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo de estudos recentes sobre alinhamento magnético de fibras em compósitos cimentícios.....	2
Tabela 2. Características das fibras naturais.....	7
Tabela 3. Vantagens e desvantagens do uso de fibra natural.	8
Tabela 4. Valores típicos das propriedades da fibra de sisal.	13
Tabela 5. Adesivos químicos empregados na pesquisa.	14
Tabela 6. Características dos ímãs de Neodímio empregados no alinhamento magnético das fibras de sisal.	15
Tabela 7. Separação do material ferromagnético do material não magnético.....	19
Tabela 8. Massa média das amostras com os adesivos químicos utilizados.	19
Tabela 9. Razão de m_{Fe}/m_{fibra} de acordo com os adesivos utilizados.	20
Tabela 10. Número de fibras com ângulo $< 45^\circ$ em relação à direção de movimento dos ímãs.	29
Tabela 11. Composição química do Cimento Portland.....	32
Tabela 12. Nomenclatura e características da matriz e compósitos reforçados com fibras de sisal.....	36
Tabela 13. Correlação entre a massa de fibra <i>in natura</i> e revestida presentes nos compósitos.	36
Tabela 14. Nomenclatura e processo de moldagem de cada tipo de compósito.	37
Tabela 15. Resultado do ensaio de <i>flow table</i>	39
Tabela 16. Resultados médios obtidos do ensaio de resistividade elétrica.	48
Tabela 17. Dados coletados do ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico. ...	50
Tabela 18. Valores da velocidade de propagação do pulso ultrassônico obtidos pelo método indireto.	52
Tabela 19. Resultados médios dos testes de flexão em quatro pontos.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

a/c – Relação água/cimento

ARI – Alta Resistência Inicial

CCRF – Compósitos cimentícios reforçados por fibras

CC_S_IN_RA – Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal *in natura* dispersas randomicamente

CC_S_R_RA – Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal revestidas e dispersas randomicamente

CC_S_R_OR – Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal revestidas e dispersas e orientadas magneticamente

CP – Cimento Portland

FES – *Functional Electrical Stimulation*

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

M_{Fe} – Massa de ferro

$M_{\text{fibra in natura}}$ – Massa de fibra *in natura*

TENS – *Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation*

UV – Ultravioleta

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Justificativa da pesquisa.....	2
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Estrutura da dissertação.....	4
2	Revisão Bibliográfica.....	6
3	Fibras, componentes do revestimento e método de tratamento superficial das fibras.....	12
3.1	Introdução.....	12
3.2	Objetivos.....	12
3.3	Materiais.....	12
3.3.1	Fibra de sisal.....	12
3.3.2	Resíduo de corte de metais.....	13
3.3.3	Adesivos Químicos.....	13
3.3.4	Imãs de neodímio.....	14
3.4	Métodos.....	15
3.4.1	Desembaraçamento das fibras.....	15
3.4.2	Separação do material ferromagnético presente dos resíduos de corte de metal.....	16
3.4.3	Seleção do adesivo químico.....	17
3.4.3.1	Massa de material ferromagnético aderida à fibra.....	17
3.4.3.2	Absorção de água.....	18
3.5	Resultados.....	18
3.5.1	Separação magnética do resíduo de pó de ferro.....	18
3.5.2	Massa de material ferromagnético aderida.....	19
3.5.3	Absorção de água.....	22
3.6	Conclusões.....	23
4	Processo piloto de alinhamento magnético.....	24
4.1	Introdução.....	24
4.2	Objetivos.....	24
4.3	Materiais.....	25

4.3.1	Fôrmas em acrílico	25
4.3.2	Gel de ultrassom.....	25
4.3.3	Água.....	25
4.3.4	Imãs de neodímio.....	25
4.4	Métodos	25
4.4.1	Ensaio de índice de consistência do gel de ultrassom	25
4.4.2	Alinhamento das fibras revestidas no gel	26
4.5	Resultados	29
4.5.1	Consistência do gel e tamanho da fibra	29
4.6	Conclusões	30

5 Produção da matriz e dos compósitos e processo de orientação

magnética das fibras na matriz..... 31

5.1	Introdução	31
5.2	Objetivos	31
5.3	Materiais	31
5.3.1	Cimento.....	31
5.3.2	<i>Filler</i> de Calcário.....	32
5.3.3	Água.....	32
5.3.4	Fôrmas de acrílico	32
5.3.5	Imã de neodímio	33
5.3.6	Robô.....	33
5.4	Métodos	34
5.4.1	Definição/produção da matriz	34
5.4.2	Produção dos compósitos.....	35
5.5	Resultados	39
5.5.1	Definição da matriz e traço empregados.....	39
5.5.2	Velocidade de operação do braço mecânico	40
5.5.3	Número de deslocamentos do braço mecânico	40
5.5.4	Distância de operação do braço mecânico ao corpo de prova.....	40
5.6	Conclusões	40

6 Caracterização físico/mecânica e análise de imagem..... 41

6.1	Introdução	41
-----	------------------	----

6.2	Objetivos	41
6.3	Materiais e Métodos	42
6.3.1	Caracterização física	42
6.3.1.1	Determinação da resistividade elétrica.....	42
6.3.1.2	Determinação da velocidade do pulso ultrassônico	43
6.3.2	Caracterização mecânica.....	45
6.3.2.1	Ensaio de compressão	45
6.3.2.2	Ensaio de flexão.....	46
6.3.3	Análise de imagem - radiografia	46
6.4	Resultados	47
6.4.1	Determinação da resistividade elétrica	47
6.4.2	Velocidade de propagação do pulso ultrassônico.....	49
6.4.3	Ensaio de Compressão	52
6.4.4	Ensaio de Flexão.....	53
6.4.5	Análise de imagem - radiografia	56
6.5	Conclusões	56
7	Conclusões Gerais.....	58
	Referências	59

CAPÍTULO 1

1 Introdução

Em um cenário em que a sustentabilidade, o crescimento econômico e a preocupação com o meio ambiente são temas recorrentes, a busca por matérias-primas alternativas e de baixo custo é cada vez maior. O setor da construção civil que movimenta a economia e age como termômetro do desenvolvimento econômico, responsável pela geração de milhares de empregos é também uma área que está intimamente ligada à engenharia de materiais. Embora ainda que taxado de conservador e resistente à mudanças, este setor há tempos, tem desencadeado estudos para o uso de materiais não convencionais na construção civil. O grande avanço da tecnologia na pesquisa de novos materiais possibilita a utilização nesse setor, adequando-os às diversas possibilidades de uso.

Neste contexto, as fibras vegetais vêm se destacando como um material de grande potencial para reforço de matrizes cimentícias. Devido à grande variedade de fibras naturais com potencial para reforço de compósitos cimentícios usados na produção de concreto e argamassa para a construção civil, torna-se imprescindível o melhor conhecimento das potencialidades desses materiais [1]. Entre elas destacam-se as fibras de sisal, coco, banana, algodão e piaçava (entre outras). De acordo com Savastano Jr.[2] as fibras naturais como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios, têm despertado grande interesse nos países em desenvolvimento, devido ao seu baixo custo, disponibilidade, economia de energia e também no que tange às questões ambientais.

A adição de fibras promove melhoria da tenacidade e da ductilidade do concreto, por meio de um processo de controle da propagação das fissuras, com aumento da resistência à tração e à flexão [3]. Existem no Brasil, diversos estudos e experiências do uso de matrizes à base de cimento reforçadas com fibras vegetais, para a produção de elementos construtivos, como por exemplo, na fabricação de telhas. Savastano Jr. e Pimentel [4] estudaram a produção de componentes de cobertura de baixo custo produzidos com uma matriz cimentícia reforçada com fibras vegetais, destacando a elevada absorção de energia destes compósitos na condição pós-fissurada.

Esse tipo de reforço é interessante para elementos finos/delgados, os quais não venham a ser expostos ao meio ambiente, uma vez que as fibras podem ser degradadas pela ação dos raios UV e pelo contato direto com a água e com o meio alcalino. Desta forma, estes compósitos

poderiam ser empregados em ambientes internos e não úmidos das construções, na forma de divisórias, placas, mesas, entre outros.

A efetividade do reforço da fibra em matrizes cimentícias irá depender de uma série de fatores. Entre os principais, pode-se destacar “a orientação do reforço” [5], foco deste trabalho.

Neste contexto, o objetivo do presente estudo é desenvolver um conjunto de métodos efetivos para proporcionar a orientação de fibras curtas de sisal em matriz cimentícia, por meio de ação de campo magnético, com a expectativa de melhora das propriedades mecânicas do compósito. Para tanto, primeiramente foi desenvolvido um processo de tratamento superficial da fibra, a fim de torná-la um elemento magnético. Em seguida foi desenvolvido um processo para obtenção do alinhamento magnético das fibras imersas na matriz cimentícia e por fim foi realizada a caracterização mecânica e análise de imagem dos compósitos produzidos para avaliar a influência da orientação das fibras no desempenho pré e pós-fissuração dos compósitos.

1.1 Justificativa da pesquisa

Na literatura ainda não existem publicações que tratem de matrizes cimentícias reforçadas com fibras curtas naturais orientadas por meio magnético [6, 7].

A Tabela 1 apresenta o resumo de estudos recentes sobre alinhamento magnético de fibras em compósitos cimentícios.

Tabela 1. Resumo de estudos recentes sobre alinhamento magnético de fibras em compósitos cimentícios.

	Referência				
	[8]	[9]	[10]	[11]	Estudo presente
Matriz	Argamassa	Concreto autoadensável	Concreto de ultra alto desempenho	Concreto de alto desempenho	Pasta
Reforço	Fibra de aço	Fibra de aço	Fibra de aço	Fibra de aço	Fibra de sisal
Método de alinhamento magnético	Bobina magnética	Bobina magnética	Núcleo de ferro em forma de U	Circuito magnético	Imãs de neodímio acoplados em um braço robótico
Testes de resistência mecânica	•	•	•	•	•
Análise de imagem	•	•	•	•	•
Resistividade elétrica				•	•
Velocidade de propagação de pulso ultrassônico				•	•

A orientação das fibras de sisal em uma matriz cimentícia, só se torna elementar no caso de utilização dos tecidos de sisal. Quando utilizadas na forma de fibras curtas (caso mais comum), prevalece a randomicidade do reforço, a qual acaba por reduzir o desempenho mecânico potencial do compósito resultante.

Fibras alinhadas na direção do carregamento proporcionam aos compósitos cimentícios alta tenacidade, aumento da resistência à tração e à flexão [12].

O máximo desempenho em resistência de um compósito com fibras curtas, em geral, é obtido quando as fibras estão completamente orientadas na direção do esforço. A obtenção de compósitos reforçados por fibras curtas alinhadas é tecnicamente difícil e por isso normalmente os compósitos cimentícios utilizados na construção civil são compósitos com fibras aleatoriamente distribuídas.

Neste contexto, a proposta de desenvolver um compósito cimentício utilizando material de fonte renovável como reforço, no caso o sisal, aliado ao desafio de desenvolver métodos e processos que promovam a orientação dessas fibras vegetais, por meio de ação magnética, pode contribuir para o preenchimento de uma lacuna na literatura existente.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um conjunto de métodos efetivos para o alinhamento magnético de fibras curtas de sisal em matrizes cimentícias, capaz de proporcionar uma melhora das características mecânicas do compósito resultante.

Objetivos específicos

Para atingir o objetivo primário proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Desenvolver o método de tratamento superficial da fibra de sisal (*coating*);
- b) Desenvolver o método de alinhamento da fibra tratada superficialmente;
- c) Desenvolver uma matriz cimentícia com propriedades reológicas adequadas para a atuação do campo magnético sobre as fibras de sisal tratadas superficialmente;
- d) Caracterizar e comparar mecanicamente os compósitos produzidos com reforço randômico e alinhado;
- e) Averiguar a efetividade do processo de alinhamento das fibras utilizando análise de imagem.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação foi dividida em sete capítulos, sendo que a partir do capítulo 3, os capítulos são apresentados como blocos, contendo cada um, introdução, materiais, métodos, resultados e conclusões, conforme segue:

Capítulo 1: Introdução – neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais, a descrição dos objetivos gerais e específicos do trabalho, a sua justificativa e relevância, bem como a estrutura da dissertação.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica – apresenta o referencial teórico para o trabalho, por meio de uma revisão sobre o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras naturais, com especial destaque ao efeito da orientação do reforço sobre as propriedades mecânicas dos mesmos.

Capítulo 3: Fibras, componentes do revestimento e método de tratamento superficial das fibras – este capítulo aborda a seleção e caracterização dos materiais empregados como reforço e revestimento, bem como a metodologia empregada no desenvolvimento do tratamento superficial das fibras de sisal.

Capítulo 4: Processo piloto de orientação magnética - este capítulo tem o objetivo de apresentar o método piloto desenvolvido para alinhamento magnético da fibra tratada superficialmente (sem a presença da matriz cimentícia e sem o robô que será utilizado posteriormente). Este processo envolve a consistência adequada a ser aplicada à matriz cimentícia, bem como a definição do tamanho da fibra a ser empregado na pesquisa, dando sequência ao corte das fibras tratadas no capítulo 3.

Capítulo 5: Produção da matriz e dos compósitos e processo de orientação magnética das fibras na matriz – este capítulo aborda o processo de produção da matriz, a dosagem empregada nos compósitos e a orientação magnética das fibras na matriz cimentícia. Ao final do capítulo terá sido obtido o tipo de matriz empregada, a definição do traço, o processo de moldagem dos compósitos, bem como o processo de orientação magnética das fibras na matriz cimentícia desenvolvida.

Capítulo 6: Caracterização físico-mecânica e análise de imagem dos compósitos – neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios físicos, mecânicos e de imagem dos compósitos com reforço randômico e orientado.

Capítulo 7: Conclusões – são apresentadas as conclusões gerais obtidas a partir dos resultados dos diferentes blocos.

Referências

CAPÍTULO 2

2 Revisão Bibliográfica

O uso de fibras naturais como reforço de materiais frágeis e poucos resistentes à tração, não é algo novo e remete há mais de 3000 anos, onde os egípcios, babilônios e outras civilizações utilizavam palha e crina de cavalo para reforço de tijolos de argila [13].

Nos últimos anos, uma nova consciência social tem levado a comunidade científica a procurar soluções adequadas para o meio ambiente de forma a se buscar reduzir principalmente a emissão de CO₂ no ambiente. Assim, desde a segunda metade do século XX, as fibras vegetais têm sido amplamente utilizadas como reforço em muitos campos da indústria [14].

Diante do atual cenário de busca por novos materiais com propriedades aprimoradas e custos de produção reduzidos, aliados às questões ambientais, os compósitos a base de fibras naturais surgem como um desafio para a indústria da construção civil, uma vez que necessitam aliar a diversidade e disponibilidade existente das fibras naturais à solução para combinar materiais não convencionais com as técnicas de construção convencionais [15].

Comparadas às fibras artificiais, as fibras naturais apresentam vantagens ecológicas (são biodegradáveis, renováveis e livres de carbono, isto é, quando são compostadas ou incineradas, liberam a mesma quantidade de dióxido de carbono consumida durante seu desenvolvimento), apresentam vantagens sociais (geram empregos rurais), mecânicas (mais leves e resistentes) e econômicas (são mais baratas, já que sua produção requer pouca energia) [16].

Segundo Codispoti *et al.*[17], as fibras naturais são classificadas em três principais categorias de acordo com a sua origem: animal, mineral e vegetal [18]; cada uma destas categorias é dividida em diversas subcategorias (Figura 1).

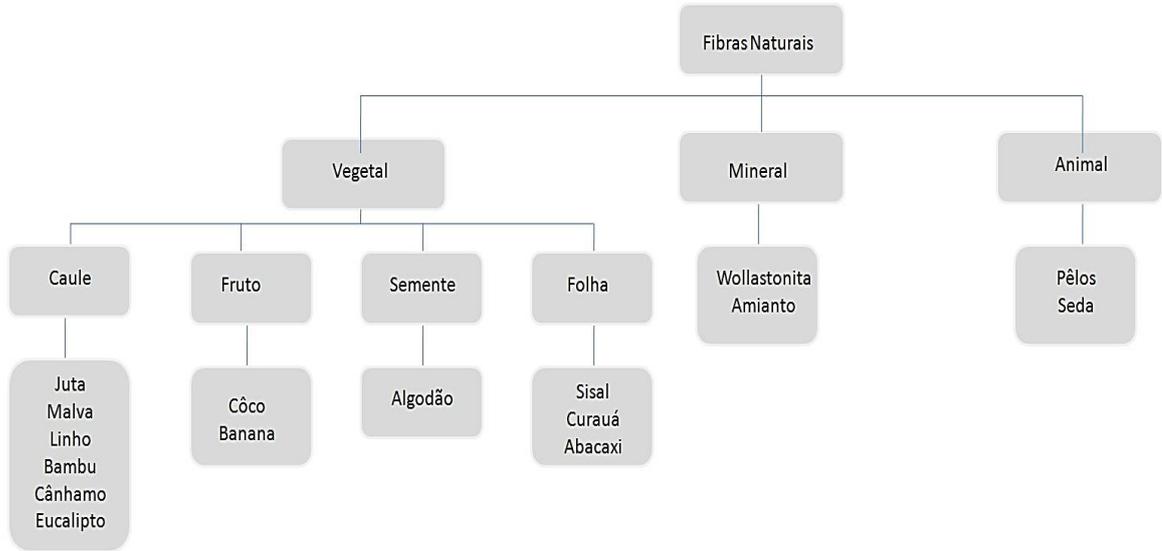


Figura 1. Tipos de fibras naturais.
Fonte: adaptado de Cardoso [19].

Como um produto natural, as características das fibras vegetais apresentam grande variabilidade, com coeficientes de variação frequentemente maiores que 40 %. As pesquisas no Brasil e no exterior concentraram-se nas fibras de coco e sisal [20], fartamente disponíveis a preço relativamente baixo. Para o reforço de materiais de construção civil podem ser empregadas fibras de menor comprimento, normalmente rejeitadas pelas indústrias de marra, estofados e tecelagem, tradicionais consumidoras destas fibras.

A Tabela 2 apresenta a compilação de características das fibras vegetais já utilizadas como reforço de matrizes à base de cimento.

Tabela 2. Características das fibras naturais.

Fibras (40 mm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação (%)	Área (mm ²)
Curauá	543 ± 260	63,7 ± 32,5	1 ± 0,2	0,004 ± 0,002
Juta	249 ± 89	43,9 ± 12,3	0,6 ± 0,2	0,004 ± 0,001
Coco	90 ± 35	2,6 ± 0,7	18,8 ± 9,1	0,052 ± 0,030
Piaçava	131 ± 36	3,8 ± 0,9	49,8 ± 19,8	0,585 ± 0,279
Sisal	484 ± 135	19,5 ± 4,5	3,3 ± 1,6	0,023 ± 0,007

Fonte: Savastano Jr. [2]

Embora as fibras vegetais apresentem elevada resistência à tração, seu baixo módulo de elasticidade condiciona sua eficiência como reforço a deformações elevadas do compósito a base de cimento. Estas apresentam uma série de vantagens sobre as fibras sintéticas justificando assim o seu uso como reforço em matrizes tanto cimentícias como poliméricas.

A Tabela 3 resume vantagens e desvantagens dessa fibra em relação às fibras sintéticas de aço e polipropileno, por exemplo.

Tabela 3. Vantagens e desvantagens do uso de fibra natural.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Grande disponibilidade	Variabilidade de propriedades físicas e mecânicas
Baixo custo	Estrutura porosa
Não é prejudicial à saúde	Elevada capacidade de absorção de água e inchamento
Possibilidade de incremento na economia Agrícola	Fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes
Baixa densidade	Menor durabilidade quando usada como reforço em matriz cimentícia.
Biodegradáveis	Baixa resistência ao meio alcalino
Baixa energia de produção	Baixa resistência ao fogo
Prevenção de erosão	Qualidade varia em função do tempo

Fonte: Adaptado de Agopyan [20].

Devido às boas propriedades mecânicas, as fibras naturais vêm ganhando espaço e sendo cada vez mais competitivas com as fibras sintéticas. Esses materiais têm um mercado em constante crescimento, com o mercado norte-americano projetado para crescer de US \$ 155 milhões no ano de 2000 para US \$ 1,38 bilhões até 2025 [21].

As fibras naturais como reforço em concreto consistem, na maioria dos casos, em fibras curtas sendo dispersas aleatoriamente nas matrizes cimentícias, atuando nas microfissuras e restringindo o seu crescimento quando submetidas a tensões que levam a ruptura do compósito. A dispersão e o arranjo de fibras em matriz frágil oferecem um meio conveniente e prático para alcançar melhorias em muitas propriedades dos materiais de engenharia, como fratura, módulo de elasticidade na flexão, fadiga e resistência ao impacto [22].

Compósitos reforçados com fibras naturais podem ser produzidos por meio de diferentes técnicas, tais como *Premix*, *Spray up*, *Hand lay up* e *Hatschek*.

- *Premix* (ou pré-mistura): consiste na mistura prévia da matriz cimentícia com as fibras no misturador, sendo o método mais comum de produção. Como as fibras reduzem a trabalhabilidade, apenas cerca de 2 % de fibras em volume podem ser introduzidas na mistura por esse método [23]. O processo de pré-mistura, resulta em teores menores de fibras aplicadas à mistura e uma distribuição desuniforme das mesmas, quando comparado com o método *Spray up* [24]. Segundo Silva [25] na pré-mistura é complicado de se obter uma boa distribuição das fibras. Aumentar o teor de água na mistura pode resolver, porém surgem outros problemas, como a exsudação e segregação da mistura. No caso da pré-mistura o uso de aditivos é

imprescindível, melhorando a trabalhabilidade da matriz, garantindo baixo fator a/c, permitindo a dispersão das fibras, melhorando a distribuição das mesmas e garantindo a homogeneidade da mistura [25].

- *Spray up* (projeção/pulverização): é um método de fácil execução que consiste em projetar a mistura com auxílio de ar comprimido, influenciando assim, diretamente no processo de dosagem e que permite alcançar o dobro de resistência em comparação com a pré-mistura. Esse método consiste em projetar a mistura contra um molde através de uma pistola dotada de duas unidades de projeção, pois a argamassa e a fibra são projetadas separadamente [24].

- *Hand lay up*: neste método, camadas de fibras na forma de tapetes ou tecidos são colocadas em moldes, impregnadas com uma matriz cimentícia e depois vibrados ou comprimidos, para produzir materiais densos com alto teor de fibras [5]. Compósitos produzidos por esta técnica foram desenvolvidos por Silva *et. al.*, [26] com fibras longas de sisal de comprimento 400 mm, dispostas unidirecionalmente em cinco camadas, e frações volumétricas de fibras de 10 % (Figura 2).

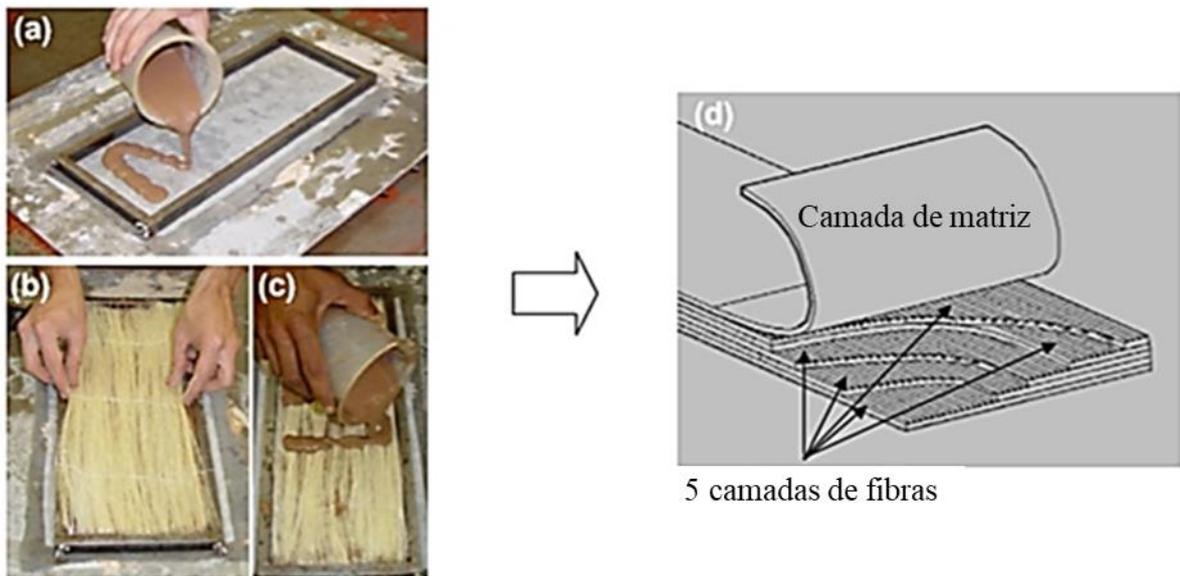


Figura 2. Procedimento de moldagem do compósito (a) a primeira camada da matriz sendo derramada no molde; (b) posicionamento da primeira camada de fibra; (c) posicionamento da segunda camada da matriz e; (d) uma visão geral das camadas dos compósitos.

Fonte: Silva *et. al.* [26].

- *Hatschek*: este processo é o mais empregado na produção de placas planas e onduladas de fibrocimento. Uma suspensão bem diluída de fibras, cimento e aditivos é misturada em um grande tanque onde cilindros rotatórios captam essa pasta por meio de sucção, removendo a

água da mistura até a obtenção de mantas com a espessura desejada (formadas por lâminas de aproximadamente 1 mm cada uma). A massa utilizada no processo *Hatschek* contém somente 20 % de sólidos. As matérias primas comumente utilizadas são: cimento Portland, sílica ativa, material carbonático, polpa de celulose, fibras poliméricas ou de amianto.

A Figura 3 apresenta o método *Hatschek* para produção de placas planas e telhas onduladas e a máquina formadora das placas.



Figura 3. Método *Hatschek* para produção de placas planas e telhas onduladas(a); máquina formadora e desenforme (b).

Fonte: Savastano Jr *et.al.*[27]

Dentre as principais fibras naturais disponíveis em nosso território nacional, destaca-se o sisal. O sisal (ou *Agave sisalana*), é uma planta nativa da Península de Yucatan, no México, tipicamente tropical, que pode atingir até 12 m de altura e no Brasil, sua produção é mais expressiva na região Nordeste [28]. A produção média anual é de 80 mil toneladas, ocupando uma área de 200 mil hectares. A Bahia e a Paraíba são os principais produtores de sisal [29], envolvendo 14 indústrias, 8 cooperativas e 4 associações.

Em 2019 o Brasil se encontrava na posição de maior produtor e exportador de fibras e manufaturados de sisal, com 60 % da produção mundial, sendo 85 % da produção destinada ao mercado externo com destino de 69,7 % para os Estados Unidos e 11,2 % para China [30].

A efetividade do reforço de sisal em matrizes cimentícias irá depender de uma série de fatores. Entre os principais e foco do presente estudo, pode-se destacar “a orientação do reforço” [31]. Quando alinhadas na direção do carregamento, as fibras de sisal proporcionam aos compósitos cimentícios alta tenacidade, resistência à tração e resistência à flexão [13]. O alinhamento do reforço de sisal, entretanto, só se torna elementar no caso do uso de têxteis. Quando utilizado na forma de fibras curtas (caso mais comum) prevalece a randomicidade do

reforço, a qual acaba por reduzir o desempenho mecânico potencial do compósito resultante [32].

Dados sobre o benefício mecânico da utilização de fibras curtas e alinhadas de sisal em matrizes cimentícias praticamente inexistem. Entretanto, é possível conjecturar sobre tais contribuições, observando estudos paralelos realizados com matrizes cimentícias reforçadas com fibras de aço.

Brito [11] em seu estudo, relata que para compósitos de alta performance reforçados com 1 %, 2 %, 3 % e 5 % de fibras de aço curtas (12,5 mm) e alinhadas, foram obtidos acréscimos de máxima tensão de ruptura e tenacidade à flexão de respectivamente 73 % e 114,9 % em comparação aos compósitos com fibras randômicas. Observou-se também que a orientação da fibra foi capaz de reduzir o volume crítico de fibras na flexão. Tal redução pode ser verificada, por exemplo, através de um comparativo de tenacidades entre os casos randômico e alinhado. No trabalho de Brito [11], valores de tenacidade obtidos das amostras randômicas para 2 % e 3 % de fibras seriam alcançados nas amostras alinhadas com reduções de cerca de 15 % e 26 % no teor de fibras, respectivamente.

Outro ponto interessante apresentado no estudo de Brito [11], foi que o acréscimo da tenacidade para um aumento de 1 % no volume de fibra é significativamente diferente dependendo da orientação do reforço. Comparando o ganho médio de tenacidade entre dois casos, com fibras randômicas e alinhadas, foi possível observar valores praticamente 30 % maiores para o caso de fibras alinhadas. Esse fato resulta da maior quantidade de fibras que cruzam a seção fraturada no caso dos compósitos com fibras alinhadas.

Estudos relatados por Abrishambaf *et al.* [10] mostram que, para compósitos reforçados com 3 % de fibras de aço (alinhadas e randômicas), a quantidade de fibras/cm² na seção fraturada das amostras pode ser quase 50 % maior no caso de fibras orientadas.

Neste contexto o presente estudo contribui para o avanço do conhecimento referente ao comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras naturais. A pesquisa contempla o desenvolvimento de um tratamento superficial da fibra de sisal (*coating*) para torná-la um elemento magnético; desenvolve um método de alinhamento das fibras tratadas imersas em matriz cimentícia; caracteriza física e mecanicamente os compósitos produzidos por meio de ensaios de resistividade elétrica, determinação da velocidade do pulso ultrassônico e ensaios de flexão a quatro pontos; além de avaliar, por meio de análise de imagem (radiografia), a eficácia do método de orientação magnética desenvolvido.

CAPÍTULO 3

3 Fibras, componentes do revestimento e método de tratamento superficial das fibras

3.1 Introdução

Este capítulo (bloco) trata da seleção do adesivo químico empregado como componente do revestimento das fibras e do método do tratamento superficial das fibras de sisal *in natura*. A seleção foi realizada com base em dois critérios específicos: quantidade de massa de material ferromagnético aderido à fibra e absorção de água pelas fibras revestidas. Os resultados obtidos neste capítulo serviram de base para continuidade do estudo.

3.2 Objetivos

Este capítulo (bloco) possui os seguintes objetivos específicos:

- Separar e quantificar o material ferromagnético presente no resíduo de corte de metal;
- Determinar a massa de material ferromagnético aderido às fibras para cada adesivo químico estudado;
- Determinar a absorção das fibras curtas de sisal revestidas com os diferentes adesivos químicos;
- Selecionar o adesivo químico a ser empregado no revestimento das fibras, com base na capacidade de aderir material ferromagnético, absorção de água pela fibra e maior alinhamento da fibra na direção das linhas de campo magnético provocadas pelos ímãs de neodímio.

3.3 Materiais

3.3.1 Fibra de sisal

As fibras empregadas neste trabalho foram fornecidas pela empresa Sisal Sul em *packs* de 1 kg e cerca de 1 m de comprimento.

A Tabela 4 apresenta os valores típicos de propriedades físicas e mecânicas dessa fibra com base no estudo de Toledo Filho [33].

Tabela 4. Valores típicos das propriedades da fibra de sisal.

Propriedades	Média
Massa específica (g/cm ³)	0,90
Resistência à tração (MPa)	615
Módulo de elasticidade	18,82
Deformação na ruptura (%)	3,13
Absorção da água até a saturação (%)	220
Diâmetro (mm)	0,19

Fonte: Toledo Filho.

3.3.2 Resíduo de corte de metais

O resíduo de corte de metal (Figura 4) empregado para promover o alinhamento magnético das fibras curtas de sisal, foi coletado das serras Policorte da Ferrorama Serralheria (aciaria elétrica), localizada no bairro da Luz, zona central da cidade de São Paulo. Todo o resíduo de corte de metal empregado (20 kg) foi proveniente do mesmo fornecedor.



Figura 4. Resíduo de corte de metal (pó de ferro).

Nesse resíduo foram observadas quantidades significativas de impurezas (material não magnético), tendo sido necessária a adoção de dois processos para a separação das impurezas e a remoção de partículas grosseiras (>1,18mm) e não magnéticas.

3.3.3 Adesivos Químicos

Buscando promover a aderência entre fibra e resíduo de corte de metais, necessários para atuação de um campo magnético sobre a fibra, foram testados dois adesivos químicos: a cola de silicone e a cola a base de epóxi (*Compound Gel*).

O adesivo de silicone tem alta viscosidade, textura espessa e forma uma liga extremamente forte e flexível que é resistente à água e altas e baixas temperaturas. Adere vários tipos de material e é especialmente indicada para metais; em sua aplicação exige que as superfícies colocadas em contato sejam pressionadas por pelo menos 30 segundos e tem uma secagem inicial de 5 minutos, com cura completa em 24 horas.

Compound Gel é um adesivo estrutural de base epóxi bi componente, que apresenta resistência inicial em 12 horas e resistência máxima final 7 dias depois da aplicação. Para sua utilização foi executada a proporção pré-estabelecida de acordo com o fabricante para uma mistura da poliamina e da resina epóxi na proporção de 1g de poliamina para 15,66 g de resina epóxi.

A Tabela 5 resume as características dos 2 adesivos químicos empregados na produção do revestimento das fibras.

Tabela 5. Adesivos químicos empregados na pesquisa.

Características	Tipos de adesivos químicos	
	Silicone	Compound Gel
Fabricante	Tek Bond	Vedacit
Base química	Acetato de vinila e metanol	Resina epóxi + poliamina
Aparência (visual)	Líquido viscoso incolor	Pasta viscosa cinza
Viscosidade a 25 °C (cps)	15000	*
Densidade de 20 °C a 25 °C (g/cm ³)	1,0	1,5
Tempo de cura inicial	5 a 30 minutos	12 h
Tempo de cura total	24 horas	7 dias
Temperatura de aplicação (°C)	+ 5 a 45	25
Temperatura de operação (°C)	-30 a 80	*
Validade	48 meses	12 meses

Nota: *Valores não disponibilizados pelo fabricante.

3.3.4 Ímãs de neodímio

O ímã de neodímio (Figura 5) também chamado de ímã de neodímio-ferro-boro, ou menos especificamente de “ímã de terras raras” é um poderoso ímã feito a partir de uma combinação de neodímio, ferro e boro (Nd₂Fe₁₄B). Esses ímãs são muito poderosos em comparação a sua massa, mas também são mecanicamente frágeis e perdem seu magnetismo de modo irreversível em temperaturas acima de 120 °C.

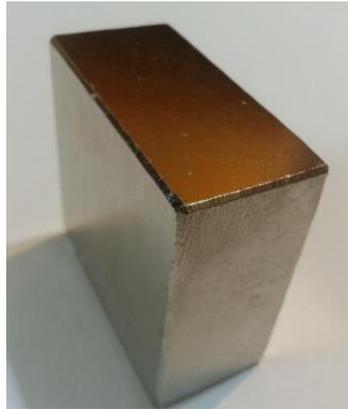


Figura 5. Imã de Neodímio.

Fonte: BRIMAS [34].

Para o alinhamento das fibras de sisal tratadas superficialmente foram utilizados dois imãs de neodímio modelo N50 (Figura 5), adquiridos na New Imãs Indústria e Comércio no centro de São Paulo, apresentando cada um deles, as características descritas na Tabela 6. A opção pelo imã de Neodímio foi realizada face este imã possuir maior intensidade de campo magnético do que os imãs convencionais.

Tabela 6. Características dos imãs de Neodímio empregados no alinhamento magnético das fibras de sisal.

Tipo de imã	Neodímio
Composição química	Níquel, ferro e boro
Dimensão	50,8 x 50,8 x 25,4 mm
Massa	120 g
Resistência a carga	85 kg
Intensidade de campo magnético	5200 Gauss (0,05 Tesla)

3.4 Métodos

3.4.1 Desembaraçamento das fibras

Para o desembaraçamento das fibras de sisal foi utilizada uma placa de compensado em madeira de dimensões 400 x 400 x 10 mm com 247 pregos com cabeça de comprimento 3,75 cm e diâmetro 2 mm. Os pregos foram distribuídos ao longo da superfície em 13 colunas e 19 linhas, tendo sido dispostos 20 mm um do outro. Estes pregos foram fixados na madeira, funcionando como um pente, permitindo uma melhor separação das fibras (próxima da unitária), conforme apresentado na Figura 6.



3.4.2 Separação do material ferromagnético presente dos resíduos de corte de metal

Com o objetivo de garantir a eficácia do processo de alinhamento magnético das fibras de sisal, foi realizada a separação do resíduo de corte de metal, em impurezas e material ferromagnético. Este processo foi executado em duas etapas, sendo a primeira etapa o peneiramento tradicional e a segunda, a separação do material ferromagnético do material não magnético. Durante o peneiramento, partículas maiores que 0,3 mm foram descartadas, sendo aproveitado para o revestimento das fibras, apenas o material passante na malha de 0,3 mm. A segunda etapa consistiu na separação das partículas não magnéticas com o auxílio de um ímã de neodímio, promovendo a separação magnética do material. Esse método consiste em atrair os resíduos ferromagnéticos utilizando duas placas de acrílico sobrepostas a uma distância de 8 cm e um ímã de neodímio situado acima da placa superior, que resulta na separação das impurezas as quais ficam concentradas sobre a placa inferior (entre as placas). A Figura 7 apresenta a separação magnética dos resíduos ferromagnéticos dos não magnéticos utilizando-se um ímã de neodímio.

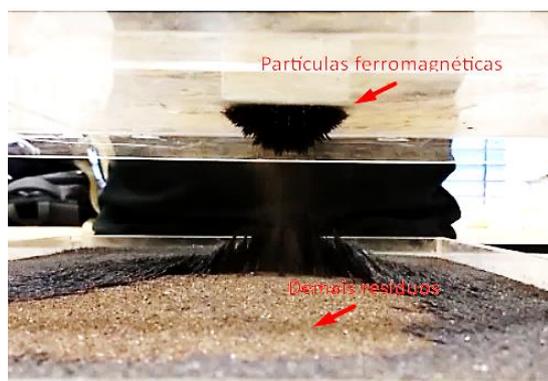


Figura 7. Utilização do ímã de neodímio para separação magnética do resíduo de corte de metal.

3.4.3 Seleção do adesivo químico

A seleção do adesivo químico apropriado para o desenvolvimento do revestimento foi realizada com base em dois critérios específicos: quantidade de massa de material ferromagnético aderido à fibra e absorção de água pelas fibras revestidas.

3.4.3.1 Massa de material ferromagnético aderida à fibra

A fim de selecionar o melhor adesivo para as fibras de sisal, foi realizada a determinação de massa de material ferromagnético aderido às fibras com cada adesivo utilizando uma balança digital da fabricante Marte Balanças e Aparelhos de Precisão Ltda, modelo AL 500, carga máxima 500 g e precisão 0,001 g. Dois adesivos químicos foram empregados: cola de silicone e cola a base de epóxi, conforme descrito no 3.3.3.

O ensaio foi realizado utilizando cinco amostras compostas por dez fibras, cada uma com 15 cm de comprimento, sendo inicialmente determinada a massa de cada fibra desembaraçada. Na sequência, cada fibra foi apoiada em uma superfície plana de madeira e com o auxílio de um pincel de cerdas macias foi aplicado a cada fibra um tipo de adesivo químico separadamente, sendo logo após realizada a determinação da massa com o adesivo. Por fim, as fibras com cada tipo de adesivo foram impregnadas ao resíduo ferromagnético, sendo posteriormente determinada a massa da fibra com o adesivo e o resíduo ferromagnético.

A Figura 8 apresenta a sequência do processo de revestimento das fibras com adesivo químico.

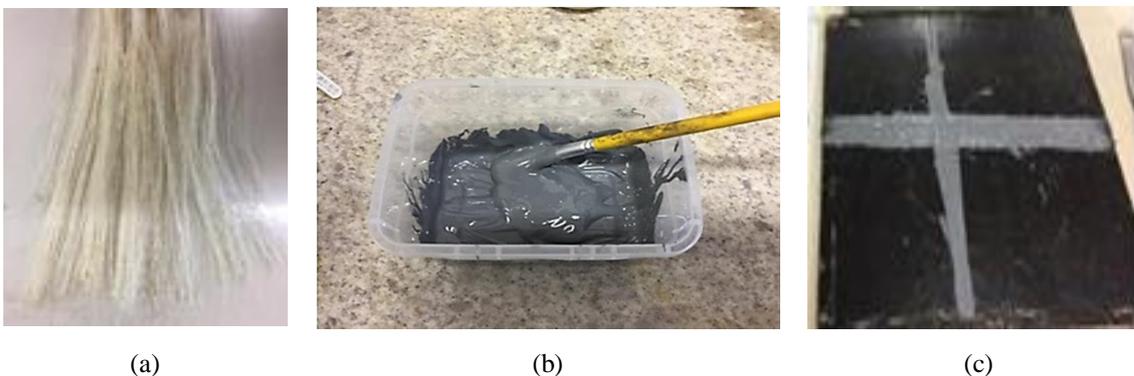


Figura 8. Fibras de sisal desembaraçadas (a); Adesivo químico (b); Placa para aplicação do adesivo na fibra.

A Figura 9 apresenta o processo de impregnação da fibra com resíduo ferromagnético.

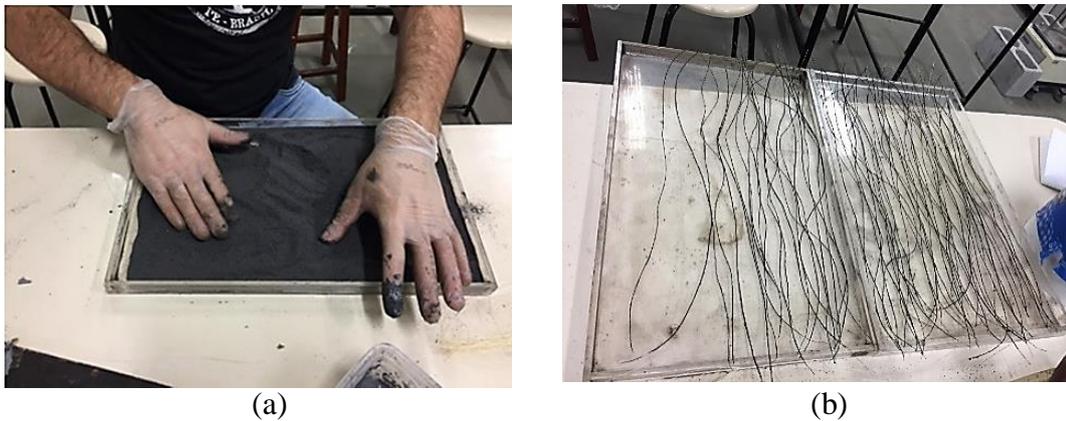


Figura 9. Impregnação da fibra com resíduo magnético (a); Fibras de sisal revestidas com resíduo magnético (b).

O material adesivo e suas diluições são pontos de grande relevância, visto influenciarem diretamente na quantidade de resíduo de corte de metal aderido na fibra e, conseqüentemente na contribuição para a ocorrência do alinhamento da fibra revestida na matriz. O adesivo de silicone por possuir viscosidade elevada, foi diluído utilizando Etanol E-96 (96% de concentração), a fim de melhorar a trabalhabilidade e a adesão do pó de ferro nas fibras de sisal. As diluições empregadas foram 1:1, 1:3 e 2:3 (adesivo de silicone : etanol 96 %). O adesivo *Compound Gel* foi empregado sem diluição, observando as recomendações do fabricante.

3.4.3.2 Absorção de água

Para analisar a capacidade de impermeabilização dos adesivos aplicados às fibras de sisal, foram realizados ensaios de absorção, os quais fornecem o ganho de massa das fibras (revestidas e não revestidas) imersas em água ao longo do tempo. Para este ensaio foram utilizadas amostras compostas, cada uma, por 30 fibras com 20 cm de comprimento.

O ensaio consistiu na imersão dos grupos de fibras revestidas e não revestidas dentro de uma proveta com 1000 ml de água, sendo realizada a pesagem em balança de precisão (três casas decimais) para cada uma das 6 amostras, a cada 30 minutos durante 2 horas e, após 24 horas. O processo foi repetido, para todos os adesivos químicos empregados no estudo.

3.5 Resultados

3.5.1 Separação magnética do resíduo de pó de ferro

Na Tabela 10 encontram-se listados os resultados médios de massa de material ferromagnético e impurezas obtidos das 3 amostras de resíduo testadas. Consta-se que aproximadamente 90 % da massa do resíduo é composta por material ferromagnético.

Tabela 7. Separação do material ferromagnético do material não magnético.

Parâmetro	Total (g)	Massa de material ferromagnético (g)	Massa de impurezas (g)	Média da massa de material ferromagnético (g)	Média da massa de impureza (g)	Impureza (%)
1ª Amostra	1000,00	906,35	93,63			
2ª Amostra	1000,00	892,16	107,84	899,28 ± 7,01	90,56 ± 0,71	10
3ª Amostra	1000,00	899,33	100,67			

A Figura 10 apresenta o resíduo de corte de metal separado em resíduo não magnético e resíduo magnético resultante. Cabe ressaltar que o material empregado no revestimento foi apenas o magnético indicado à direita na figura.

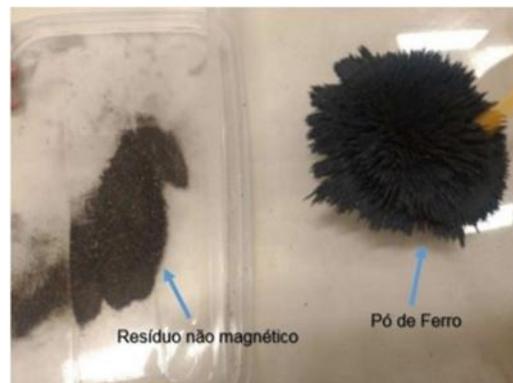


Figura 10. Resíduo não magnético e pó de ferro.

3.5.2 Massa de material ferromagnético aderida

Os resultados da massa média de material ferromagnético aderido nas fibras são apresentados na Tabela 8, a qual apresenta os tipos de adesivos utilizados e suas respectivas massas médias com o material ferromagnético aderido.

Tabela 8. Massa média das amostras com os adesivos químicos utilizados.

Tipo de adesivo	Amostra	Fibra <i>in natura</i> (g)	Fibra + adesivo (g)	Fibra + adesivo + pó de ferro (g)
Adesivo de silicone	Fibra + adesivo puro	0,005 ± 0,001	0,012 ± 0,004	0,022 ± 0,011
	Fibra + adesivo diluído 1/3	0,004 ± 0,001	0,012 ± 0,004	0,029 ± 0,008
	Fibra + adesivo diluído 2/3	0,005 ± 0,001	0,017 ± 0,005	0,055 ± 0,015
	Fibra + adesivo diluído 1/1	0,005 ± 0,001	0,010 ± 0,005	0,037 ± 0,013
Adesivo de Epoxi	Fibra + adesivo puro	0,008 ± 0,001	0,039 ± 0,014	0,129 ± 0,028

A Figura 11 apresenta a massa das fibras com o material ferromagnético aderido, conforme os adesivos químicos utilizados.

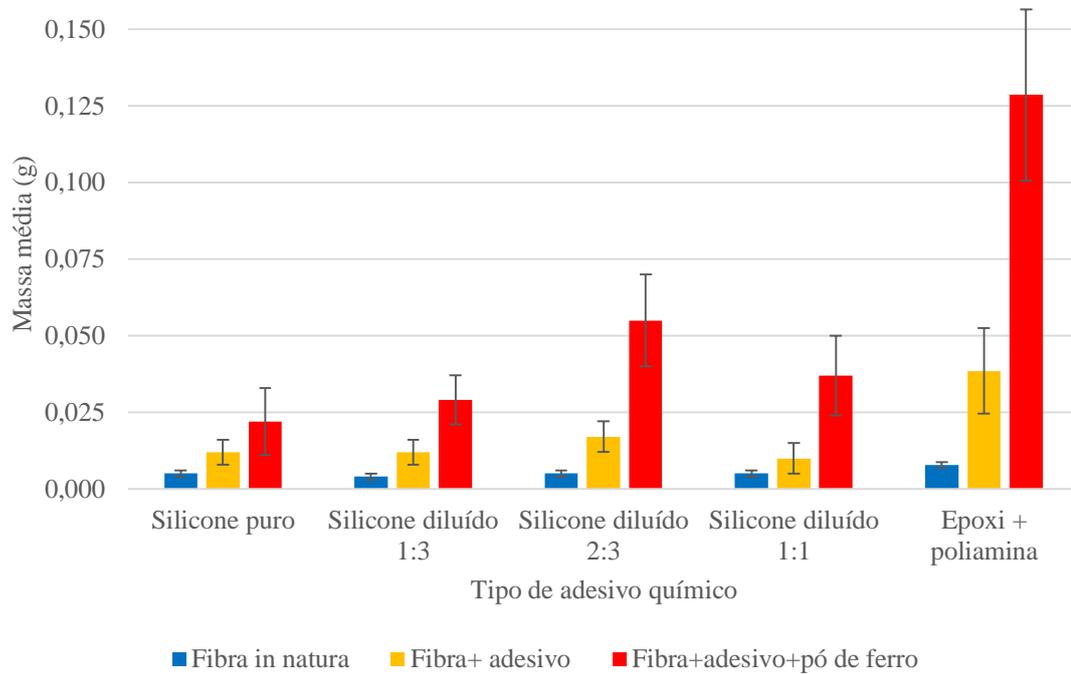


Figura 11. Massa das fibras com material ferromagnético aderido, de acordo com o adesivo químico utilizado.

A Tabela 9 apresenta a razão entre a massa de pó de ferro (m_{Fe}) e a massa de fibra *in natura* ($m_{fibra\ in\ natura}$), de acordo com os adesivos utilizados.

Tabela 9. Razão de m_{Fe}/m_{fibra} de acordo com os adesivos utilizados.

Tipo de adesivo	Diluição	massa de pó de ferro (g)	massa de fibra <i>in natura</i> (g)	$m_{Fe}/m_{fibra\ in\ natura}$ (g/g)
silicone	puro	$0,005 \pm 0,001$	$0,005 \pm 0,001$	$1,000 \pm 0,002$
	diluído 1:3	$0,013 \pm 0,003$	$0,004 \pm 0,001$	$3,250 \pm 0,004$
	diluído 2:3	$0,033 \pm 0,009$	$0,005 \pm 0,001$	$6,600 \pm 0,010$
	diluído 1:1	$0,022 \pm 0,007$	$0,005 \pm 0,001$	$4,400 \pm 0,008$
epóxi	comp A+B	$0,082 \pm 0,013$	$0,008 \pm 0,001$	$10,250 \pm 0,014$

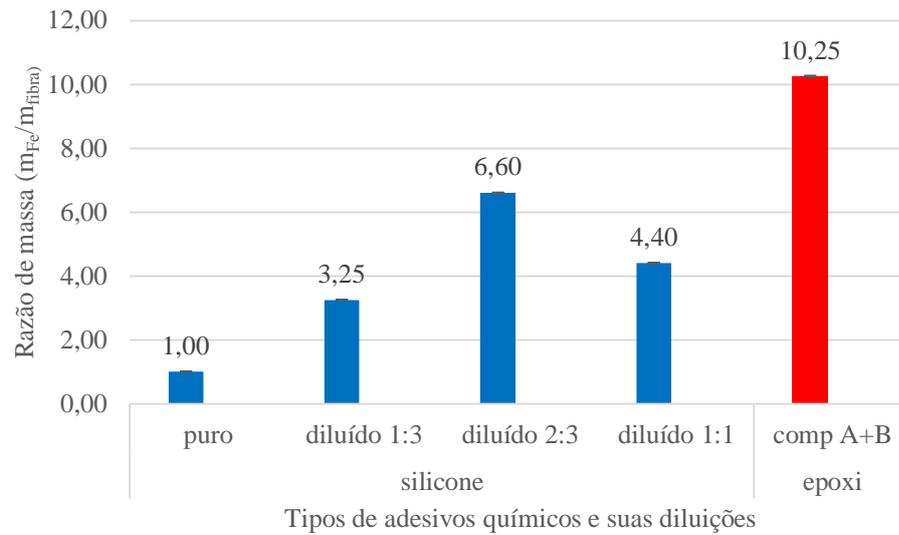


Figura 12. Razão de m_{Fe}/m_{fibra} versus tipos de adesivos.

De acordo com a Figura 12 pode-se observar que a massa de pó de ferro aderida à fibra é de 10,25 vezes a massa da fibra para o adesivo de epóxi mais poliamina (*Compound Gel*), sendo portanto este o adesivo com maior potencial de adesão de partículas magnéticas testado.

Na Figura 13 é apresentada uma imagem de fibras de sisal revestidas como o adesivo *Compound Gel* e impregnadas com partículas ferromagnéticas.



Figura 13. Fibras de sisal revestidas com o adesivo *Compound Gel* e partículas ferromagnéticas.

3.5.3 Absorção de água

A Figura 14 apresenta os resultados obtidos referente ao aumento de massa das fibras *in natura*, revestidas com a melhor diluição de silicone (2:3) e com o epóxi ao longo de 24 horas. Pelo gráfico percebe-se que o *onset* das curvas, em que se inicia uma tendência a estabilização e formação de um patamar, é por volta de 30 min.

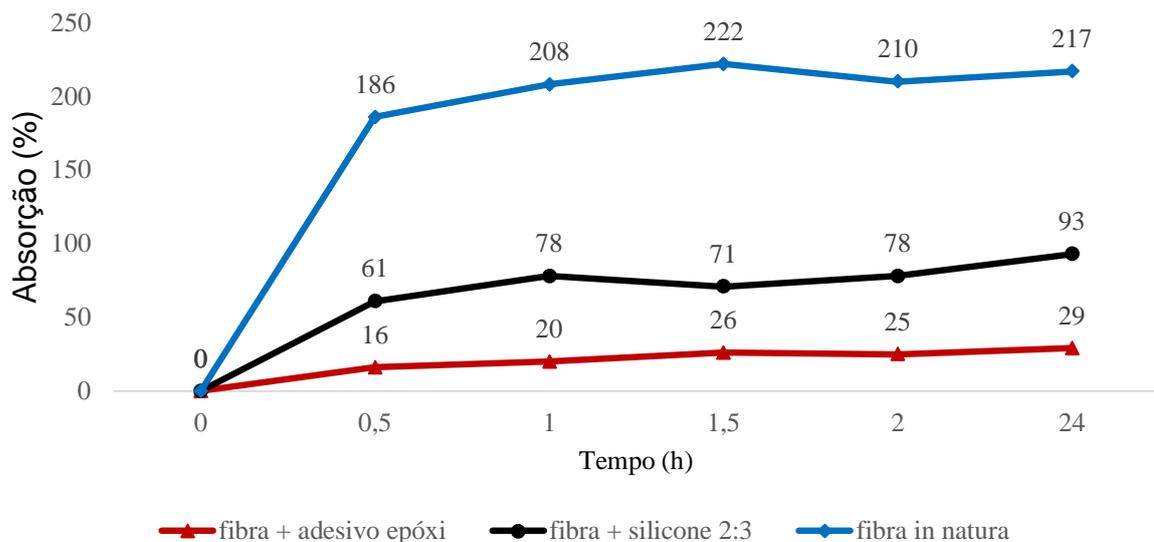


Figura 14. Absorção de água pelas fibras de acordo com o adesivo químico utilizado.

Por meio da Figura 14, observa-se que os adesivos químicos alteram o processo de absorção das fibras de sisal, variando a massa de água absorvida ao longo do tempo. Após 24h, o ganho de massa observado para as fibras naturais, revestidas com silicone e revestidas com epóxi, foi de respectivamente 217 %, 93 % e 29 %. Silva [35] determinou que a absorção de fibra de sisal *in natura* é de cerca de 200 %, consoante com os valores encontrados na Figura 14. Os resultados revelam que o revestimento epóxi é eficiente na redução do potencial de absorção das fibras de sisal. Ocorre que o adesivo acaba blindando parcialmente o reforço de sisal, gerando menor absorção de água nas fibras revestidas. Dessa maneira, o fenômeno de retração por secagem das fibras [36] é provavelmente reduzido, beneficiando as características de adesão do reforço à matriz.

3.6 Conclusões

- Os adesivos químicos empregados como parte do revestimento do reforço foram capazes de promover a adesão de material ferromagnético às fibras. Este efeito foi mais pronunciado para o adesivo a base de epóxi (*Compound Gel*), gerando uma relação m_{Fe}/m_{fibra} de cerca de 10,25.

- Os adesivos químicos também foram capazes de diminuir a absorção de água das fibras. A maior redução observada em relação às fibras de referência foi de 188 % obtida com o uso do adesivo a base de epóxi (*Compound Gel*).

- O adesivo químico selecionado para dar continuidade ao trabalho foi o que obteve os melhores resultados, conforme os critérios estabelecidos, tendo sido o adesivo a base de epóxi (*Compound Gel*).

CAPÍTULO 4

4 Processo piloto de alinhamento magnético

4.1 Introdução

Este capítulo trata do processo que originou o desenvolvimento da metodologia para se obter a orientação magnética de fibras de sisal tratadas superficialmente em meio a uma matriz cimentícia. Este processo foi fundamental para visualizar o efeito do campo magnético gerado por ímãs de neodímio sobre as fibras revestidas (imersas em gel de ultrassom preliminarmente). Também foi essencial para estabelecer parâmetros de consistência do gel a serem empregados na matriz cimentícia, e definir o comprimento das fibras revestidas utilizadas no estudo, dando sequência ao corte das fibras tratadas com resíduo ferromagnético apresentada no capítulo anterior.

4.2 Objetivos

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar o método piloto desenvolvido para alinhamento magnético da fibra tratada superficialmente e os componentes utilizados neste processo. Este processo além de buscar uma consistência ideal para a matriz, (neste caso o gel de ultrassom), define o comprimento de fibra revestida no qual é possível a obtenção do alinhamento magnético. Tanto os valores de consistência quanto o comprimento ideal obtido neste capítulo serão empregados na sequência do estudo voltada à produção dos compósitos cimentícios.

Este capítulo (bloco) possui os seguintes objetivos específicos:

- Visualizar o comportamento das fibras revestidas sob ação do campo magnético quando embebidas no gel de ultrassom;
- Determinar a consistência ideal do gel para movimentação das fibras revestidas sob ação do campo magnético, como parâmetro para produção da matriz cimentícia por meio de ensaio de índice de consistência (*flow table*);

- Determinar o comprimento da fibra revestida a ser empregada como revestimento nos compósitos a partir da rotação das fibras em relação à direção de movimentação dos ímãs.

4.3 Materiais

4.3.1 Fôrmas em acrílico

A fim de que não houvesse interferência magnética no processo foram empregadas no estudo fôrmas de acrílico transparente de espessura 3 mm e dimensões 400 x 250 x 13 mm.

4.3.2 Gel de ultrassom

Para os testes de consistência e de rotação das fibras foi utilizado o gel universal condutor para exames da marca Plurigel Carbogel 1000 g, desenvolvido para uso como meio de contato em exames de ultrassonografia, ecocardiograma, eletrocardiograma, fisioterapia, massagens e aplicações de *Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation* (TENS) e *Functional Electrical Stimulation* (FES). O material possui pH neutro, é inodoro, possui densidade de 0,950 g/ml a 0,970 g/ml, viscosidade de 44,00 – 48,00 Pa.s e solubilidade em água de 100 %.

4.3.3 Água

A água utilizada em toda a fase experimental foi proveniente da rede de abastecimento do Campus da Universidade São Judas Tadeu, unidade mooca, na cidade de São Paulo – SP.

4.3.4 Ímãs de neodímio

Os ímãs de neodímio empregado neste capítulo, foram os mesmos especificados e descritos no capítulo 3, mais especificamente no item 3.3.4.

4.4 Métodos

4.4.1 Ensaio de índice de consistência do gel de ultrassom

O ensaio de índice de consistência da argamassa foi aplicado ao gel de ultrassom e suas diluições, tendo sido realizado de acordo com a norma NBR 13276/02 [39]. Para tal, foram empregados:

- a) Balança com resolução de 0,1 g;
- b) Mesa para índice de consistência;
- c) Molde tronco cônico;
- d) Soquete metálico;
- e) Misturador mecânico;
- f) Paquímetro para medições até 500 mm, com resolução de pelo menos 1 mm.

Antes do início do ensaio foi limpo o tampo da mesa para índice de consistência e a parede do molde tronco-cônico com um pano umedecido, de modo que as superfícies ficassem ligeiramente úmidas.

Logo após, o molde tronco-cônico foi preenchido com gel de ultrassom, colocado de modo centralizado sobre a mesa para índice de consistência. Enquanto um operador segurava o molde firmemente, outro preenchia o molde com gel em três camadas sucessivas, com alturas aproximadas iguais. Em cada uma das camadas foram aplicados, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete de madeira, distribuídos uniformemente.

O rasamento do gel de ultrassom foi realizado passando a régua metálica rente à borda do molde tronco-cônico, com movimentos curtos de vai-e-vem ao longo de toda a superfície. Foi acionado a manivela da mesa para índice de consistência, de modo a que a mesa subiu e caiu 30 vezes em 30 s de maneira uniforme.

Imediatamente após a última queda da mesa, foi medido com paquímetro o espalhamento do molde tronco-cônico original do gel de ultrassom. Estas medidas foram realizadas em três diâmetros tomados em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro e registradas.

O índice de consistência do gel de ultrassom correspondeu à média das três medidas de diâmetro, expressa em centímetros.

4.4.2 Alinhamento das fibras revestidas no gel

Com o objetivo de se obter uma matriz cimentícia com reologia adequada para a ação do campo magnético sobre as fibras revestidas com resíduo ferromagnético foi adotado

preliminarmente o gel de ultrassom. Este gel foi também empregado para simular a consistência ideal para a matriz, facilitar a visualização das fibras sob a ação do campo magnético para a ocorrência do alinhamento das fibras, além da determinação do melhor comprimento.

O ensaio de orientação magnética consistiu em posicionar as fibras já revestidas em gel de ultrassom e submetê-las a um campo magnético, verificando o comportamento das fibras mediante a consistência do gel que simula a pasta cimentícia.

Para este ensaio foi utilizado gel de ultrassom nas diluições 1:1, 1:2 e 1:3 (gel : água), um corpo de prova em acrílico preparado com separadores em madeira de 20 mm de altura, compondo 3 fôrmas de 240 x 50 x 13 mm. Também foram utilizadas fibras de sisal revestidas com diferentes comprimentos e dois imãs de neodímio N50 de dimensões 50,8 x 50,8 x 25,4 mm separados por um bloco de madeira de secção quadrada de 58 mm² e comprimento de 120 mm, conforme ilustrado na Figura 15.



Figura 15. Imãs de neodímio separados por um bloco de madeira.

Com o intuito de avaliar o melhor parâmetro de comprimento da fibra, foram criados três grupos de fibras revestidas. Cada grupo contou com 10 fibras revestidas, cada qual com medidas de 10, 20 e 30 mm, as quais foram acomodadas em espaços de dimensões 240 mm x 50 mm, iguais aos moldes produzidos (Figura 16).

Os testes foram realizados com espessuras de gel de 13 mm. O deslocamento do conjunto formado pelos dois imãs separados pelo bloco de madeira ocorreu linearmente sob cada grupo de fibras, de forma manual, em duas passagens (ida e volta), na direção do maior

lado do molde (240 mm) em uma velocidade aproximada de 7 cm/s, conforme mostra a Figura 16.

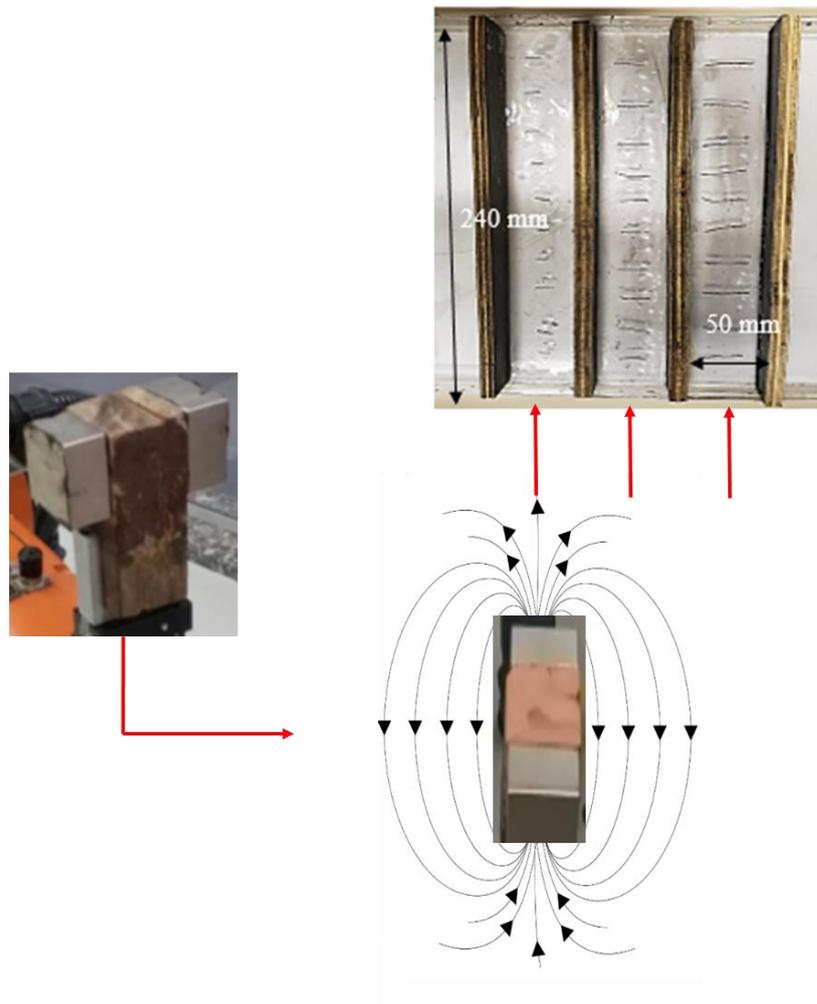


Figura 16. Esquema do processo piloto de alinhamento magnético.

O conjunto (dois ímãs separados pelo bloco de madeira) proposto para o alinhamento, bem como seu posicionamento para o deslocamento, foi decorrente de testes preliminares, os quais indicaram melhores resultados do efeito das linhas de campo sobre as fibras revestidas.

Para o emprego do campo em sua maior intensidade, a distância entre a superfície inferior da placa de acrílico e o deslocamento dos ímãs foi nula. Com isso, buscou-se a rotação das fibras revestidas formando ângulos inferiores a 45° em relação à direção de deslocamento dos ímãs, de forma a ser realizado uma análise quantitativa simples de contagem das fibras.

4.5 Resultados

4.5.1 Consistência do gel e tamanho da fibra

A Tabela 10 apresenta os resultados do espalhamento das diluições do gel obtidos por meio do ensaio de índice de consistência, bem como o resultado do número de fibras obtido com ângulo menor de 45° em relação à direção de movimento dos imãs.

Tabela 10. Número de fibras com ângulo $< 45^\circ$ em relação à direção de movimento dos imãs.

Diluição (gel:água)	Espalhamento (cm)	Nº de fibras com ângulo $< 45^\circ$ em relação à maior dimensão do molde (direção de movimento dos imãs)		
		10 mm	20 mm	30 mm
1 : 1	21,24	0	0	0
1 : 2	32,25	0	0	0
1 : 3	40,94	10	1	0

A Figura 17 apresenta o resultado do processo experimental descrito em 4.1.3.3 em que amostras de fibras de 10, 20 e 30 mm foram imersas em gel de ultrassom nas diluições 1:1, 1:2 e 1:3 (gel:água) com espessuras de 13 mm.



Figura 17. Resultado da ação do campo magnético em vários tamanhos de fibras revestidas no gel.

Observa-se que para a diluição de gel na proporção 1:3 (gel:água), as fibras de comprimento 10 mm (pertencentes ao grupo da esquerda na Figura 17 se alinharam na direção do movimento do imã com todas as 10 fibras apresentando um ângulo inferior a 45° após ação dos imãs. O grupo de fibras com comprimento 20 mm apresentou dificuldade para rotacionar, sendo que em apenas 1 fibra foi detectado ângulo inferior a 45° . Para as fibras mais longas, grupo com 30 mm de comprimento, praticamente não houve movimentação das fibras.

Em virtude desse resultado, concluiu-se que, partindo da ótica da orientação, as fibras de 10 mm possuíam o comprimento propício para o prosseguimento do estudo. Entretanto, há que se fazer a ressalva, de que quanto menor o comprimento da fibra, menor será a sua capacidade de reforço.

4.6 Conclusões

- A utilização do gel de ultrassom proporcionou a visualização do efeito da ação do campo magnético gerado pelos ímãs de neodímio sobre as fibras tratadas superficialmente;

- A diluição do gel na proporção 1:3 propiciou o alinhamento das fibras revestidas (com 10 mm de comprimento) quando submetidas à ação do campo magnético gerado pelos ímãs de neodímio.

- As fibras revestidas selecionadas para dar continuidade ao estudo foram as fibras de comprimento 10 mm, as quais obtiveram o melhor desempenho em termos de alinhamento na direção das linhas de campo magnético.

CAPÍTULO 5

5 Produção da matriz e dos compósitos e processo de orientação magnética das fibras na matriz

5.1 Introdução

Este capítulo aborda inicialmente a produção da matriz, considerando-se a importância de uma elevada fluidez para movimentação das fibras sob a ação de um campo magnético. Para tanto, procurou-se obter uma matriz com consistência/abatimento similar ao do gel obtido na definição do comprimento das fibras. Foram testadas ao todo três pastas com traços diferentes com o objetivo de atingir a consistência necessária para a movimentação das fibras (próxima da consistência do gel na diluição 1:3). Foram também produzidos três tipos de compósitos combinando fibras *in natura* e revestidas, dispersas randomicamente e submetidas ao processo de alinhamento magnético controlado por um braço mecânico industrial. A fim de garantir a padronização do processo de moldagem dos compósitos foi adotada a fração volumétrica de 0,56 % em massa de fibra de sisal *in natura* para cada tipo de amostra de compósito produzido.

5.2 Objetivos

Este capítulo (bloco) possui os seguintes objetivos específicos:

- Definir o tipo e o traço de matriz empregada para produção dos compósitos;
- Apresentar a nomenclatura empregada na produção dos compósitos;
- Apresentar o processo de orientação magnética das fibras na matriz cimentícia, juntamente com parâmetros de velocidade, números de deslocamentos e distância de operação dos ímãs ao corpo de prova.

5.3 Materiais

5.3.1 Cimento

O cimento empregado na produção da matriz foi o cimento CPV ARI Premium da marca LIZ de mesmo lote. Suas características de resistência à compressão são normatizadas pela NBR 16697 [37]. Esta norma prevê que em 28 dias o cimento Portland V ARI possua, em

média, uma resistência à compressão na faixa de 50,7 MPa, e massa específica média de 3,09 g/cm³.

A massa específica do cimento foi calculada pelo método do frasco de Le Chatelier, de acordo com a NBR 16605 [38], tendo sido obtida a densidade média resultante de 3,0 g/cm³, valor este correspondente ao fornecido pelo fabricante. Todo o cimento empregado (20 kg) foi proveniente de um único lote de produção.

A Tabela 11 mostra a composição química do cimento Portland CP V ARI utilizado no experimento.

Tabela 11. Composição química do Cimento Portland.

Composto	Sigla	Teor médio (%)
Óxido de Cálcio	CaO	60 a 67
Dióxido de Silício	SiO ₂	17 a 25
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	3 a 8
Óxido de Ferro III	Fe ₂ O ₃	0,5 a 6

Fonte: ABNT NBR 16697 [37].

A ficha técnica da composição química do cimento CP V ARI PREMIUM da marca LIZ encontra-se no anexo.

5.3.2 *Filler* de Calcário

Com o objetivo de se produzir uma matriz altamente fluida, com consistência similar àquela obtida pelo gel diluído na proporção 1:3, buscou-se utilizar no estudo uma matriz comum em fibrocimento com alto fator a/c. O *filler* de calcário (pureza de 96 % em CaCO₃) utilizado neste estudo foi o fornecido pela fabricante Holcim. Todo *filler* empregado (20 kg) foi proveniente de um único lote. A massa específica do *filler* foi calculada pelo método do frasco de Le Chatelier, de acordo com a NBR 16605 [38] tendo sido obtida a densidade média de 2,76 g/cm³.

5.3.3 Água

A água utilizada em toda a fase experimental foi proveniente da rede de abastecimento do Campus da Universidade São Judas Tadeu, unidade Mooca, na cidade de São Paulo – SP.

5.3.4 Fôrmas de acrílico

Os corpos de prova foram moldados em um recipiente de acrílico construído com dimensões de 400 x 250 x 13 mm e preparados com divisórias de isopor para receber amostras de 240 x 50 x 13 mm, conforme mostra a Figura 32.

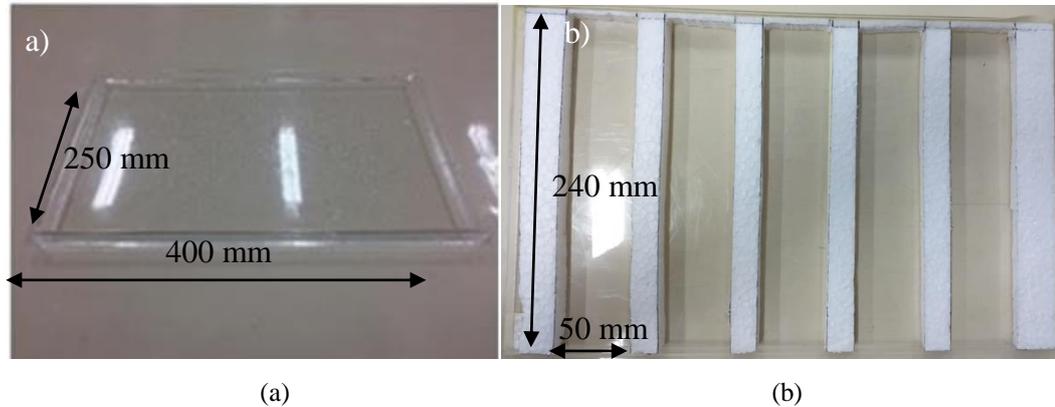


Figura 18. (a) Fôrma de acrílico e (b) fôrma com divisões em isopor para recebimento da mistura.

5.3.5 Imã de neodímio

Os imãs de neodímio empregado neste capítulo, foram os mesmos especificados e descritos no capítulo 3, mais especificamente no item 3.3.4.

5.3.6 Robô

No processo de desenvolvimento do método de alinhamento das fibras revestidas com material ferromagnético utilizando os imãs de neodímio foi empregado um robô industrial (Figura 19) fabricado pela KUKA modelo KRC 900, com capacidade de carga 6 kg, velocidade máxima de 2 m/s e alcance de 80 cm. O robô industrial foi empregado para garantir estabilidade a todo o processo de moldagem das amostras (ex: controle de velocidade e posição em relação a fôrma).



Figura 19. Braço robótico.

5.4 Métodos

5.4.1 Definição/produção da matriz

Neste estudo foram empregadas ao todo três matrizes com o objetivo de atingir a consistência necessária para a ocorrência do alinhamento das fibras sob a ação do campo magnético dos ímãs de neodímio. Diante da necessidade de obtenção de uma matriz bem fluida e com partículas finas optou-se por uma matriz de fibrocimento. A escolha da matriz foi realizada por meio de ensaio de índice de consistência de argamassa (*flow table*), conforme a norma NBR 13276 [39], buscando espalhamento similar ao do gel de ultrassom diluído empregado no item 4.5.1.

Os traços em massa testados foram produzidos nas seguintes proporções 1:1:0,9 ; 1:1:1 e 1:1:1,1 (cimento: *filler* : água).

Uma vez determinado o traço da matriz, a produção da mesma foi realizada segundo a ABNT NBR 13276, cujo procedimento é descrito a seguir.

Foi utilizada uma argamassadeira planetária da marca Solotest, com duas velocidades de configuração: lenta (140 rpm) e rápida (285 rpm), de movimento planetário, com capacidade para 5 litros e batedor em aço inoxidável.

Para a produção da matriz, inicialmente foi realizado o umedecimento da cuba de modo a evitar a perda na relação a/c pré-estabelecida. Em seguida houve a mistura dos insumos secos da matriz (cimento e *filler*) na velocidade lenta por 60 segundos, sendo posteriormente

adicionado água à mistura com a argamassadeira em funcionamento na velocidade lenta também por 60 segundos.

5.4.2 Produção dos compósitos

Após a matriz ser produzida, teve início o processo de produção dos compósitos os quais foram desenvolvidos com e sem orientação magnética de fibras. A fôrma de acrílico utilizada, com dimensões de 400 x 250 x 13 mm (comprimento x largura x espessura), permitiu a produção de 5 amostras para cada um dos compósitos produzidos.

Com o auxílio de isopor, as quatro fôrmas de acrílico foram divididas em cinco partes (Figura 20) de medidas 240 mm x 50 mm x 13 mm, a fim de produzir maior quantidade de amostras para cada compósito. As amostras, após desforma, permaneceram com dimensões de 240 x 50 x 13 mm (comprimento x largura x espessura).

Com os quatro corpos de prova (Figura 20), foram produzidos quatro diferentes tipos de amostras de placas cimentícias, conforme listado na Tabela 12.

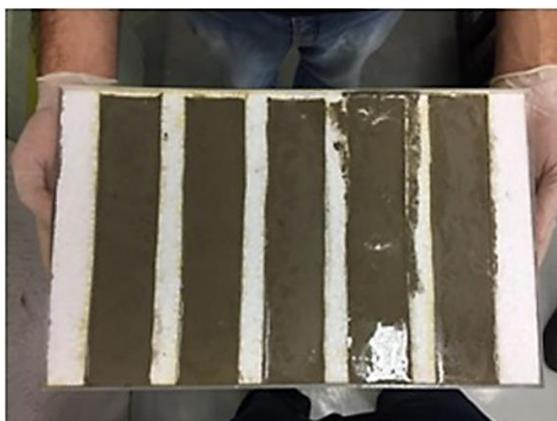


Figura 20. Moldagem em corpo de prova de acrílico preparado para cinco amostras de 240 x 50 x 13 mm.

A Tabela 12 apresenta a nomenclatura definida para os compósitos desenvolvidos no estudo. Ao todo 4 abreviaturas foram utilizadas: CC_S_IN_RA: Compósito cimentício reforçados com fibras de sisal *in natura* dispersas randomicamente; CC_S_R_RA: Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal revestidas e dispersas randomicamente; CC_S_R_OR: Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal revestidas e orientadas magneticamente e MATRIZ: Matriz cimentícia sem reforço.

Tabela 12. Nomenclatura e características da matriz e compósitos reforçados com fibras de sisal.

Sigla	Característica do compósito
Matriz	Matriz cimentícia sem reforço
CC_S_IN_RA	Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal <i>in natura</i> dispersas randomicamente
CC_S_R_RA	Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal revestidas e dispersas randomicamente
CC_S_R_OR	Compósito cimentício reforçado com fibras de sisal revestidas e orientadas magneticamente

Conforme testes preliminares realizados, adotou-se a fração volumétrica de 0,56 % em massa de fibra de sisal *in natura* para cada compósito produzido para evitar aglomerados de fibras e dificuldades de alinhamento, além de uniformizar os compósitos para comparação dos resultados.

A fração volumétrica adotada de 0,56 % corresponde a 0,78 g de fibra *in natura*, cuja massa revestida equivale a 15 g. Portanto, para cada amostra com fibra *in natura* contendo 0,78 g, tem-se o correspondente a 15 g de fibra revestida para cada amostra de compósito, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13. Correlação entre a massa de fibra *in natura* e revestida presentes nos compósitos.

NOMENCLATURA	Vf (%) <i>in natura</i>	Massa de fibra <i>in natura</i> (g)	Massa de fibra + Revestimento (g)
Matriz	0	0	0
CC_S_IN_RA	0,56	0,78	0,78
CC_S_R_RA	0,56	0,78	15
CC_S_R_OR	0,56	0,78	15

A metodologia de moldagem de cada tipo de compósito é apresentada por meio da Tabela 14 iniciando com a aplicação de óleo nas formas para proporcionar o desmolde das amostras. A fim de padronizar o processo para comparação e análise final dos compósitos, foi adotado o mesmo tempo empregado na moldagem do compósito CC_S_R_OR (em que foi utilizado o braço mecânico com os ímãs de neodímio), para a moldagem do compósito CC_S_R_RA.

Tabela 14. Nomenclatura e processo de moldagem de cada tipo de compósito.

Nomenclatura	N de etapas para moldagem de 1 amostra	Etapas	Tempo decorrido (s)	Processo de moldagem
Matriz	2	1	30	Lançamento de 1/2 da massa matriz na forma + acabamento de superfície
		2	30	Lançamento de 1/2 da massa matriz na forma + acabamento de superfície + arrasamento
CC_S_IN_RA	5	1	30	Lançamento de 1/3 da massa matriz na forma
		2	30	Lançamento de 1/2 da massa com fibras (0,39 g) + acabamento da superfície
		3	30	Lançamento de 1/3 da massa matriz na forma
		4	30	Lançamento de 1/2 da massa com fibras (0,39 g) + acabamento da superfície
		5	30	Lançamento de 1/3 da massa matriz + acabamento de superfície + arrasamento
CC_S_R_RA	4	1	30	Lançamento de 2/3 da massa matriz na forma
		2	180	Lançamento de 1/6 da massa com fibras (2,5 g) + acabamento da superfície
		3	6 x 180	Repetição da etapa 2 por seis vezes
		4	30	Lançamento de 1/3 da massa matriz + acabamento de superfície + arrasamento
CC_S_R_OR	4	1	30	Lançamento de 2/3 da massa matriz na forma
		2	180	Lançamento de 1/6 da massa com fibras (2,5 g) + deslocamento dos imãs 4 vezes = 2 x (ida+volta) sob a forma + acabamento da superfície
		3	6 x 180	Repetição da etapa 2 por seis vezes
		4	30	Lançamento de 1/3 da massa matriz + acabamento de superfície + arrasamento

Vale ressaltar que durante a produção de cada grupo das amostras foi necessário manter a argamassadeira em regime de trabalho constante na primeira velocidade, sendo desligada apenas por poucos instantes para a retirada da quantidade de matriz correspondente para produção de uma amostra.

Para cada uma das cinco amostras de fibra *in natura* não orientada (CC_S_IN_RA) foram utilizadas duas porções de fibras *in natura* contendo 0,39 g cada. Já os compósitos CC_S_R_RA e CC_S_R_OR utilizaram em cada amostra 6 porções de 2,5 g de fibras revestidas em cada porção.

Uma vez produzidos a matriz e os compósitos CC_S_IN_RA e CC_S_R_RA destaca-se a metodologia para a orientação magnética de fibras revestidas de sisal para a obtenção do CC_S_R_OR.

Para a realização do procedimento de alinhamento magnético foram utilizadas as fôrmas descritas no item 4.3.1, dois imãs de neodímio separados por um bloco de madeira (Figura 15) e o braço robótico (item 5.3.6).

Para estabilidade do processo foi montada uma estrutura de apoio aos corpos de prova para que o alinhamento das fibras fosse realizado pelo braço robótico, o qual foi programado para executar o deslocamento linear dos imãs abaixo da placa considerando a distância de 6 mm entre imãs e placa, onde foi posicionado os moldes para receber a matriz cimentícia e as fibras revestidas (Figura 21 (a) e (c)).

O acabamento superficial citado na Tabela 14 foi realizado de forma manual, por meio de 20 movimentos verticais (sem penetração na amostra), de um soquete de aço na superfície do compósito, a fim de impedir que parte das fibras permanecesse acima da superfície da matriz, conforme é apresentado na Figura 21 (d).

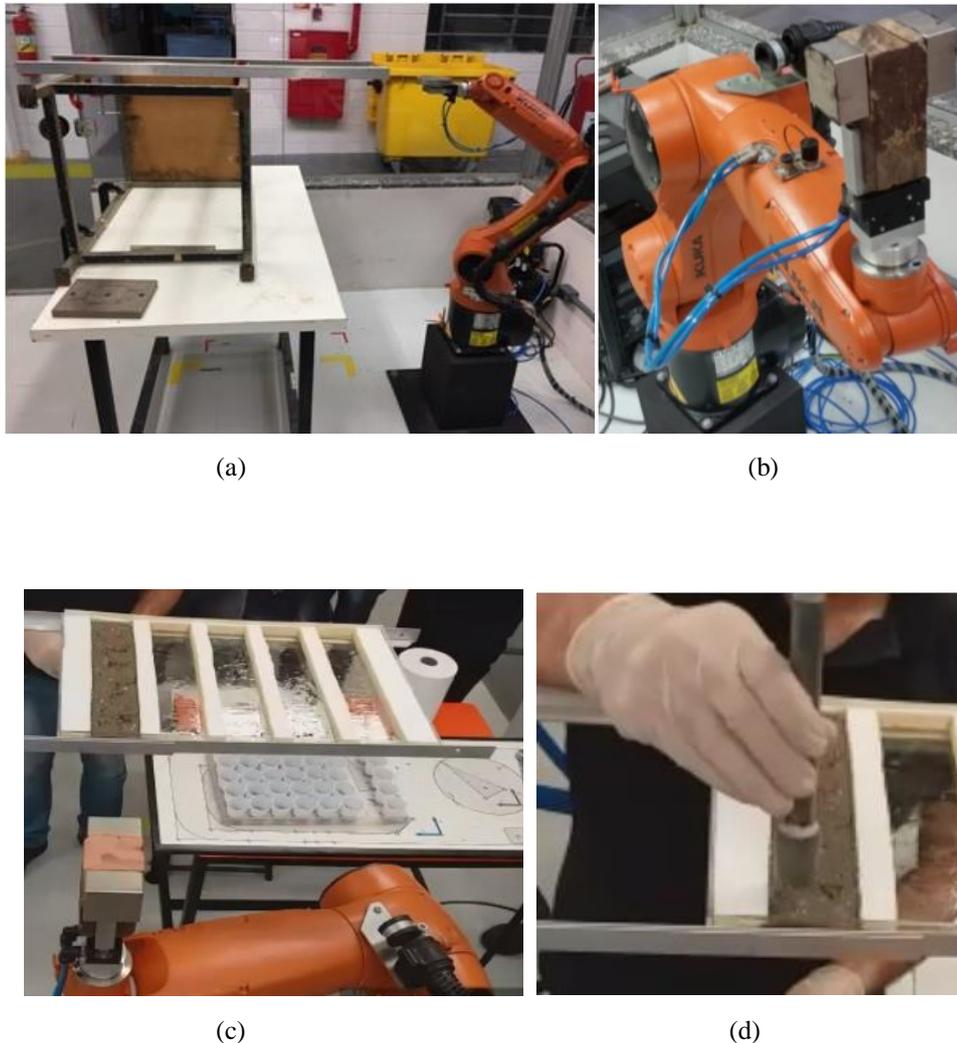


Figura 21. (a) Braço robótico e suporte para corpo de prova; (b) bloco de madeira com imãs fixados na garra do robô; (c) deslocamento dos imãs sob o molde e (d) acabamento de superfície.

O braço robótico com os ímãs de neodímio acoplados foi configurado com movimento linear e velocidade constante de 0,5 cm/s, de modo a realizar quatro passagens 2 x (ida + volta) sob as amostras em cada uma das seis aplicações de fibra revestida (6 x 2,5 g), totalizando 24 passagens do ímã sob cada amostra CC_S_R_OR.

Uma vez produzidas, as amostras foram levadas para uma câmara de cura, a 25 °C por 28 dias (Figura 22). Um pano úmido foi empregado sobre as amostras a fim de garantir a umidade superficial das mesmas e evitar fissuras de retração por secagem.



Figura 22. Amostras em câmara úmida após processo de moldagem.

5.5 Resultados

5.5.1 Definição da matriz e traço empregados

- Os resultados médios do ensaio de índice de consistência [39], obtidos das matrizes de fibrocimento testadas são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15. Resultado do ensaio de *flow table*.

Traço	Espalhamento (cm)
1:1:0,9	39,37
1:1:1	41,23
1:1:1,1	43,23

Dentre os traços avaliados, o escolhido para a produção dos compósitos foi 1:1:1, tendo em vista a proximidade de seus resultados de espalhamento (41,23 cm) com àqueles obtidos para o gel diluído na proporção 1:3 (40,94 cm). A matriz com teor de água 0,9 gerou resistência à rotação das fibras devido a sua consistência menos fluida. Por fim, na matriz com teor de água

1,1, foi observada forte exsudação, a qual dificultava o processo de moldagem e posteriormente a cura.

5.5.2 Velocidade de operação do braço mecânico

O braço robótico foi configurado com movimento linear e velocidade constante de 0,5 cm/s. Esta escolha foi baseada em observação visual do alinhamento das fibras durante testes preliminares. Há que ressaltar que a velocidade empregada no robô foi inferior àquela empregada no gel (7 cm/s) para garantir o alinhamento das fibras. A menor velocidade foi adotada em função da maior densidade da matriz em relação ao gel de ultrassom (1,87 vezes superior) e também, em função do volume de fibras empregado nos compósitos, o qual é muito superior ao empregado nos testes com gel.

5.5.3 Número de deslocamentos do braço mecânico

O braço robótico foi configurado com movimento linear e velocidade constante de 0,5 cm/s, de modo a realizar quatro passagens 2 x (ida + volta) sob as amostras com os ímãs de neodímio acoplados a esse braço em cada uma das seis aplicações de fibra revestida (6 x 2,5 g), totalizando 24 passagens do ímã sob cada amostra CC_S_R_OR.

5.5.4 Distância de operação do braço mecânico ao corpo de prova

A distância estabelecida, com base em testes preliminares, para operação do braço mecânico com os ímãs de neodímio sob os corpos de acrílico com os moldes foi de 6 mm.

5.6 Conclusões

- A matriz de fibrocimento de traço 1 : 1 : 1 (cimento : *filler* : água) foi a que apresentou o espalhamento mais próximo do gel diluído na proporção 1:3, favorecendo a movimentação e alinhamento das fibras e por isso foi a adotada.

- Os parâmetros de configuração do braço robótico que surtiram melhor desempenho para o processo foram velocidade de 0,5 cm/s, 24 deslocamentos do braço mecânico sob o corpo de prova e distância de 6 mm dos ímãs ao corpo de prova.

CAPÍTULO 6

6 Caracterização físico/mecânica e análise de imagem

6.1 Introdução

Este capítulo trata da caracterização física e mecânica da matriz e dos compósitos, bem como da análise de imagem dos compósitos produzidos. A caracterização física é abordada por meio de análise dimensional e de ensaios não destrutivos de determinação da resistividade elétrica e determinação de velocidade de pulso ultrassônico. A caracterização mecânica é apresentada por meio de ensaios de compressão da matriz e flexão da matriz e dos compósitos. A caracterização mecânica foi realizada respectivamente, para avaliar a resistência da matriz e a influência das fibras alinhadas no comportamento mecânico dos compósitos. Além disso, também foi realizada a análise de imagem por meio de radiografias para avaliar a eficácia do método de alinhamento de fibras naturais revestidas desenvolvido no estudo.

6.2 Objetivos

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a caracterização física e mecânica da matriz e dos compósitos produzidos, bem como apresentar os resultados e a eficácia do alinhamento magnético realizado por meio da análise de imagem dos compósitos.

Este capítulo (bloco) possui os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar fisicamente os compósitos produzidos por meio de análise dimensional.
- Caracterizar por meio de ensaios de resistividade elétrica os compósitos produzidos;
- Caracterizar por meio de ensaios de velocidade de pulso ultrassônico os compósitos produzidos;
- Caracterizar a matriz por meio de ensaios de compressão;
- Caracterizar, por meio de ensaios de flexão, o comportamento mecânico de todos os compósitos produzidos;

- Analisar por meio de imagens de radiografia a orientação do reforço pós processo de alinhamento e cura dos compósitos.

6.3 Materiais e Métodos

6.3.1 Caracterização física

Para a caracterização física foi realizada a análise dimensional de todas as amostras produzidas utilizando-se um paquímetro digital com duas casas de precisão, além de terem sido executados ensaios não destrutivos de determinação de resistividade elétrica e determinação de velocidade do pulso ultrassônico.

6.3.1.1 Determinação da resistividade elétrica

Para o ensaio de resistividade elétrica foi utilizado o equipamento Resipod, que consiste em quatro sondas Wenner da marca Proceq que pode realizar medidas em uma faixa de $1\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ até $1000\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ usando uma frequência de 40 Hz. Uma corrente é aplicada entre sondas externas e a diferença de potencial é medida entre as sondas internas. A resistividade obtida depende das propriedades elétricas do material e do espaçamento das sondas. A resistividade elétrica foi medida na face inferior das amostras produzidas, em virtude desta face estar mais plana (sem irregularidades).

O ensaio de resistividade elétrica foi executado em todas as 20 amostras (matriz e compósitos) produzidas para este estudo. O objetivo principal foi avaliar se a orientação das fibras seria capaz de alterar as propriedades elétricas dos compósitos. Tal fato é comum em compósitos reforçados com fibras de aço, acarretando anisotropia nos valores de resistividade ao longo do volume do compósito [11].

A Figura 23 apresenta o ensaio de resistividade elétrica realizado aos 19 dias de idade dos compósitos a uma temperatura de 24°C em ambiente seco.



Figura 23. Ensaio de resistividade nos compósitos.

Foram realizadas três medições, em três linhas paralelas, na face inferior de cada uma das cinco amostras dos quatro grupos de materiais, espaçadas aproximadamente 12,5 mm em relação a sua largura. As medições foram realizadas sobre uma bancada de madeira, tendo sido usado água no momento de medição nas extremidades da sonda.

O método de *Wenner*, conforme é conhecido utiliza quatro eletrodos posicionados linearmente e equidistantes, onde é aplicada uma corrente às duas sondas nas extremidades, sendo a diferença de potencial medida entre as duas sondas internas (Figura 24). A resistividade elétrica calculada depende do espaçamento do equipamento utilizado, que no caso do Resipod é de 38 mm.

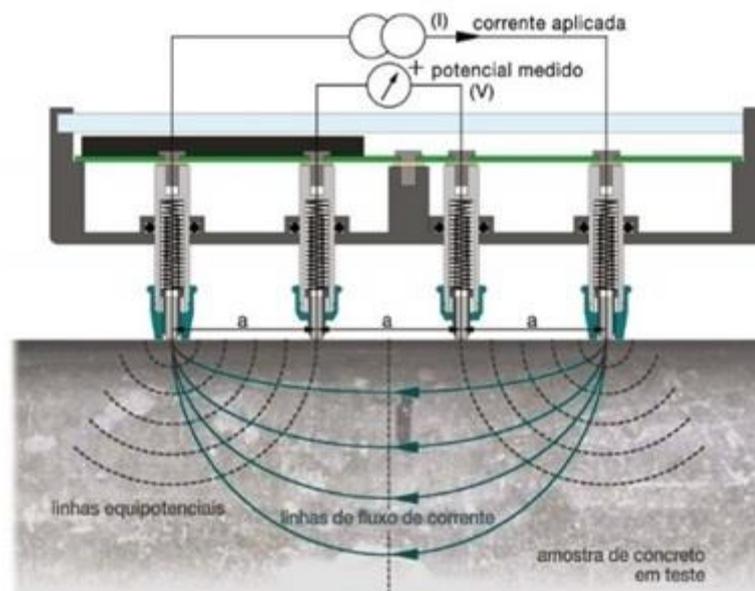


Figura 24. Funcionamento da sonda *Wenner*.

Fonte: Manual do equipamento Resipod da marca Proceq.

6.3.1.2 Determinação da velocidade do pulso ultrassônico

Para a determinação da velocidade do pulso ultrassônico foi utilizado o instrumento Pundit Lab da marca Proceq com precisão de 0,1 μ s, acoplados a transdutores de 54 kHz. A velocidade de pulso ultrassônico é calculada pela distância entre os transdutores dividida pelo tempo de propagação. Os ensaios foram realizados aos 19 dias de idade, seguindo as recomendações da NBR 8802 [40]. Os procedimentos de medição da onda foram realizados de forma indireta, ou seja, o transdutor-emissor e transdutor-receptor estiveram na mesma face inferior da placa apoiados sobre uma bancada de madeira, conforme é demonstrado na Figura 25.



Figura 25. Ensaio para determinação da velocidade do pulso ultrassônico.

Após a calibração, foram marcados dois pontos de medição em cada amostra, sendo alocado o transdutor-receptor a uma distância 8 cm do transdutor-emissor, para a medição do primeiro ponto; logo após, o transdutor receptor foi deslocado para o segundo ponto, a uma distância de 16 cm do transdutor emissor. A Figura 26 demonstra o procedimento adotado para as medições.

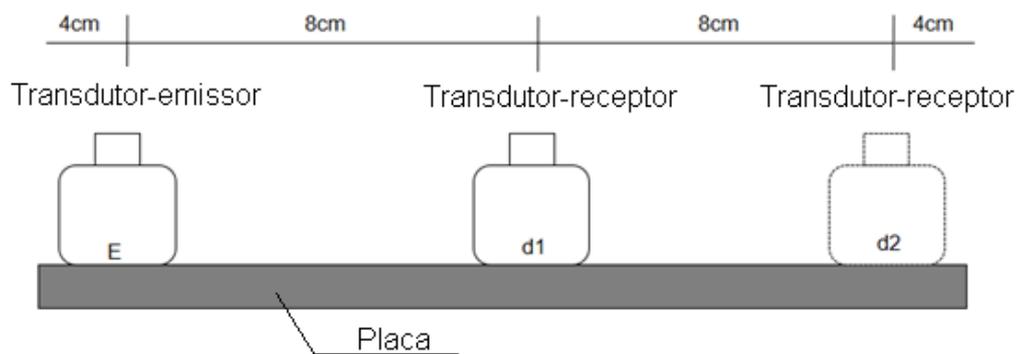


Figura 26. Posicionamento dos transdutores para o ensaio de ultrassom.

Duas medidas foram realizadas para cada amostra. A cada nova medida foi realizada a substituição do material acoplante (gel) dos transdutores. A determinação da velocidade de propagação do pulso ultrassônico também foi obtida por meio indireto, através da inclinação da reta obtida pela correlação entre a distância dos transdutores e o tempo efetivo de propagação da onda, conforme mostra a Figura 27.

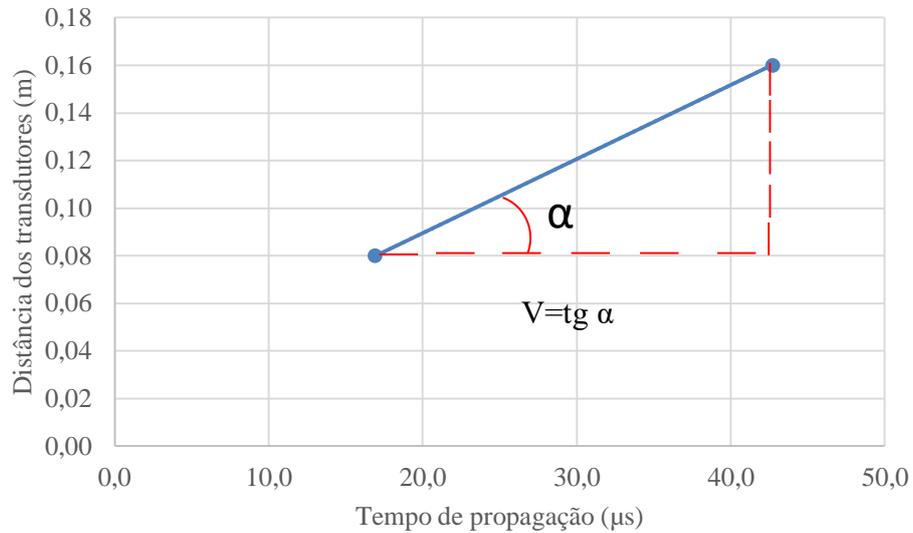


Figura 27. Velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

6.3.2 Caracterização mecânica

6.3.2.1 Ensaio de compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados segundo a NBR 5739 [41], conforme Figura 28.

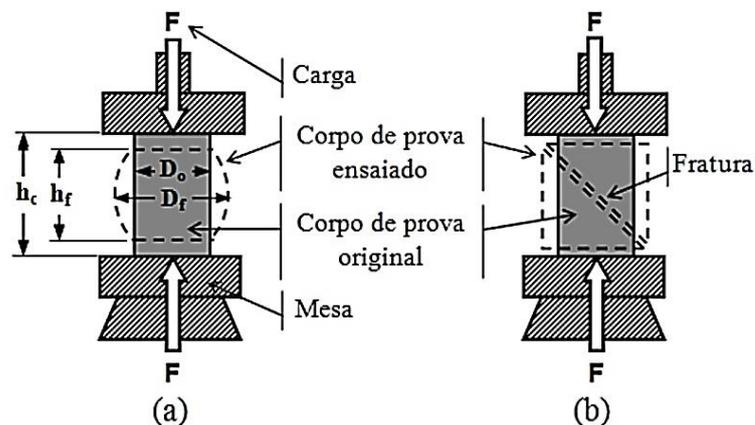


Figura 28. Demonstração do ensaio de compressão

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2018).

Neste ensaio não foi utilizado transdutor para medição de deslocamento linear (*Linear Differential Transformer – LVDT*).

O rompimento foi feito nas amostras cilíndricas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura retificadas utilizando a máquina Kratos de modelo 20KE, com capacidade para 20000 kgf a uma velocidade de 500 N/s conforme mostram as Figura 29 (a) e (b).

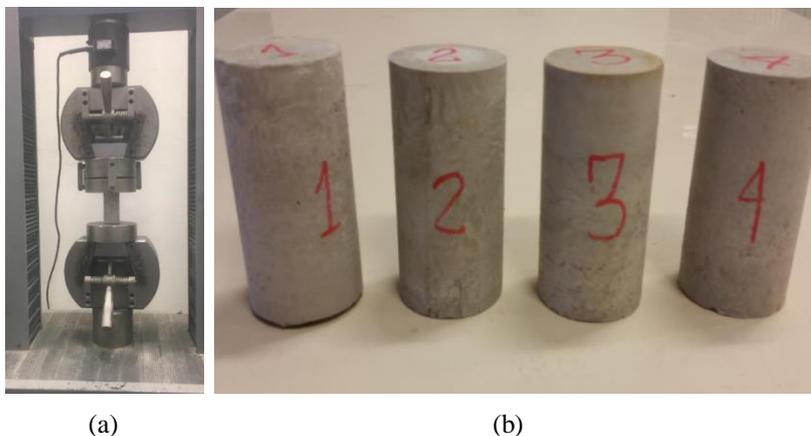


Figura 29. Ensaio de resistência à compressão (a) máquina de ensaio Kratos (b) corpos de prova.

6.3.2.2 Ensaio de flexão

Para o ensaio de flexão foi utilizada uma prensa mecânica da marca EMIC com célula de 100 kN. Para a determinação do deslocamento foi empregado um transdutor de deslocamento linear (*Linear Variable Differential Transformer – LVDT*). Os testes foram realizados até um deslocamento máximo de 12 mm utilizando uma taxa de deslocamento do atuador de 4 mm/min. Todas as amostras foram submetidas ao teste de flexão de quatro pontos na idade de 28 dias. Foram realizados 20 ensaios ao todo, quatro lotes de compósitos, cada qual com cinco amostras, conforme descrito na Tabela 12, de dimensões médias 240 x 50 x 13 mm. O cálculo da tenacidade acumulada foi realizado obtendo-se a área total sob a curva de carga *versus* deslocamento da carga.

6.3.3 Análise de imagem - radiografia

Para as imagens de raio x obtidas de todos os compósitos produzidos (área da maior amostra, 240 mm x 50 mm) foi utilizado um equipamento de radiografia. A máquina utilizada para a análise de imagem foi a máquina da marca CDK, modelo CDK – IMAG VET 320 mA, 125 kv 32 kw.

As amostras do compósito reforçado com fibras de sisal revestidas com pó de ferro foram submetidas a radiografia (Figura 30). O objetivo da obtenção das imagens radiográficas foi visualizar o posicionamento das fibras a fim de avaliar se o método de alinhamento adotado contribuiu para o alinhamento das mesmas.

A máquina foi ajustada com uma configuração para análise de densidade óssea, com um tempo de exposição $t = 0,05$ s, uma corrente de 200 mA e uma voltagem de 68 kV.



Figura 30. Amostras do lote CC_S_IN_RA, CC_S_R_RA e CC_S_R_OR sendo submetidas à radiografia.

6.4 Resultados

6.4.1 Determinação da resistividade elétrica

A Tabela 16 apresenta os resultados médios obtidos do ensaio de resistividade elétrica realizado na face inferior de todas as amostras.

Tabela 16. Resultados médios obtidos do ensaio de resistividade elétrica.

RESISTIVIDADE (kΩ.cm)				
Matriz	Superfície inferior			
	AM 1	19,7	19,1	19,4
	AM 2	19,3	19,9	19,1
	AM 3	19,0	19,6	19,3
	AM 4	27,7	27,2	27,2
	AM 5	26,4	25,3	25,4
	Média	22,2 ± 3,7		
CC_S_IN_RA	Superfície inferior			
	AM 1	21,7	27,7	27,5
	AM 2	25,1	24,2	24,0
	AM 3	24,9	24,0	24,0
	AM 4	24,6	24,0	23,8
	AM 5	27,7	27,0	27,8
	Média	25,2 ± 1,9		
CC_S_R_RA	Superfície inferior			
	AM 1	31,8	31,5	33,0
	AM 2	27,9	27,4	27,8
	AM 3	25,1	24,1	24,6
	AM 4	27,7	25,7	25,8
	AM 5	27,2	25,9	25,9
	Média	27,4 ± 2,7		
CC_S_R_OR	Superfície inferior			
	AM 1	29,2	29,6	29,5
	AM 2	29,0	27,5	29,3
	AM 3	29,6	29,9	29,3
	AM 4	25,3	24,5	24,9
	AM 5	33,1	31,4	33,8
	Média	29,1 ± 2,7		

A Figura 31 apresenta os dados de resistividade média obtidos para cada tipo de compósito estudado.

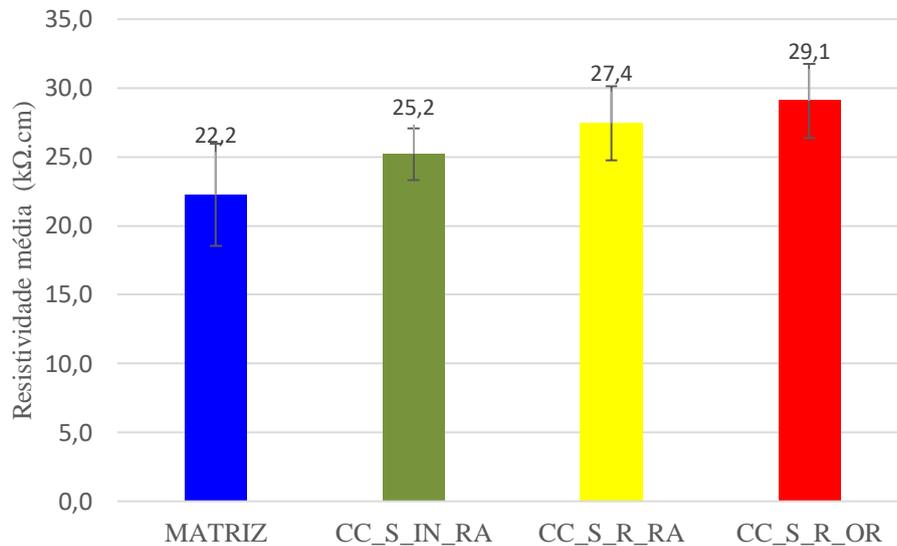


Figura 31. Resistividade elétrica *versus* tipos de compósitos.

A partir da Figura 31 é possível observar que todos os compósitos fibrosos produzidos apresentaram valores médios de resistividade superiores ao da matriz. É provável que este comportamento resulte, em parte, do aumento da porosidade das amostras promovido pela inclusão das fibras de sisal. Este aumento de porosidade, aliado a condição de teste, com amostras secas ao ar durante 5 dias, poderia acarretar aumento de resistividade. Isto porque, uma maior quantidade de vazios aliada a uma menor concentração de eletrólito, dificultaria a passagem de corrente elétrica pelo compósito.

Uma análise de variâncias (ANOVA) foi executada e conclui-se que existem diferenças significativas entre os dados médios da matriz e dos três compósitos produzidos. Entretanto, os valores médios de resistividade obtidos dos compósitos CC_S_R_RA e CC_S_R_OR mostraram não ser significativamente diferentes.

6.4.2 Velocidade de propagação do pulso ultrassônico

Os resultados dos ensaios de determinação de velocidade de propagação do pulso ultrassônico encontram-se apresentados na Tabela 17 e apresentam o tempo t_1 e t_2 em segundos para a propagação da onda nas respectivas posições mencionadas na metodologia.

Tabela 17. Dados coletados do ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

Determinação da velocidade de propagação do pulso ultrassônico						
	AMOSTRA	Medição	t1 (μs)	t2 (μs)	v(m/s)	Vméd(m/s)
Matriz	AM 1	1° Medição	16,5	44,4	2867	3144 ± 125
		2° Medição	16,6	44,8	2836	
	AM 2	1° Medição	18,8	42,8	3333	
		2° Medição	17	44,7	2888	
	AM 3	1° Medição	16	41,4	3149	
		2° Medição	16,7	41,6	3212	
	AM 4	1° Medição	15,5	44	2807	
		2° Medição	15,9	43	2952	
	AM 5	1° Medição	21,3	40,7	4123	
		2° Medição	14,9	39,4	3265	
CC_S_IN_RA	AM 1	1° Medição	15,5	41,8	3041	2892 ± 48
		2° Medição	16,2	42,6	3030	
	AM 2	1° Medição	15,6	44,5	2768	
		2° Medição	17,5	45	2909	
	AM 3	1° Medição	19,7	47,8	2846	
		2° Medição	18,4	49,4	2580	
	AM 4	1° Medição	14,3	40,3	3076	
		2° Medição	13,6	40,5	2973	
	AM 5	1° Medição	15,8	44,5	2787	
		2° Medição	17	44,5	2909	
CC_S_R_RA	AM 1	1° Medição	17,3	45,6	2826	2479 ± 120
		2° Medição	19,2	46,1	2973	
	AM 2	1° Medição	17,7	52,4	2015	
		2° Medição	19,5	48,5	2758	
	AM 3	1° Medição	16,5	53	2191	
		2° Medição	11,9	42,8	2589	
	AM 4	1° Medição	16,8	56,1	2035	
		2° Medição	14,5	44,6	2657	
	AM 5	1° Medição	10,8	50,9	1995	
		2° Medição	13,6	42,7	2749	
CC_S_R_OR	AM 1	1° Medição	15,5	54,8	2035	2751 ± 101
		2° Medição	16,3	44,9	2797	
	AM 2	1° Medição	15,7	41,2	3137	
		2° Medição	15,8	42,5	2996	
	AM 3	1° Medição	15,5	42,9	2919	
		2° Medição	14,6	43	2816	
	AM 4	1° Medição	11,8	44,8	2424	
		2° Medição	14,5	42,6	2845	
	AM 5	1° Medição	14,7	45,2	2622	
		2° Medição	16,9	44,3	2919	

A Figura 32 apresenta os valores médios da velocidade de propagação do pulso ultrassônico nos compósitos estudados.

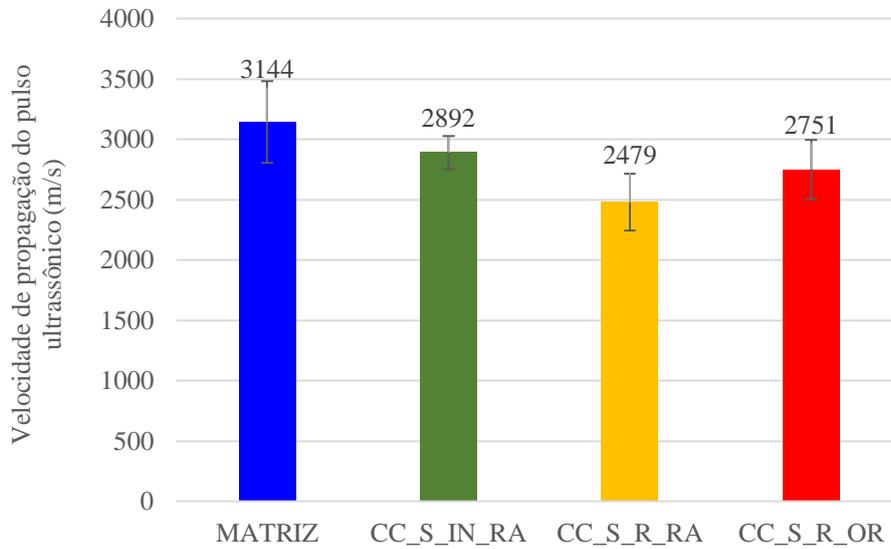


Figura 32. Velocidade de propagação do pulso ultrassônico *versus* tipos de compósitos.

A Figura 33 apresenta o método indireto de cálculo da velocidade de propagação do pulso ultrassônico nos compósitos estudados, conforme metodologia apresentada na Figura 27.

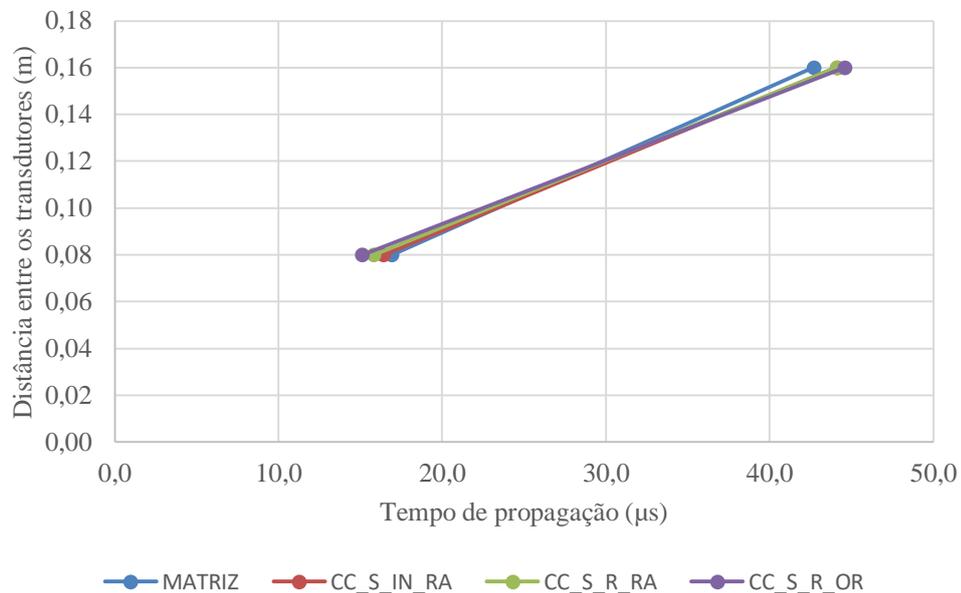


Figura 33. Velocidade de propagação do pulso ultrassônico nos compósitos obtido pelo método indireto.

A Tabela 18 apresenta os valores obtidos, pelo método indireto, da velocidade de propagação da velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

Tabela 18. Valores da velocidade de propagação do pulso ultrassônico obtidos pelo método indireto.

Método indireto	
Velocidade de propagação do pulso ultrassônico (m/s)	
MATRIZ	3144 ± 395
CC_S_IN_RA	2892 ± 152
CC_S_R_RA	2508 ± 349
CC_S_R_OR	2752 ± 319

A partir da Figura 32 é possível observar que todos os compósitos fibrosos produzidos (CC_S_IN_RA, CC_S_R_RA e CC_S_R_OR) apresentam valores de velocidade de propagação do pulso ultrassônico inferiores aos da matriz. Assim como observado no caso da resistividade, é provável que este fato se dê em função da inclusão das fibras na matriz, as quais acarretam aumento de porosidade nas amostras. Isto porque, o aumento da porosidade está diretamente associado à dificuldade das ondas ultrassônicas de se propagarem através das amostras.

Embora existam diferenças entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico obtida para a matriz e para os compósitos, é possível perceber que os valores médios se encontram muito próximos em todos os casos. Uma análise de variâncias (ANOVA) foi então executada e conclui-se que não existe diferença significativa entre os dados obtidos pela matriz e pelos compósitos.

6.4.3 Ensaio de Compressão

O valor médio de resistência à compressão da matriz empregada nos compósitos, aos 28 dias de idade, foi de 18 MPa. O modo de ruptura dos corpos de prova cilíndricos em todas as amostras foi cônico. Segundo a norma NBR 5739 [41], corpos de prova que se rompem com formato “ampulheta/cônica” indicam que o ensaio de ruptura foi realizado corretamente, conforme Figura 34.

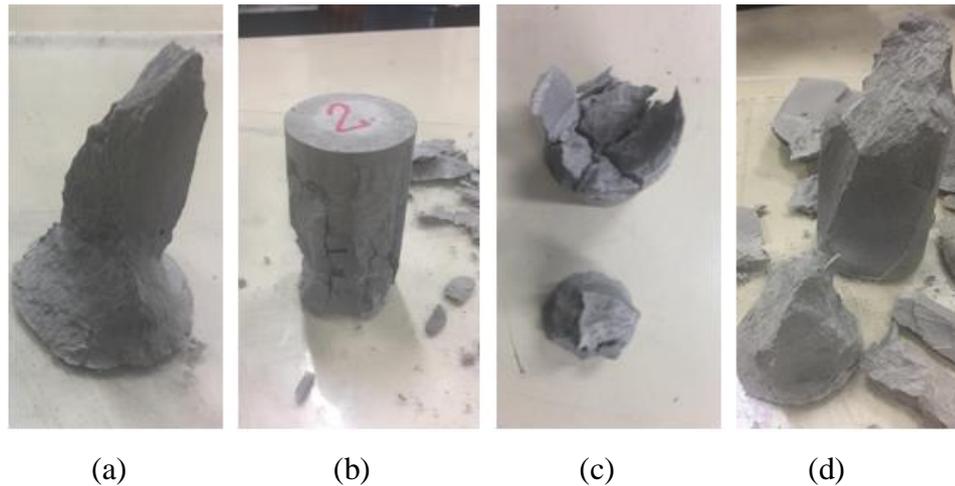


Figura 34. Corpos de provas da (a) matriz,

6.4.4 Ensaio de Flexão

A Figura 36 apresenta as curvas típicas obtidas nos testes de flexão de quatro pontos para cada compósito investigado no presente trabalho. Os resultados de tensão de primeira fissura, deflexão de primeira fissura, e tenacidade acumulada (para 4 mm, 8 mm e 12 mm de deflexão) são apresentados na Tabela 19. Todos os compósitos reforçados com fibras de sisal apresentaram comportamento *deflection softening* com formação de uma única fissura. Embora o tratamento superficial e o alinhamento magnético tenham contribuído para modificar o comportamento à flexão dos compósitos produzidos, esse efeito não foi suficiente para permitir o acréscimo de tensão na pós fissuração. Esse comportamento está em grande parte relacionado ao baixo teor de fibras empregado como reforço dos compósitos estudados (0,56 %).

Tabela 19. Resultados médios dos testes de flexão em quatro pontos.

Nomenclatura	Tensão de primeira fissura		Tenacidade		
	σ (MPa)	δ (mm)	T_{4mm} (J)	T_{8mm} (J)	T_{12mm} (J)
Matrix	$4,80 \pm 1,24$	$0,30 \pm 0,06$	-	-	-
CC_S_IN_RA	$4,12 \pm 0,71$	$0,33 \pm 0,08$	$3,20 \pm 0,76$	$5,24 \pm 1,14$	$6,60 \pm 1,50$
CC_S_R_RA	$4,61 \pm 0,32$	$0,26 \pm 0,10$	$6,16 \pm 0,61$	$9,90 \pm 1,22$	$11,98 \pm 1,40$
CC_S_R_OR	$5,13 \pm 0,43$	$0,35 \pm 0,09$	$6,91 \pm 0,83$	$13,55 \pm 3,85$	$14,70 \pm 1,59$

A Figura 35 apresenta as curvas dos compósitos referentes ao ensaio de flexão realizado.

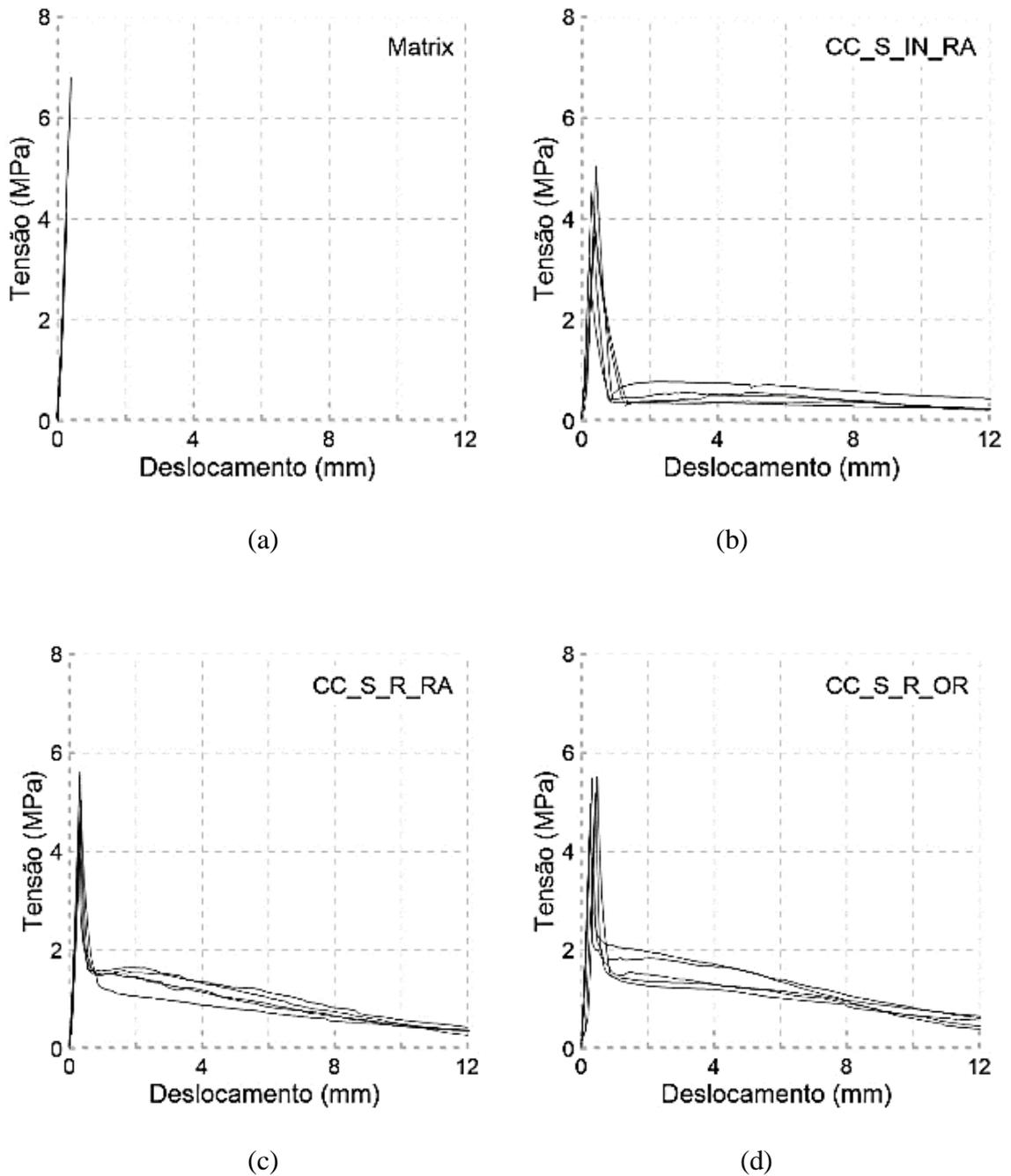


Figura 35. Curvas de tensão *versus* deslocamento resultantes do ensaio de flexão dos compósitos.

(a) Matriz, (b) CC_S_IN_RA, (c) CC_S_R_RA, (d) CC_S_R_OR

A Figura 36 apresenta um comparativo entre curvas típicas obtidas nos testes de flexão para cada compósito investigado no presente trabalho.

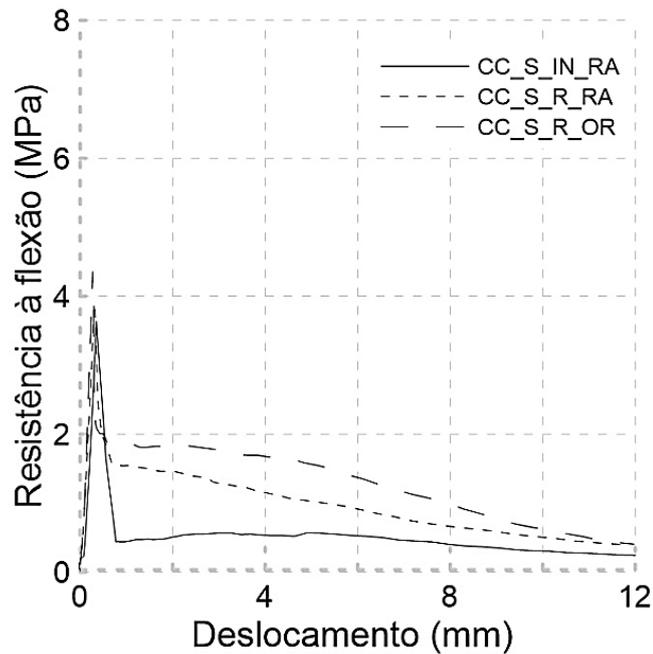


Figura 36. Curvas típicas dos compósitos submetidas ao ensaio de flexão.

O menor desempenho de flexão foi observado para o compósito CC_S_IN_RA. Esse padrão resulta da orientação aleatória do reforço, bem como da baixa adesão fibra-matriz e consequente descolamento interfacial, ocorrido entre as fibras naturais de sisal e a matriz sob tensão.

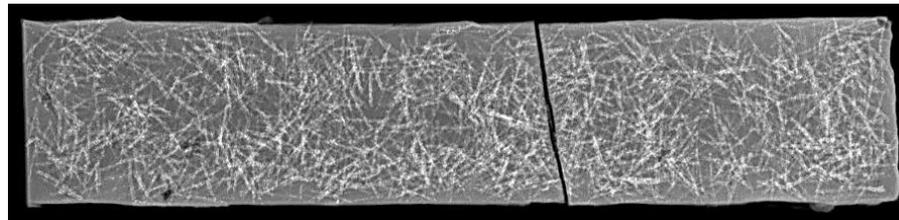
Observando o compósito CC_S_R_RA e a Tabela 19 é possível notar um aumento de mais de 80 % na tenacidade acumulada (até 12 mm) em comparação com CC_S_IN_RA. Tais resultados indicam que o tratamento com o adesivo a base de epóxi e partículas ferromagnéticas foi capaz de melhorar a interação fibra-matriz, uma vez que a orientação e o volume de fibras foram iguais em ambos os compósitos.

O melhor desempenho mecânico à flexão foi observado para o composto CC_S_R_OR. A tenacidade calculada como a área total sob a curva de deslocamento *versus* carga mostrou-se, respectivamente, 1,2 e 2,2 vezes maior que a observada para os compósitos CC_S_R_RA e CC_S_IN_RA. Esse comportamento resulta das melhorias relacionadas à interação fibra-matriz (já discutidas) e também da orientação do reforço, a qual também será discutida no item 6.4.5.

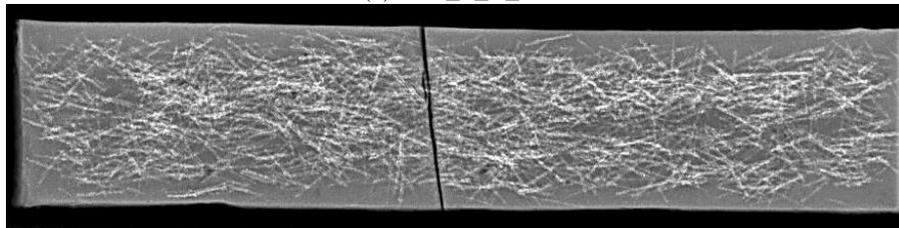
A maior tenacidade do compósito CC_S_R_OR em relação aos demais resulta provavelmente de uma maior quantidade de fibras cruzando a seção fraturada. Assim como reportado anteriormente, estudos de Abrishamhaf *et al.* [10] mostram que em compósitos reforçados com 3 % de fibras de aço (orientadas e randômicas), o teor de fibras/cm² na seção fraturada da amostra pode ser quase 50 % maior no caso das fibras orientadas.

6.4.5 Análise de imagem - radiografia

A Figura 37 apresenta um comparativo entre imagens radiográficas obtidas dos compósitos CC_S_R_RA e CC_S_R_OR.



(a) CC_S_R_RA



(b) CC_S_R_OR

Figura 37. Imagens radiográficas de amostras dos compósitos CC_S_R_RA e CC_S_R_OR.

Na Figura 37 (a) é possível observar a aleatoriedade das fibras de sisal presentes no compósito CC_S_R_RA por toda extensão da placa produzida.

Em contraponto, no compósito CC_S_R_OR (Figura 37 b) observa-se uma tendência de orientação paralela a maior dimensão do corpo de prova (direção de movimento dos ímãs) sendo menor, aparentemente, o número de fibras paralelas a menor direção. Esse fato, combinado às melhorias na tenacidade do compósito, comprova que o método de alinhamento magnético proposto neste estudo foi capaz de alterar a orientação do reforço de sisal tratado.

É provável que, para frações volumétricas de reforço mais altas, o efeito do alinhamento magnético das fibras de sisal possa ser ainda mais significativo em termos de comportamento mecânico alcançado.

6.5 Conclusões

- A inclusão de fibras naturais na matriz cimentícia, aliada a condição de teste (amostras secas ao ar), resultou em acréscimos de resistividade elétrica nos compósitos estudados em comparação à matriz. O ensaio de resistividade elétrica, entretanto, se mostrou sensível apenas

a presença de fibras naturais nos compósitos, não sendo capaz de perceber mudanças na orientação das mesmas.

- Não foram percebidas diferenças significativas entre os dados obtidos pela matriz e pelos compósitos nos ensaios de determinação da velocidade de pulso ultrassônico.

- O tratamento superficial e o alinhamento magnético contribuíram para modificar o comportamento à flexão dos compósitos produzidos.

- Os resultados do ensaio de flexão indicam que o tratamento com o adesivo a base de epóxi e partículas ferromagnéticas foi capaz de melhorar a interação fibra-matriz.

- O compósito com fibras revestidas e alinhadas magneticamente apresentou o melhor desempenho à flexão dentre todos os compósitos testados.

- Por meio da análise de imagens de radiografia é possível afirmar que houve uma tendência de orientação preferencial das fibras no compósito CC_S_R_OR.

CAPÍTULO 7

7 Conclusões Gerais

O adesivo químico *Compound Gel* selecionado como parte do revestimento do reforço foi capaz de promover a adesão de material ferromagnético às fibras, gerando uma relação de m_{Fe}/m_{fibra} de cerca de 10,25, e também foi capaz de diminuir a absorção de água das fibras em 188 % em relação às fibras de referência.

As fibras revestidas de comprimento 10 mm foram as que obtiveram melhor desempenho em termos de alinhamento na direção das linhas de campo magnético.

A matriz de fibrocimento de traço 1:1:1 (cimento:*filler*:água) foi a que apresentou o espalhamento mais próximo do gel diluído na proporção 1:3, favorecendo a movimentação e alinhamento das fibras e por isso foi a adotada.

Os parâmetros de configuração do braço robótico que surtiram melhor desempenho para o processo foram velocidade de 0,5 cm/s, 24 deslocamentos do braço mecânico sob o corpo de prova e distância de 6 mm dos ímãs ao corpo de prova.

O método de alinhamento magnético proposto no estudo foi capaz de gerar uma orientação preferencial nas fibras de sisal revestidas com partículas ferromagnéticas quando incorporadas em uma matriz cimentícia fluida. Esse fato foi claramente observado através das imagens radiográficas.

Tanto o tratamento superficial das fibras quanto seu alinhamento magnético foram capazes de promover aumentos na tenacidade dos compósitos em relação à referência (com fibras aleatórias e não tratadas).

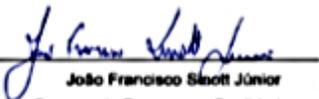
Os resultados apresentados nos testes de flexão indicam que o tratamento com partículas ferromagnéticas foi capaz de melhorar a interação fibra-matriz, indicando também que o adesivo de base epóxi impermeabilizou parcialmente o reforço de sisal, gerando menor absorção de água nas fibras revestidas.

O melhor desempenho mecânico à flexão, dentre todos os compósitos testados, foi observado para o compósito com fibras revestidas e alinhadas magneticamente

Por meio da análise de imagens de radiografia é possível afirmar que houve uma tendência de orientação preferencial das fibras no compósito CC_S_R_OR.

ANEXO

Ficha técnica do cimento CP V – ARI PREMIUM da fabricante LIZ CIMENTOS.

		CP V-ARI PREMIUM Cimento Portland de Alta Resistência Inicial ABNT NBR 16697/18 abril-20		EMPRESA DE CIMENTOS LIZ SA CONTROLE DE QUALIDADE BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO	
ENSAIOS QUÍMICOS					
Características de Ensaio	Norma de referência	Especificação de Norma	Resultado	Unidade de Medida	
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NBR NM 15	≠ 3,5	1,09	%	
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	≠ 6,5	2,73	%	
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR NM 11-2	≠ 6,5	1,63	%	
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NBR NM 16	≠ 4,5	2,72	%	
Anidrido Carbônico - CO ₂	ABNT NBR NM 20	≠ 5,5	1,89	%	
Óxido de Sódio - Na ₂ O	ABNT NBR NM 17	não aplicável	0,07	%	
Óxido de Potássio - K ₂ O	ABNT NBR NM 17	não aplicável	0,73	%	
Equivalente Alcalino	Norma Interna	não aplicável	0,55	%	
Aluminato Tricálcico - C ₃ A no cimento	Norma Interna	não aplicável	6,90	%	
ENSAIOS FÍSICOS					
Resíduo na peneira #200	ABNT NBR 11579	≤ 6,0		%	
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 12826	não aplicável	1,70	%	
Área Específica - Blaine	ABNT NBR NM 76	≥ 300	564	m ² /kg	
Massa Específica	ABNT NBR NM 23	não aplicável	3,07	g/cm ³	
Expansibilidade a quente	ABNT NBR 11582	≤ 5,0	0,00	mm	
Início de Pega	ABNT NBR NM 65	≥ 60	128	minutos	
Fim de Pega	ABNT NBR NM 65	≤ 600	159	minutos	
Teor de Água	ABNT NBR NM 43	não aplicável	30,0	%	
ENSAIOS MECÂNICOS					
Resistência a Compressão - 1 dia	ABNT NBR 7215	14,0	25,3	MPa	
Resistência a Compressão - 3 dias	ABNT NBR 7215	24,0	40,0	MPa	
Resistência a Compressão - 7 dias	ABNT NBR 7215	34,0	46,1	MPa	
Resistência a Compressão - 28 dias	ABNT NBR 7215	não aplicável	51,5	MPa	
Observações:					
Teor Médio de Adições: % Material Carbonático = 5,0					
 João Francisco Sinott Júnior Gerente do Processo e Qualidade			 Armando Ferreira da Silva Chefe da Seção de Assistência Técnica		

REFERÊNCIAS

- [1] GHAVAMI, K.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Introductory remarks - The nonconventional materials (NOCMAT) for sustainable infrastructure regeneration in 21st century. In: Sustainable and nonconventional construction materials using inorganic bonded fibre composites, s/v.; s/n., p.1-21, 2017.
- [2] SAVASTANO JR, H. Sistema de Cobertura para Construção de Baixo Custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais. Tese (Livre Docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- [3] CAETANO, L. F.; GRAEFF, A. G.; GARCEZ, E. O.; BERNARDI, S. T.; SILVA FILHO, L. C. P. Compósito de matriz cimentícia reforçada com fibras. In: II Seminário de Patologia das Edificações - Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, Porto Alegre (RS), p.1-21, 2004.
- [4] SAVASTANO JR, H.; PIMENTEL, L. L. “Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.4, n.1, p.103-110, 2000.
- [5] BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites, Londres: Francis and Taylor, 2007.
- [6] BENAIMECHE O.; SEGHIR N.T.; SADODOWSKI L.; MELLAS M. The utilization of vegetable fibres in cementitious materials. Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, 2019.
- [7] BARROS, J. A. O.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D., Experimental and numerical research on the potentialities of layered reinforcement configuration of continuous sisal fibres for thin mortar panels. Elsevier Applied Science, 2015.
- [8] MU, R.; LI, H.; QING, J.; ZHAO, Q. “Aligning steel fibres in cement mortar using electromagnetic field”, Construction and Building Materials, 2017: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.081>
- [9] WIJFFELS, M. J. H.; WOLFS, R. J. M.; SUIKER, A. S. J.; SALET, T. A. M. “Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behavior”, Cem. Concr. Compos, 2017: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.005>
- [10] ABRISHAMBAF, A.; PIMENTEL, M.; NUNES, S. “Influence of fibre orientation on the tensile behavior of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites”, Cem. Concr. Res. 97, p.28-40, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.007>

-
- [11] BRITO, I.S., Compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras de aço alinhadas por meio de campo magnético. Dissertação (Mestrado). Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2019.
- [12] SILVA, F. A. Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal. Tese (Doutorado), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [13] SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; MELO FILHO, J. A.; FAIRNAIRN, E. M. R. "Physical and mechanical properties of durable sisal fibre–cement composites". *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 5, p. 777-785, 2010.
- [14] CAMPILHO, R. D. S. G., *Natural Fibre Composites*. CRC Press, 2015.
- [15] TOLEDO FILHO, R. D. Materiais compósitos reforçados com fibras naturais vegetais. In: TOLEDO FILHO, R.D.; NASCIMENTO, J.W.B.; GHAWAMI, K. (coord.). *Materiais não convencionais para construções rurais*, Campina Grande (PB), p. 49-82, 1997.
- [16] JACOB, A.; JACOB, M.; THOMAS, S. Influence of chemical modification on mechanical and swelling characteristics of banana fibre reinforced natural rubber composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, v.93, n.5, p. 2305-2312, 2004.
- [17] CODISPOTI R. Mechanical performance of natural fibre reinforced composites for the strengthening of masonry. *Composites Part B*, 77, p.74-83, 2015.
- [18] CHEUNG, H. Natural fibre reinforced composites for Bioengineering and Environment engineering applications. *Comp. Part B: Eng.* v.12, n.3, p.655-663, 2009.
- [19] CARDOSO, P. H. M. Efeito do Tratamento Alcalino/mecânico de Fibras de Curauá nas Propriedades de Laminados Compósitos de Matriz de Epóxi. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- [20] AGOPYAN, V. *Materiais Reforçados com Fibras para a Construção Civil nos Países em Desenvolvimento: O Uso de Fibras Vegetais*. Tese (Livre-Docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991.
- [21] SATYANARAYANA K. G.; ARIZAGA G. G. C.; WYPYCH, F. "Progress in Polymer Science Biodegradable composites based on lignocellulosic fibres — An overview," vol. 34, p. 982-1021, 2009.
- [22] MANSUR, M.; AZIZ, M. Study of bamboo-mesh reinforced cement composites, *The International journal of cement composites and lightweight concrete*, v.5, n.3, p.165-171, 1982.
- [23] BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Second. Taylor & Francis, 2007.
- [24] DUARTE, J. F. Aspectos do dimensionamento de painéis pré-fabricados de fachada em GRC do tipo nervurado. 125 p., Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Instituto politécnico de Coimbra, Coimbra, 2014.

[25] SILVA, V. G. Diretrizes para o Projeto de Painéis de Fachada em Cimento Reforçado com Fibras de Vidro. 1998. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

[26] SILVA, F. A.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R. D., "Cracking mechanisms in durable sisal fibre reinforced cement composites," Cem. Concr. Compos., vol. 31, no. 10, p. 721-730, 2009.

[27] SAVASTANO JR, H.; SANTOS, S. F. Materiais de Construção Civil, IBRACON, 2007.

[28] MARTIN, A. R. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. Polímeros, São Carlos, v.19, n.1, p.40-46, 2009.

[29] MELO FILHO, J. A. Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal. Tese (Doutorado), COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

[30] SINDIFIBRAS. (2019). Disponível em: http://antigo.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/fibras-naturais/2019/21a-ro/diagnostico-setor-fibras_20-marco-2019_final-convertido.pdf. Acesso em: 31.05.2020.

[31] BENTUR A, MINDESS S. Fibre reinforced cementitious composites. Londres: Elsevier Applied Science; 1990.

[32] FÉLIX, A. H. O. Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltrióxido-silano como agente de adesão. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

[33] TOLEDO FILHO, R. D. Materiais compósitos reforçados com fibras naturais vegetais. In: TOLEDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAWAMI, K. (coord.). Materiais não convencionais para construções rurais, Campina Grande (PB), p. 49-82., 1997.

[34] BRIMAS. Imã de Neodímio. (2019). Disponível em: <:https://www.brimas.com.br/imas-de-neodimio/bloco/508x508x254/ima-neodimio-n50-50,8x50,8x25,4mm-bloco/>. Acesso em: 20.mar.2020.

[35] SILVA, F. A.; SOUZA, L. M. S.; CASTOLDI, R. S. Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fibre reinforced concretes. Construction and Building materials, v.211, 30, 2019, p.617-628, 2019.

[36] SANTOS, S. F.; TEIXEIRA, R. S.; SAVASTANO JUNIOR, H. Chapter 3: Interfacial transition zone between lignocellulosic fibre and matrix in cement-based composites. In: Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fibre Composites, Wood head Publishing, 2017.

[37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

[38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

[39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8802 - Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.