



Victor Antunes Querido

**Estudo da Inserção de Fibra de Bucha Vegetal como Reforço
Estrutural em Matrizes Cimentícias**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de
Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Roberto Moraes D’Almeida
Co-Orientador: Prof. Flávio de Andrade Silva

Rio de Janeiro
Março de 2018



VICTOR ANTUNES QUERIDO

**Estudo da Inserção de Fibra de Bucha Vegetal
como Reforço Estrutural em Matrizes Cimentícias**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Roberto Moraes d’Almeida

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de março de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Victor Antunes Querido

Graduou-se em Engenharia de Petróleo e Gás pela Universidade do Grande Rio – Unigranrio – (Rio de Janeiro, Brasil). Fez mestrado no Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio, especializando-se na área de materiais compósitos.

Ficha Catalográfica

Querido, Victor Antunes

Estudo da inserção de fibra de bucha vegetal como reforço estrutural em matrizes cimentícias / Victor Antunes Querido ; orientadores: José Roberto M. d'Almeida, Flávio de Andrade Silva. – 2018.

103 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de Materiais – Teses. 2. Engenharia Química – Teses. 3. Fibras de bucha vegetal. 4. Compósitos cimentícios. 5. Materiais pozolânicos. 6. Caracterização química. 7. Propriedades mecânicas. I. Almeida, José Roberto Moraes d'. II. Silva, Flávio de Andrade. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

À minha avó materna, Berenice dos Santos Antunes (In memoriam).

Agradecimentos

À Deus, que sempre me deu forças para perseverar a seguir meus sonhos.

Aos meus pais, Fátima e Jorge, que sempre me incentivaram e apoiaram, enchendo-me incondicionalmente de seu amor e confiança, e por serem os meus mais fiéis torcedores. Aos meus irmãos, Luciana e André, pelo eterno apoio, carinho e motivação.

À minha namorada Bianca, pelo amor, paciência, companheirismo e nunca ter me deixado desistir, diante das dificuldades desse caminho. Aos meus sogros Cledna e Adilson, e à madrinha Cleunice, pela imensa demonstração de afeto e incentivo de sempre.

Ao meu orientador, o professor José Roberto, pelo enorme conhecimento compartilhado, pela confiança, ajuda nos momentos mais difíceis e por ter me mantido no melhor caminho até o final.

Ao meu coorientador, o professor Flávio, pelo incondicional suporte e compartilhamento de ideias que puderam agregar valor ao estudo.

Aos técnicos e funcionários do laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, por prover as melhores condições para a realização dos ensaios. Sobretudo ao Euclides, no auxílio e presteza em todos os testes realizados.

Ao Yuri, técnico do laboratório de Microscopia da PUC-Rio.

Aos técnicos da Escola de Química da UFRJ, do laboratório de Termoanálises e de Reologia (LABTeR), primordiais para a consumação do ensaio de DSC.

Aos meus colegas de laboratório, Lucas Ripper e Felipe de Sá, que me auxiliaram na moldagem dos primeiros corpos de prova e na realização dos ensaios de tração do filamento, respectivamente. E também, à Diana que me contemplou com a sua ajuda na interpretação do ensaio de Raios-x da bucha.

Aos meus amigos-irmãos, Douglas e Renan (Mineiro) que me deram forças e me brindaram com sua amizade desde o primeiro momento.

À todos os outros familiares e amigos que contribuíram direta ou indiretamente por essa conquista.

À PUC-Rio pela isenção de mensalidades do Mestrado e à CAPES que concedeu a bolsa a qual possibilitou tal oferta e pelo financiamento dos ensaios realizados.

Resumo

Querido, Victor Antunes; d'Almeida, José Roberto Moraes; Silva, Flávio de Andrade. **Estudo da Inserção de Fibra de Bucha Vegetal como Reforço Estrutural em Matrizes Cimentícias**. Rio de Janeiro, 2018. 103p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo do presente estudo consistiu na obtenção, caracterização mecânica e química das fibras de bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) utilizadas, e o emprego das mesmas como possível reforço de compósitos cimentícios. Inicialmente, as fibras de bucha foram encaminhadas à prensa mecânica para perder o seu formato cilíndrico, propiciando uma moldagem mais facilitada, dos posteriores compósitos. A partir daí, foram submetidas a ensaio de tração direta, dividindo-se entre filamento e tecido, difração de raios-x (DRX), espectroscopia de infravermelho (IV), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise em microscópio digital, com posterior análise em software digital. A matriz foi dosada, respeitando uma substituição parcial de 50% de cimento, por materiais pozolânicos, como 40% de metacaulinita e 10% de cinza volante, com o objetivo de diminuir a quantidade de Hidróxido de Cálcio (HC), produto oriundo da hidratação do cimento. Também foi utilizado superplastificante na confecção da pasta, para melhorar a fluidez e assegurar que toda a área do molde fosse preenchida, além de prover o encharcamento uniforme da fibra. A caracterização química matriz se deu através do ensaio de termogravimetria (TGA), o qual foi capaz de corroborar a baixa presença de HC, propiciando a incorporação de fibras vegetais nessa matriz. As propriedades mecânicas foram avaliadas a partir de ensaio de *flow table*, de resistência à compressão e à flexão. O composto com a matriz supracitada foi confeccionado com as fibras de bucha vegetal nas direções do carregamento e posteriormente encaminhados ao ensaio de flexão de três pontos. Para agregar valor à discussão, foi fabricado um compósito sanduíche com a fibra de sisal (*Agave sisalana*) em conjunto com a fibra de bucha. Os compósitos cimentícios reforçados por fibra de bucha, e o compósito sanduíche

apresentaram valores de resistência 33% maiores, em relação aos corpos de prova moldados apenas com a matriz (sem reforço).

Palavras-chave

Fibras de bucha vegetal; compósitos cimentícios; materiais pozolânicos; caracterização química; propriedades mecânicas

Abstract

Querido, Victor Antunes; d'Almeida, José Roberto Moraes (Advisor); Silva, Flávio de Andrade (co-Advisor). **Study of the Insertion of Sponge Gourd as Structural Reinforcement in Cement Matrices**. Rio de Janeiro, 2018. 103p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this study was to obtain, mechanical and chemical fibre characterization of Loofah (*Luffa cylindrica*) used, and the use of same as possible reinforcement of cementitious composites. Initially, Loofah fibres were forwarded to the mechanical press for losing your cylindrical format, providing a more facilitated, molding of composite posterior. From there, were subjected to direct tensile test, dividing her time between filament and fabric, x-ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy (IV), scanning electron microscopy (SEM) and microscope analysis Digital, with further analysis in digital software. The array was dosed, respecting a partial substitution of 50% cement, Pozzolan materials, such as 40% metacaulinite and 10% fly ash, with the goal of reducing the amount of calcium hydroxide (CH), native of cement hydration product. Superplasticizer was also used in the making of the folder, to improve the fluidity and ensure that the entire area of the mold were filled equally, in addition to providing the drenching fiber uniform. Chemical characterization through array of Thermogravimetry (TGA), which was able to corroborate the low presence of CH, resulting in the incorporation of vegetable fibers in this array. The mechanical properties were evaluated from flow tube test, compression and flexural strength. The compound with the above-mentioned matrix was made with Loofah fibres in the directions of loading and subsequently forwarded to the three-point flexural test. To add value to the discussion, made a sandwich composite with sisal fiber (*Agave sisalana*) in conjunction with the Loofah fiber. The cementitious composites reinforced by loofah fiber, and sandwich composite presented values of maximum 33% larger in relation to specimens only molded array (no reinforcement), although it is not an improvement as significant as found in other synthetic or natural fibers, already studied and some in use by industry.

Keywords

Loofah fibres; cementitious composites; Pozzolan materials; Chemical characterization; mechanical properties.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Fibras Naturais	20
2.2 Microestrutura das fibras vegetais	24
2.3 Bucha Vegetal	26
2.4 Sisal.....	29
2.5 Matriz cimentícia	29
2.5.1 Cimento Portland	30
2.5.2 Metacaulinita	36
2.5.3 Cinza Volante	37
2.6 Compósitos cimentícios reforçados por fibras (CCRF).....	39
2.7 Interface fibra-matriz	43
2.8 Problemas de durabilidade em matrizes cimentícias	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 Introdução	48
3.2 Caracterização do reforço fibroso	48
3.2.1 Ensaio de tração direta	50
3.2.1.1 Tração direta do tecido	50
3.2.1.2 Tração no filamento	51
3.2.2 Microscópio estereoscópio	53
3.2.3 Difração de Raios-X	56
3.2.4 Espectroscopia no Infravermelho (IV)	56
3.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	57
3.3 Caracterização da matriz cimentícia	58
3.3.1 Flow Table	60
3.3.2 Resistência à compressão.....	60
3.3.3 Resistência à flexão	61
3.3.4 Análise Termogravimétrica (TGA)	63
3.4 Caracterização do compósito cimentício	64

3.4.1 Resistência à flexão	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 Caracterização do reforço fibroso	67
4.1.1 Ensaio de tração direta	67
4.1.1.1 Tração direta no tecido	67
4.1.1.2 Tração direta no filamento	68
4.1.2 Microscópio estereoscópico	70
4.1.3 Difração de Raios-X (DRX)	72
4.1.4 Espectroscopia de infravermelho (IV)	74
4.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	76
4.2 Caracterização da matriz cimentícia	80
4.2.1 Ensaio de <i>Flow Table</i>	81
4.2.2 Resistência à compressão	82
4.2.3 Resistência à flexão	81
4.2.4 Análise Termogravimétrica (TGA)	82
4.3 Caracterização do compósito cimentício	82
4.3.1 Resistência à flexão	83
5 CONCLUSÃO	85
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
7 Referências bibliográficas	88

Lista de figuras

Figura 1. Classificação quanto à origem das principais fibras lignocelulósicas. ..	21
Figura 2. Constituição estrutural das fibras vegetais.	25
Figura 3. Sistema vascular da bucha seca.....	27
Figura 4. (a) <i>Luffa cylindrica</i> durante o amadurecimento; e (b) bucha após a retirada da casca.....	28
Figura 5. Resistência dos componentes em função dos dias após a cura.	32
Figura 6. Relação entre a resistência à compressão e o fator água/cimento.....	34
Figura 7. Diferença de volume entre os constituintes iniciais e os produtos de hidratação.....	34
Figura 8. Evolução do módulo de Young's de acordo com o grau de hidratação.	35
Figura 9. Módulo de Young's com diferentes teores a/c.....	35
Figura 10. Difratoograma comparativo entre caulim e metacaulinita.	37
Figura 11. Curva tensão x deformação dos CCRF à tração direta.	40
Figura 12. Ponte de transferência de esforço em CCRF.	41
Figura 13. Condição de múltipla fissuração para compósitos.	42
Figura 14. Curvas de tensão x deformação para compósitos de acordo com a fração volumétrica de fibras sob tração direta. (a) strain-hardening, (b) strain softening.	43
Figura 15. (a) Arranjos 1 e 2D, uni e bi direcionais; (b) Arranjo de fibras 3D.	43
Figura 16. (a) Interações químicas, (b) eletrostáticas e (c) mecânicas na interface fibra-matriz.	44
Figura 17. Ensaio de pull-out.	45
Figura 18. Curvas de slip softening e slip hardening a partir do ensaio de pull-out.	46
Figura 19. Bucha aberta antes da prensagem.	49
Figura 20. Esquema do programa experimental referente à caracterização do reforço.....	49
Figura 21. Moinho de facas utilizado no trabalho.	50
Figura 22. a), b) e c). Sequência de fotos ilustrando o modo de ruptura do tecido ensaiado.	51
Figura 23. Conjunto de filamentos, a partir dos quais foram retirados monofilamentos para ensaio.	52

Figura 24. Esquematização do corpo de prova utilizado no ensaio de tração do filamento.....	52
Figura 25. a) Instrumentação do ensaio; b) Andamento do ensaio com a fratura completa da fibra.	53
Figura 26. Microscópio utilizado para a visualização das fibras.....	54
Figura 27. Exemplificação da utilização do software ImageJ, com a extensão OrientationJ. a) Imagem de entrada a 8bit, b) Imagem após a análise qualitativa da orientação, c) Paleta de cores, onde cada uma delas especifica um intervalo de ângulos de orientação.....	55
Figura 28. Análise quantitativa dos ângulos de orientação e coerência na imagem analisada.	55
Figura 29. Microscópio Eletrônico de Varredura da marca JEOL, modelo JSM-6510LV usado na pesquisa.	57
Figura 30. a) Fibra da bucha antes da metalização. b) Fibra após ser metalizada por ouro.	58
Figura 31. Fluxograma do programa experimental referente à caracterização da matriz cimentícia.....	59
Figura 32. Flow table utilizada no teste de consistência da argamassa.	60
Figura 33. Esquema das dimensões dos corpos de prova.....	60
Figura 34. a) Suporte acrílico envolvendo corpo de prova e servindo como base para a colocação dos LVDTs. b) e c) Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão.	61
Figura 35. a) Esquema de dimensões dos corpos de prova para ensaio de flexão. b) Corpo de prova com consistência suficiente para ser desmoldado.	62
Figura 36. Corpo de prova sendo submetido a ensaio de flexão de 3 pontos.....	62
Figura 37. Equipamento utilizado na análise de TGA da matriz.....	63
Figura 38. Esquema do programa experimental referente à caracterização do compósito.	64
Figura 39. Sequência de moldagem do compósito reforçado por fibra de bucha vegetal.....	65
Figura 40. Sequência da fabricação do compósito sanduíche bucha-sisal.	66
Figura 41. Curva força x deslocamento do tecido de Luffa cylindrica.	68
Figura 42. Tensão x deformação de filamentos com e sem ramificação.....	69

Figura 43. Visualização da fibra de bucha, com destaque para a aleatoriedade dos filamentos.....	70
Figura 44. Delimitação por elipses dos filamentos a serem avaliados.	71
Figura 45. Cada coloração indica um ângulo predominante.	71
Figura 46. Difratoograma de raios-x da fibra de bucha vegetal.	72
Figura 47. Deconvolução dos picos da bucha vegetal.....	73
Figura 48. Delimitação da área total (amorfa + cristalina) a partir do DRX.	74
Figura 49. Delimitação da área total (amorfa + cristalina) a partir do DRX.	75
Figura 50. Estrutura externa dos filamentos (100x).	76
Figura 51. Seção transversal de um filamento (250x).	76
Figura 52. Parede celular do filamento de bucha, com detalhe para o lúmen e a parede celular.	77
Figura 53. Imagem de MEV da superfície da fibra de bucha.	77
Figura 54. Imagem de MEV da superfície da fibra de bucha.	78
Figura 55. Composição em porcentagem (%) de elementos presentes na fibra. ...	79
Figura 56. Corpo de prova sendo submetido à ensaio de compressão direta.	80
Figura 57. Curvas de DTG e perda de massa da matriz cimentícia aos 28 dias....	82
Figura 58. Curvas tensão x deslocamento dos diferentes tipos de materiais analisados.	83

Lista de tabelas

Tabela 1. Valores de tensão máxima e módulo de elasticidade de algumas fibras naturais.	23
Tabela 2. Densidade de algumas fibras de origem vegetal.....	23
Tabela 3. Composição química das fibras mais utilizadas no Brasil.....	26
Tabela 4. Composição da fibra de bucha (<i>Luffa Cylindrica</i>).	28
Tabela 5. Composição química do cimento Portland.	30
Tabela 6. Principais compostos químicos do cimento Portland..	30
Tabela 7. Calor de hidratação dos compostos do Cimento Portland.....	31
Tabela 8. Classificações e teores dos componentes dos diferentes cimentos Portland.....	33
Tabela 9. Composição das cinzas volantes silicosas e calcárias (%).	38
Tabela 10. Quantificação da orientação e da coerência dos filamentos analisados	71
Tabela 11. Áreas utilizadas no cálculo de IC da <i>Luffa cylindrica</i>	73
Tabela 12. Regiões dos picos característicos de cada grupo e espécie presente nas fibras.....	75
Tabela 13. Composição em porcentagem (%) de elementos presentes na fibra....	78
Tabela 14. Composição em porcentagem (%) de elementos presentes na fibra....	78
Tabela 15. Valores de tensão máxima e módulo de elasticidade para cada idade de cura.....	80
Tabela 16. Valores de tensão máxima, módulo de elasticidade e deformação máxima da matriz cimentícia.....	81
Tabela 17. Valores de tensão, módulo de elasticidade e deformação das amostras.	84

Introdução

Estudos intensivos têm sido desenvolvidos com o objetivo de encontrar uma fibra que possa substituir eficientemente a fibra de asbesto. Essa fibra, utilizada na produção do cimento amianto, ainda é utilizada em países em desenvolvimento, pelo seu baixo custo e boas características mecânicas, mas traz sérios malefícios à saúde humana e animal (ABREA, 2016).

Em razão de ser nocivo à saúde humana, muitas restrições têm sido feitas ao emprego do amianto e buscam-se, em todo o mundo, produtos que possam substituir com eficácia os seus usos, no âmbito econômico, técnico e ambiental. A lista de prováveis substitutos é grande e alguns destes produtos atendem plenamente as especificações supracitadas, enquanto outros estão sendo desenvolvidos e avaliados em seus riscos (Gibbs, 1994; INSERM, 1998; Foà & Basilico, 1999).

Ultimamente as fibras vegetais têm despertado bastante interesse, no que diz respeito ao reforço de matrizes cimentícias, principalmente em países em desenvolvimento. Isso ocorre devido a facilidade de obtenção, já que essas fibras são amplamente disponíveis. Além disso, são fibras de baixo custo, que permitem economia de energia no seu processamento, além de atenderem a questão ambiental, por serem materiais biodegradáveis. Segundo Swamy (1990), o emprego dessas fibras, na fabricação de placas, telhas de cobertura ou materiais pré-fabricados, dentre outros, apresenta uma significativa contribuição para a melhoria da infraestrutura dos países em desenvolvimento.

Pioneiros nas pesquisas sobre materiais cimentícios reforçados com produtos vegetais, nesse caso a polpa de celulose, o *Fibre Composites Group* do *Forestry and Forest Products* (FFP) e a *Commonwealth Scientific and Industrial Reserach Organization* (CSIRO), localizados na Austrália, contribuíram para fazer desse o primeiro país a produzir fibro-cimentos totalmente livres de amianto, que é responsável por graves problemas de saúde dos trabalhadores da indústria da construção, como câncer e fibrose pulmonar (Rongxi, 1995 e Savastano Jr., 2000)

De acordo com Savastano Jr. (2009), o avanço na utilização de fibras vegetais vem precedida de estudos fundamentais para analisar o tipo de falha que pode vir a ocorrer no compósito, as interações microestruturais e a interface, ou seja, a zona de transição entre a matriz e a fibra. Para que possa haver melhora na resistência, no comportamento tensão x deformação, na resistência à fadiga e na diminuição da permeabilidade, é necessário que a relação seja ótima entre as fases contínua e dispersa.

Elsaid et al. (2011) e Kwan et al. (2014) documentaram o incremento de resistência à flexão e à tração em concreto reforçado com fibras (CRF), além de melhor desempenho quanto aos esforços cisalhantes, capacidade de absorção de energia e ductilidade, graças às características da interface fibra/matriz. Nesta situação, as fibras funcionam como um retardador do início e propagação de fissuras, agindo como ponte de transferência de tensões após o surgimento da primeira fissura e, assim, evitando rupturas bruscas, do tipo frágil (Bentur e Mindess, 2007).

A necessidade de se pesquisar e estudar materiais até então não usuais, que possam atuar como reforço estrutural de compósitos, guiou o objetivo do presente trabalho. A fibra de bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) foi escolhida para o desenvolvimento e caracterização do compósito para avaliar se sua utilização futura no campo da construção civil pode atender aos requisitos técnico-financeiros.

A escolha da bucha vegetal também foi feita pela pouca ocorrência de estudos baseados na utilização dessa fibra em compósitos cimentícios. Na maioria das vezes os trabalhos empregando bucha vegetal estão relacionados a compósitos poliméricos, como os trabalhos de Satyanarayana et al. (2007), Tanobe et al. (2005), d'Almeida et al. (2005), entre outros.

O objetivo principal consistiu no desenvolvimento e caracterização de um compósito cimentício reforçado por fibras alinhadas de bucha vegetal, no qual a matriz foi modificada para que as fibras não fossem atacadas quimicamente pelo hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Para isso, foram incorporados à matriz materiais pozolânicos (metacaulinita e cinza volante), os quais em proporções adequadas previnem a degradação das fibras e, ainda, não alteram as propriedades mecânicas do material final. Para o desenvolvimento do compósito foram analisadas as propriedades da fibra por meio de ensaios de Difração de Raios-X

(DRX), Espectroscopia de Infravermelho (IV) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), além de ser levantado o comportamento mecânico do compósito e da fibra. Para as fibras foram realizados ensaios de tração direta e os compósitos foram submetidos a ensaio de flexão e de tração direta.

Identificar o compósito final como econômica e tecnicamente viável para que possa ser utilizado na indústria da construção civil foi a principal motivação do estudo. A maneira fácil de se encontrar a bucha vegetal e a ausência de grande competição promovida por outras indústrias em relação ao emprego desse material confere boa disponibilidade para a aplicação da fibra em matrizes como a do presente trabalho.

O presente trabalho está organizado, no capítulo 1, são apresentados a introdução sobre o assunto que será abordado no trabalho, assim como os objetivos e a motivação que impulsionou a concepção do mesmo.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica apresenta conceitos básicos de fibras vegetais longas e como elas foram e continuam sendo usadas como reforço em matriz cimentícia, bem como apresenta-se o comportamento mecânico dos compósitos cimentícios reforçados por fibras vegetais.

No capítulo 3 são apresentados os métodos usados para as caracterizações da fibra e da matriz e, ainda, a metodologia de fabricação dos compósitos. É apresentado também como a matriz cimentícia foi modificada para que houvesse uma redução no teor de hidróxido de cálcio, e, conseqüentemente, a fibra apresente uma maior durabilidade.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados experimentais. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões, baseadas nos resultados obtidos dos ensaios mecânicos e das caracterizações das fibras, da matriz e dos compósitos cimentícios.

Revisão bibliográfica

2.1.

Fibras Naturais

As fibras naturais podem ser divididas em vegetais, animais ou minerais. Enquanto as fibras vegetais apresentam cadeias celulósicas (recebendo a alcunha de fibras lignocelulósicas), as animais apresentam cadeias proteicas e as minerais, grandes redes cristalinas (Pereira, 2012).

As fibras vegetais são constituídas essencialmente por celulose, com quantidades significativas de hemicelulose, lignina, açúcares livres, pectina, amidos, proteínas, compostos orgânicos e sais minerais inorgânicos. O teor de celulose é o principal influenciador das propriedades mecânicas das fibras vegetais e varia, em função da espécie e da idade da planta (Bledzki e Gassan, 1999; Ashby, 2011). Fibras da mesma espécie podem apresentar composições químicas distintas, em função de onde são cultivadas, por exemplo. Como apresentado por Kozłowski (2012) e por Le Guen *et al.* (2015) as propriedades químicas e físicas das fibras são relacionadas ao seu papel biológico na planta. Ou seja, as fibras extraídas do caule possuem valores de resistência à tração e rigidez altos, em função da alta porcentagem de celulose presente.

Conforme Silva *et al.* (2008), as matrizes de cimento quando reforçadas com fibras têm as suas resistências à tração, flexão e ao impacto aumentadas, contribuindo, assim, para uma maior absorção de energia até a fratura, denominada tenacidade.

Ultimamente várias pesquisas têm tido como pauta a exploração das fibras vegetais com o objetivo de melhor estudá-las como componentes de suporte de carga em materiais compósitos. A maior procura por tais materiais se deu pelo baixo custo, capacidade de reciclagem e o fato de apresentarem boa razão de resistência/peso de material (JOHN & THOMAS, 2008).

Além disso, as fibras lignocelulósicas são obtidas de fontes renováveis, as quais apresentam alta disponibilidade, possuem baixo custo e são ambientalmente mais favoráveis, por emitirem baixa parcela de CO₂ na atmosfera e a sua extração

demandar baixo consumo de energia, entre outras características (Nazire e Nancy, 2015; Bledzki e Gassan, 1999; Faruk *et al.*, 2012; d'Almeida *et al.*, 2005; Goda e Cao, 2007 e John e Thomas, 2008).

Algumas das principais fibras, quanto ao potencial de utilização como reforço em materiais compósitos, são classificadas de acordo com a sua origem (Figura 1) e são aplicadas desde a fabricação de móveis até usos no setor automotivo, aeroespacial e de construção civil.

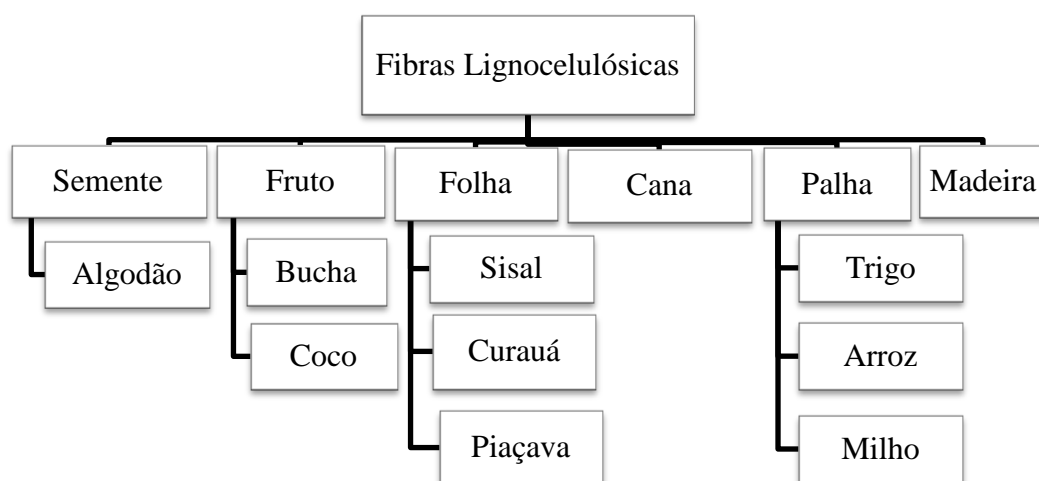


Figura 1. Classificação quanto à origem das principais fibras lignocelulósicas.

Fonte: Adaptado de Kozlowski, 2012.

No Brasil, de acordo com Savastano (2000), o estudo das fibras vegetais para fins de reforço em matrizes começou em 1980, no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED), em Camaçari na Bahia, com pesquisas e testes em fibras de bambu, bucha vegetal, cana de açúcar, coco, sisal e piaçava. Antes disso, em 1970, pesquisas com as mesmas finalidades foram iniciadas na Inglaterra.

De acordo com Caetano *et al.* (2004), as pastas cimentícias apresentam comportamento que, para um determinado nível de esforço de tração elas sofrem fissuras, porém, sem que haja deformação plástica. A fim de melhorar o desempenho mecânico, são incorporadas fibras orgânicas ou inorgânicas, tornando o surgimento das fraturas um processo progressivo, pois as fibras funcionam como ponte de transferência de esforços. Com isso, essas pontes absorvem parte das solicitações e originam fissuras mais bem distribuídas.

As fibras vegetais apresentam baixa elasticidade, porém alta resistência à tração, o que proporciona maior resistência ao impacto, se incorporadas de maneira adequada à matriz, além de maior absorção de energia, o que gera também possibilidade de trabalho no estágio pós-fissuração. Segundo Hota & Liang (2011) e Marinelli *et al.* (2008), o uso de compósitos reforçados com fibras naturais reduz a produção de resíduos oriundos da construção e aumenta a eficiência energética, oferecendo uma solução para necessidades de infraestrutura. Outras vantagens das fibras vegetais, além da já citada boa resistência mecânica, são as boas resistências térmica e acústica, baixo custo, baixa densidade, e são fontes renováveis, estando disponíveis em qualquer parte do Mundo. No entanto, é importante observar que as propriedades de cada fibra são singulares, dependendo de fatores como o diâmetro da mesma, estrutura, grau de cristalinidade, tipo de extração, e as condições que a planta teve desde sua plantação até o momento da extração.

Em inúmeros trabalhos ficou constatado que a resistência à tração da fibra depende, proporcionalmente, ao teor de celulose e ao ângulo microfibrilar. Além disso, é proporcional à deformação máxima a que a fibra consegue ser imposta. Segundo Derfoirdt *et al.* (2010), a fibra de coco apresenta constituição de 32-53% de celulose, e ângulo microfibrilar entre, aproximadamente, 30-49°. Seus valores de resistência à tração e módulo de elasticidade valem 192 MPa e 3 GPa, respectivamente. Entretanto, as fibras de juta estudadas por Fidelis *et al.* (2014), resultaram em alta resistência à tração (aproximadamente 353 MPa) e módulo de elasticidade elevado (26 GPa), se comparado a outras fibras, resultados de teores consideráveis de celulose e pequeno ângulo microfibrilar. Monteiro *et al.* (2011), estudaram algumas outras fibras como por exemplo, curauá que apresentou resistência à tração entre 117 e 3000 MPa, e módulo de elasticidade na faixa 27 – 80 GPa. O sisal e o rami estudados apresentaram valores de 287 - 913 MPa e 400 – 1620 MPa, para resistência à tração máxima, e módulo de elasticidade entre 9 - 28 GPa e 61 - 128 GPa, respectivamente. Os referidos valores estão apresentados e organizados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de resistência e módulo de elasticidade de algumas fibras naturais.

Fibras	Resistência Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Coco	192	3
Juta	353	26
Curauá	117 - 3000	27 - 80
Sisal	287 - 913	9 - 28
Rami	400 - 1620	61 - 128

Fonte: Monteiro *et al.* (2011) e Fidelis *et al.* (2014).

A densidade da bucha vegetal varia (Tabela 2), na média, entre 0,82-0,92 g/cm³, (Satyanarayana *et al.* 2007; Tanobe *et al.* 2005), sendo menor, portanto, do que outras fibras mais comuns, como o sisal que está entre 1,26-1,45 g/cm³ (Sydendtricker *et al.* 2003; Li *et al.* 2000), fibra de coco (1,25 g/cm³), rami (1,5 g/cm³), algodão (1,51-1,6 g/cm³), (Wambua *et al.* 2003; Bledzki; Gassan 1999) e juta (1,03 g/cm³).

Tabela 2. Densidade de algumas fibras de origem vegetal.

Fibras	Densidade (g/cm ³)	Referências
Bucha	0,82-0,92	Satyanarayana <i>et al.</i> 2007; Tanobe <i>et al.</i> 2005
Sisal	1,26-1,45	Sydendtricker <i>et al.</i> 2003; Li <i>et al.</i> 2000
Coco	1,25	Wambua <i>et al.</i> 2003; Bledzki, and Gassan 1999
Rami	1,5	Wambua <i>et al.</i> 2003; Bledzki, and Gassan 1999
Algodão	1,51-1,6	Wambua <i>et al.</i> 2003; Bledzki, and Gassan 1999
Juta	1,03	ACI 544.5R-10, 2010

Ainda de acordo com Marinelli *et al.* (2008) compósitos que sejam reforçados com fibras vegetais surgem como alternativa no que diz respeito a redução de CO₂ na atmosfera, durante a sua produção, processamento e emprego, e de boa rentabilidade na sua utilização pela possibilidade de comércio de créditos de carbono para a sua respectiva cadeia produtiva.

Além da citada abundância e vantagens ecológicas que a utilização dessas fibras pode trazer, há também a viabilidade econômica, visto que o aumento do uso de fibras lignocelulósicas pode se tornar uma fonte de renda para a população local (Levy e Pardine, 2006; Monteiro *et al.*, 2012).

2.2.

Microestrutura das fibras vegetais

De acordo com John e Thomas (2008), as fibras naturais podem ser consideradas como compostos naturais formadas, principalmente, por fibrilas de celulose incorporadas à matriz de lignina, e que estão devidamente alinhadas no comprimento da fibra, conferindo resistência à tração e à flexão, além de fornecer rigidez à mesma. O quão eficientemente irá se comportar o reforço fibroso, está relacionado diretamente ao grau de polimerização e à cristalinidade da fibra natural.

Segundo Mukherjee e Satyanarayana (1984), em sua constituição as fibras vegetais apresentam células individualizadas, que são compostas por microfibrilas que estão em diferentes camadas e cada uma delas com diferentes ângulos de orientação. Essas microfibrilas são compostas por lignina e hemicelulose. As células das fibras têm de 10 a 25 μm de diâmetro e de acordo com Coutts (1990) apresentam quatro camadas (Figura 2):

- i) A camada primária apresenta estrutura reticulada, além de estar na parte mais externa;
- ii) A camada secundária (S1), também apresenta estrutura reticulada;
- iii) A camada secundária (S2), está sob orientação de um ângulo Θ , com relação a um determinado eixo longitudinal da célula. Tem maior espessura e teor de celulose.
- iv) A camada secundária (S3) é a mais interna delas e também apresenta orientação em espiral.

Uma cavidade denominada lúmen se encontra no interior da célula, com variação de dimensão entre 5 e 10 μm .

Os ângulos microfibrilares são características únicas de uma fibra para outra e os mesmos são responsáveis pela ductilidade ou rigidez da fibra. Ângulos maiores originam fibras mais dúcteis, enquanto ângulos menores, fibras mais frágeis e mais rígidas.

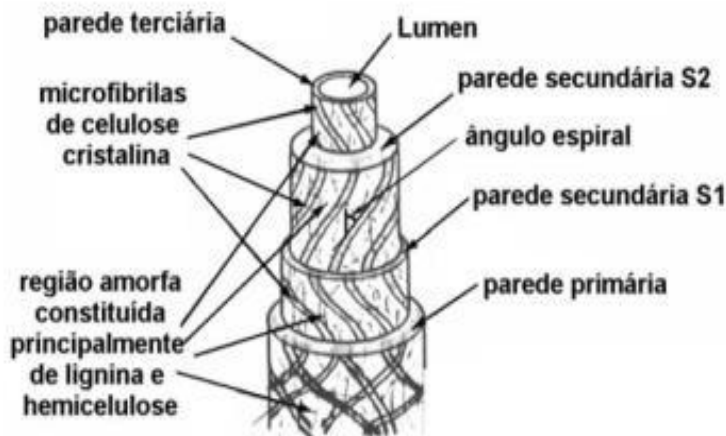


Figura 2. Constituição estrutural das fibras vegetais.

Fonte: Adaptado de SILVA, 2003.

Os principais componentes químicos das fibras vegetais são a celulose, hemicelulose, lignina, pectinas e ceras. O primeiro é um polímero natural que é capaz de impactar na resistência da fibra. Já a hemicelulose forma o suporte das microfibrilas de celulose. Enquanto a lignina é um polímero originado de hidrocarbonetos complexos que apresentam características hidrofóbicas e componentes amorfos, que auxiliam na rigidez da fibra (Maya e Rajesh, 2008).

Conforme Pereira (2012), portanto, o que chamamos de fibra ou macrofibra é, na realidade, um conjunto de filamentos individuais, compostos por moléculas de celulose e unidos por lignina e hemicelulose, que são espécies orgânicas não cristalinas. Pela sua grande capacidade de cristalização e polimerização, a celulose geralmente apresenta maior estabilidade à degradação, independentemente, da natureza química, física ou térmica. Quando os teores de lignina são altos, conferem à fibra rigidez e dureza.

De acordo com d'Almeida (2005), dentre as fibras vegetais mais estudadas e utilizadas mundialmente como reforço em compósitos de matriz polimérica, destacam-se o sisal e a juta. Entretanto, inúmeras outras fibras vegetais mostram possibilidade de aplicação como reforço em compósitos. Dentre as fibras que podem ser destacadas para tal emprego estão as de coco, rami, piaçava e bucha. A Tabela 3 traz uma comparação de algumas fibras quanto a sua composição química.

Tabela 3. Composição química das fibras mais utilizadas no Brasil.

Fibras	Celulose (% em peso)	Hemicelulose (% em peso)	Lignina (% em peso)
Sisal	65	12	9,9
Coco	32 - 43	0,15 - 0,25	40-45
Juta	61 - 71	14 - 20	12-13
Curauá	73,6	9,9	7,5
Piaçava	28,6	25,8	45
Bambu	26 - 43	30	21-31
Rami	68,6 - 85	3,0 - 13,1	0,5
Algodão	82,7 - 90	5,7 - 6,0	-
Madeira	40 - 45	32,0	17,0 - 26,0

Fonte: Adaptada de Maya & Rashed, 2008; Tanobe et al., 2005 e Siqueira et al., 2010.

A durabilidade dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais pode estar diretamente relacionada ou a ação de agentes externos como variação de umidade e temperatura, ataques ocasionados por cloretos e sulfatos, entre outros, ou a danos internos como interface fibra-matriz incompatível, frações volumétricas não-ótimas, etc. A degradação dessas fibras se dá, principalmente, devido a lignina e a hemicelulose estarem imersas em ambiente altamente alcalino, que é a pasta de cimento Portland.

2.3.

Bucha Vegetal

A *Luffa cylindrica*, ou simplesmente bucha, é uma planta subtropical, pertencente a família das curcubitáceas, encontrada facilmente na Ásia, principalmente Japão e China, bem como em países da América Central e do Sul. Sua fruta tem um sistema vascular que, quando seca, forma uma manta tridimensional natural (Figura 3). Essa manta confere ao compósito um incremento na sua tenacidade, visto que as trincas são defletidas na interface matriz-fibra. Todavia, apesar dessa vantagem, os níveis de tensão obtidos são baixos, pois tende a acontecer a prematura ruptura das interfaces (Boyard *et al.*, 2003).



Figura 3. Sistema vascular da bucha seca.
. Fonte: Adaptada do Autor, 2017.

De acordo com Heiser & Schiling (1990) e Bisognin (2002), o gênero *Luffa* é subdivididos em sete espécies, a saber: *quinquefida*, *operculata*, *astorii*, *echinata*, *acutangula*, *graveolens* e *aegyptiaca* (*cylindrica*). Essa última é a mais cultivada no Brasil e no Mundo.

Boynard *et al.* (2003) em sua pesquisa constataram que a bucha reduz a propagação de fissuras, controlando a abertura das mesmas e aumentando a tenacidade de compósitos poliméricos, sendo necessária uma maior atenção com a baixa interação na interface fibra-matriz.

O tamanho desses frutos é dividido em dois grupos, um que varia de 15 a 25 cm, e outro de 1,20 a 1,50 cm, apresentando diâmetros entre 8 e 10 cm. Os frutos são verdes, de formato cilíndrico grande e seu exterior tem linhas verticais e em reticulado em seu interior (Figura 4a e 4b). Na indústria, seu campo de emprego é bastante amplo, indo desde palmilhas, até filtros de óleo automobilísticos e revestimentos acústicos. Sua propriedade de bom isolamento térmico faz com que seja utilizada também como chapéus tropicais (Medina, 1959, Bal *et al.*, 2004 e Lee & Yoo, 2006). Atualmente, as buchas vegetais são principalmente utilizadas no mercado de acessórios para banho, onde tem a aplicação de esponja de banho, e de produtos cosméticos. Porém, também tem sido usado como agregado em materiais compósitos e material de adsorção em estações de tratamentos de água durante a fase de troca iônica (DAVIS *et al.*, 1993 e TANOBE *et al.*, 2005).

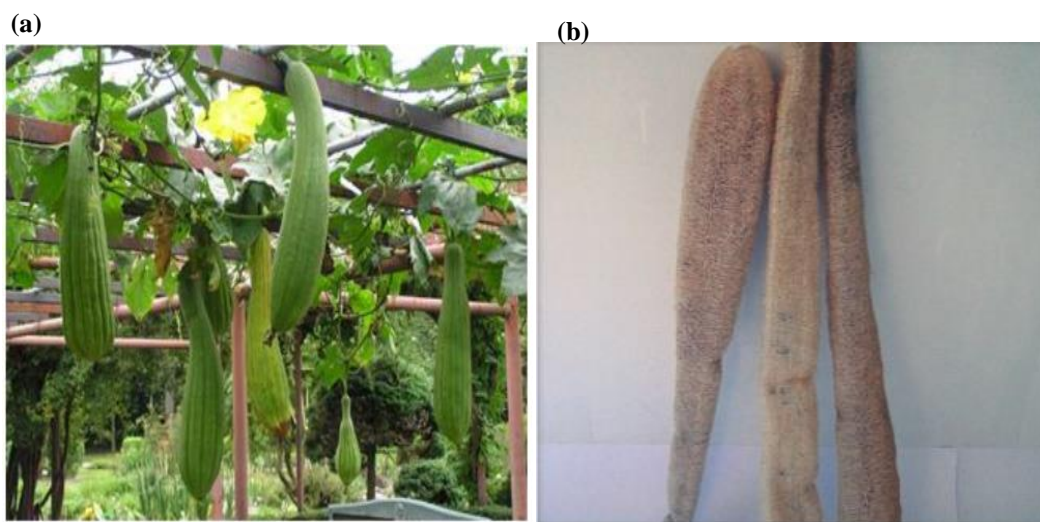


Figura 4. (a) *Luffa cylindrica* durante o amadurecimento; e,
(b) Bucha após retirada da casca.
Fonte: Adaptada do Autor, 2017.

A *Luffa cylindrica* possui uma rede vascular fibrosa (Figura 3) arquitetada microcelularmente por contínuos microcanais ocos que formam o seu sistema poroso (ZAMPERI *et al.* 2006). Por isso, essa morfologia específica faz com que a sua composição química (teores de hemicelulose e lignina, por exemplo) dependa de vários fatores, como a origem das plantas, condições meteorológicas a que foram impostas durante o tempo, natureza do solo, etc.

Os resultados das quantidades medidas de lignina, celulose, hemicelulose e estão na Tabela 4, de acordo com Siqueira *et al.* (2010). Comparativamente com a Tabela 3, a *Luffa cylindrica* apresenta, na média, quantidade de celulose similar a sisal e rami, porém menor que algodão e curauá, todavia maior que a madeira. Os percentuais de lignina e hemicelulose são maiores do que os mesmos presentes em fibras de sisal, rami e algodão e menores do que nas fibras de madeira.

Tabela 4. Composição da fibra de bucha (*Luffa Cylindrica*).

Componentes	Porcentagem em peso (%)
Lignina	15,2
Celulose	65,2
Hemicelulose	17,5

Fonte: Siqueira et al., 2010.

A bucha vegetal apresenta, ainda, altos graus de porosidade e volume específico de poros, propriedades físicas estáveis, biodegradabilidade, não apresenta toxicidade, além de baixo custo (TANOBE *et al.*, 2005).

2.4.

Sisal

A planta do sisal é originária da península de Yucatã, no México. Em 1834, as primeiras mudas foram levadas para o sul da Flórida, nos Estados Unidos. No Brasil, as primeiras mudas de *Agave sisalana* foram introduzidas na Bahia, em 1903, sendo este o maior produtor no país, respondendo por 93,5% de toda a produção nacional. A agaveicultura está predominantemente concentrada em áreas de pequenos produtores, sendo responsável por constituir fonte de renda, emprego e fixar os trabalhadores na região do semi-árido nordestino. O Brasil é o maior produtor mundial de fibras de sisal (Martin *et al.* 2009),

Em consonância com Silva *et al.* (2008 e 2009), a fibra de sisal é uma das fibras naturais mais utilizadas na fabricação de cordas, tapetes, colchões e outros materiais artesanais. Depois do algodão, é a fibra com segundo maior volume de produção, no âmbito das fibras naturais. Além disso, durante as últimas décadas tem sido objeto de estudo como reforço em materiais compósitos cimentícios e poliméricos. Para essa última utilização, as fibras podem estar distribuídas aleatoriamente ou ainda, alinhadas, quando forem longas. Alguns componentes automotivos, já estão sendo produzidos com uso de materiais compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de sisal.

Cada planta de sisal produz entre 200 e 250 folhas antes de florir, as quais contém, aproximadamente, entre 700 e 1400 fibras com comprimento médio no intervalo de 0,5 a 1,0 mm, e diâmetro em torno de 200 μm . Essas folhas são compostas de 4% de fibras, 1% de cutícula, 8% de matéria seca e 87% de água.

2.5.

Matriz cimentícia

De acordo com Naaman e Najm (1991), Savastano Jr *et al.* (2001), Silva *et al.* (2006), Toledo Filho *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2011) a eficiência adequada dos compósitos cimentícios reforçados por fibras depende diretamente de características distintas desse reforço, tais como, o comprimento, orientação, geometria, razão volumétrica e aderência fibra-matriz.

Silva *et al.* (2010) constataram que matrizes cimentícias com incremento de compostos vegetais e fabricadas com cimento Portland sofrem processo de envelhecimento quando em ambientes úmidos, os quais podem acarretar em uma diminuição na resistência pós-fissuração. Isso decorre da mineralização das fibras, causada pela migração de produtos de hidratação do cimento, principalmente o CaOH_2 (hidróxido de cálcio) e impacta na resistência à tração das mesmas. Bergström e Gram (1984) propuseram que para evitar essa degradação, as fibras fossem impregnadas por inibidores de hidratação, redutores de alcalinidade (da matriz) e selagem dos poros.

Outra proposta, iniciada por Silva *et al.* (2010) e Fidelis, Silva e Toledo Filho (2014), foi a diminuição da proporção de cimento e, conseqüentemente, dos produtos de sua hidratação, substituindo 50% de sua concentração por materiais pozolânicos como, cinza volante, tijolo cerâmico moído ou metacaulim. Com isso, ficou constatada a não mineralização da fibra após ciclos de molhagem e secagem. Além disso, uma diminuição no teor de cimento significa redução proporcional de emissões de CO_2 associadas à sua produção. Com isso, há conseqüente atenuação do impacto ambiental.

2.5.1.

Cimento Portland

Os antigos romanos, provavelmente, foram o primeiro povo a utilizar um cimento hidráulico, ou seja, material que se torna endurecido devido à ação da água. Essa característica foi primordial para a popularização e difusão do concreto (palavra de origem latina) para ser utilizado como material de construção. Em 1824, o cimento atual, o Portland, foi patenteado por Joseph Aspdin (NEVILLE & BROOKS, 2013).

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico que, segundo a ASTM C 150-07 (1991), é oriundo da calcinação e clinquerização de uma mistura de calcário e argila. Sua produção se dá pela moagem do clínquer, que apresenta silicatos e aluminatos de cálcio. As quatro fases principais são: silicato tricálcio (C_3S), silicato dicálcio (C_2S), aluminato de cálcio (C_3A) e a fase ferrita (C_4AF).

Em relação aos componentes químicos (Tabela 5) a NBR 14656 (ABNT, 2001) lista como os principais: óxido de cálcio (CaO), dióxido de sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3).

Tabela 5. Composição química do cimento Portland.

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

Fonte: ABNT NBR 14656, 2001.

De acordo com Neville & Books (2013), o cimento, reconhecidamente, apresenta quatro compostos principais (Tabela 6) em sua formulação. Cada um deles apresenta uma abreviação específica utilizada, onde cada óxido é descrito por uma letra e o cimento hidratado é somente representado por H, em lugar de H₂O.

Os silicatos C₂S e C₃S são considerados os compostos mais importantes, já que são responsáveis pela resistência da pasta de cimento em seu estado hidratado. O segundo composto (C₃S), na maioria dos cimentos comercializados, apresenta quantidade pequena e seria responsável pela pega instantânea da pasta, que é prevenida pela adição de sulfato de cálcio (gesso) ao clínquer. O C₃A contribui muito pouco para a resistência nas idades mais jovens do concreto e, além disso, quando a pasta é endurecida e atacada por sulfatos, dá origem ao sulfoaluminato de cálcio (etringita) que pode causar degradação por desagregação do concreto. Entretanto, esse mesmo composto é facilitador na combinação de óxido de cálcio com a sílica. O C₄AF reage com a gipsita (forma hidratada do gesso – sulfato de cálcio) e acelera a hidratação dos silicatos. Segundo Aïtcin & Neville (2003) uma menor quantidade de C₃A possibilita um maior controle da reologia da mistura.

Tabela 6. Principais compostos químicos do cimento Portland..

Composto	Sigla	Abreviação
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₃	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: Adaptado de Neville & Brooks, 2013.

A temperatura em que a hidratação dos grãos de cimento ocorre, afeta diretamente a velocidade do calor de hidratação liberado. Quando a temperatura do concreto em estado fresco é mais elevada que o normal, a pega do mesmo é mais acelerada e a resistência é menor em idades avançadas. Para os cimentos Portland metade do calor total é liberado até os três primeiros dias. A Tabela 7 apresenta o calor de hidratação para os seus respectivos compostos.

Tabela 7. Calor de hidratação dos compostos do Cimento Portland	
Composto	Calor de hidratação (J/g)
C_3S	502
C_2S	260
C_3A	867
C_4AF	419

Fonte: Adaptado de Neville & Brooks, 2013.

Ao reduzir as proporções do C_3A e C_3S , o calor de hidratação do cimento pode ser atenuado. Como dito, os sulfatos C_2S e C_3S são imprescindíveis e responsáveis para a resistência do cimento hidratado. Na idade próxima a um ano, ambos tem contribuição aproximadamente igual na resistência final. A Figura 5 mostra o desenvolvimento da resistência devido aos quatro componentes puros do cimento.

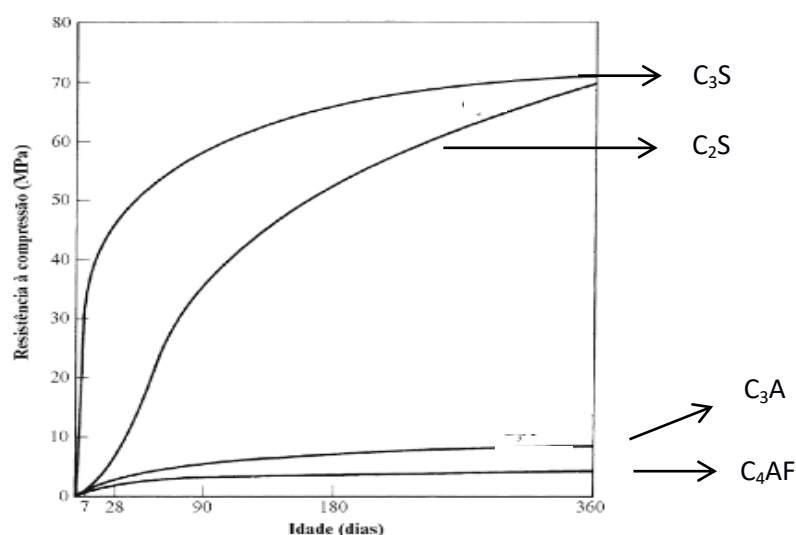


Figura 5. Participação dos componentes do cimento na resistência à compressão.

Fonte: Adaptado de Neville & Brooks, 2013.

A NBR 8491 (ABNT, 2012) lista os diferentes tipos existentes do cimento Portland, com distintas adições em suas formulações para atenderem às mais

diversas utilizações, como cimentos com alta resistência mecânica inicial, alto desempenho, resistentes a sulfatos e outros ambientes agressivos, como a água salina. A tabela 8 apresenta as diferentes classificações do cimento Portland. Segundo a NBR 11578 (ABNT, 2011), a classe do cimento é definida pelo limite inferior de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa.

Entretanto, a qualidade e todos os parâmetros da pasta de concreto dependem da relação água/cimento (a/c) e do respectivo grau de hidratação. Propriedades mecânicas como, módulo de elasticidade, resistências à compressão e à tração, fluência, abrasão e outras estão ligadas a relação supracitada (IBRACON, 2010).

Como avaliado por Cagnon *et al.* (2016), na pasta de cimento o coeficiente de dilatação térmica dos materiais envolvidos, cimento e agregados, é aumentado pela porosidade e pela quantidade de água presente na mistura. Uma razão de água/cimento (a/c) alta influencia nos efeitos capilares, descritos pela Lei de Laplace, e devidos à diferença entre a pressão de gás e líquido no interior dos poros. Entretanto, para uma relação a/c muito baixa, ou seja, quando a umidade interna do concreto cai bruscamente, há um aumento na energia superficial, resultando em uma maior resistência à compressão do material (Figura 6).

Tabela 8. Classificações e teores dos componentes dos diferentes cimentos Portland.

Tipos de cimento Portland	Sigla	Classes	Fração dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Filler
Comum	CP I	25, 32, 40	100	-	0	-
Comum com adição	CP I-S	25, 32, 40	99-95	-	1-5	-
Composto com pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	76-94	0	6-14	0-10
Alto forno	CP II-F	25, 32, 40	25-65	35-70	0	0-5
Composto com filler	CP III	25, 32, 40	90-94	0	0	6-10
Pozolânico	CP IV	25, 32, 40	5-45	0	15-50	0-5
Alta resistência inicial	CP V- ARI	-	95-100	0	0	0-5
Resistência à sulfatos	RS	35, 32, 40	-	-	-	-
Baixo calor hidratação	BC	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: ABNT NBR 8491, 2012

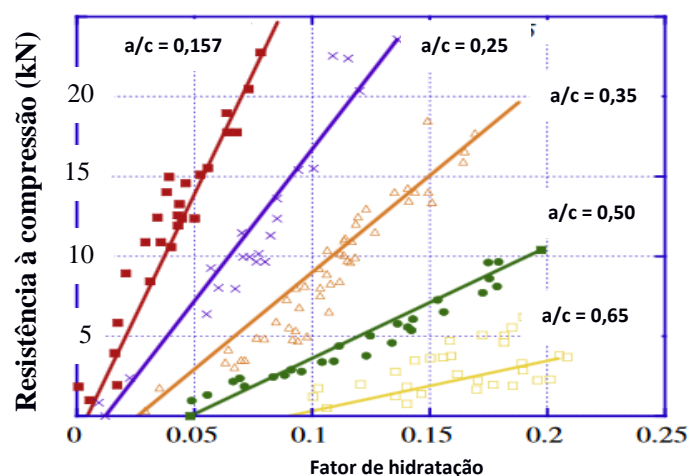


Figura 6. Relação entre a resistência à compressão e o fator água/cimento.

Fonte: Adaptado de Stefan *et al.*, 2009.

Entretanto, esse baixo teor de a/c se reflete em uma retração autógena maior, isso é, quando os produtos de hidratação apresentam volume menor do que os constituintes iniciais (Figura 7), o que pode levar a fissuras internas no material. (Stefan *et al.*, 2009 e Cagnon *et al.*, 2016).

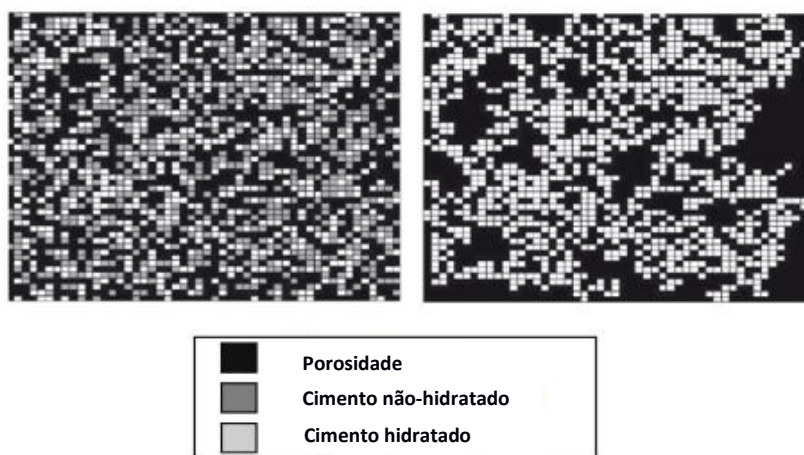


Figura 7. Diferença de volume entre os constituintes iniciais e os produtos de hidratação.

Fonte: Stefan *et al.*, 2009.

Ainda segundo Stefan *et al.* (2009), as possibilidades de fissuração dependem, largamente, do desenvolvimento das propriedades mecânicas nesse estágio fluido. Além disso, é sabido que o módulo de elasticidade atinge uma significativa fração de seu valor final, em poucos dias, mais rápido do que as

resistências à tração e à compressão do concreto. Esse comportamento é função do grau de hidratação dos grãos de cimento (Figura 8).

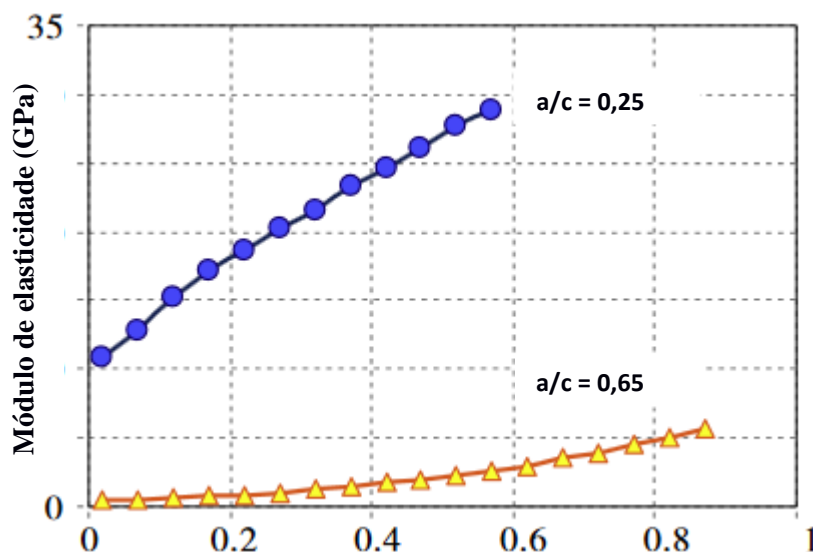


Figura 8. Evolução do módulo de Young's de acordo com o grau de hidratação.

Fonte: Stefan *et al.*, 2009.

Inúmeros autores, como Kraub & Hariri (2006), Staake *et al.* (2008), Bisschop (2003) e Kasai *et al.* (1971), observaram que quando o fator a/c é de, aproximadamente, 0,3, é constatado um aumento do módulo de elasticidade em escala exponencial nas primeiras 24h, com uma desaceleração nos dias subsequentes (Figura 9).

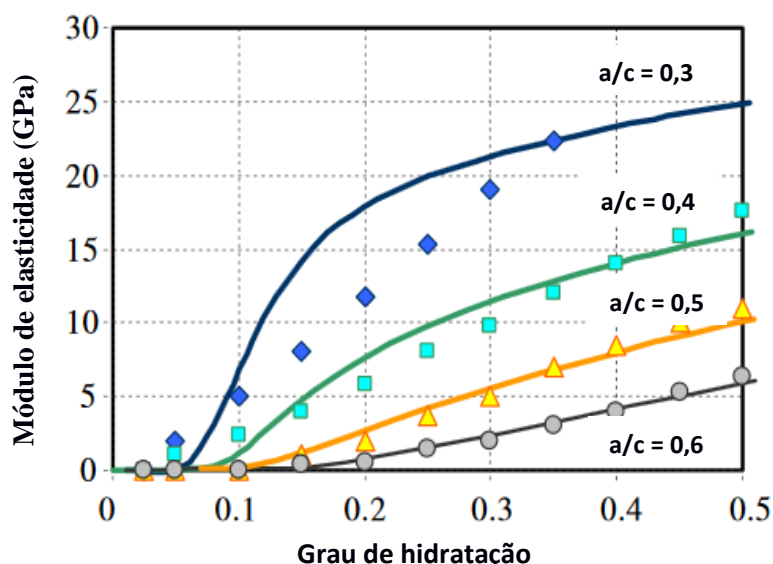


Figura 9. Módulo de Young's com diferentes teores a/c .

Fonte: Stefan *et al.*, 2009.

A indústria cimenteira é responsável por adicionar 1,5 bilhão de toneladas de CO₂ na atmosfera. Um dos esforços na busca de materiais mais amigáveis ambientalmente está na substituição parcial, por exemplo, de cimento por cinza volante na pasta de concreto, o que, além de favorecer o meio ambiente confere excelentes propriedades mecânicas (DAVIDOVITS, 1994; MALHOTRA, 1999 e 2002; MCCAFFREY, 2002). Em consonância com Lopes & Toledo Filho (2008), a metacaulinita é outro material que, ao substituir parcialmente o cimento na pasta, contribui para uma menor emissão de dióxido de carbono (CO₂), visto que, por conter menos cimento, menor é o consumo energético e mais ambientalmente correto é a pasta cimentícia.

Além disso, com o aumento da adição mineral, como por exemplo de escória de alto forno, cinza volante e metacaulinita, entre outros, ocorre maior resistência à carbonatação quando o clínquer é substituído por esse tipo de material, diminuindo assim, o risco de corrosão em concretos com estruturas reforçadas (Leemann *et al.*, 2014).

2.5.2.

Metacaulinita

O caulim apresenta em sua composição silicatos e hidratos de alumínio, sendo de origem pozolânica e amorfo (BERTOLINO *et al.*, 2012). De acordo com a definição da NBR 12653 (1992) e da ASTM C125-03 (2003), materiais pozolânicos são aqueles que, por si só, apresentam pouca ou nula atividade aglomerante, porém quando divididos finamente e hidratados reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, resultando em compostos com propriedades aglomerantes.

De acordo com Sabir *et al.* (2001) a metacaulinita é material resultante da desidratação do caulim, que é feita com o objetivo de alterar a estrutura cristalina e com isso, torná-la amorfa e, assim, reativa ao hidróxido de cálcio que é produzido a partir do processo de hidratação do cimento Portland. Essa transformação ocorre, aproximadamente, em torno de 500 °C e essa temperatura, juntamente com o tempo de residência no forno e a composição química do caulim são responsáveis pelo grau de amorfização da metacaulinita. Toledo Filho e Lima (2008) observaram e compararam em seu estudo o difratograma de raios X

entre o caulim e a metacaulinita obtida após a amorfização. Ficou constatada a redução dos picos cristalinos da caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), o que torna esse material reativo e consequentemente pozolânico, quando em contato com a água presente na pasta de cimento Portland, conforme a Figura 10.

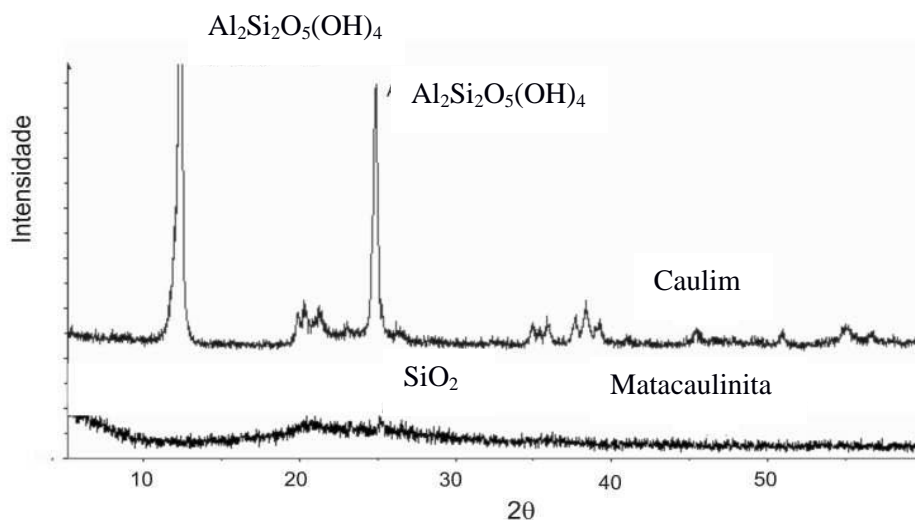


Figura 10. Difratograma comparativo entre caulim e metacaulinita.

Fonte: Toledo Filho e Lima (2008).

De acordo com Fidelis *et al.* (2014) a utilização de metacaulinita em matriz cimentícia contribuiu para aumentar o consumo de hidróxido de cálcio livre, em comparação à matriz sem a inserção desse material. Ou seja, quando a metacaulinita é usada em matriz cimentícia que apresenta reforço fibroso, gera um material mais ecologicamente correto, pela diminuição da presença de clínquer, o que impacta diretamente em um menor consumo energético e ainda, uma menor emissão de dióxido de carbono para a atmosfera (Lopes; Toledo Filho, 2008). Além disso, Winnefeld *et al.* (2007) constataram que a inserção desse material gera um incremento na resistência à compressão da pasta assim como na sua durabilidade em função de uma maior resistência ao ataque químico por sulfatos.

2.5.3.

Cinza Volante

As cinzas volantes podem ser de natureza silicosa ou calcária e são obtidas através da precipitação eletrostática ou mecânica de partículas em fornos de combustão de carvão (ENV 197-1, 2000). A Tabela 9 traz a diferença nas composições das referidas cinzas. Quando submetidas a altas temperaturas no

forno, a matéria volátil e o carbono são incinerados, onde uma parte da matéria mineral forma cinza, enquanto a maior parte passa pelo sistema de exaustão de gás. A essa parte, dá-se o nome de cinza volante (DESCHNER *et al.* 2012).

Tabela 9. Composição das cinzas volantes silicosas e calcárias (%).

Produto da queima	Cinza volante silicosa	Cinza volante calcária
Silica	47 - 54	18 - 25
Alumina	28 - 35	12 - 15
Óxido de Ferro	4 - 12	6 - 8
Cálcario	1 - 4	43 - 49
Magnésio	1 - 2,5	2 - 3
Sulfato (SO ₃)	0 - 1	5 - 9
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1 - 6	5
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,2 - 2	5
Perda de ignição	2,5 - 14	2 - 4

Fonte: Adaptado de LEA's, 1988.

A utilização da cinza volante, subproduto da indústria de geração térmica, como substituto do clínquer, no cimento Portland, contribui para a redução das emissões de CO₂ para atmosfera, além de encontrar um destino, para um até então resíduo industrial. O concreto com incremento desse aditivo tem a sua trabalhabilidade melhorada, diminuição da permeabilidade e aumento de resistência. Além disso, esse material controla o calor de hidratação do cimento, sendo benéfico ao reduzir os riscos de fratura térmica. Entretanto, por controlar a hidratação, a resistência à compressão em idades curtas é diminuída (Hoang *et al.*, 2012).

Nas propriedades da pasta de cimento, a cinza volante contribui positivamente para a coesão, trabalhabilidade, diminui a exsudação e a segregação, ainda no estado plástico da pasta. Além disso, as reações de hidratação passam a ocorrer em uma menor temperatura, os poros apresentam melhor refinamento e há um ganho de resistência à fissuração da pasta cimentícia, devido à redução do ataque alcalino, e maior permeabilidade, o que também contribui na melhora da durabilidade (MEHTA, 1987 e D'SOUZA, 2011).

2.6.

Compósitos cimentícios reforçados por fibras (CCRF)

O compósito é um material constituído da junção física de outros dois materiais distintos, com o intuito de assumir características que os dois em separado não conseguiriam. O componente com maior porcentagem de composição é conhecido como matriz, e a de menor, reforço. A matriz tem a responsabilidade de manter a orientação, espaçamento e proteger o reforço (MANO, 2000).

Os compósitos fibrosos são aqueles em que o reforço é feito por fibras e as mesmas estão, frequentemente, na seção amorfa da matriz, auxiliando a alterar a resposta da matriz, de frágil para dúctil. Em relação à razão de aspecto, que relaciona o comprimento da fibra e o diâmetro da mesma (l/d), geralmente o comprimento é bem mais elevado que o diâmetro, o que ajuda a potencializar suas propriedades mecânicas. Além da razão de aspecto, as propriedades mecânicas dependem da fração volumétrica de fibras, orientação, geometria e aderência fibra-matriz (BENTUR & MINDESS, 2006).

Compósitos cimentícios reforçados com fibras (CCRF) com desempenho *Strain-Hardening* e comportamento de fissuração múltipla já foram desenvolvidos (LI, 2003). Essa característica única confere aos compósitos micro-fissurações que aparecem multiplamente, ao contrário dos compósitos que apresentam comportamento *strain-softening*, onde a uma certa tensão há o surgimento de uma única macro-fissura. A maioria dos comportamentos de *strain-hardening* dependem das fibras estarem dispostas em um ângulo apropriado (NAAMAN, 2003; KANDA & LI, 1999 e 2006; KANDA *et al.*, 2000; LI *et al.*, 1996 e 2001).

Como observado por Ahmed *et al.* (2003 e 2007), Kawamata *et al.* (2002) e Ostuka *et al.* (2003), compósitos fabricados com hibridização de fibras, ou seja, dois ou mais tipos diferentes delas, podem apresentar comportamento de *strain-hardening*. Essa hibridização pode ser feita combinando comprimentos, diâmetros, módulos e resistências à tração distintas.

Em função da relação entre o comprimento e o diâmetro as fibras são classificadas como fibras curtas ($l/d > 1$) ou longas ($l/d \gg 1$). As matrizes feitas com reforço fibroso curto podem apresentar três tipos de comportamento (Figura 11). Os compósitos reforçados por fibras longas, quando incorporados com fração

volumétrica e comprimentos acima da crítica, concedem ao material o comportamento de *strain-hardening*, o qual é caracterizado por um ganho de resistência na zona pós-fissuração. Esse comportamento gera maior capacidade de absorver energia (tenacidade) e ocorre o aparecimento de múltiplas fissuras, que são ligadas por pontes desenvolvidas pelas fibras e que transferem de maneira mais uniforme as cargas que estão sendo impostas ao compósito. Esse comportamento pode ocorrer com aumento significativo de resistência à tração, ou não, como apresentado nas Figuras 11(a) e 11(b), respectivamente. No último caso, ocorre o comportamento de *strain-softening* (c). Ou seja, há uma queda na resistência do compósito após a primeira fissura (SILVA *et al.*, 2010 e LIMA *et al.*, 2012).

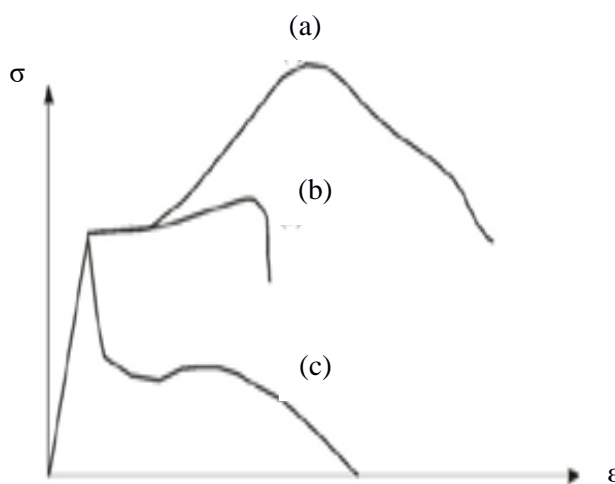


Figura 11. Curva tensão x deformação dos CCRF à tração direta.

Fonte: Adaptado de Lima *et al.*, 2012.

Li e Wu (1992) deixaram explícito que é muito mais improvável, mas não impossível, que o comportamento de *strain-hardening* ocorra em compósitos reforçados com fibras com distribuição aleatória, do que quando as mesmas estão contínuas e alinhadas. Nesse último caso, é necessário ainda que a quantidade dessas fibras seja adequada para atuarem como ponte de transferência de esforço e contribuïrem para suportar um carregamento adicional mesmo após a fissura da matriz (Figura 12).

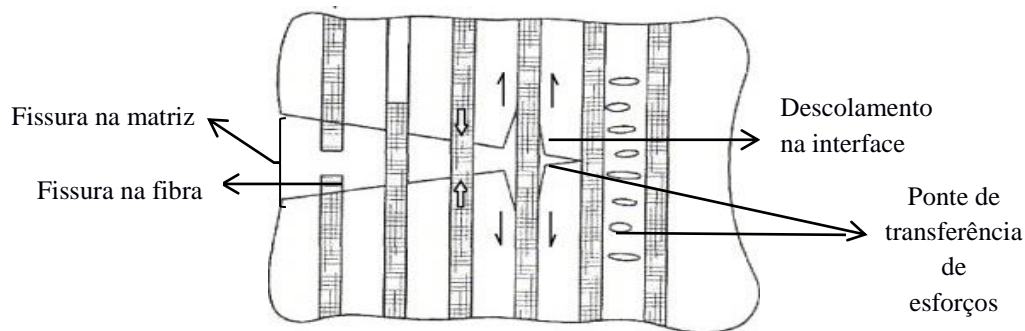


Figura 12. Ponte de transferência de esforço em CCRF.

Fonte: Adaptado de Singh *et al.*, 2004.

A condição clássica para a múltipla fissuração em compósitos com reforço fibroso contínuo foi desenvolvida por Aveston *et al.* (1971) baseado na Regra das Misturas (Equação 1). Quando o volume de fibras é pequeno, assume-se que o compósito irá fraturar, quando a resistência à tração da matriz for atingida.

$$\sigma_c = V_m \sigma_m + V_f \sigma_f \quad (1)$$

Na equação da Regra das Misturas σ_c , σ_m e σ_f são as tensões suportadas pelo compósito, pela matriz e pelas fibras, respectivamente. Visto que, $\sigma_f = (E_f/E_m) \sigma_m$ e V_m , V_f , E_m e E_f são as frações volumétricas da matriz, fibra e seus referentes módulos de elasticidade. Quando $V_f \rightarrow \infty$, a resistência do compósito será essencialmente a da fibra, então:

$$\sigma_c = V_f \sigma_f \quad (2)$$

As equações (1) e (2) são demonstradas pela Figura 13.

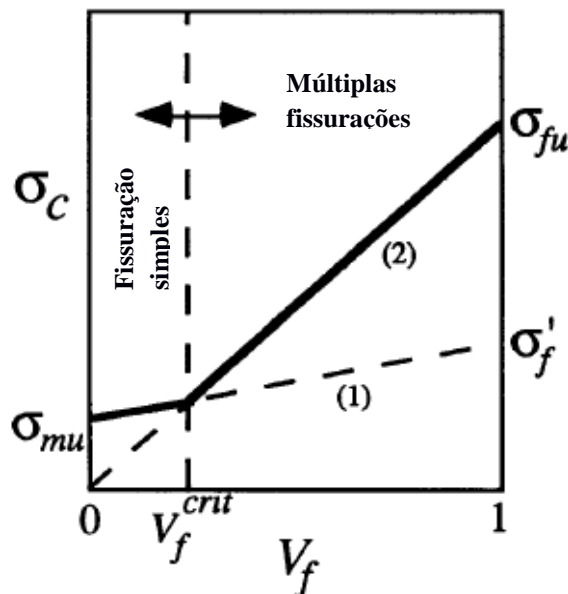


Figura 13. Condição de múltipla fissuração para compósitos.

Fonte: Aveston *et al.*, 1971.

A interseção mostrada na Figura 13 indica a fração volumétrica crítica de fibras, acima da qual a múltipla fissuração do compósito fibroso irá ocorrer e é dado pela equação:

$$V_f^{crit} = \frac{\sigma_m}{\sigma_f + \left(1 - \frac{E_f}{E_m}\right)\sigma_m} \quad (3)$$

A equação 3 não tem uma equivalente para o caso do reforço ser feito por fibras descontínuas e aleatórias, mas com base na regra das misturas fica compreendido que o fator de eficiência de um reforço não contínuo é menor em comparação ao mesmo, quando são usadas fibras contínuas e alinhadas.

As Figuras 14(a) e 14(b) ilustram as situações de *strain-hardening* e *strain softening*, respectivamente. A situação de *strain softening* é caracterizada pela fração volumétrica de fibras estar abaixo do volume crítico, enquanto a de *strain-hardening*, está presente em compósitos que dispõem de reforço fibroso acima do volume crítico. Com isso, mesmo com a ruptura da matriz, o compósito tem um incremento na resistência pós-fissuração, pois as fibras atuam como ponte de transferência de esforço.

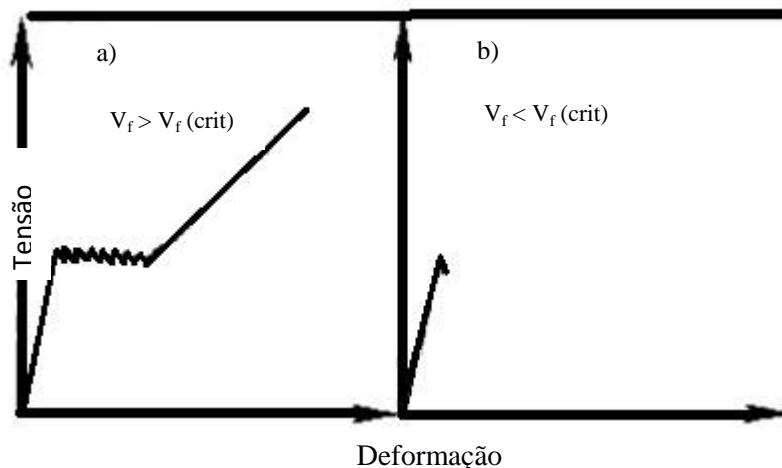


Figura 14. Curvas de tensão x deformação para compósitos de acordo com a fração volumétrica de fibras sob tração direta. (a) strain-hardening, (b) strain softening.

Fonte: Bentur & Mindess, 2007.

Outro fator que influencia nas propriedades mecânicas do CCRF é a orientação das fibras, que podem estar de maneira uni ou bidirecionais, ou ainda, dispostas de maneira aleatória (Bentur & Mindess, 2007). Já no que se refere ao arranjo têxtil, este pode estar estruturado bi ou tridimensionalmente, ou seja, no arranjo 3D as fibras estão orientadas nos eixos X, Y e Z (Jetavat *et al.*, 2012), como ilustrado na Figura 15(a) e (b).

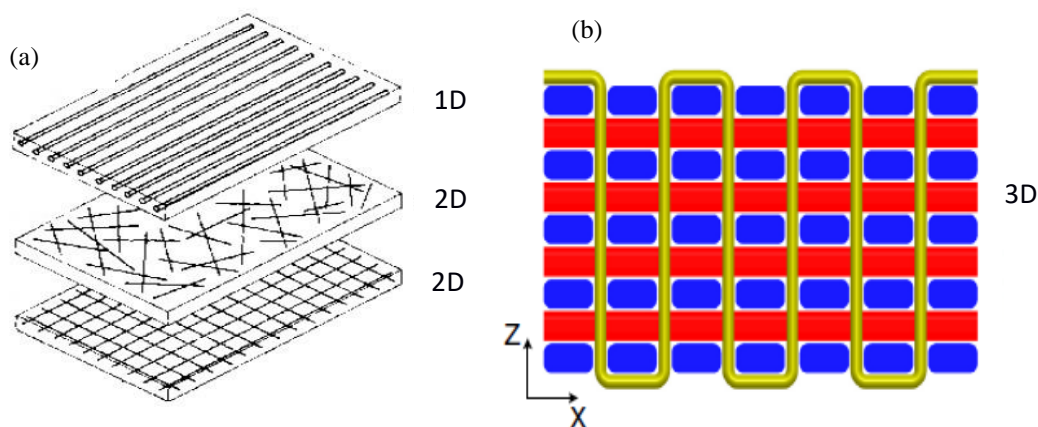


Figura 15. (a) Arranjos 1 e 2D, uni e bi direcionais. Fonte: Bentur & Mindess, 2007.; (b) Arranjo de fibras 3D.

Fonte: Zhang *et al.*, 2015.

2.7.

Interface fibra-matriz

Zhandarov & Mäder (2004), Bentur & Mindess (2007), Yosomika *et al.* (1990), Butt *et al* (2006), Chawla (1998) e Hull & Clyne (1996) entenderam que para um melhor desempenho mecânico dessas matrizes é necessário que a

interação entre fibra e matriz seja ótima. A interação pode se dar de três maneiras distintas como adesão físico-química, atração eletrostática e ancoragem mecânica. No primeiro caso, na escala molecular (Figura 16(a)), a estrutura química de ambas as fases se unem por ligações de van de Waals (mais fracas), interações ácido-base ou ligações covalentes (mais fortes) e, do ponto de vista da engenharia, essa é a forma de adesão mais importante e eficiente. Na atração eletrostática (Figura 16(b)), a diferença de carga presente na região da interface é a responsável por essa adesão e é diretamente proporcional aos elétrons livres disponíveis nas superfícies dos materiais. Ou seja, quanto maior essa densidade de carga, mais fácil e forte será a interação. Por último, a ancoragem mecânica, onde uma superfície que apresenta maior rugosidade que a outra, influencia esse tipo de ligação (Figura 16(c)).

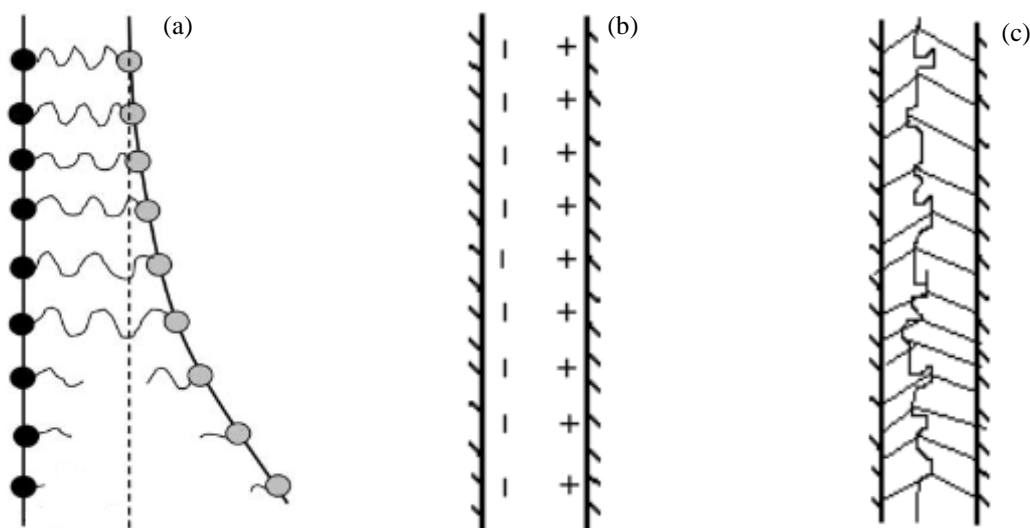


Figura 16. (a) Interações químicas, (b) eletrostáticas e (c) mecânicas na interface fibra-matriz.

Fonte: Adaptado de Yosomika *et al* (1990) e Zhandarov & Mäder (2004).

Zhandarov & Mäder (2004) defenderam que uma ferramenta importante de investigação da adesão interfacial são os testes de *pull-out* ou de arrancamento (Figura 17), sobretudo nas matrizes frágeis com reforço fibroso, por ser o que mais se assemelha com as tensões reais que o compósito sofrerá. O ensaio consiste em três estágios, onde, no primeiro, a interface fibra-matriz permanece intacta ($0 \leq F \leq F_d$), pois o carregamento externo (F), não atingiu o limite de descolamento da fibra na matriz (F_d). Quando esse limite é, no mínimo, igualado ($F_d \leq F \leq F_{\max}$), a fibra começa a se desprender da matriz através do surgimento de

fissuras interfaciais, que, concomitantemente, se propagam. O carregamento continua aumentando até que chega no último estágio, no qual a fibra que estava envolta pela matriz se desprende completamente, pela instabilidade causada pelas fissuras. Nesse momento, o ensaio de *pull-out* está completo ($F_{\max} = F_b$).

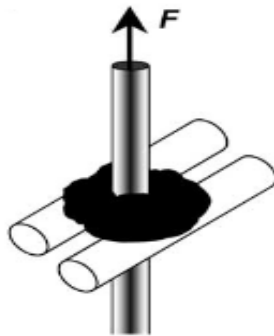


Figura 17. Ensaio de pull-out.
Fonte: Zhandarov & Mäder, 2004.

Em concordância com Teo *et al.* (2007) o teste de arrancamento deve consistir em um carregamento constante até que se obtenha a falha na matriz e o total descolamento da fibra. A resistência experimental desse descolamento é dado pela equação:

$$\tau = F / (\pi \times d \times l) \quad (4)$$

onde τ é a tensão tangencial de descolamento (MPa) entre fibra e matriz, F (N) é a carga que se dá o descolamento da fibra e matriz, d (mm) por sua vez é o diâmetro da fibra e l (mm) o comprimento da fibra que está inserido na matriz.

Boshoff *et al.* (2009) afirmaram que o comprimento que a fibra tem inserido na matriz é vital no que se refere à resistência da interface fibra-matriz. Ou seja, comprimentos diferentes do reforço na matriz originam variações nos deslocamentos e, conseqüentemente, na eficiência da interface. Para comprimentos maiores inseridos na matriz é igual a probabilidade de ruptura das fibras durante o ensaio de arrancamento e menor a probabilidade de escorregamento.

A Figura 18 ilustra um gráfico típico de ensaio de *pull-out*. A tensão cisalhante gerada pelo ensaio pode gerar um comportamento do tipo *split softening* ou *split hardening*. No primeiro, a aderência é menor, assim como,

consequentemente, a tensão cisalhante interfacial. Na segunda, a aderência de tão efetiva, confere ao compósito, mesmo após o surgimento de fissuras, o ganho na resistência ao arrancamento (Bentur & Mindess, 2007).

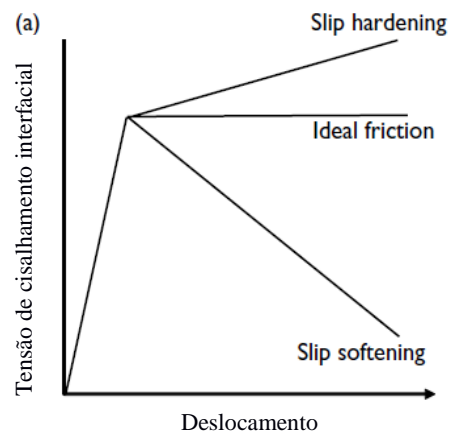


Figura 18. Curvas de slip softening e slip hardening a partir do ensaio de pull-out.

Fonte: Bentur & Mindess, 2007.

Monteiro & d'Almeida (2006) analisaram que os ensaios de *pull-out* são utilizados quando é necessário a determinação do comprimento crítico (l_c) da fibra a ser usada na matriz e a tensão cisalhante interfacial (τ_{cis}) de transferência de esforços na interface fibra-matriz. Esses parâmetros quantificam a resistência e eficiência do compósito. Quanto mais longas as fibras, maior a eficácia do reforço, em relação as mesmas fibras, mais curtas.

2.8.

Problemas de durabilidade em matrizes cimentícias

Como apresentado por Mohammadhosseini *et al.* (2017) o concreto é reconhecidamente um material frágil, com baixa capacidade de absorver energia e baixa resistência à tração, sendo suscetível a ataques químicos, retração e deformações térmicas. Foi atestado por Brandt (2008), Brostow *et al.* (2016) e Palankar *et al.* (2016) que por meio das fissuras na matriz tanto a água como componentes químicos adentram a matriz e aceleram o processo de deterioração das mais variadas formas como, corrosão, ataques por sulfatos, ácidos e cloretos, gelo e degelo e carbonatação.

Como foi relatado que a maioria dos problemas do concreto estão relacionados ao surgimento de trincas, é necessário a diminuição da fragilidade da

matriz, e com isso Toutanji (1999) e Sun *et al.* (2001) relataram que esse problema poderia ser sanado com a incorporação de fibras aos compósitos cimentícios. Beigi *et al.* (2013) e Medina *et al.* (2014) constataram que a adição de materiais pozolânicos melhoram de maneira excelente a ductilidade do material sob carregamento mecânico, assim como sua durabilidade quando expostos aos mais distintos ambientes agressivos.

De acordo com Toledo Filho *et al.* (2005) e Edvardsen (1999), a adição de pequenas quantidades de fibras de aço, polipropileno ou celulósicas já são capazes de reduzir a retração plástica, que ocorre com a pasta ainda no estado fresco, e as fissuras no concreto decorrentes dessa ação. Além disso, experiências práticas demonstraram que as fibras vegetais podem atuar como responsáveis por proporcionarem o *self-healing* das fissuras, por manterem a umidade no interior das pastas de cimento e auxiliarem na hidratação de grãos de cimento que ainda não haviam sido hidratados.

Entretanto Gram (1983), Canovas *et al.* (1992), John *et al.* (2005) Agopyan e Savastano Jr. (1999) e Toledo Filho *et al.* (2000; 2003) identificaram que a perda prematura de resistência mecânica do compósito cimentício está interligada à presença da fibra natural, a qual sofre ataque alcalino. A fibra é mineralizada por razão da migração do hidróxido de cálcio e da variação volumétrica das mesmas, em função da absorção de água. Esse ataque degrada as fases lignina e hemicelulose, fragilizando a estrutura fibrilar. Para assegurar a durabilidade desses compósitos fibrosos, a impregnação do reforço com substâncias repelidoras de água, selagem da matriz, para que diminua os poros desta e com isso, a interconectividade dos mesmos seja aumentada, e a alteração da matriz com a utilização de cimentos com alto teor de alumina ou com adição de materiais pozolânicos, como metacaulinita, cinza volante ou escória são ações de tratamento propostas. O fato de as fibras serem altamente hidrofílicas também prejudica a durabilidade do compósito cimentício, visto que, ao causar alteração de volume do mesmo, induz o surgimento de fissuras no concreto causadas por retração (Ghavami, 2005; Tonoli *et al.*, 2007).

Juntamente com as propriedades mecânicas, os aspectos relacionados à durabilidade desses compósitos são considerados essenciais para o comportamento e a possível utilização desses materiais (Mohammadhosseini *et al.*, 2017).

3

Materiais e métodos

3.1.

Introdução

Neste capítulo, serão apresentados os materiais utilizados durante a fabricação da matriz e, posteriormente, do compósito. Além disso, serão descritos os métodos escolhidos para analisar o reforço natural (fibras de bucha vegetal), a matriz cimentícia a que o reforço será inserido, e por fim, o compósito cimentício. Quanto às fibras, suas propriedades mecânicas e químicas foram analisadas, tentando efetuar uma correlação entre seus respectivos comportamentos através de diversos ensaios como, tração direta da fibra (do filamento e do tecido), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-x (DRX), espectroscopia de infravermelho (IV) e análise digital em lupa eletrônica a fim de gerar imagens capazes de indicar alguma tendência no direcionamento dos filamentos no interior das fibras e verificar se isso influencia no comportamento mecânico das mesmas.

Quanto a caracterização da matriz, a mesma foi feita por meio de ensaios de *flow table*, resistência à flexão, à compressão e análise termogravimétrica. Essa análise foi feita com duas matrizes distintas. Uma com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos e a outra, sem esse tipo de substituição, a fim de traçar uma comparação entre a presença de Hidróxido de Cálcio nas duas matrizes.

Por fim, o compósito cimentício reforçado com a bucha foi caracterizado por meio de ensaios de resistência à tração e flexão, com o objetivo de avaliar a eficiência mecânica do mesmo.

3.2.

Caracterização do reforço fibroso

As fibras de *Luffa cylindrica* possuem uma morfologia, assim como seção transversal, bastante variável. Por isso, após a aquisição, as buchas foram abertas

ao meio e prensadas (Figura 19) em prensa manual, com carga de 5 toneladas para se obter um material com maior uniformidade e que facilitasse a moldagem dos futuros corpos de prova do compósito. As mesmas não passaram por nenhum tipo de tratamento químico ou secagem.

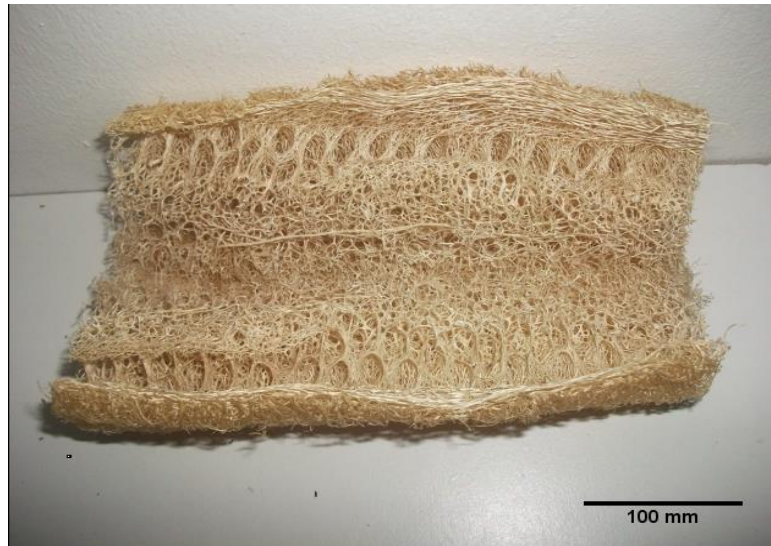


Figura 19. Bucha aberta antes da prensagem.
Fonte: Autor, 2017.

Na Figura 20 é apresentado esquematicamente o programa experimental de caracterização do reforço.

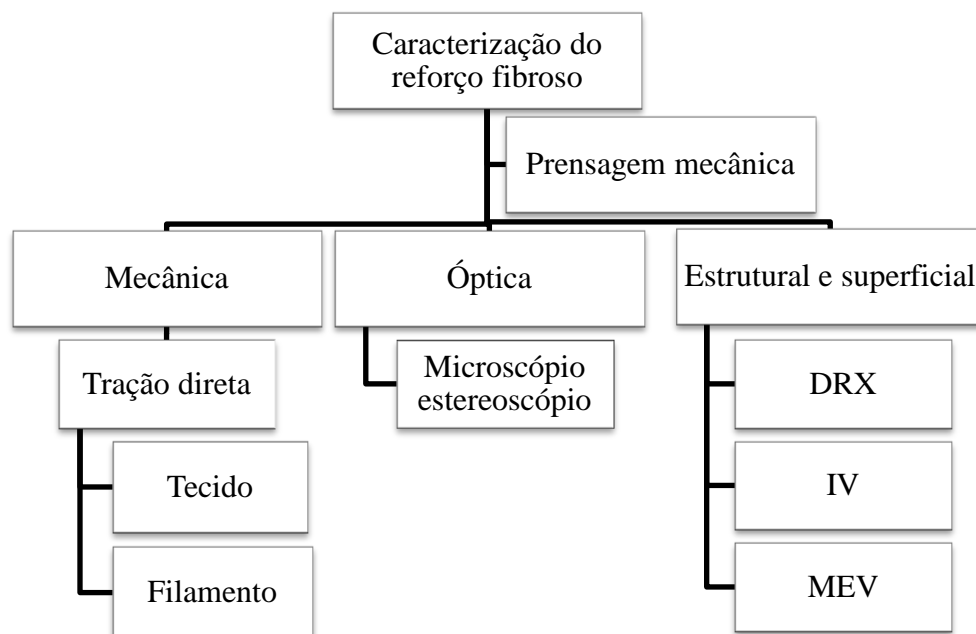


Figura 20. Esquema do programa experimental referente à caracterização do reforço.
Fonte: Autor, 2017.

As fibras utilizadas no presente trabalho são oriundas de uma propriedade rural de nome Fazenda Coquerato, localizada na cidade de Itápolis, no Estado de São Paulo, Brasil.

Para a realização dos ensaios de Difração de Raio-X e Espectroscopia de Infravermelho, as fibras de *Luffa cylindrica* precisaram ser anteriormente moídas, a fim de se obter um pó fino. A moagem foi realizada em um moinho de facas, de marca e modelo SOLAB SL-30 (Figura 21).

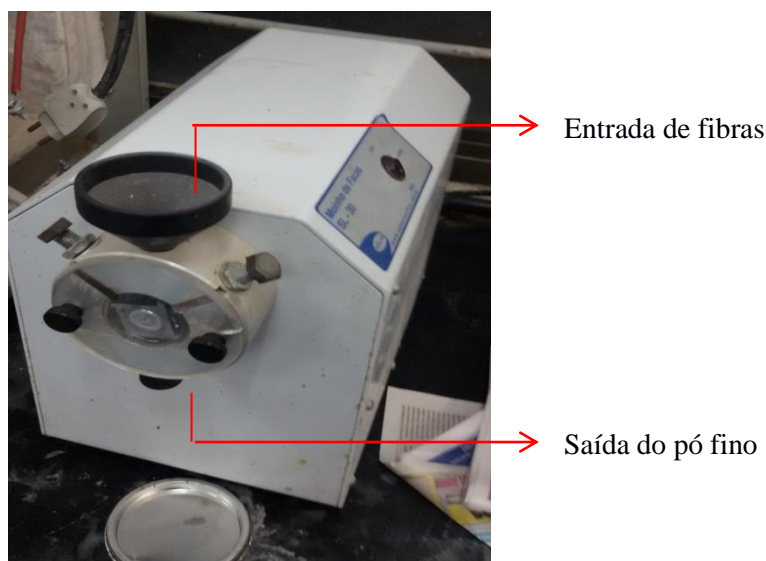


Figura 21. Moinho de facas utilizado no trabalho.

Fonte: Autor, 2017.

3.2.1.

Ensaio de tração direta

O ensaio de tração direta foi dividido entre o tecido e o filamento da fibra da bucha.

3.2.1.1.

Tração direta do tecido

As buchas foram ensaiadas em seu estado seco, após terem sido abertas e prensadas mecanicamente. As mesmas foram fixadas em placas de ferro com espaçamento de 300 mm. Foram feitos 15 ensaios realizados na máquina de ensaio universal MTS, modelo 311, com célula de carga de 1kN, e velocidade de

ensaio de 0,5mm/min. Nas Figuras 22a a 22c é ilustrada a sequência de ruptura do tecido.

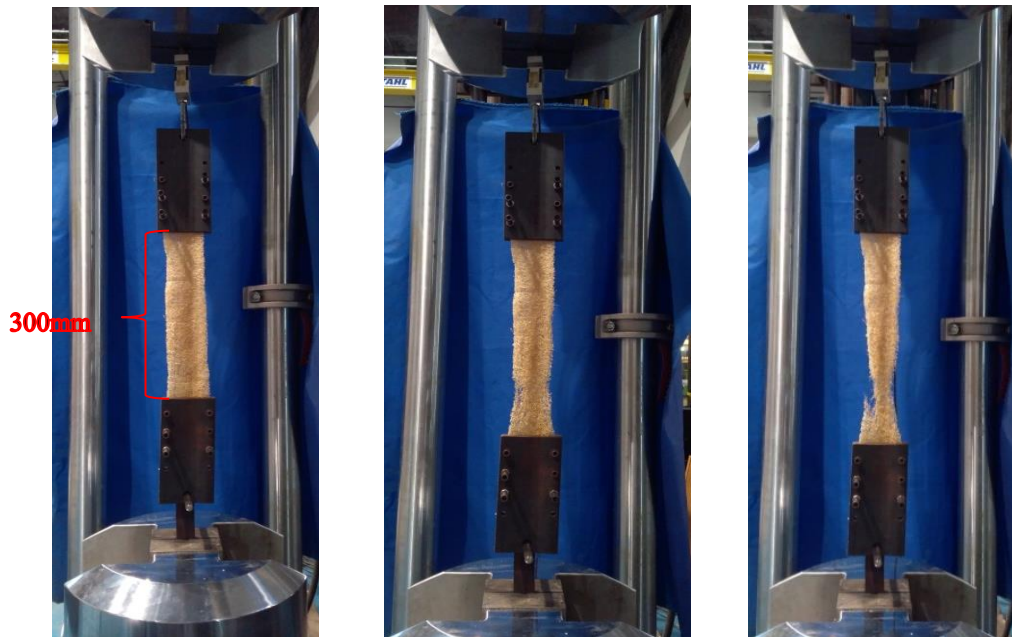


Figura 22. a), b) e c). Sequência de fotos ilustrando o modo de ruptura do tecido ensaiado.

3.2.1.2.

Tração no filamento

Os filamentos do tecido (Figura 23) foram retirados após as fibras estarem abertas, porém, antes da prensagem mecânica. Foram divididos em dois grupos: um constituído de filamentos retilíneos e sem ramificações com outros filamentos e outro grupo, apenas com filamentos que apresentassem nós. Cada grupo contém 10 unidades de filamentos. Essa distinção foi feita com o objetivo de caracterizar o que essa morfologia implica na resistência mecânica do material.



Figura 23. Conjunto de filamentos, a partir dos quais foram retirados monofilamentos para ensaio.

Os filamentos foram testados conforme a norma ASTM C1557 (2014). Inicialmente tiveram suas extremidades coladas em um papel de 90 g/cm², utilizando uma cola industrial Loctite 496. O papel foi cortado no meio, com espaçamento de 20 mm, representando o tamanho da fibra a ser ensaiado. Após o corpo de prova ser fixado na máquina, as laterais do papel foram cortadas para que a carga aplicada fosse suportada somente pela fibra, como mostrado na Figura 24.

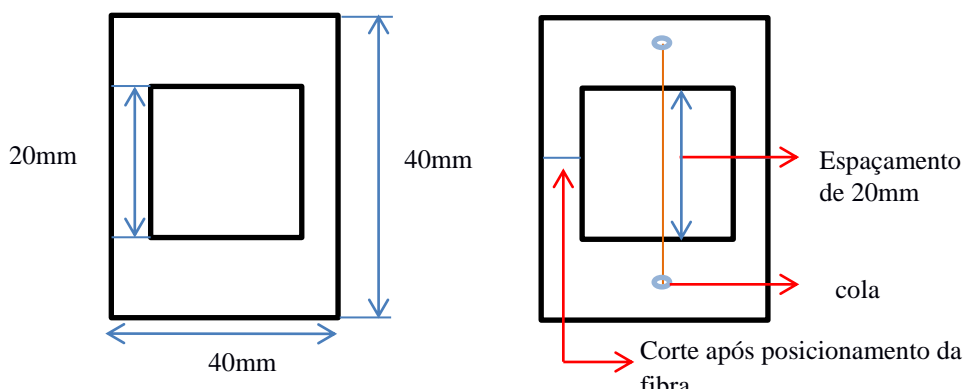


Figura 24. Esquematização do corpo de prova utilizado no ensaio de tração do filamento.

Esse ensaio foi realizado em uma máquina universal MTS, modelo 810/250, porém, com adaptação para uma célula de carga de 100 N. A velocidade do ensaio foi de 0,1 mm/min, tendo sido empregado um LVDT para medir o deslocamento ao longo de todo o ensaio. A instrumentação e o andamento do ensaio são apresentados na Figura 25.



Figura 25. a) Instrumentação do ensaio; b) Andamento do ensaio com a fratura completa da fibra.

3.2.2.

Microscópio estereoscópio

O ensaio foi realizado em um equipamento da marca Nikon, modelo SMZ800N (Figura 26), com o zoom podendo variar entre 1x e 8x, permitindo visualizações com altas resoluções.



Figura 26. Microscópio utilizado para a visualização das fibras.

Essa observação foi feita com o objetivo de encontrar uma orientação preferencial das microfibrilas da bucha vegetal, através do software ImageJ/Fiji, utilizando o *plugin* OrientationJ. O referido *plugin* foi desenvolvido pela *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, no *Biomedical Image Group*, localizado na Suíça.

Medidas quantitativas e qualitativas podem ser feitas a partir de uma imagem descolorida (8, 16 ou 32bit), usando uma janela da Gaussiana, a qual influenciará em quantos intervalos de pixels pode ser feita a análise da estrutura. Quanto maior o número de intervalos, mais uniforme será a interpretação do software dentro de um mesmo espaço específico.

De maneira qualitativa, cada cor corresponde a uma orientação específica computada pelo programa para cada pixel da imagem e apresentada em ângulos, que variam de -90° até $+90^\circ$ (Figura 27).

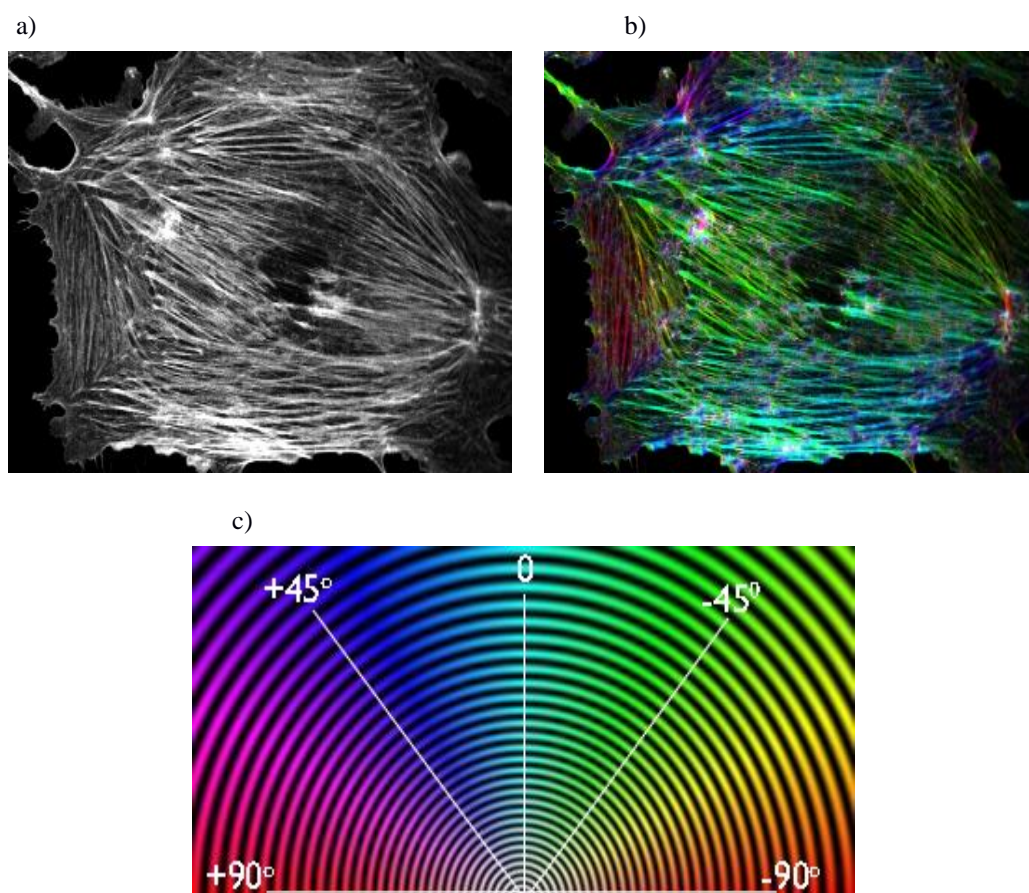


Figura 27. Exemplificação da utilização do software ImageJ, com a extensão OrientationJ. a) Imagem de entrada a 8bit, b) Imagem após a análise qualitativa da orientação, c) Paleta de cores, onde cada uma delas especifica um intervalo de ângulos de orientação.

Fonte: Sage, 2012.

De maneira quantitativa pode ser feita a medida da orientação usando uma imagem também descolorida, na qual são feitas delimitações para se analisar a orientação em determinado local da imagem. Nessa análise também é medida a coerência com que a angulação das fibras é apresentada. O coeficiente de coerência varia entre 0 e 1, onde mais próximo de 1 (100%) indica uma forte coerência das fibras à orientação preferencial naquela região analisada (Figura 28).

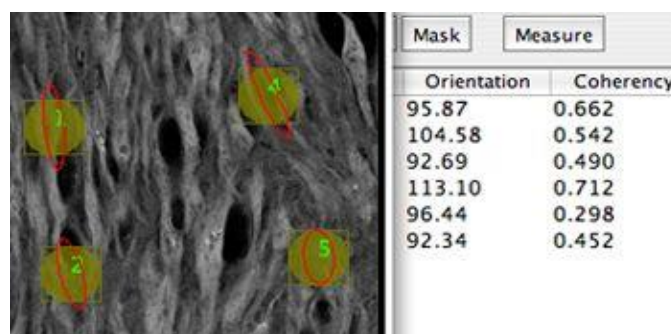


Figura 28. Análise quantitativa dos ângulos de orientação e coerência na imagem analisada.

Fonte: Fonck, 2009.

Na medida em que a coerência esteja próxima de 1, a elipse tem um formato mais estreito. Por exemplo, como pode ser observada na Figura 28, a delimitação de área da figura representada pelo número 5, apresenta uma orientação preferencial das fibras no ângulo de 96,44° e uma coerência de 0,298 ou 29,8%. Ou seja, nesse local, a aleatoriedade das fibras é predominante.

3.2.3.

Difração de Raios-X

Pela importância que a celulose tem como constituinte da fibra, responsável por conferir resistência a mesma, foi realizado o ensaio de difração de raio-x, para determinar o índice de cristalinidade da fibra de bucha vegetal. O ensaio foi feito em um difratômetro Bruker D8 Discovery, com radiação de cobre (Cu- $k\alpha$, $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 30 mA. No difratômetro as amostras foram analisadas entre ângulos de 5° a 80°, com velocidade angular de 0,02°/s.

A porcentagem de cristalinidade das amostras foi quantificada pelos métodos de subtração da área amorfa, após deconvolução dos picos e da medição da altura dos picos. A partir da equação 5, é possível determinar o grau de cristalinidade da amostra (Karimi e Taherzadeh, 2016).

$$(IC \%) = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100 \quad (5)$$

Onde, IC é índice de cristalinidade do material, A_c é a área sob os picos cristalinos. Esses picos são maiores e mais afilados e A_a é a área correspondente do halo amorfo.

3.2.4.

Espectroscopia no Infravermelho (IV)

O espectro infravermelho de um composto químico é considerado uma das técnicas de caracterização mais importantes e, por isso, a espectroscopia no infravermelho tem utilização na identificação dos compostos.

Outra importante aplicação do infravermelho, mas ainda bem menos utilizada, é a análise quantitativa de misturas de compostos. Como a intensidade de uma banda de absorção é proporcional a concentração do componente que

causou esta banda, a quantidade de um composto presente em uma amostra pode ser determinada através de uma curva de calibração (intensidade da banda na Espectroscopia no Infravermelho x concentração) construída a partir de amostras com concentrações conhecidas do composto em questão.

A análise dos espectros foi feita respeitando a região do infravermelho médio entre 650 e 4000 cm^{-1} . O pó fino das fibras, oriundo do moinho de facas, foi analisado no espectrofotômetro da marca Perkin Elmer, modelo Spectrum 400, com resolução de 2 cm^{-1} , operando com velocidade de varredura de 0,2 cm/s.

3.2.5.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise microestrutural foi feita em um microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6510 LV (Figura 31), o qual utilizou o método de elétrons secundários e uma tensão de aceleração do feixe de elétrons de 10 kV. O MEV permite analisar detalhadamente a morfologia da superfície das fibras e identificar qualitativamente os elementos que compõem as mesmas.



Figura 29. Microscópio Eletrônico de Varredura da marca JEOL, modelo JSM-6510LV usado na pesquisa.

Anteriormente às análises as fibras precisaram ser metalizadas (Figura 32), tendo sido empregado ouro para tal finalidade, a fim de possibilitar a condução de elétrons necessária na análise.

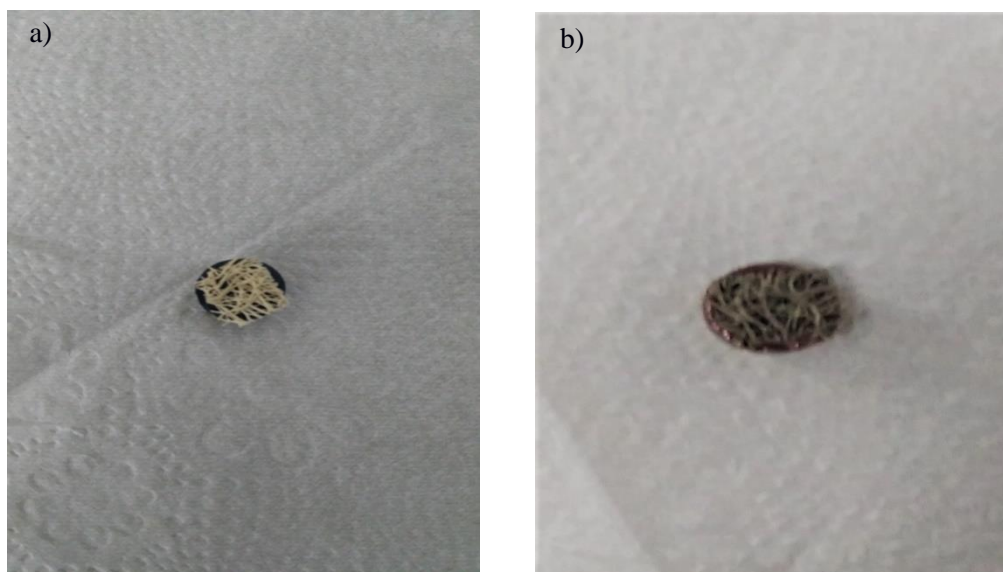


Figura 30. a) Fibra da bucha antes da metalização. b) Fibra após ser metalizada por ouro.

A metalização se faz necessária pois, sem ela, a bucha não seria capaz de conduzir os elétrons e esses não seriam captados pelos detectores, que os convertem em imagens de alta resolução.

3.3.

Caracterização da matriz cimentícia

Silva *et al.* (2010) e Fidélis *et al.* (2014), como solução para a migração de Ca(OH)_2 e a consequente diminuição de durabilidade das fibras, propuseram a substituição de 50% do cimento Portland por outros materiais, como por exemplo, a cinza volante.

Para o desenvolvimento da matriz utilizada no presente trabalho, foi adotada a dosagem que Fidelis (2014) utilizou na sua pesquisa. Com 50% dos finos sendo formados por cimento, 40% de metacaulinita e 10% de cinza volante e fator água cimento de 0,4. Com essa mistura, visou-se a redução do hidróxido de cálcio.

A substituição parcial do cimento por metacaulinita traz um aumento na resistência à compressão da pasta, gera poros com estruturas mais refinadas e leva à maior blindagem ao ataque causado por sulfeto de magnésio e por íons cloretos (WINNEFELD *et al.* 2007).

A Figura 33 mostra esquematicamente o programa experimental proposto para a caracterização da matriz utilizada.

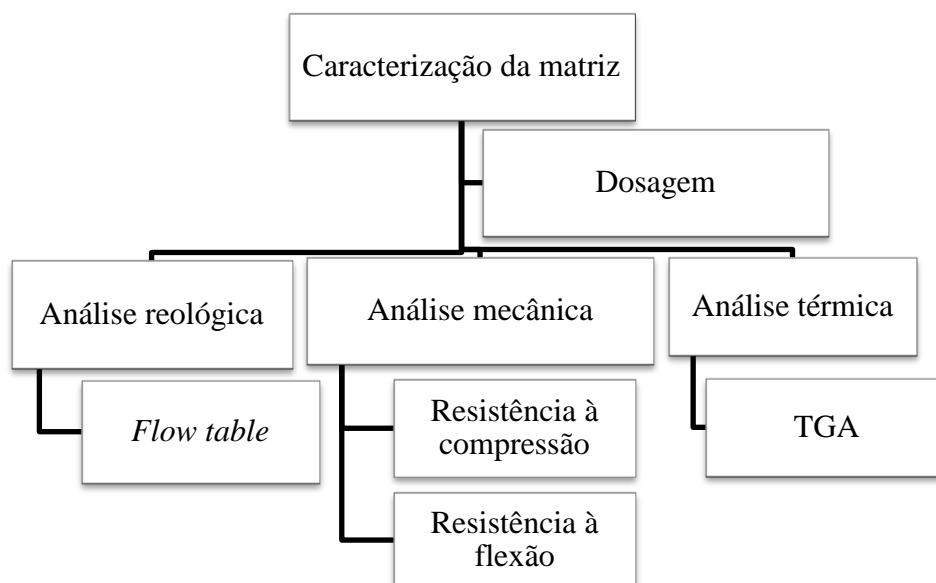


Figura 31. Fluxograma do programa experimental referente à caracterização da matriz cimentícia.

3.3.1.

Flow Table

O ensaio de *Flow Table* foi realizado conforme a norma NBR 7215 (ABNT, 1996). Nesse ensaio se utiliza uma mesa lisa, plana e previamente lubrificada (Figura 34), além de um molde tricônico e um soquete de metal. A argamassa foi vertida no molde em três camadas de mesma altura e, entre cada uma dessas camadas, foram aplicados 15, 10 e 5 golpes, respectivamente no molde. Depois de cheio, o mesmo foi retirado verticalmente, deixando que a mistura se espalhasse pela mesa e foram feitas duas medidas do diâmetro de espalhamento, para se determinar uma média e, conseqüentemente, um índice de consistência. Segundo Silva *et al.* (2010) e Fidelis *et al.* (2014) um espalhamento de aproximadamente 400mm é o suficiente para conferir trabalhabilidade à matriz.



Figura 32. Flow table utilizada no teste de consistência da argamassa.

3.3.2.

Resistência à compressão

A matriz com substituição parcial de 50% de cimento por 40% de metacaulinita e 10% de cinza volante foi testada à compressão para determinar sua propriedade mecânica. Os corpos de prova apresentavam dimensões de 100 x 50 mm (altura x diâmetro), como ilustrado na Figura 35.

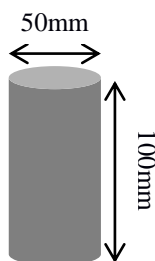


Figura 33. Esquema das dimensões dos corpos de prova.

Os ensaios supracitados foram realizados no equipamento de ensaios de compressão da empresa Controls, modelo 50-C46Z00 (Figura 36a), com capacidade de carga de até 2000 kN, com uma taxa de carregamento de 0,25 MPa/s. Os corpos de prova foram faceados, para conferir planicidade entre as duas bases e o encurtamento médio foi aferido por dois LVDT's, os quais estavam fixados em um suporte acrílico (Figura 36b). Para este ensaio, foram fabricados 3 corpos de prova (Figura 36c e d) para cada uma das idades testadas (7, 14 e 28 dias).



Figura 344. a) e b) Suporte acrílico envolvendo corpo de prova e servindo como base para a colocação dos LVDTs. c) e d) Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão.

3.3.3.

Resistência à flexão

A matriz utilizada na moldagem dos corpos de prova do referido ensaio, respeitou a mesma dosagem de 50% de cimento, 40% de metacaulinita e 10% de cinza volante. Os corpos de prova eram retangulares com dimensões de 500 x 60 x 10 mm (comprimento x largura x espessura), como ilustrado na Figura 37a.

A retirada do molde se deu dois dias após a moldagem e, nesse intervalo, os corpos de prova ficaram envolvidos com plástico impermeável, para reduzir a retração (Figura 37b). Após desmoldados foram imersos em ambiente aquoso saturado em cal, até a data do ensaio.



Figura 35. a) Esquema de dimensões dos corpos de prova para ensaio de flexão. b) Corpo de prova com consistência suficiente para ser desmoldado.

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaios universais MTS modelo 810 (Figura 38a), com garras hidráulicas e capacidade de carga de 500 kN (MTS 810/500), com taxa de deslocamento de 1 mm/s e célula de carga de 250 kg. O deslocamento médio no meio do vão, inicialmente de 400 mm, foi medido por dois LVDT's externos (Figura 38b). Foram ensaiados 3 corpos de prova, com idade de 28 dias, contados a partir da moldagem.

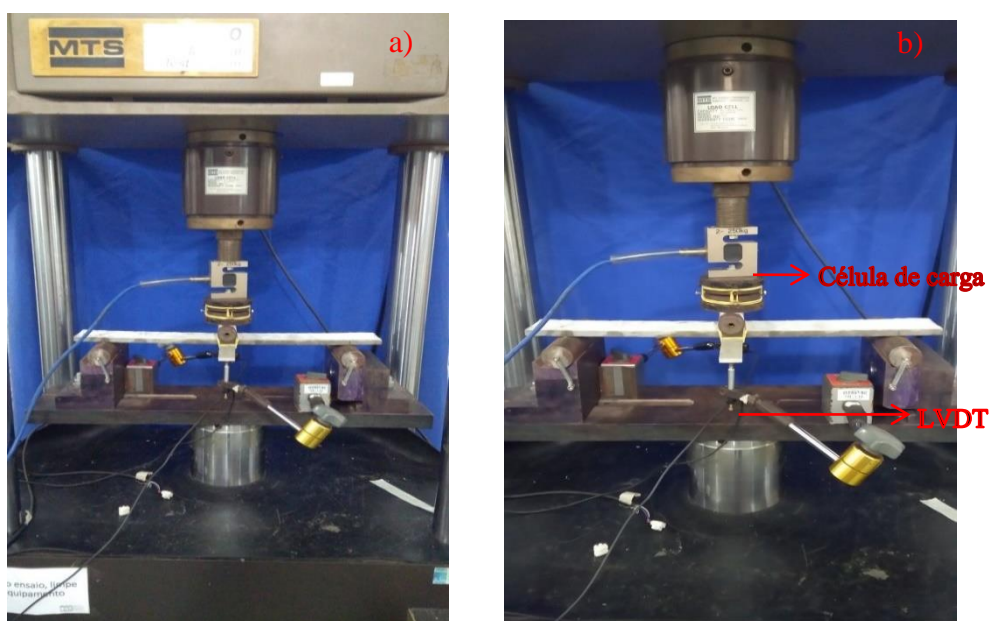


Figura 36. Corpo de prova sendo submetido a ensaio de flexão de 3 pontos.

3.3.4.

Análise Termogravimétrica (TGA)

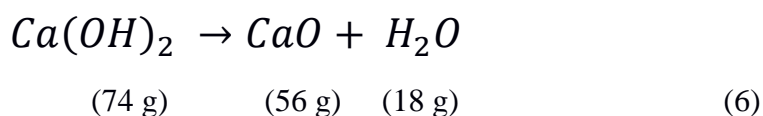
As análises termogravimétricas foram utilizadas para determinar a quantidade de hidróxido de cálcio (HC), principal produto de hidratação do cimento, na matriz cimentícia do presente estudo. Esses ensaios foram realizados com a matriz de 28 dias de idade.

Os ensaios foram realizados no equipamento da marca Perkin-Elmer Pyris 1 TGA (Figura 39); a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min, iniciando na temperatura ambiente até 900 °C, em atmosfera de nitrogênio com vazão de 29mL/min. A amostra a ser analisada, após a mistura, foi armazenada e curada em uma sacola plástica fechada, a qual foi aberta somente na data do ensaio.



Figura 37. Equipamento utilizado na análise de TGA da matriz.

De acordo com Elbeyli *et al.* (2003), o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) se decompõe quimicamente na faixa de 420 a 520 °C, eliminando água durante esse processo. Por meio das análises termogravimétricas (TGA) é factível determinar, a perda de água, em massa, que estava combinada quimicamente ao Ca(OH)_2 . A equação 6 apresenta como ocorre o processo de desidratação.



Interpretando a Eq. 6 é possível observar que a perda de uma molécula de água (18g), corresponde a desidratação de uma molécula de hidróxido de cálcio (74g). Sendo assim, a massa livre de Ca(OH)_2 é igual a 74/18 da massa de perda de água na reação química oriunda do aquecimento da amostra. Para calcular a quantidade de HC presente na matriz cimentícia, será utilizada a equação 7:

$$\text{HC (\%)} = \frac{74,0}{18,0} \times \frac{M_S^{\text{To}} - M_S^{\text{Tf}}}{M_c} \quad (7)$$

onde, M_S^{To} e M_S^{Tf} são os valores das massas oriundas do ensaio de TGA, para as temperaturas inicial e final de desidratação do Ca(OH)_2 , respectivamente. M_c é a massa inicial da amostra a ser analisada.

3.4.

Caracterização do compósito cimentício

A Figura 40 mostra, esquematicamente, a sequência a ser respeitada para a caracterização do compósito cimentício. Foram fabricados dois tipos de compósitos. O primeiro, reforçado somente por fibras de bucha vegetal, é o objetivo principal do presente estudo. Com o objetivo de agregar conteúdo à discussão acerca do tema, foi fabricado um compósito do tipo sanduíche, composto por fibras de bucha e sisal (*Agave sisalana*).

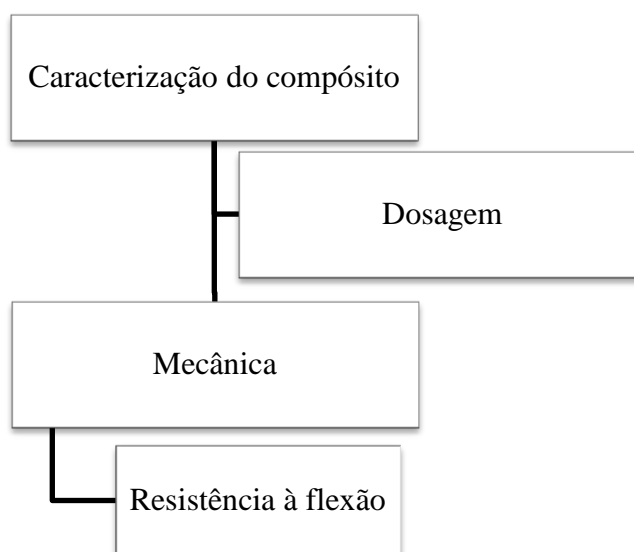


Figura 38. Esquema do programa experimental referente à caracterização do compósito.

As fibras de sisal utilizadas no estudo são provenientes de uma fazenda, localizada na cidade de Valente, no nordeste da Bahia, Brasil. Elas foram recebidas totalmente secas, porém passaram por um processo de molhagem, anterior à moldagem, para evitar que roubassem umidade da pasta.

3.4.1.

Resistência à flexão

Assim como na caracterização da matriz cimentícia, os compósitos também foram fabricados respeitando uma dosagem proporcional de 50% de cimento, 40% de metacaulinita e 10% de cinza volante. Além disso, para as suas propriedades mecânicas serem melhor comparadas, também apresentavam a mesma medida (500 mm de comprimento x 60 mm de largura x 10 mm de espessura), como ilustrado na Figura 37a. Os ensaios respeitaram os mesmos parâmetros e condições expostos no capítulo 3.3.3.

Para a fabricação dos compósitos reforçados com fibras, foram usadas, em um primeiro momento, uma única camada de bucha vegetal, isoladamente (Figura 41).



Figura 39. Sequência de moldagem do compósito reforçado por fibra de bucha vegetal.

Em um segundo momento, foram fabricados compósitos com reforço fibroso de *Luffa cylindrica* e *Agave sisalana* alternados entre si, resultando assim, em um compósito do tipo sanduíche (Figura 42). A massa de sisal colocado em todos os corpos de prova foi de 46 g e o lançamento da matriz se deu após todo o reforço ter sido posicionado.

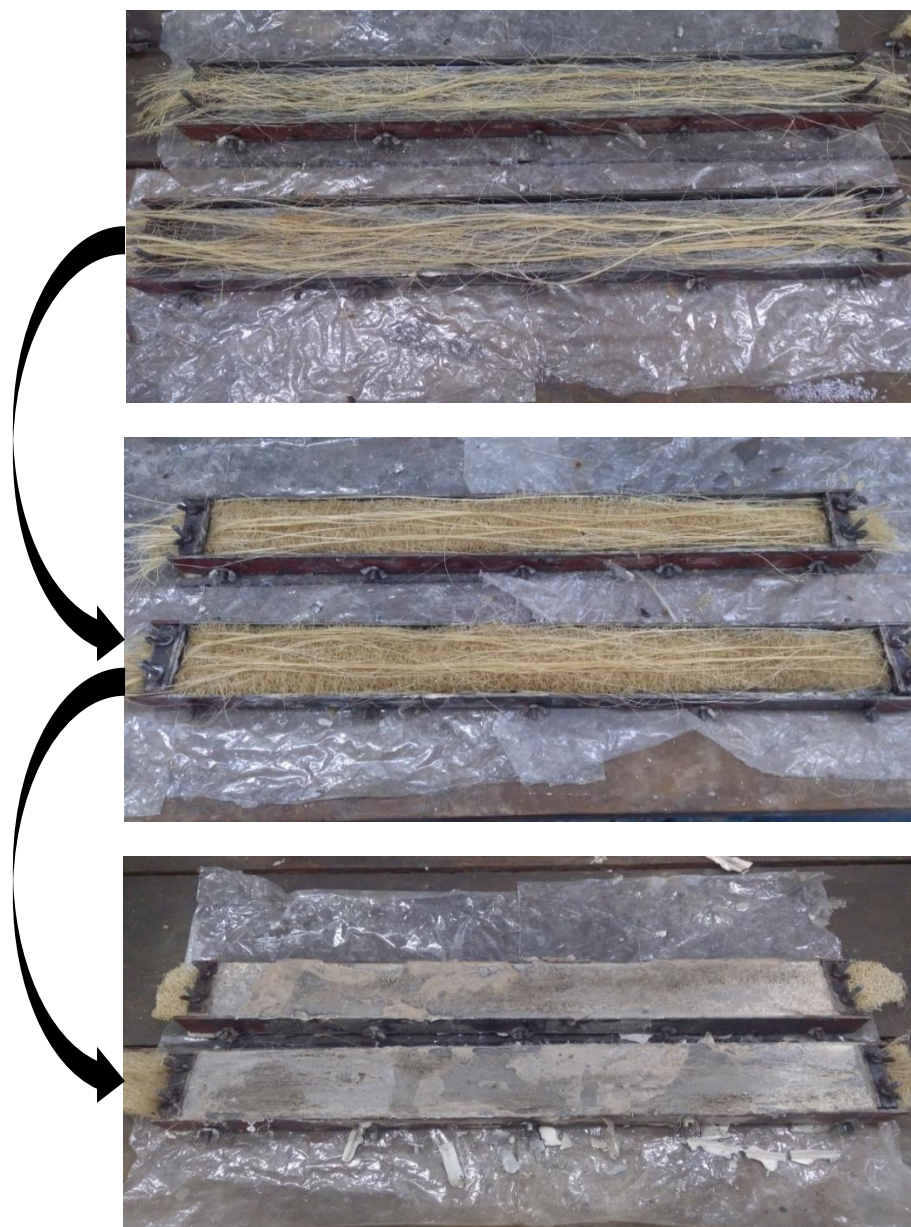


Figura 40. Sequência da fabricação do compósito sanduíche bucha-sisal.

Após a etapa de fabricação, os corpos de prova foram desmoldados após dois dias e encaminhados para continuarem a cura em ambiente aquoso, saturado por cal, onde permaneceram até a data do ensaio, 28 dias após a moldagem.

Resultados e discussões

4.1.

Caracterização do reforço fibroso

Essa caracterização foi feita por ensaios de tração direta, realizados no tecido e em cada filamento separadamente. Imagens da fibra foram obtidas através de microscópio óptico e analisadas pelo software *ImageJ*, a fim de se verificar algum direcionamento preferencial dos filamentos. Além disso, ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de raios-X, Espectroscopia de Infravermelho (IV) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) também foram utilizados para complementar a análise das propriedades da fibra de bucha vegetal.

4.1.1.

Ensaio de tração direta

4.1.1.1.

Tração direta no tecido

A partir desse ensaio foi constatada a carga máxima que o tecido de bucha vegetal suporta até o rompimento das primeiras fibras. Entretanto, analisando a Figura 43, é possível observar um aumento na resistência, em alguns casos, mesmo após ruptura dos primeiros filamentos. Foi encontrada resistência máxima de $151,1 \pm 62,2$ N. Como a geometria da bucha apresenta uma grande variação entre elas, foi feita uma relação entre a massa (g) e o tamanho da fibra (km), muito utilizada em tecidos com características semelhantes e dada pela unidade Tex. O “Tex” é uma unidade têxtil para densidade linear, equivalente a massa em gramas de 1000 m de fio. Os valores médios encontrados foram de 36.250 ± 19.995 Tex, para uma massa média de $16,875 \pm 6,00$ g e comprimento de 0,0003 km.

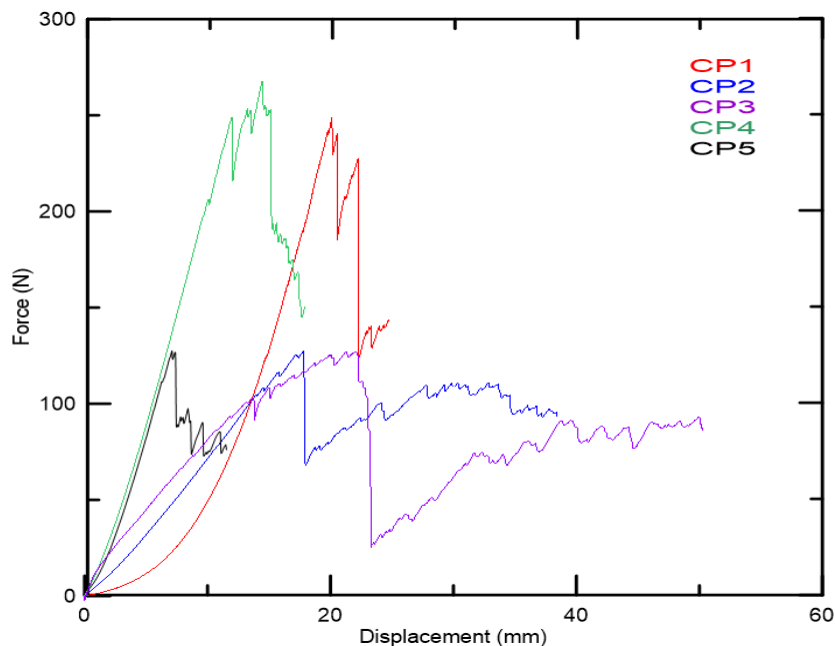


Figura 41. Curva força x deslocamento do tecido de *Luffa cylindrica*.

d’Almeida e d’Almeida (2010) estudaram o comportamento dos tecidos de fibra de vidro e juta em ensaios de tração. Foi observado que as fibras de vidro suportaram uma carga de, aproximadamente, 600 Newtons (N). Em contrapartida, as fibras de juta resistiram algo em torno de 300 N. Já os tecidos naturais de fibras de ubuçu analisados por d’Almeida e Oliveira (2013) apresentaram força máxima de máxima de 430 N. Por se tratarem de tecidos naturais, esses últimos apresentaram resultados mais condizentes com os encontrados no presente estudo. Fidelis (2014) analisou o cordão de juta, o qual apresentou uma densidade linear de 326 tex.

4.1.1.2.

Tração direta no filamento

Com a separação dos filamentos entre aqueles com e sem ramificações, ficou constatado que os nós aumentam a resistência à tração dos filamentos. As tensões máximas e módulos de elasticidade ficaram em $127,5 \pm 75,1$ MPa e $3,2 \pm 2,6$ GPa para filamentos sem ramificação e $159,2 \pm 92,2$ MPa e $27,9 \pm 24,5$ GPa para filamentos com ramificações (Figura 44).

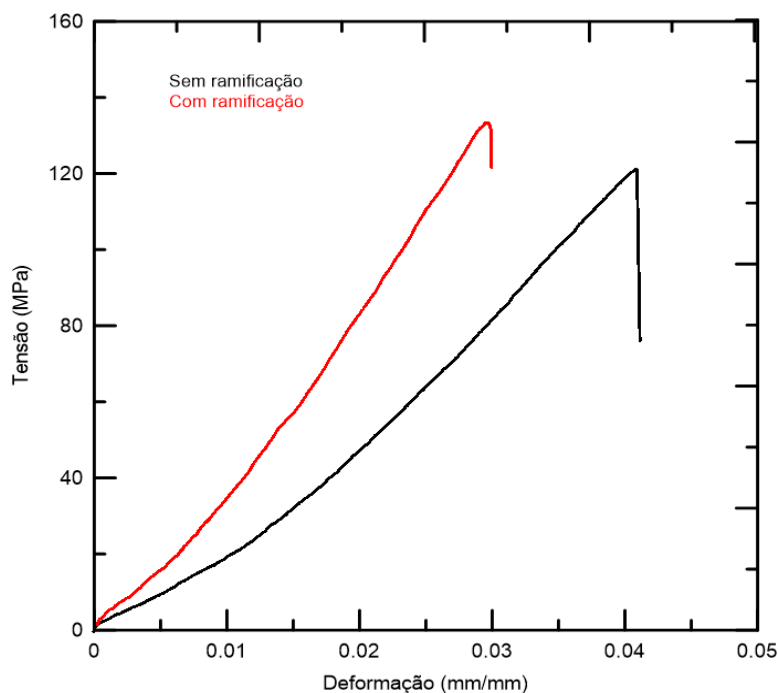


Figura 42. Tensão x deformação de filamentos com e sem ramificação.

Não foram encontrados na literatura estudos que fizessem distinção de fibras que apresentassem ou não ramificações. Todavia, Silva *et al.* (2008) encontraram valores para fibra de sisal entre 396 – 696 MPa de resistência à tração e 12,81 GPa de módulo de elasticidade, sendo utilizados comprimentos de 10, 20, 30 e 40mm.

Derfoirdt *et al.* (2010) pesquisaram inúmeras fibras vegetais. A fibra de coco teve valores de 174 – 210 MPa e 3,44 GPa de resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente. A fibra de juta apresentou alta resistência à tração, entre 349 e 449 MPa, com igualmente alto módulo de elasticidade, 26,3 GPa. Outra fibra analisada foi a de bambu, com valores ainda maiores de resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente, 768 – 858 MPa e 33,4 GPa.

As fibras de curauá estudadas por Fidelis *et al.* (2013) apresentaram uma grande discrepância nos valores de resistência à tração (283 – 803 MPa) e alto módulo de elasticidade (63,7 GPa). d’Almeida *et al.* (2006) avaliaram as propriedades mecânicas das fibras de piaçava, as quais apresentaram baixos valores de resistência à tração, entre 118 e 144 MPa, e módulo de elasticidade (2,38 – 2,78GPa).

Sendo assim, os filamentos de bucha vegetal apresentaram valores comparáveis apenas às fibras de coco e piaçava. Sendo menos resistentes do que as fibras de bambu, juta e sisal.

4.1.2.

Microscópio estereoscópico

A partir da visualização das fibras de *Luffa cylindrica* em alta resolução, ficou possível observar a aleatoriedade que os filamentos individuais apresentam e como os mesmos, em alguns casos, se ramificam para gerarem outro grupo de filamentos e assim sucessivamente (Figura 45).

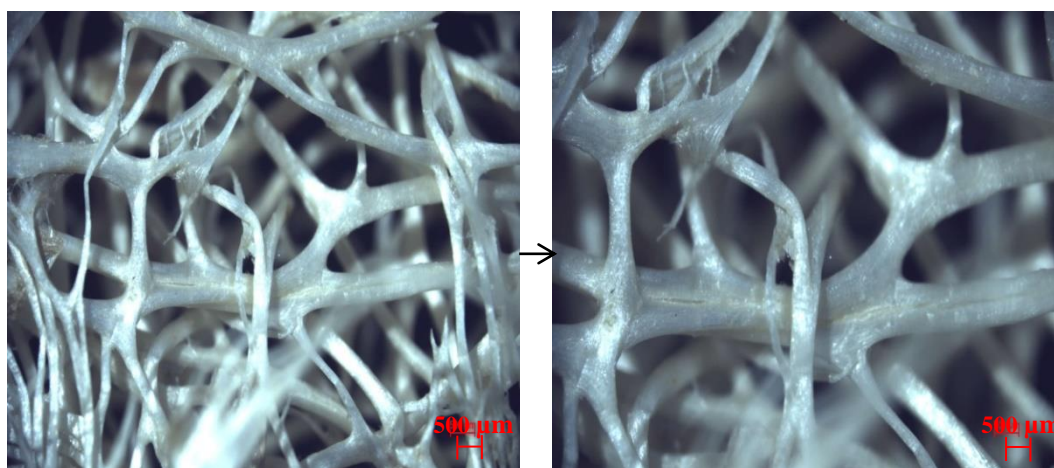


Figura 43. Visualização da fibra de bucha, com destaque para a aleatoriedade dos filamentos.

A aleatoriedade foi quantificada a partir do programa ImageJ, com a expansão OrientationJ, onde é possível identificar a orientação preferencial em um certo grupo de filamentos de uma área delimitada por elipses e a coerência de orientação com que os mesmos apresentam, que varia de 0 a 100% (Figura 46). A imagem descolorida resulta em outra onde cada cor representa a angulação predominante dos filamentos (Figura 47).

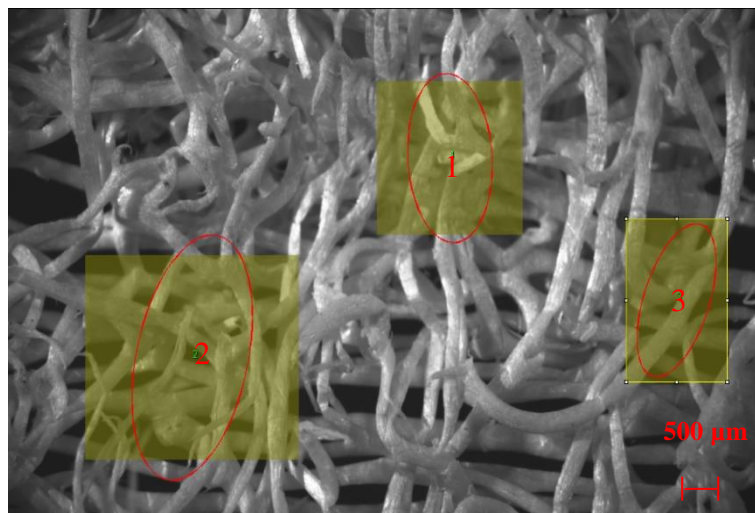


Figura 44. Delimitação por elipses dos filamentos a serem avaliados.

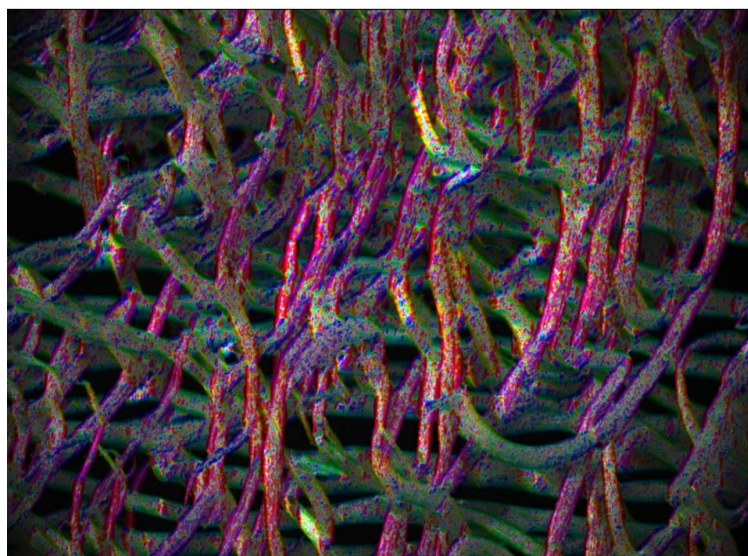


Figura 45. Cada coloração indica um ângulo predominante.

Tabela 10. Quantificação da orientação e da coerência dos filamentos analisados.

Quadrado	Orientação (°)	Coerência (%)
1	-86,33	30,5
2	77,02	35,6
3	70,62	39,5

A Tabela 10 mostra que, por exemplo, na área delimitada pelo quadrado 2, a orientação preferencial é de 77,02°, entretanto, com coerência de apenas 35,6%. Ou seja, nesse ponto, os filamentos apresentam uma aleatoriedade predominante, já que a menor parte segue a orientação do ângulo avaliado pela análise digital. Não foi possível traçar qualquer tipo de comparação, entre os resultados obtidos neste trabalho com de outras fibras naturais que passaram pela mesma análise

digital, dado a dificuldade de encontrar pesquisas existentes acerca do referido ensaio na literatura.

4.1.3.

Difração de Raios-X (DRX)

As fibras avaliadas no ensaio não passaram por qualquer tratamento químico, apenas físico, sendo transformadas em pó com o auxílio de um moinho de facas. No difratograma apresentado pela Figura 49 é possível observar uma banda de dispersão de fundo em $2\theta = 16^\circ$, aproximadamente, indicando a presença de estruturas amorfas, e três picos de difração de Bragg, condizentes com outros difratogramas de diferentes fibras lignocelulósicas. Esses picos, a aproximadamente $15,9^\circ$, $22,6^\circ$ e $34,6^\circ$, são correspondentes, respectivamente, aos planos (101), (002) e (040), relacionados à difração da celulose (Garvey *et al.* , 2005, Guo *et al.*, 2013 e Xu *et al.* , 2013).

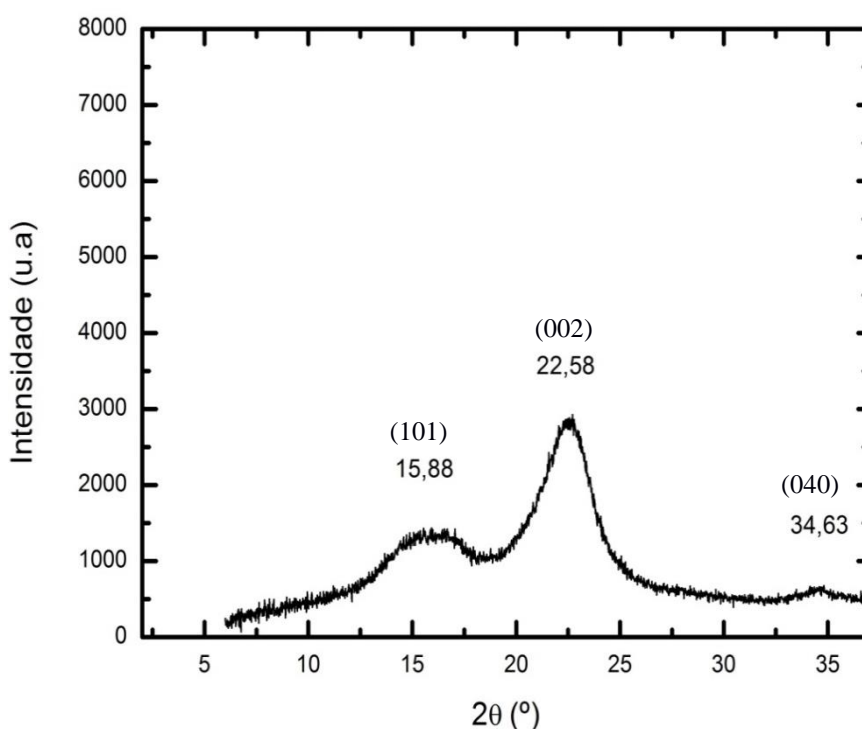


Figura 46. Difratograma de raios-x da fibra de bucha vegetal.

A presença de regiões amorfas e cristalinas ocorre porque as cadeias de celulose contém partes amorfas (menor ordenamento) e cristalinas (mais ordenadas). Além disso, as fibras lignocelulósicas contém hemicelulose e lignina que são compostos amorfos.

O índice de cristalinidade (IC) foi determinado pelo método de deconvolução dos picos dos espectros de DRX das fibras, utilizando a equação 5, a qual relaciona a área total e a área dos picos cristalinos. Essas áreas foram calculadas com o auxílio do software *OriginPro*, a partir dos difratogramas de Raios-X, sendo a área cristalina determinada pela subtração da parte amorfa do difratograma total. A Tabela 11 mostra as áreas de cada pico, determinadas a partir da deconvolução dos mesmos (Figura 50). A Figura 51 mostra a área total.

Tabela 11. Áreas utilizadas no cálculo de IC da *Luffa cylindrica*.

Área do pico 1	$5,08253 \times 10^{15}$ u.a
Área do pico 2	$7,88385 \times 10^{15}$ u.a
Área do pico 3	$3,43853 \times 10^{14}$ u.a
Área do halo amorfo	$1,909 \times 10^{16}$ u.a

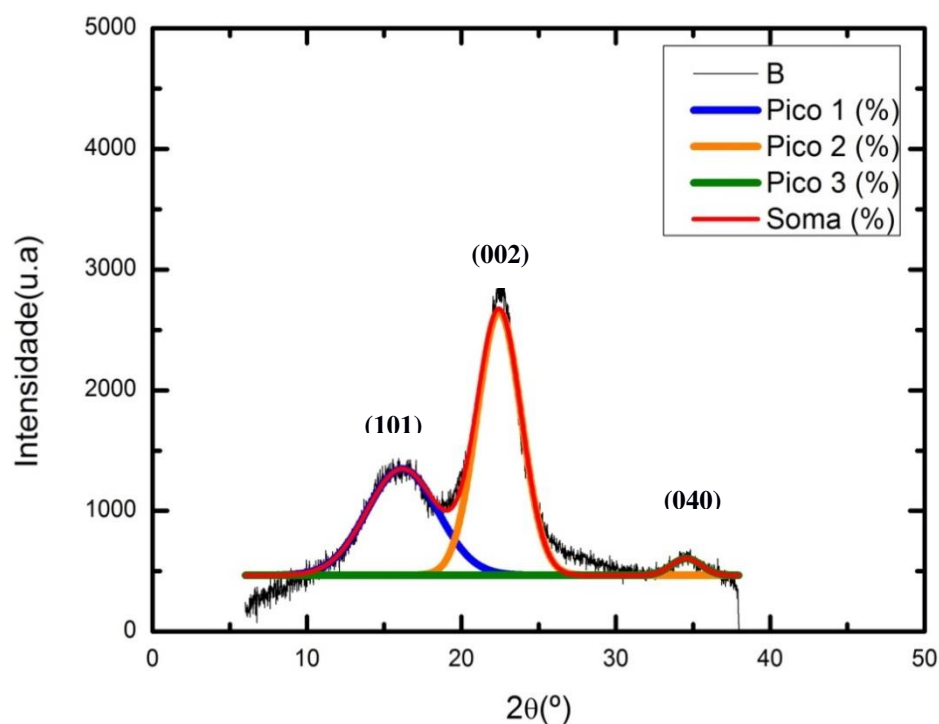


Figura 47. Deconvolução dos picos da bucha vegetal.

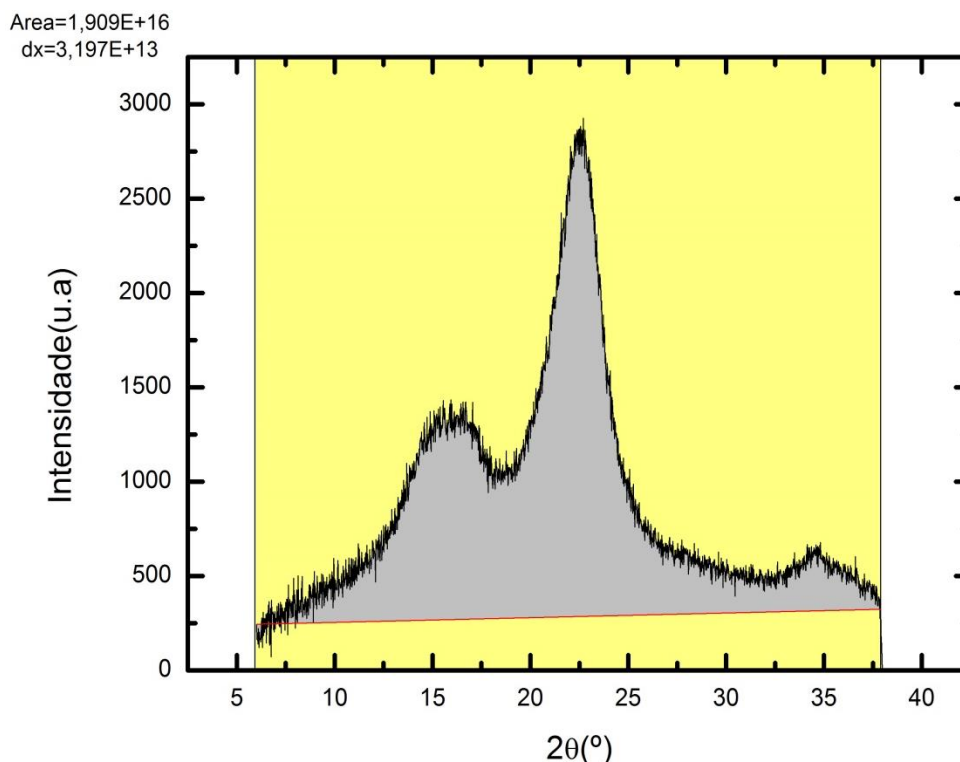


Figura 48. Delimitação da área total (amorfa + cristalina) a partir do DRX.

O Índice de Cristalinidade calculado foi de 43%, relativamente próximo ao encontrados por Adewuyi e Pereira (2017) que foi de 48,91% e por Ghali *et al.* (2009) e Guimarães *et al.* (2009) que acharam resultados de IC = 50%. Entretanto, as fibras analisadas são substancialmente menos cristalinas do que as fibras de Tanobe *et al.* (2005), Satyanarayana *et al.* (2007) e Ganesh e Muralikannan (2016) que reportaram valores de 59,1 e 58,68%.

4.1.4.

Espectroscopia de infravermelho (IV)

A análise de espectroscopia de infravermelho (IV) é constantemente usada na determinação dos grupos funcionais presentes, a partir dos principais constituintes das fibras vegetais, tais como a celulose, lignina, hemicelulose e pectina. Na Figura 52 é possível observar o espectro de infravermelho correspondente à fibra de bucha, onde os picos foram relacionados a grupos rotineiramente presentes em fibras dessa natureza. As regiões dos picos foram condizentes às encontradas na literatura para as fibras de bucha, por autores como, Guimarães *et al.* (2009) e Dai e Fan (2011).

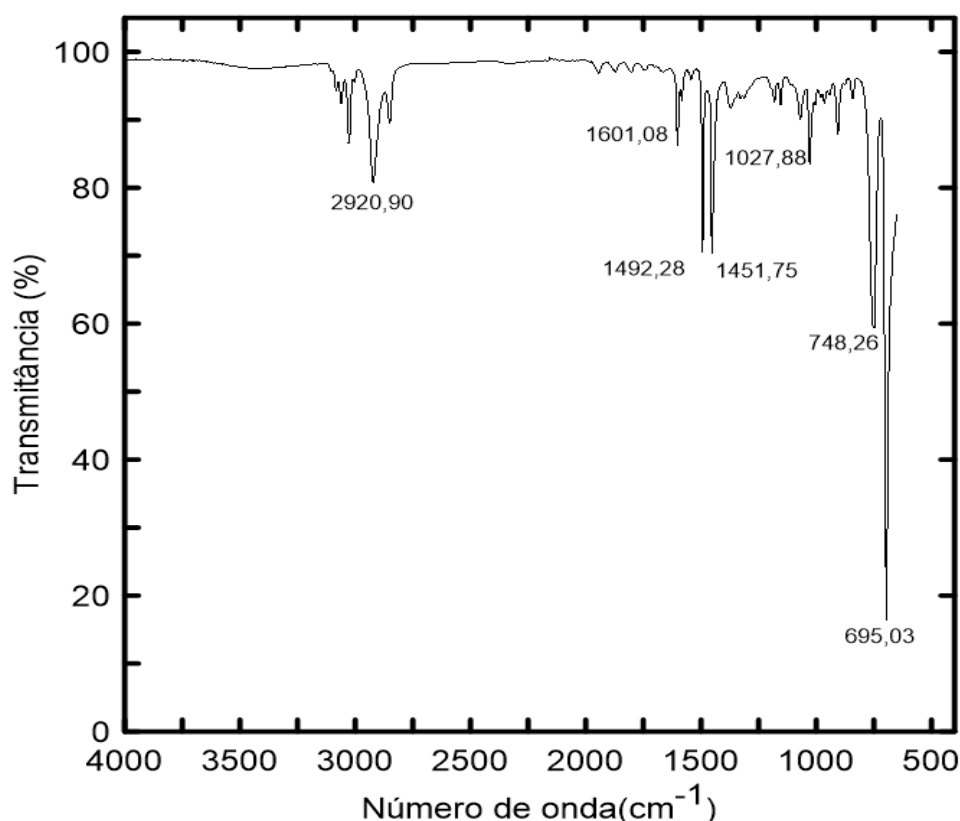


Figura 49. Espectroscopia de Infravermelho da *Luffa cylindrica*.

Na Tabela 12 são apresentadas as principais bandas de absorção características dos espectros de fibras, assim como a espécie química que está associada a cada região. Ainda, em consonância com os autores citados acima, as regiões por volta de 2900 cm^{-1} são características das unidades de metileno (CH_2), associados à celulose e hemicelulose. Já a banda na região de, aproximadamente, 1600 cm^{-1} representa a presença de lignina. Os picos de menor intensidade, como nas regiões de 748 e 695 cm^{-1} caracterizam também a presença de celulose, por meio de grupos de hidroxila.

Tabela 12. Regiões dos picos característicos de cada grupo e espécie presente nas fibras.

Regiões (cm^{-1})	Intensidades (%)	Grupos	Espécie
2920,90	80	CH alifáticos	Celulose e hemicelulose
1601,08	85	C=C aromáticos	Lignina
1451,75	65	CH_2	Celulose
1027,88	80	CO	Celulose e hemicelulose
748,26	55	C-OH	Celulose
695,03	15	C-OH	Celulose

4.1.5.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na análise por MEV ficou constatado que as fibras de bucha formam um emaranhado de filamentos, os quais se ramificam ao longo de toda a estrutura (Figura 53). Esses filamentos apresentam uma seção transversal arredondada (Figura 54), com diâmetro variável, apresentando microcélulas e um lúmen central, como presente em outras fibras lignocelulósicas, de acordo com Biron (2013), e conforme destacado na Figura 55.

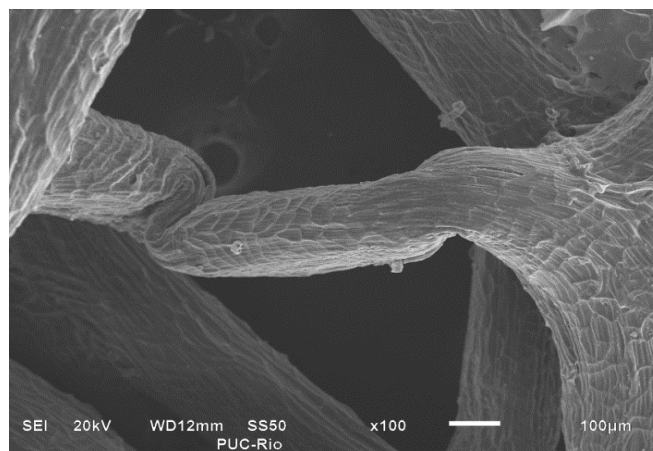


Figura 50. Estrutura externa dos filamentos (100x).

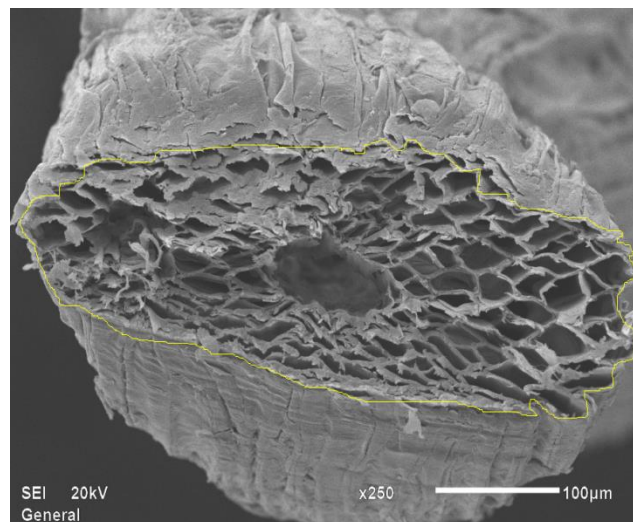


Figura 51. Seção transversal de um filamento (250x).

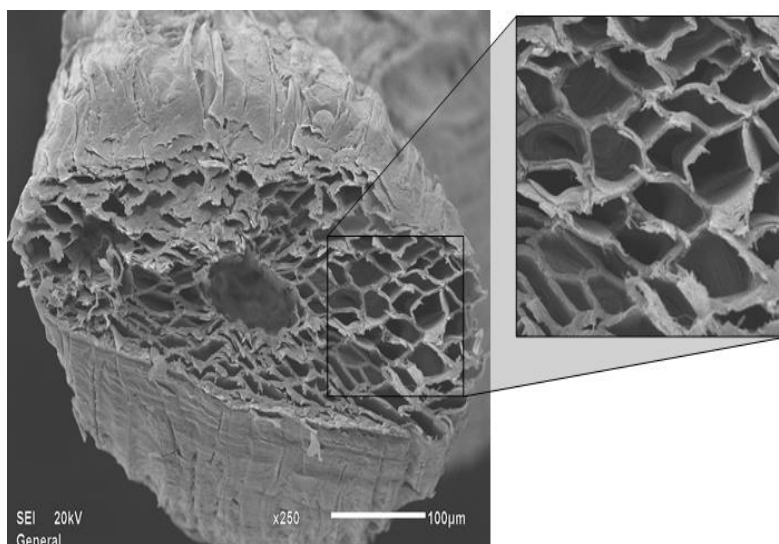


Figura 52. Parede celular do filamento de bucha, com detalhe para o lúmen e a parede celular.

Por meio do processamento digital das imagens das fibras, utilizando o software ImageJ, foi obtido um diâmetro médio de $0,43 \pm 0,19$ mm para os filamentos sem ramificação e $0,52 \pm 0,11$ mm para aqueles que apresentavam algum tipo de nó ao longo de sua estrutura. Esses valores são menores do que os encontrados por Tanobe *et al.* (2005), $0,631 \pm 0,217$ mm, que avaliou apenas fibras sem ramificação. Não há anormalidade na divergência desses valores, já que estão relacionados à inúmeros fatores como, condições do solo usado no plantio, variações do clima da região, entre outros. Os valores médios da seção transversal não apresentaram diferença significativa entre ambos os grupos, sendo de $0,047 \pm 0,017$ mm².

As análises qualitativas dos materiais constituintes da fibra de bucha são apresentadas nas Figuras 56 e 57 e nas Tabelas 13 e 14.

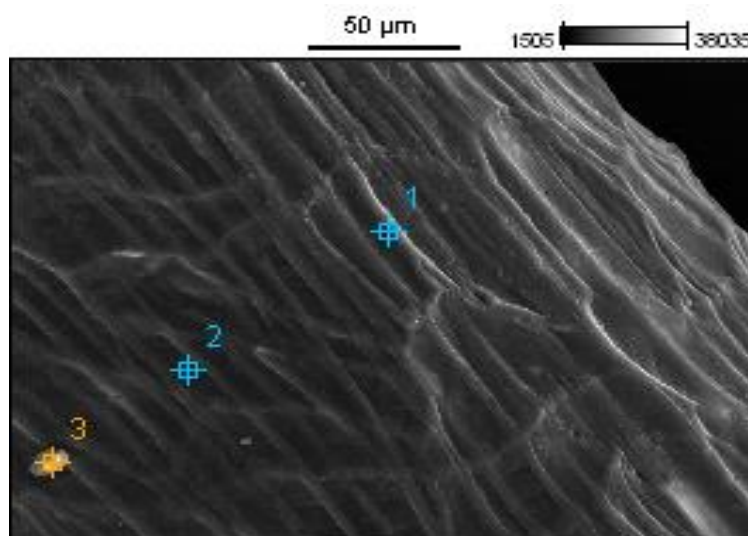


Figura 53. Imagem de MEV da superfície da fibra de bucha.

Tabela 13. Composição em porcentagem (%) de elementos presentes na fibra.

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Cl-K	Ca-K	Au-L
Ponto 1	48,22	32,01			1,06		18,71
Ponto 2	53,41	29,90					16,69
Ponto 3	45,89	26,63	4,53	5,28		5,72	11,59

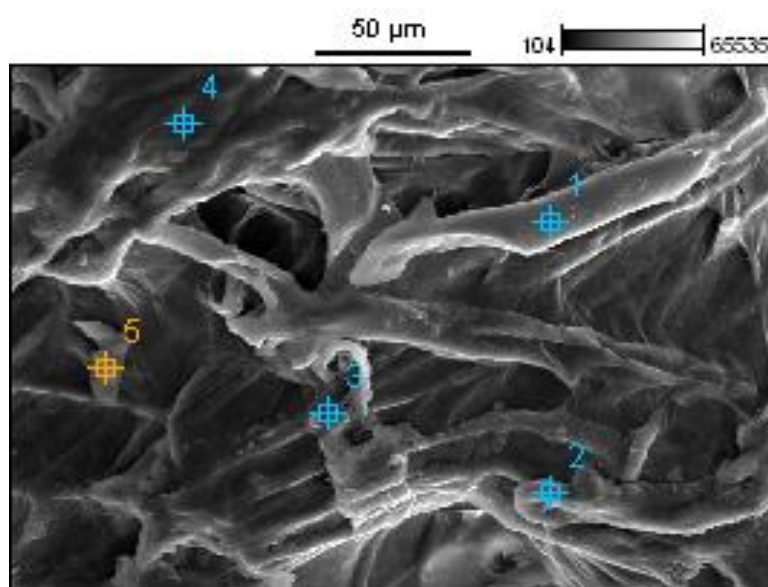


Figura 54. Imagem de MEV da superfície da fibra de bucha.

Tabela 14. Composição em porcentagem (%) de elementos presentes na fibra

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	Cl-K	Ca-K	Au-L
Ponto 1	50,15	32,22					0,25	15,80
Ponto 2	55,53	25,89		0,23		0,59	0,35	16,69
Ponto 3	52,46	20,80	0,34		0,47	0,56	1,93	20,63
Ponto 4	46,27	20,65				1,43	0,53	31,13
Ponto 5	41,87	15,44				2,43	1,00	35,59

Como qualquer matéria orgânica, essas fibras apresentam em sua composição, essencialmente, carbono e oxigênio, com algumas presenças de magnésio, alumínio, cálcio e silício. A grande porcentagem de ouro presente, diz respeito a necessidade da prévia metalização da fibra, para que a mesma apresentasse condutividade elétrica, a qual é necessária para a realização do ensaio.

4.2.

Caracterização da matriz cimentícia

4.2.1.

Ensaio de *Flow Table*

Esse ensaio foi baseado na norma NBR 7215 (ABTN, 1996). Após a retirada do molde, a argamassa se espalhou sobre a mesa alcançando um diâmetro médio de 430 mm (Figura 58), pouco mais do que proposto por autores como Silva *et al.* (2010) e Fidélis *et al.* (2014) que propuseram um espalhamento de 400 mm, como o suficiente para uma boa trabalhabilidade da matriz a ser utilizada em compósitos reforçados por fibras naturais.

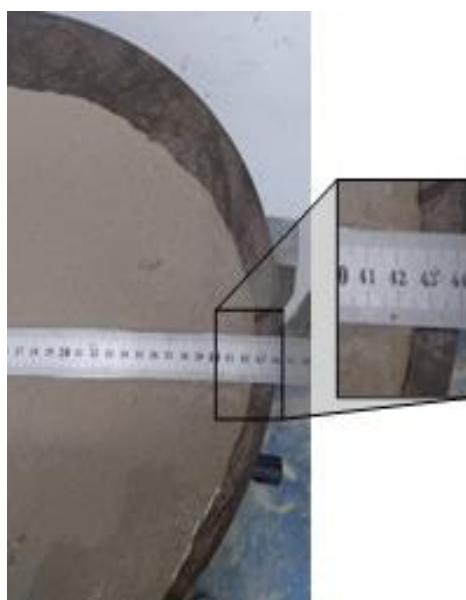


Figura 55. Realização do ensaio de espalhamento da matriz.

4.2.2.

Resistência à compressão

Na Tabela 15 são apresentados os valores de tensão máxima suportada pela matriz antes do rompimento e o módulo de elasticidade da mesma, para cada idade.



Figura 56. Corpo de prova sendo submetido à ensaio de compressão direta.

Tabela 15. Valores de tensão máxima e módulo de elasticidade para cada idade de cura.

Idades (dias)	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade
	máxima (MPa)	(GPa)
7	$52,6 \pm 2,3$	$43,4 \pm 7,2$
14	$58,7 \pm 1,6$	$38,3 \pm 3,7$
28	$62,7 \pm 0,9$	$36,6 \pm 9,7$

A matriz apresentou valores máximos de resistência à compressão, na idade de 28 dias, sendo de 62,7 MPa. Os valores mínimos, como esperado, foram nas idades mais jovens (7 dias), 52,6 MPa em média. Ainda assim, os resultados são bastante satisfatórios, para a fabricação do compósito.

Durante o seu estudo, Lima e Toledo Filho (2008) observaram que a substituição de massa de cimento por metacaulinita em 30% acarreta um aumento de mais de 16% na resistência à compressão, em relação aos corpos de prova sem essa modificação. Os autores encontraram resistências de $57,53 \pm 4,9$ MPa aos 28 dias de idade. Qian e Li (2001) identificaram que, em concretos, a redução ou aumento do valor dessa propriedade, assim como do módulo de elasticidade, está relacionado ao teor de metacaulinita utilizado na dosagem. Sem a substituição de massa de cimento por materiais pozzolânicos, Dawood e Ramli (2011), encontraram valores de 42,7 MPa e 54,3 MPa, em amostras com 7 e 28 dias, respectivamente, e módulo de elasticidade de 33,1 GPa, aos 28 dias.

Como a matriz utilizada continha 40% desse material, é factível a melhora da resistência à compressão, em relação aos valores encontrados pelos autores supracitados.

4.2.3.

Resistência à flexão

À exemplo dos corpos de prova que foram analisados sob o ensaio de compressão, as amostras foram retiradas da cura úmida decorridos 28 dias da moldagem, e encaminhadas ao ensaio de flexão minutos depois. No total, foram ensaiadas três amostras sem adição de fibras, servindo de base para uma posterior comparação da tensão máxima suportada e do módulo de elasticidade, quando houvesse a incorporação das fibras vegetais.

A Tabela 16 traz a média dos valores de tensão máxima suportada antes da primeira fissura, do módulo de elasticidade e a deformação máxima observada nos corpos de prova testados.

Tabela 16. Valores de tensão máxima, módulo de elasticidade e deformação máxima da matriz cimentícia.

Corpo de prova	Resistência à flexão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (mm/mm)	Tenacidade máxima (kJ)
Matriz	12,53 ± 3,89	1,6 ± 0,2	0,002 ± 9,4 x 10 ⁻⁵	0,16

Li *et al.* (2004) e Sedan *et al.* (2008) analisaram as suas pastas de cimento e encontraram valores de tensão máxima de 4,9MPa aos 28 dias de idade. Dawood e Ramli (2011) fizeram ensaios decorridos 28 e 90 dias, após a moldagem, e encontram valores médios de 7,60 MPa e 9,12 MPa, respectivamente. Cabe ressaltar que nenhum dos autores citados, fez a substituição de massa de cimento, por materiais pozolânicos.

4.2.4.

Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 60 traz a análise termogravimétrica realizada na matriz cimentícia aos 28 dias de idade. Os picos são condizentes aos analisados por Dweck *et. al* (2000) e Neves Jr. *et al.* (2009), que observaram que, entre 50 e 200 °C, há perda de umidade, por desidratação da tobermorita e da etringita. Entre 380 (M_s^{t0}) e 460 °C (M_s^{tf}) ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio. No intervalo de 520 a 730 °C ocorre a decomposição do carbonato de cálcio.

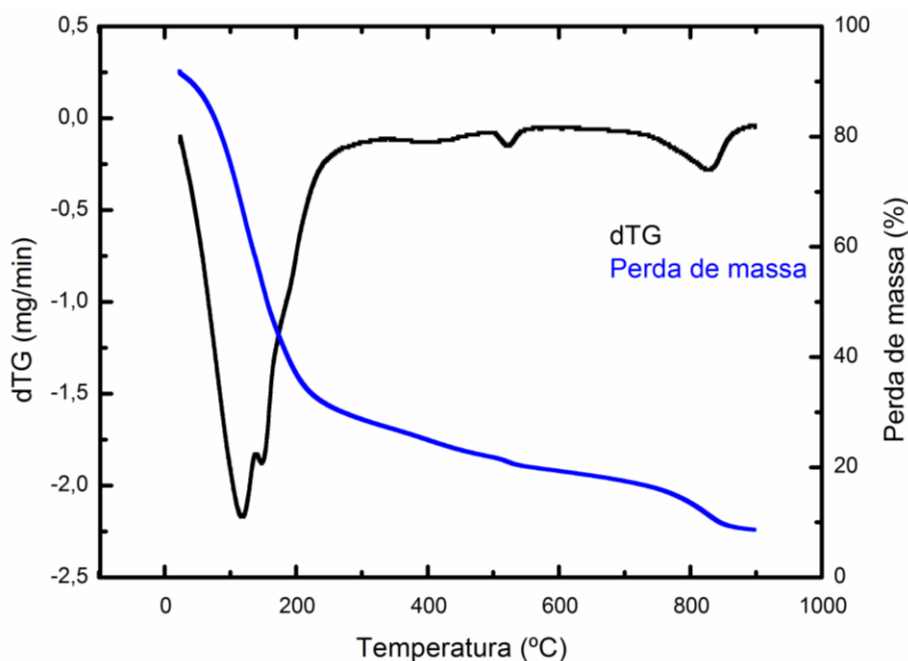


Figura 57. Curvas de DTG e perda de massa da matriz cimentícia aos 28 dias.

Os valores de M_s^{t0} e de M_s^{tf} encontrados na análise termogravimétrica são usados na equação 7 para a quantificação do hidróxido de cálcio presente na matriz avaliada, juntamente com o valor da massa inicial da amostra, que foi de 34 mg (M_c). Com isso, foi encontrado um valor de apenas 1,13% de HC na matriz utilizada, sendo possível a incorporação de fibras naturais na mesma, sem que estas sofram forte degradação.

4.3.

Caracterização do compósito cimentício

Decorridos 28 dias da moldagem, os compósitos foram encaminhados para o ensaio de flexão de três pontos. O referido ensaio avaliou a carga máxima que

os corpos de prova são capazes de suportar e permitiu traçar uma comparação entre a eficácia do reforço de *Luffa cylindrica* e de *Agave sisalana* em relação aos valores obtidos através do mesmo ensaio, para os corpos de prova sem reforço (apenas matriz), avaliados no Item 4.2.3.

4.3.1.

Resistência à flexão

Para este ensaio também foram analisados 3 corpos de prova reforçados com fibras de bucha vegetal e outras 3 unidades de compósito sanduíche, que tinham a incorporação além das fibras de bucha, principal fonte de estudo de presente trabalho, também de fibras de sisal.

A Figura 61 traz ilustrativamente como se deu o rompimento das amostras. É perceptível que a adição de fibras melhora a resistência dos compósitos após as primeiras microfissuras da matriz cimentícia, comportamento chamado de *strain hardening*, diferentemente do observado no corpo de prova sem adição de fibras, moldado somente com a matriz, onde a resistência à flexão apresentou o pior resultado.

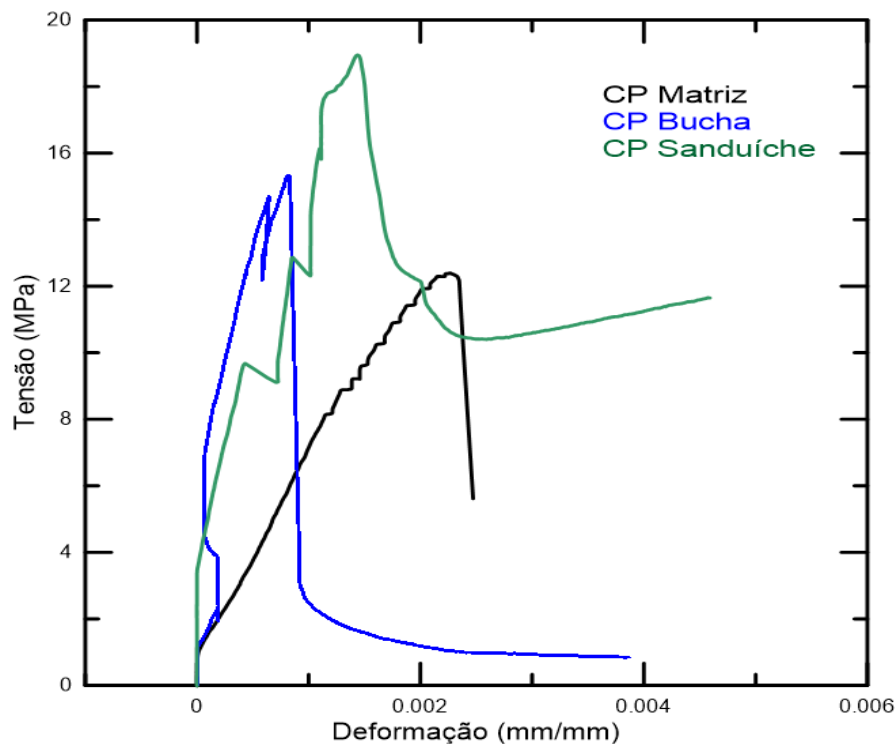


Figura 58. Curvas tensão x deslocamento dos diferentes tipos de materiais analisados.

A Tabela 17 apresenta os valores para os parâmetros analisados a partir do ensaio de flexão, sendo relevante a melhora dos compósitos reforçados por fibras de bucha e os compósitos sanduíches, em relação à matriz sem reforço.

Houve aumento da tensão máxima suportada de 33%, para ambos os compósitos cimentícios com reforço das fibras naturais. Além disso, observa-se maior capacidade de deformação dos compósito reforçado por fibra de bucha, apresentando 100 % de incremento em relação aos outros dois grupos analisados. Em relação ao módulo de elasticidade, o reforço de *Luffa cylindrica* também apresentou o maior valor (4,2 GPa). Em relação à tenacidade, observou-se um aumento de 50%, do compósito reforçado somente por bucha, e de mais de 80% no caso do compósito sanduíche, em comparação à matriz sem reforço. Isso quer dizer que a energia acumulada antes da primeira fissura, aumentou substancialmente nos compósitos com reforço fibroso.

Tabela 17. Valores de tensão, módulo de elasticidade e deformação das amostras.

Corpo de prova	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (mm/mm)	Tenacidade máxima (kJ)
Matriz	12,53 ± 3,89	1,6 ± 0,2	0,002 ± 9,4 x 10 ⁻⁵	0,16
Compósito com bucha	15 ± 1,50	4,2 ± 0,5	0,004 ± 0,004	0,24
Compósito sanduíche	14,82 ± 2,10	2,11 ± 0,6	0,002 ± 0,0008	0,29

Os compósitos cimentícios reforçados por fibras alinhadas de cânhamo, estudados por Sedan *et al.* (2008), geraram os melhores resultados de tensão máxima, quando o volume de fibras, em relação ao volume total do compósito, incorporado à matriz atingiu 16% (6,8 MPa). Já as fibras da casca da banana, analisadas por Zhu e Tobias (1994), alcançaram o valor máximo de 25 MPa quando incorporado um volume de 12% em matriz cimentícia. Silva *et al.* (2009) estudaram compósitos cimentícios reforçados por fibra de sisal, e encontraram valores médios de 25,07 MPa e 0,48 kJ para a tensão máxima suportada e a tenacidade na primeira fratura, respectivamente.

Conclusão

A matriz cimentícia utilizada no presente estudo, com substituição parcial do cimento por metaculinita e cinza volante apresentou boas propriedades em seu estado endurecido, analisado pelos ensaios de compressão e flexão, e no estado fresco, avaliado através do *Flow Table*, com um espalhamento médio de 430 mm, apresentando uma boa fluidez para que pudesse penetrar em toda a extensão da malha de bucha. Além disso, através da termogravimetria foi corroborado que a substituição de cimento por materiais pozolânicos, diminui a presença de hidróxido de cálcio, principal causador de degradação das fibras vegetais e oriundo da hidratação do cimento Portland.

As fibras de *Luffa cylindrica* escolhidas, pelo seu ineditismo em pesquisas como reforço em compósitos da matriz cimentícia, apresentaram valores medianos de resistência à tração em relação à outras fibras naturais já analisadas. Talvez a principal característica dessa fibra seja a grande aleatoriedade dos seus filamentos, confirmado através da análise digital, o que pode, inevitavelmente, influenciar nos resultados mecânicos do compósito final, mas que pode apresentar boas respostas em condições de carregamento baixo. Os filamentos sem ramificação apresentaram um diâmetro médio de 0,43 mm, e o grupo com ramificação, diâmetro de 0,52 mm. A seção transversal média não apresentou distinção de valores entre os dois grupos, sendo de 0,047 mm². O MEV mostrou que os elementos químicos mais presentes da fibra analisada são, oxigênio e carbono, por se tratar de uma matéria orgânica. A espectroscopia de IV determinou a presença dos principais constituintes das fibras naturais, celulose, hemicelulose e lignina, atreladas aos grupos funcionais presentes. Por fim, a partir da difração de raio-x foi possível determinar o índice de cristalinidade da *Luffa*.

Os compósitos cimentícios foram divididos em dois grupos, o principal, reforçado por fibras de bucha, e outro para enriquecimento da discussão, formado por fibras de bucha juntamente com de sisal, dando origem a um compósito do tipo sanduíche. Analisadas a partir de ensaio de flexão de três pontos, foi notória a melhora dos compósitos reforçados por fibras em relação à matriz cimentícia sem reforço, embora não suficientemente elevada, para serem empregados em

aplicações estruturais. Em particular, as fibras de esponja vegetal, conferiram ao compósito uma maior capacidade de deformação máxima e maior módulo de elasticidade, além de uma maior tenacidade à primeira fratura.

Sugestões para trabalhos futuros

A possibilidade de continuidade de estudos em que a fibra de bucha vegetal, seja utilizada como reforço de matriz cimentícia existe. Entretanto, não necessariamente como reforço mecânico, já que existem opções na indústria com melhores resultados do que os apresentados pela fibra estudada. Reforço térmico e acústico seriam possibilidades plausíveis de se pesquisar.

Outra possibilidade é avaliar o quão satisfatória e resistente é a interface da fibra de *Luffa cylindrica* quando incorporada ao cimento, por meio de ensaios de arrancamento, por exemplo, e buscar tratamentos que melhorem essa aderência, reconhecidamente baixa quando há superfície de contato em cimento x fibras naturais.

Além disso, há margem para serem realizados outros ensaios mecânicos que enriqueçam a discussão, para se avaliar se a fibra de bucha vegetal mostra viabilidade técnica ou não, para serem utilizadas como reforço estrutural em compósitos cimentícios.

Referências bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12653/92. **Materiais pozolânicos** – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 14656. **Cimento Portland e matérias-primas** - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8491. **Tijolo de solo-cimento** - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ABREA - Associação Brasileira dos Expostos ao Amianto. 2016. <http://www.abrea.com.br/02amianto.htm>. Acessado em julho de 2016.

_____. Disponível em: <http://www.abrea.org.br/19_2leis.htm>. Acesso em: abril de 2017.

ACI 544.5R-10 – American Concrete Institute. **Report on the physical properties and durability of fiber-reinforced concrete**. United States of America, 2010.

ADEWUYI, A., PEREIRA, F. V. **Isolation and surface modification of cellulose from underutilized Luffa cylindrica sponge: A potential feed stock for local polymer industry in Africa**. J. Assoc. Arab Univ. Basic Appl. Sci., vol. In Press., 2017.

AHMED, S. F. U, MAALEJ, M., PARAMASIVAM, P. **Analytical model for tensile strain hardening and multiple cracking behaviour of hybrid fibre engineered cementitious composites**. Materials in Civil Engineering, 2007; 19(7):527–39.

AHMED, S. F. U, MAALEJ, M., PARAMASIVAM, P. **Flexural responses of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cement composites containing high volume fly ash**. Construction and Building Materials, 2007; 21(5):1088–97

AHMED, S. F. U, MAALEJ, M., PARAMASIVAM, P. **Strain-hardening behavior of hybrid fibre reinforced cement composites**. Journal Ferrocement, 2003; 33 (3):172–82.

AİTCIN, P. C.; NEVILLE, A. **How the water-cement ratio affects concrete strength**. Concrete International, v. 25, pp. 51-58, 2003.

ASHBY, M. M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**, 4^o ed. Elsevier, 2011.

ASTM C 150-07. **Standard Specification for Portland Cement**. United States, 1991.

ASTM International Standards. C125 – 03: **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. United States, 2003.

AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A.; **Single and multiple fracture, in the properties of fiber composites**. Conf. Proc., IPC Science and Techonology Press, 15 – 24, 1971.

AZEREDO, A. P. D. **Estudo e avaliação de diferentes nucleantes na morfologia e propriedades de polipropileno**. 2010. 127 (Dissertação de Mestrado). Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

BAL, K. E.; BAL, Y.; LALLAM A. **Gross morphology and absorption capacity of cell fibers from the fibrous vascular system of Loofah (*Luffa cylindrica*)**. Textile, 2004.

BEIGI, M.H., BERENJIAN, J., OMRAN, O.L., NIK, A.S., NIKBIN, I.M. **An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete**. Materials & Desing. v.50, 1019 – 1029, 2013.

BENTUR, A. & MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2nd Ed., New York, NY, USA: Taylor & Francis, 2007.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. CRC Press, 2007.

BERGSTRÖM, S. G.; GRAM, H.-E. **Durability of alkali-sensitive fibres in concrete**. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 6, n. 2, p. 75-80, 1984. ISSN 0262-5075

BERTOLINO, L. C. et al. **Caracterização mineralógica e beneficiamento do caulim de prado (ba)**. HOLOS, v. 5, n. 28, p. 83-92, 2012.

BIRON, M. **Thermosets and composites: material selection, applications, manufacturing and cost analysis**. Elsevier Ltd, 2013.

BISOGNIN, D. A. **Origin and evolution of cultivated cucurbits**. Ciência Rural, Santa Maria, v.32, n.5, p.715-723, 2002.

BISSCHOP, J. **Evolution of solid behavior**. Report of Rilem Technical Committee. TC 181 – **EAS early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems**, vol. 25, 2003.

BLEDZKI, A. K., e GASSAN, J. “**Composites reinforced with cellulose based fibres**,” Prog. Polym. Sci, 1999.

BOSHOF, W. P.; MECHTCHERINE, V.; VAN ZIJL, G. P. A. G. **Characterizing the time-dependant behavior on the single fibre level of SHCC: Part 2: The rate effects on fibre pull-out tests**. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 9, p. 787-797, 9// 2009. ISSN 0008-8846.

BOYNARD, C. A.; MONTEIRO, S. N.; d’ALMEIDA, J. R. M. **Aspects of álcali treatment of spong gourd (*Luffa Cylindrica*) fibers on the flexurak properties of polyester matrix composites**. Journal of Applied Polymer Science, Nova Iorque, v.87, p. 1927-1932, 2003.

BRANDT, A.M. **Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering**. Composite Structure. v.86, pp. 3-9, 2008.

BROSTOW, W., CHETUYA, N., HNATCHUK, N., UYGUNOGLU, T. **Reinforcing concrete: comparison of filler effects**. Journal of Cleaner Production. v.112, pp. 2243 – 2248, 2016.

BUTT H. J.; GRAF K.; KAPPL M. **Physics and Chemistry of Interfaces**, Ed: Wiley-VCH, 2006.

CAETANO, L. F.; GRAEFF, A. G.; GARCEZ, E. O.; BERNARDINI, S. T.; SILVA FILHO, L. C. P. **Compósito da matriz cimentícia reforçada com fibras**. Seminário de Patologia das Edificações. Porto Alegre – RS, 2004.

CAGNON, H.; VIDAL, T.; SELLIER, A.; SOULA, C.; BOURBON, X.; CAMPS, G. **Effects of water and temperature variations on deformation of limestone aggregates, cement paste, mortar and High Performance Concrete (HPC)**. Cement and Concrete Composites, v. 71, pp. 131-143, 2016.

CANOVAS, M. F.; SELVA, N. H.; KAVICHE, G. M.; **New economical solutions for improvement of durability of Portland cement mortar reinforced with sisal fibres**. Materials and Structures, v. 25, p. 417-422, 1992.

CHAWLA K. K. **Composite Materials: Science and Engineering**, 2ed, Ed: Spring-Verlag, New York, 1998.

COUTTS, R. S. P; WARDEN, P. G. **Effect of compaction on the properties of air-cured wood fibre reinforced cement**. Cement and Concrete Composite, v.12, p. 151-6, 1990.

D'SOUZA CEZAR, D. **Características de durabilidade de Concretos com cinza volante e cinza de Casca de arroz com e sem beneficiamento**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria centro de tecnologia. 2011.

D' SOUZA, D. **Características de durabilidade de Concretos com cinza volante e cinza de Casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, RS.

DAI, D., FAN, M. **Investigation of the dislocation of natural fibres by Fourier-transform infrared spectroscopy**. Vibrational Spectroscopy, v. 55, pp. 300-306, 2011.

d'ALMEIDA, A. L. F. S., d'ALMEIDA, J.R.M. **Evaluation of the tensile and flexural mechanical behavior of hybrid glass fiber – Jute fiber fabric**

reinforced composites. ISNaPol: 7th Internacional Symposium on Natural Polymers and Composites, 2010.

d'ALMEIDA, A. L. F. S.; CALADO, V.; BARRETO, D. W. & d'ALMEIDA, J.R.M. **Acetilação da fibra de bucha (*Luffa cylindrica*).** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 15, nº 1, p. 59-62. Rio de Janeiro, 2005.

d'ALMEIDA, J. R. M.; AQUINO, R. C. M. P.; MONTEIRO, S. N. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 9, p. 1473-1479, 9, 2006.

DAVIDOVITS, J. **High-alkali cements for 21st century concretes.** In: Kumar Metha P., editor. *Concrete Technology: Past, Present, and Future: Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium*, pp. 383–397, 1994.

DAVIS, J. M., e ZERONIAN, S. H. **“New Crops”.** John Wiley and Sons, New York, 560-561. 1993.

DAWOOD, E. T., RAMLI, M. **Properties of high strength flowable mortar reinforced with different fibers.** Concrete Res., pp. 315-325, 2011.

DEFOIRDT, N. et al. Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 41, n. 5, p. 588-595, 5, 2010.

DEFOIRDT, N., BISWAS, S., DE VRIESE, L., TRAN, L. Q. N, ACKER, J. V, AHSAN, Q., GORBATIKH, L., VUURE, A. V., VERPOEST, I. **Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 41, n. 5, p. 588-595, 5// 2010.

DESCHNER, F., WINNEFEL, F., LOTHENBACH, B., SEUFERT, S., SCHWESIG, P., DITTRICH, S., GOETZ-NEUNHOEFFER, F., E NEUBAUER, J. **Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash.** Cement and Concrete Research, v. 42, n. 10, p. 1389-1400, 10// 2012.

DWECK, J., BUCHLER, P. M., COELHO, A. C. V., CARTLEDGE, F. K. **Hydration of Portlanc Cement blended with calcium carbonate.** *Thermochimica Acta*, v. 346, p. 105-113, 2000.

EDVARDESEN C. **Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete.** *ACI Materials*, pp. 448–54, 1999;

ELSAID, A. et al. **Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete.** *Construction and Building Materials*, 25(4), pp.1991–2001, 2011.

EN – European Standard. **Cement – part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.** Bruxelas, 2000.

FARUK., O., BLEDZKI, A. K., FINK., H.-P., SAIN, M. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010.** *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no 11, p. 1552–1596, 2012.

FIDELIS, M. E. A.; **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta.** Tese de Doutorado. Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

FIDELIS, M. E. A.; SILVA, F. A; TOLEDO, R. D. **The Influence of Fiber Treatment on the Mechanical Behavior of Jute Textile Reinforced Concrete.** *Key Engineering Materials* v. 600, n. 469-474, 2014.

FOÀ, V. & BASILICO, S., 1999. **Caratteristiche chimico-fisiche e tossicologica delle fibre minerali artificiali.** *Medicina del Lavoro*, 90:10-52.

GARVEY, C. J., PARKER, I. H., SIMON, G. P. **On the interpretation of X-ray diffraction powder patterns in terms of the nanostructure of cellulose I fibres.** *Macromol. Chem. Phys.*, vol. 206, no 15, p. 1568–1575, 2005.

GHALI, L., MSAHLI, S., ZIDI, M., SAKLI, F. **Effect of pre-treatment of Luffa fibres on the structural properties.** *Mater. Lett.*, vol. 63, no 1, p. 61–63, jan. 2009.

GHAVAMI K. **Bamboo as reinforcement in structure concrete elements.** *Cement and Concrete Composites*, v.27; pp. 637–49, 2005.

GIBBS, G. W., 1994. **Synthetic fibres and health**: An overview. *Jornal de Pneumologia*, 20(Sup. 4):219-229.

GRAM, H. E. **Durability of natural fibres in concrete**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 225, 1983.

GUIMARÃES, J. L., FROLLINI, E., da SILVA, C. G., WYPYCH, F., SATYANARAYANA, E. K. G. **Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil**. *Ind. Crops Prod.*, vol. 30, no 3, p. 407–415, 2009.

GUO, C., ZHOU, L., JIANXIONG, L. **Effects of expandable graphite and modified ammonium polyphosphate on the flame-retardant and mechanical properties of wood flour-polypropylene composites**. *Polym. Polym. Compos.*, vol. 21, no 7, p. 449–456, 2013.

HEISER, C.B., SCHILLING, E.E. **The genus Luffa**: A problem in phytogeography. In: BATES, D.M., ROBINSON, R.W., JEFFREY, C. **Biology and utilization of the Cucurbitaceae**. Ithaca and London: Cornell University, 1990. 120-133. 485p.

HOTA, G.; LIANG, R. **Advanced fiber reinforced polymer composites for sustainable civil infrastructures**. International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering Xiamen University, 2011, China. p.11.

HUANG, X., NI, W., CUI, W., WANG, Z., ZHU, LI. **Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag**. *Construction and Building Materials*, v. 27, pp. 1-5, 2012.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials**. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale), 1998. **Effets sur la Santé de Fibres de Substitution à l'Amiante**. Paris: INSERM.

JETAVAT, D.; SHARMA, S.; & POTLURI, P.. **3D Weaving of Near Net Preforms**. ECCM 15 - 15Th European Conference on Composite Materials, pp.24–28, 2012.

JOHN, M. J. & THOMAS, S. **Biofibres and biocomposites**. Carbohydrate Polymers, 71, pp. 343-364, 2008.

JOHN, V. M. *et al.* **Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre**. Cement and Concrete Composites, v. 27, p. 565-574, 2005.

K. GODA., Y. CAO, “**Research and Development of Fully Green Composites Reinforced with Natural Fibers**”, J. Solid Mech. Mater. Eng., vol. 1, no 9, p. 1073–

KANDA, T., LI, V. C. **New micromechanics design theory for pseudo strain hardening cementitious composites**. Journal of Engineering Mechanics. 125(4):373–81, 1999.

_____. **Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behaviour in ECC**. 2006; 4(1):59–72, 2005.

KANDA, T., LIN, Z., LI, V. C. **Tensile stress-strain modeling of pseudo strain-hardening cementitious composite**. Materials in Civil Engineering. 12(2):147-56, 2000.

KASAI, Y., YOKOYAMA, K., MATSUI, I. **Tensile properties of early age concrete**. in: Proceedings of the 1971 International Conference on Mechanical Behaviour of Materials, vol. IV, 1971.

KAWAMATA, A., MIHASHI, H., FUKUYAMA, H. **Material design of hybrid fibre reinforced cementitious composites**. Advanced Concrete Technologies, 2002; 1(3):283–90.

KOZŁOWSKI, R. M. **Handbook of natural fibres**. 2012.

KRAUB, M., HARIRI, K., Cement and Concrete Composites, v. 28, pp. 299–396, 2006.

KWAN, W.H., RAMLI, M. & CHEAH, C.B. **Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment.** Construction and Building Materials, 63, pp.62–71, 2014.

LE GUEN, M.-J., NEWMAN, R. H., FERNYHOUGH, A., HILL, S. J., STAIGER, M. P. **Correlations Between the Physiochemical Characteristics of Plant Fibres and Their Mechanical Properties.** in Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications, Springer, 2015.

LEA's. **Chemistry Cement Concrete.** Edited by: Peter C. Hewlett. Fourth Edition, 1988.

LEE, S.; YOO, J. G.; **Method for preparing transformed *Luffa Cylindrica* Roem.** World Intellectual Property Organization, 2006.

LEEMANN, A.; NYGAARD, P.; KAUFMANN, J.; LOSER, R. **Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 62, pp. 33-43, 2015.

LEVY, N. F.; PARDINE, L. C. **Compósitos estruturais:** Ciências e Tecnologia. São Paulo, Edgard Blucher, 2006.

LI, V. C, WANG S., WU, C. **Tensile strain hardening behaviour of polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC).** 2001; 98(6):483–92.

LI, V. C, WU, H. C, MAALEJ, M., MISHRA, D. K, HASHIDA, T. **Tensile behaviour of engineered cementitious composites with discontinuous random steel fibres.** J American Ceramic Society, 1996; 79 (1):74–8.

LI, V. C. **On Engineered cementitious composites:** a review of the material and its applications. Journal Advanced Concrete Technologies, 2003; 1(3):215–30.

LI, V. C.; WU, H. C.; **Pseudo strain-hardening design in cementitious composites.** Proc. of International workshop on high performance fiber reinforced cement composites. Chapman and Hall, 371 – 387, 1992.

LI, H., XIAO, H. G., YUAN, J., OU, J. **Microstructure of cement mortar with nno-particles.** Composites Part B: Engineering, 185-189, v. 35, 2004.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; LIMA, J. M. F. **Mecanismo de fissuração sob tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal**. *Engevista*, v. 15, n. 1, p. 95-103, 2012. ISSN 2317-6717.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. **Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal**. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 4, p. 7-19, 2008.

MALHOTRA, V. M.; **Making concrete “greener” with fly ash**. *ACI - American Concrete Institute*, v.21, pp. 61-66, 1999.

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D. **Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, p. 92-99, 2008.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. **Caracterização Química e Estrutural de fibra de sisal da variedade *agave sisalana***. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MCCAFFREY, R. **Climate change and the cement industry**. *Global Cement and Lime Magazine*. pp. 15–19, 2002.

MEDINA, J. C. **Plantas Fibrosas da Flora Mundial**, Instituto Agrônomo de Campinas, p. 787-792, 1959.

MEDINA, N., BARLUENGA, G., OLIVARES, F.. **Enhancement of durability of concrete composites containing natural pozzolans blended cement through the use of Polypropylene fibers**. *Composites Part B: Engineering*. v. 61, 214 – 221, 2014.

MEHTA, P.K. **Natural Pozzolan**. In: *Supplementary Cementing Materials*. Ottawa: V. M. Malhotra. 427p. 1987.

MOHAMMADHOSSEINI, H.; YATIM, J. M.; SAM, A. R. M; AWAL, A. S. M. A.; **Durability performance of green concrete composites containing wast carpet fibers and palm oil fuel ash**. *Journal of cleaner production*, pp. 448 – 458, 2017.

MONTEIRO, S. N.; CALADO, V.; RODRIGUEZ, R. J.; MARGEM, F. M. **Termogravimetric behavior of natural fibers reinforced polymer composites.** Materials Science & Engineering A. v. 557, p. 17-28, 2012.

MONTEIRO, S. N.; D'ALMEIDA, J. R. M. **Ensaio de Pullout em fibras lignocelulósicas-uma metodologia de análise.** Revista Matéria, v. 11, n. 3, p. 189-196, 2006.

MONTEIRO, S. N.; PERISSÉ, F. D. L.; COSTA, L. L.; BEVITORI, A. B.; SILVA, I. A. S.; BARBOSA, A. P. **Natural lignocellulosic fibers as engineering materials.** Metals and Materials Society and ASM International, v. 42, 2011.

MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. **Structure and properties of some vegetable fibres.** Journal of Materials Science, v. 19, n. 12, p. 3925-3934, 1984/12/01 1984.

NAAMAN, A. E. **Engineered steel fibres with optimal properties for reinforcement of cement composites.** Journal Advanced Concrete Technologies, 2003; 1(3):241–52.

NAAMAN, A.; NAJM, H. **Bond-Slip Mechanisms of Steel Fibers in Concrete.** Materials Journal, v. 88, n. 2, p. 135-145, 1991.

NAGARAJAGANESH, B., MURALIKANNAN, R. **Extraction and characterization of lignocellulosic fibers from Luffa cylindrica fruit.** Int. J. Polym. Anal. Charact., vol. 5341, p. 1–8, 2016.

NAZIRE, D., NANCY, P. **Green Biorenewable Composites: From Knowledge to Growth,** V. K. Thakur e K. Michael, Orgs. Apple Academic Press, p. 161–199, 2015.

NEVES JR. A., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R., DWECK, J. **Early stages hydration of high initial strength Portland cement, Part I. thermogravimetric analysis on calcined mass basis.** Journal Therm. Anal. Calorim, v. 108, p. 725-731, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Techonology.** Livro. 2 ed, Pearson Education Limited, 2013.

- OLIVEIRA, A. K. F, d'ALMEIDA, J. R. M. **Characterization of Ubuçu (*Manicaria saccifera*) Natural Fiber Mat**. Polymers from Renewable Resources, v. 5, nº1, 2014.
- OTSUKA, K., MIHASHI, H., MORI, S., KAWAMATA, A. **Observation of multiple cracking in hybrid FRCC at micro and meso levels**. Advanced Concrete Technologies, 2003; 1(3):291–8.
- PALANKAR, N., SHANKAR, A.R., MITHUN, B.M. **Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates**. Journal of Cleaner Production. v.129, pp. 437 – 448, 2016.
- PEREIRA, C. L. **Aproveitamento do resíduo do coco verde para produção de compósitos destinados à construção rural**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia – USP, 2012.
- QIAN, X., LI, Z. **The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin**. Cement and concrete research, v. 31, p. 1607-1611, 2011.
- DAWOOD, E. T., RAMLI, M. **High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres**. Construction and Building Materials, v. 25, p. 2240-2247, 2011.
- RONGXI, S. **Trends of world fibre-cement industry and its impact on China fibre-cement industry**. In: National Fibre-Cement Technology, Standards and Information Conference, 4., Beijing, 1995.
- SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. **Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review**. Cement and Concrete Composites, v. 23, p. 441-454, 2001.
- SATYANARAYANA, K. G., GUILMARAES, J. L., e WYPYCH, F. **“Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications”** Composites: Part A. 2007.
- SAVASTANO JR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. **Performance of low cost vegetable fibre-cement composites under weathering**. 2001, 2001. p.1-11.

SAVASTANO JR. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: Reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** Tese de livre-docência do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2000.

SAVASTANO Jr., H.; SANTOS, S.F.; RADONJIC, M.; SOBOYEJO, W.O. **Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites.** Rural Construction Group, Faculty of Animal Science and Food Engineering, University of São Paulo.

SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. **Transition zone studies of vegetable fibre/cement paste composites.** Cement and Concrete Composite, v. 21, p. 49-57, 1999.

SEDAN, D.; PAGNOUX, C.; SMITH, A.; CHOTARD, T. **Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction.** Journal of the European Ceramic Society, v. 28, p. 183-192, 2008.

SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 128. 2002.

SILVA, F. A., MOBASHER, B., SONARAKOM, C., TOLEDO FILHO, R. D. **Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites.** Cement and Concrete Composites, v. 33, n. 8, p. 814-823, 9// 2011.

SILVA, F. D. A.; CHAWLA, N.; FILHO, R. D. D. T. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 15–16, p. 3438-3443, 12, 2008.

_____. An experimental investigation of the fatigue behavior of sisal fibers. **Materials Science and Engineering**, v. 516, p. 90-95, 2009.

SILVA, F. D. A., MOBASHER, B., TOLEDO FILHO, R. D. **Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites.** Cement and Concrete Composites, 2009.

SILVA, F. D. A., TOLEDO FILHO, R. D., MELO FILHO, J. A., FAIRNAIRN, E. M. R.. **Mechanical behavior and durability of compression moulded sisal fiber cement mortar laminates (SFCML)**. RILEM Publications SARL, 2006. p.171-180, 2006.

_____. **Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 5, p. 777-785, 5// 2010.

SILVA, I. I. S. A.; LAGO, L. B.; SOARES, J. P.; SOUZA, P. S. L. **Avaliação do uso de fibra de coco em compósitos cimentícios**. In: Congresso brasileiro do concreto, 50, 2008, Salvador. IBRACON, 2008. 17p.

SIQUEIRA, G., BRAS, J. e DUFRESNE, A. “*Luffa Cylindrica* as a lignocellulosic source of fiber, microfibrillated cellulose, and cellulose nanocrystals”. Bioresources, 2010.

STAQUET, S., BOULAY, C., ROBEYST, N., DE BELIE, N. **Ultrasonic monitoring of setting and autogenous shrinkage developement of high performance concrete**, in: Proceedings of the 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, Concreep 8, Ise-Shima, Japan, 2008.

STEFAN, L.; BENBOUDJEMA, F.; TORRENTI, J. M.; BISSONNETTE, B. **Prediction of elastic properties of cement pastes at early ages**. Computational Materials Science, v. 47, pp. 775-784, 2010.

SUN, W., CHEN, H., LUO, X., QIAN, H. **The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete**. Cement and Concrete Resources. v.31 (4), pp. 595 - 601, 2001.

SWAMY, R.N. **Vegetable Fibre cement composites** – A false dream or a potential reality? In: Internacional Symposium on Vegetables Plants and their Fibres as Building Materials. 2., Salvador, 1990. Proceedings. London, Chapman and Hall, 1990. P. 3-8. (Rilem Proceedings, 7)

SYDENDTRICKER, T. H. D., MOCHNACZ, S., e AMICO, S. C. **“Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites”** Polym. Test., 2003.

TANOBE, V. O. A.; SYDENSTRICKER, T. H. D. ; MUNARO, M.; AMICO, S. C. **A comprehensive characterization of chemically treated Brazilian sponge-gourds (*Luffa cylindrica*)**, Polym. Test., vol. 24, no 4, p. 474–482, 2005.

TANOBE, V. O. A., FLORES-SAHAGUN, T. H. S., AMICO, S. C., MUNIZ, G. I. B., SATYANARAYANA, K. G. **Sponge Gourd (*Luffa cylindrica*) reinforced polyester composites: Preparation and properties**. Defence Science Journal, v. 64, pp. 273-280, 2014.

TEO, D. C. L.; MANNAN, M. A.; KURIAN, V. J.; GANAPATHY, C. **Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties**. Building and Environment, v. 42, pp. 2614-2621, 2007.

TOLEDO FILHO, R. D. *et al.* **Durability of alkalisensitivity sisal and coconut fibres in cement mortar composites**. Cement and Concrete Composites, v. 22, p. 127-143, 2000.

_____. **Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability**. Cement and Concrete Composites, v. 25, p. 185-196, 2003.

_____. **Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 6, p. 2409-2420, 6// 2009.

TOLEDO FILHO, R. D., SILVA, F. D. A., MELO FILHO, J. A., FAIRNAIRN, E. M. R. **Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 6, p. 2409-2420, 6// 2009.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; SANJUÁN, M. A.; ENGLAND, G. L. **Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres**. Cement and concrete composites, pp. 537 – 546, 2005.

TONOLI, G.; JOAQUIM, A.; ARSNE, M.; BILBA, K.; SAVASTANO JR., H. **Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp**. Materials Manufacturing Processes, v.22; pp.149–56, 2007.

TOUTANJI, H. **Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete**. Construction and Building Materials. v.13, pp. 171 - 177, 1999.

WAMBUA, P., IVENS, J., e VERPOEST, I. “**Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?**”. Compos. Sci. Technol, 2003.

WINNEFELD, F., BECKER, S., PAKUSCH, J., GÖTZ, T. **Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems**. Cement and Concrete Composites, v. 29, n. 4, p. 251-262, 4// 2007.

XU, X., LIU, F., JIANG, L., ZHU, J. Y., HAAGENSON, D., WIESENORN, E D. P. **Cellulose Nanocrystals vs. Cellulose Nano fibrils: A Comparative Study on Their Microstructures and Effects as Polymer Reinforcing Agents**. ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 5, p. 2999–3009, 2013.

ZAMPERI, A., MABANDE, G. T. P., SELVAM, T., SCHWIEGER, W., RUDOLPH, A., HERMANN, R., SIEBER, H., e GREIL, P. “**Biotemplating of Luffa cylindricasponges to self-supporting hierarchical zeolite macrostructures for bio-inspired structured catalytic reactors**” Mat. Sci. Eng. C., 2006.

ZHANDAROV, S.; MÄDER, E.; **Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters**. Composites Science and Techonology, v. 65, pp. 149 – 160, 2004.

ZHU, W. H.; TOBIAS, B. C.; **Air-Cured banana-fibre-reinforced cement composites**. Cement and Concrete Composites, v. 16, p. 3-8, 1994.