

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS, ENGENHARIAS E
TECNOLOGIAS - UNACET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

MARCELO ZANIBONI DE PELLEGRIN

**DESENVOLVIMENTO DE UM COMPÓSITO
ARGAMASSA/CELULOSE DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo

Co-Orientador: Prof. Dr. Tiago Elias Allievi Frizon

**CRICIÚMA
2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P386d Pellegrin, Marcelo Zaniboni de.

Desenvolvimento de um compósito argamassa/celulose da cana-de-açúcar / Marcelo Zaniboni de Pellegrin. - 2016.

93 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2016.

Orientação: Oscar Rubem Klegues Montedo.

Coorientação: Tiago Elias Allievi Frizon.

1. Compósito cimentício – Propriedades mecânicas. 2. Fibras de celulose. 3. Bagaço de cana – Reaproveitamento. I.

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla – CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

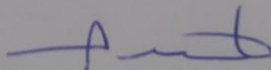
Marcelo Zaniboni de Pellegrin

Desenvolvimento de um compósito argamassa/celulose da cana-de-açúcar.

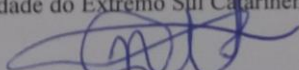
Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 21 de outubro de 2016.

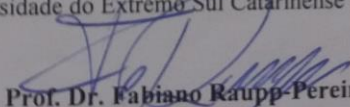
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Newton Luiz Dias Filho
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus familiares e amigos que, sem dúvidas, são as pessoas mais importantes do mundo.

Cabe um agradecimento especial ao meu orientador, Oscar, que mesmo sabendo as dificuldades que teríamos me ajudou muito durante esse último ano de mestrado. Ao Tiago pelo apoio no final do trabalho de suma importância para mim.

Ao Adriano, Bocão, Elídio, Oscar, Camila, Ariel, Glauceia que tiveram importante parcela na minha formação como engenheiro e como cidadão desde a época da graduação até a conclusão do mestrado e espero que todos continuem sendo as pessoas nas quais eu sempre me espelhei.

Aos demais professores do PPGCEM.

Ao Eng. Lucas Nesi por fornecer a matéria-prima utilizada nesse trabalho.

Aos funcionários do Iparque que me ajudaram na conclusão desse trabalho, em especial ao Tchesare e ao Augusto que me ajudaram nos ensaios.

Para a Juliana e para a Débora que possuem grande importância nesse trabalho e que, com certeza, só atingiu essa qualidade pelo apoio integral das duas. E para o Rodrigo que ajudou muito na parte de química orgânica.

Para todos os outros colegas de laboratório com os quais compartilhei ótimos momentos que lembrarei por muito tempo.

*“Não sou nada.
Nunca serei nada.
Não posso querer ser nada.
À parte isso, tenho em mim todos os sonhos do mundo.”*

Álvaro de Campos

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, porém o resíduo do processo (bagaço) não possui um destino adequado, sendo normalmente queimado, utilizado como adubo ou como reforço na alimentação animal. Procurando um material para substituir a fibra de amianto, extremamente prejudicial à saúde, foi proposta a utilização da fibra de celulose extraída do bagaço da cana-de-açúcar. As propriedades mecânicas da fibra de celulose a tornam interessante para aplicações como reforço em matrizes cimentíceas. A extração das fibras ocorreu utilizando um banho de água aquecida e um posterior tratamento com hidróxido de sódio conforme proposto por Moubarik, Grimi e Boussetta. A adição de fibras é conhecida por melhorar a tenacidade à fratura do compósito, fazendo com que passe de uma fratura frágil para uma fratura dúctil. Nesse trabalho foi estudada a influência da quantidade de fibra e do comprimento de fibra nas propriedades de resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade e densidade do compósito, sendo também caracterizada a fibra separadamente. O procedimento experimental foi o planejamento fatorial 2^2 com ponto central. Os compósitos foram fabricados em argamassadeira e testados em 3, 7 e 28 dias. Os resultados demonstraram que as composições com fibra apresentam um decréscimo na resistência à compressão e um aumento na resistência à flexão. A análise estatística demonstrou que o comprimento de fibra é o único fator significativo na resistência à compressão enquanto as duas variáveis em conjunto são significativas na resistência à flexão. O resultado mais expressivo se deu no módulo de elasticidade onde todas as composições que tiveram fibras adicionadas aumentaram de forma expressiva. A principal conclusão é que a ótima interface matriz/reforço é a responsável por esse aumento.

Palavras chave: Compósito, celulose, matriz cerâmica.

ABSTRACT

Brazil is the largest producer of sugar cane worldwide but the process residue (bagasse) doesn't have a suitable destination and usually is burned, used as fertilizer or as reinforcement in animal feed. Looking for a material to replace asbestos fiber that is extremely harmful to health, the use of cellulose fiber from sugarcane was proposed. The mechanical properties of cellulose fiber make it interesting for application as reinforcement in cementitious matrices. The extraction of the fiber was done using a heated water bath and subsequent treatment with sodium hydroxide as proposed by Moubarik, Grimi and Boussetta. The addition of fibers is known to improve the toughness of the composite changing the brittle fracture to ductile fracture. In this work, the influence of the amount of fiber and fiber length in the compressive strength properties, flexural strength, modulus of elasticity and density of the composite was studied. The fiber was characterized separately. The experimental procedure was the method 2^2 with a central point. The composites were manufactured in a mixer and tested at 3, 7 and 28 days. The results showed that compositions with fiber presented a decrease in compressive strength and an increase in flexural strength. Statistical analysis showed that the fiber length is the only significant factor in compressive strength and the two variables together are significant for flexural strength. The most significant result was for the modulus of elasticity: all compositions with fibers had a significant increase. The main conclusion is that the optimal reinforcement/matrix interface is responsible for this increase.

Keywords: Composite, cellulose, ceramic matrix

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra que está submetida à aplicação de uma carga de tração.....	34
Figura 2 - Representação de um compósito de fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente.....	35
Figura 3 - Estrutura molecular da celulose	41
Figura 4 - Mercerização da celulose: alteração de conformação das cadeias de celulose com conversão de celulose I em celulose II.....	44
Figura 5 – Procedimento do presente trabalho	45
Figura 6 – Fluxograma de obtenção das fibras de celulose	47
Figura 7 - Aparência da fibra pronta para fabricação do compósito	48
Figura 8 – Material cortado pré tratamento	50
Figura 9 - Início e final do processo de obtenção das fibras.....	51
Figura 10 - Corpos de prova logo após serem fabricados. Fonte: Autor,	52
Figura 11 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de flexão nos compósitos.....	54
Figura 12 - Picnômetro utilizado para determinação da densidade real da fibra.....	56
Figura 13 - Resultados dos ensaios de FTIR para amostra do bagaço e da fibra de celulose pós-tratamento.....	58
Figura 14 - Análise termogravimétrica do bagaço e da fibra de celulose pós-tratamento	59
Figura 15 - Derivada da análise termogravimétrica do bagaço e da fibra de celulose pós-tratamento.....	60
Figura 16 – Análise de DSC do bagaço e da fibra de celulose pós-tratamento.....	61
Figura 17 - Gráfico de barras relacionando o ICN com a composição. As linhas representam \pm o desvio padrão	63
Figura 18 - Representação gráfica da resistência à compressão.	64
Figura 19 - Gráfico de Pareto para resistência à compressão para $p < 0,05$	66

Figura 20 - Gráfico de superfície de resposta representando a relação entre comprimento de fibra, percentual de fibra e resistência à compressão.....	67
Figura 21 - Gráfico de curva de nível representando a relação entre comprimento de fibra, percentual de fibra e resistência à compressão..	68
Figura 22 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios de flexão.	70
Figura 23 - Gráfico de Pareto para resistência à flexão para $p < 0,05$	72
Figura 24 - Gráfico de superfície de resposta representando a relação entre comprimento de fibra, percentual de fibra e resistência à flexão..	73
Figura 25 - Gráfico de curva de nível representando a relação entre comprimento de fibra, percentual de fibra e resistência à flexão	74
Figura 26 - Microscopias ópticas da matriz de cimento	75
Figura 27 - Microscopias ópticas apresentando uma fibra	75
Figura 28 - Microscopias ópticas de amostras dos compósitos	76
Figura 29 – Microscopia eletrônica de varredura, observa-se uma fibra	77
Figura 30 – Microscopia eletrônica de varredura aproximada da figura 29	78
Figura 31 – Microscopia eletrônica de varredura de uma porção de material com uma fibra na transversal	78
Figura 32 – Microscopia eletrônica de varredura indicando região rica em fibra	79
Figura 33 – Microscopia eletrônica de varredura	79
Figura 34 – Microscopia eletrônica de varredura de região com fibra ..	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do bagaço de cana-de-açúcar	42
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas das fibras de celulose	42
Tabela 3 – Metodologia experimental dos compósitos	46
Tabela 4 – Razão l/d teórica das fibras	46
Tabela 5 - Índice de consistência normal para todas as formulação	62
Tabela 6 - Valores de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de cada formulação com o respectivo desvio padrão	64
Tabela 7 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão	65
Tabela 8 - Valores dos resultados dos ensaios de flexão aos 3, 7 e 28 dias de cada composição com o respectivo desvio padrão	69
Tabela 9 – ANOVA dos resultados de resistência à flexão	71
Tabela 10 - Valores obtidos de Densidade Aparente e Módulo De Elasticidade e valores calculados do Parâmetro de Eficiência da Fibra e Módulo de Elasticidade Específico	81

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	21
2 – OBJETIVOS	25
2.1 - OBJETIVO GERAL	25
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1 - SUSTENTABILIDADE	27
3.2 - BIOPOLÍMEROS	28
3.3 - COMPÓSITOS	29
3.4 - COMPÓSITO FIBRA-CIMENTO	31
3.5 - FIBRAS NATURAIS	38
3.6 - BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CELULOSE	39
4 - MÉTODOS.....	45
4.1 - OBTENÇÃO DAS FIBRAS	45
4.2 – TERMOGRAVIMETRIA (TGA) E CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC)	49
4.3 - ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	49
4.4 - FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO	51
4.5 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA NORMAL (ICN)	53
4.6 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO	53
4.7 - ENSAIOS DE FLEXÃO	53
4.8 - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	55
4.9 - DENSIDADE APARENTE	55
4.10 - DENSIDADE REAL	55
4.11 - MICROSCOPIA ÓPTICA E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	56
4.12 - ANÁLISE ESTATÍSTICA	57
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	58

5.1 - CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO E DA FIBRA	58
5.1.1 – Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	58
5.1.2 – Termogravimetria (TGA)	59
5.1.3 - Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)	61
5.1.4 - Densidade Real da Fibra.....	62
5.1.5 - Perda de massa	62
5.2 – CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO	62
5.2.1 - Índice de consistência normal	62
5.2.2 – Resistência à Compressão	63
5.2.3 - Resistência à Flexão	69
5.2.4 - Microscopia Óptica.....	74
5.2.5 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	77
5.2.6 - Densidade Aparente, Módulo de Elasticidade, Parâmetro de eficiência da fibra e Módulo de Elasticidade Específico	81
6 – CONCLUSÃO.....	84
7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
8 - REFERÊNCIAS	87

1 - INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo. Estima-se que na safra 2016-17 sejam produzidas mais de 690 milhões de toneladas. Desse total, aproximadamente 28 % é o rejeito conhecido comumente por bagaço. O bagaço é um rejeito rico em celulose que vem sendo descartado ou utilizado como combustível de caldeiras. Um dos modos de valorizar esse resíduo é como matéria-prima na fabricação de fibras de celulose (CONAB, 2016).

Além de todas as limitações mecânicas, térmicas, disponibilidade de matéria-prima e todas as outras particularidades que um engenheiro de materiais precisa levar em conta quando seleciona um material para uma aplicação, cada vez mais as questões relacionadas ao seu ciclo de vida vêm atraindo importância fundamental. Questões como consumo energético, reciclabilidade, emissão de CO₂ e outros gases prejudiciais e disponibilidade deixaram de ser apenas questões secundárias para se tornar parte essencial na etapa de seleção do material e do processo pelo qual ele é fabricado (FLORES e CASTRO-LACOURTE, 2013; DICKER et al., 2014).

Dentre toda a gama de materiais à disposição de um engenheiro de materiais, um grupo de polímeros provenientes de fontes naturais e renováveis, os biopolímeros, podem fornecer produtos de alta qualidade com baixo impacto ambiental, pois sua composição e propriedades são ditadas por fatores ambientais e em grande parte sofrem degradação de forma mais rápida e sem causar impactos ao meio ambiente. Ao mesmo tempo, este grupo possui propriedades térmicas e mecânicas que o colocam como um potencial substituto em diversas aplicações, principalmente na substituição de polímeros sintéticos originários de combustíveis fósseis (RUDIN e CHOI, 2015; JAWAID e KHALIL, 2011; HOSSAIN et al., 2014).

Estruturas feitas à base de materiais cimentícios existem a milhares de anos e possuem resistência ao desgaste ímpar, principal motivo pelo qual várias delas ainda podem ser visitadas nos dias de hoje. Porém a sua baixa tenacidade à fratura impede que elas sejam aplicadas em vários locais. Um dos métodos mais eficientes e mais utilizados para minimizar o efeito dessa propriedade é a criação de um compósito com a inserção de uma estrutura de aço no interior do cimento. Dentre as desvantagens dessa solução, a alta densidade do aço

e sua corrosão em meio alcalino se destacam, situação padrão em estruturas de cimento (ASHBY e JONES, 2007; SILVA, BRITO e DHIR, 2015; TREVISO et al., 2015).

Uma solução que vem sendo pesquisada e que tem demonstrado enorme potencial é a utilização de fibras, porções de material que apresentam uma grande razão entre seu comprimento e seu diâmetro e fornecem excelentes propriedades por esse motivo. Basicamente, a fibra atua como uma ponte que liga as extremidades de uma trinca no interior do material cerâmico, fazendo com que seja necessária maior energia para romper a peça. Fibras de aço, vidro e materiais poliméricos como a celulose, polipropileno e polietileno já foram testadas como reforço (ARDANUY, CLARAMUNT e TOLEDO FILHO, 2015; CALLISTER e RETHWISCH, 2013; LI e LEUNG, 1992).

Um material compósito não se trata apenas da mistura de dois materiais. Para poder ser considerado um material compósito, o reforço precisa melhorar de forma significativa alguma propriedade da matriz. Nesse caso as propriedades que se buscou melhorar foram o módulo de elasticidade e a resistência à flexão. Para isso foi selecionada a fibra de celulose, fibra de origem renovável e obtida a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Uma forma promissora de isolar a celulose do bagaço da cana-de-açúcar é através da mercerização, onde o bagaço entra em contato com hidróxido de sódio e dissolve a hemicelulose e a lignina. Esta fibra torna compatíveis algumas características promissoras, principalmente para o mercado brasileiro, como disponibilidade, baixo custo, facilidade de processamento e biodegradabilidade, se inserida numa matriz de cimento. (CALLISTER e RETHWISCH, 2013, LOH et al., 2013; KLEMM et al., 2005; GURGEL, 2007).

Uma possível aplicação de um compósito de cimento com reforço de fibras de celulose é em substituição aos atuais componentes fabricados com amianto. O amianto é uma fibra natural que é tratada como um fator de risco para o câncer de pulmão. Mais de 107 mil pessoas morrem por ano com doenças relacionadas ao amianto. A substituição da fibra de amianto pela fibra de celulose levaria a uma diminuição em gastos de saúde pública além de valorizar um resíduo abundante no Brasil (WANG et al., 2012; GOODMAN et al., 2014).

Neste trabalho buscou-se desenvolver um material compósito com potencial para substituir as telhas de fibrocimento atuais que utilizam amianto em sua composição.

2 – OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

Desenvolver um compósito de matriz cimentícia reforçado com fibras de celulose provenientes da reutilização do bagaço da cana-de-açúcar e avaliar suas propriedades mecânicas.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar se o método de eliminação da lignina e da hemicelulose é efetivo.
- Verificar se o percentual de fibra influencia nas propriedades do compósito.
- Verificar se o comprimento da fibra influencia nas propriedades do compósito.
- Determinar as melhores condições para fabricação de um compósito argamassa/fibra de celulose.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - SUSTENTABILIDADE

Todos os problemas ecológicos e muitos dos problemas sociais estão ligados direta ou indiretamente aos tipos e taxas de geração de materiais. Impactos negativos ocorrem ao longo de toda a vida útil dos materiais: extração, transporte, produção, uso e descarte (LINDAHL et al., 2014).

Nas últimas décadas, pesquisadores vêm se dedicando a buscar a sustentabilidade do planeta. Temas como emissão dos gases de efeito estufa, custo energético, toxicidade e esgotamento dos recursos naturais estão sendo cada vez mais considerados pelos produtores e, principalmente, pelos consumidores que estão exigindo produtos de baixo impacto ambiental (DICKER et al., 2014).

A seleção de materiais de menor impacto ambiental está entre as tarefas mais difíceis num projeto construtivo. Isso se deve, em parte a (AKADIRI, 2015):

- Inúmeros produtos e materiais devem ser avaliados tanto individualmente como em conjunto;
- Parâmetros de avaliação podem variar dentre produtos ou países;
- Falta de transparência no processo produtivo;
- A avaliação de produtos e materiais não tem abordagem mundial.

A inserção desses materiais depende das ações de um grande número de pessoas envolvidas no processo construtivo: proprietários, responsáveis, projetistas, empresas, etc.. A cuidadosa seleção de materiais de construção sustentáveis vem sendo a maneira mais fácil para se iniciar a incorporação de princípios de sustentabilidade em projetos de construção. A sua seleção é uma decisão multicritério onde a experiência é muito mais utilizada que fatores numéricos. Além disso, muitos dos métodos atuais de seleção foram criticados por enfatizar demais os aspectos ambientais (AKADIRI, OLOMOLAIYE e CHINYIO, 2013).

Uma apropriada seleção de materiais tem papel fundamental no processo construtivo. Ela pode reduzir o consumo energético durante a fabricação, a emissão de dióxido de carbono para o ambiente, o custo energético para a fabricação dos materiais durante o seu processamento, o impacto ambiental durante o ciclo de vida do produto, entre outros. Quando selecionar um material, os projetistas devem considerar uma série de fatores para atingir os melhores resultados. Dentre eles deve-se destacar: custo, propriedades mecânicas, comportamento ambiental, propriedades físicas e segurança. Contudo, as características visuais e aspectos metafísicos podem influenciar a demanda do mercado e afetam a tomada de decisão na seleção de um material (FLORES e CASTRO-LACOURTE, 2013).

3.2 - BIOPOLÍMEROS

O interesse pela utilização de biopolímeros tem aumentado em razão da crescente preocupação com a sustentabilidade no uso de polímeros derivados de petróleo. Termos e expressões como biopolímeros, bioplásticos e plástico biodegradável são empregados como sinônimos; todavia, cada um deles tem um significado único. Plástico biodegradável é aquele que se degrada devido à ação de organismos vivos, como micróbios e fungos. Um bioplástico pode ser definido como um polímero manufaturado como um polímero comercial a partir de uma fonte natural ou recurso renovável. O bioplástico pode ser biodegradável, mas dizer que um plástico é biodegradável não significa que o material foi derivado total ou parcialmente de uma fonte biológica. Biopolímeros são polímeros compostos principalmente de algumas poucas unidades repetitivas que contêm carbono e são usados em organismos vivos ou se originam deles (RUDIN e CHOI, 2015).

Como todo polímero, os biopolímeros são uma cadeia (sequência de monômeros). Em vários casos essas cadeias são lineares, porém em alguns casos são cadeias fechadas e circulares, ramificadas ou, ainda, com ligações cruzadas. A estrutura de quaisquer biopolímeros é determinada pela natureza dos monômeros e por condições ambientais, como a temperatura, o solvente e a presença de sais e/ou outros componentes moleculares. Uma característica única dos biopolímeros é que a maioria deles são essencialmente heteropolímeros, devido à característica de possuírem uma variedade de unidades monoméricas (VAN DER MAAREL, 2008).

Rejeito agroindustrial é o resíduo de fonte renovável mais abundante do planeta. O acúmulo de biomassa em grande quantidade resulta não apenas em um problema ambiental como, também, representa um problema econômico para as empresas. Um grande número de produtos comerciais como carbono ativado, biossurfactantes e resinas fenólicas, pode ser obtido a partir desses materiais. Compósitos derivados de materiais orgânicos vêm atraindo a atenção devido à alta resistência mecânica específica e alto módulo de elasticidade específico, baixo custo em altos volumes de aplicação, baixa densidade comparada com compósitos reforçados com fibras inorgânicas, baixo consumo de energia, fácil processamento, ser uma fonte renovável e ser reciclável (NEVÁREZ et al., 2011).

3.3 - COMPÓSITOS

A palavra “compósito” tem um quê de moderno. Todavia, usar a alta resistência das fibras para enrijecer e fortalecer uma matriz de material barato é, talvez, um processo mais velho do que o uso da roda. O Caminho da Procissão Da antiga Babilônia, uma das menos cotadas maravilhas do mundo antigo, foi feita de betume reforçado com palha trançada. Palha e crina de cavalo têm sido utilizadas para reforçar tijolos de barro (melhorando sua tenacidade à fratura) há, no mínimo, 5.000 anos. O papel é um compósito, o concreto também; ambos eram conhecidos dos romanos. E quase todos os materiais naturais que devem suportar carga – madeira, osso, músculo – são compósitos (ASHBY e JONES, 2007).

Entretanto, a indústria de compósitos é nova. Ela cresceu rapidamente nos últimos 30 anos com o desenvolvimento de compósitos fibrosos: para começar, polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP ou fibra de vidro) e, mais recentemente, polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP). Vários exemplos mostram que os materiais compósitos entraram na indústria como uma alternativa viável aos materiais tradicionais. Indústrias aeroespaciais e de defesa foram pioneiras nesse campo, mas as propriedades e desempenhos atraentes de materiais compósitos logo desencadearam a sua aplicação para a produção de equipamentos esportivos, barcos, componentes de reforço em engenharia civil e aplicações em energia. Na indústria de transporte os projetos de aviões lideram e os projetos mais recentes têm, aproximadamente, 60% de sua massa de materiais compósitos. Carros de luxo e de competição têm usado materiais compósitos a muitos anos

e agora eles começam a ser utilizados para produção em série de veículos de passageiros (TREVISIO et al., 2015; ASHBY e JONES, 2007).

As diferentes fases podem ser selecionadas de várias classes de materiais, metais, cerâmicos e poliméricos, porém combinações de dois materiais da mesma classe são possíveis também. Metais e cerâmicas são normalmente reforçados com fases cerâmicas enquanto polímeros são utilizados com todas as classes. Tais estruturas são projetadas para satisfazer necessidades muito específicas da aplicação em questão, fazendo uso completo de sua maior razão entre resistência e/ou rigidez pela massa específica (GASSER, 2010).

O comportamento mecânico dos materiais monolíticos (metais, cerâmicas e polímeros) já era um campo bem conhecido quando na década de 1960 materiais compósitos como vidro/poliéster e carbono/epóxi surgiram como materiais promissores. Nas décadas seguintes, grandes avanços foram feitos em temas como estimativas micromecânica das propriedades elásticas, homogeneização, teoria das placas, etc.. Porém, teorias para tratar das falhas de materiais compósitos não tiveram o mesmo sucesso. Na verdade, após numerosos esforços, após aproximadamente cinco décadas, muitas incertezas e controvérsias se mantêm em prever a falha de materiais compósitos (TALREJA, 2014).

Material monolítico é aquele que possui microestrutura uniforme e contínua, e que se formou a partir de um único material; além disso, mais de um microconstituente pode estar presente. De maneira contrária, a microestrutura de um compósito é não uniforme, descontínua e multifásica, no sentido que ele é uma mistura de dois ou mais materiais distintos (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

As combinações e as faixas de propriedades dos materiais foram, e ainda estão sendo, ampliadas pelo desenvolvimento de materiais compósitos. De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, de modo que é obtida a melhor combinação de propriedades. De acordo com esse princípio de ação combinada, melhores combinações de propriedades são criadas por uma combinação judiciosa de dois ou mais materiais distintos. Um equilíbrio entre propriedades também é feito

para muitos materiais compósitos (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Na escala microestrutural, o início da falha varia muito com o tipo da carga e está intimamente relacionada com as propriedades mecânicas, físicas e geométricas das fases constituintes, ou seja, a matriz, o reforço, a interface/interfase e a estrutura do reforço. Micro mecanismos podem produzir previsões de falhas locais em pontos críticos. No entanto, essas previsões são apenas aproximadas e não são facilmente relacionáveis à uma falha global da estrutura de compósito (DANIEL, 2014).

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa está na forma de uma fibra. Os objetivos de projetos dos compósitos reforçados com fibras incluem, com frequência, alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo específico (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

3.4 - COMPÓSITO FIBRA-CIMENTO

Materiais de construção frágeis são reforçados por fibras vegetais desde a antiguidade. O conceito de reforço com fibras vegetais em uma matriz de cimento foi desenvolvido na década de 1940, quando essas fibras foram avaliadas como um potencial substituto às fibras de amianto (ARDANUY; CLARAMUNT e TOLEDO FILHO, 2015).

Compostos Cimentícios de Engenharia (CCE) são uma classe de materiais formada por reforços fibrosos dúcteis e foram inventados nos anos 1990 (ZHOU et al., 2012).

O cimento possui como característica especial que, quando misturado com água, forma uma pasta que, subsequentemente, sofre hidratação e endurece. Esse comportamento é especialmente útil no sentido de que estruturas sólidas e rígidas com praticamente qualquer forma podem ser moldadas com rapidez. Além disso, alguns desses materiais atuam como uma fase de união, que aglutinam quimicamente agregados particulados para formar uma única fase coesa. Diferentemente de outros materiais, essa união ocorre em temperatura ambiente (CALLISTER e RETHWISCH, 2013). A argamassa pode ser considerada uma mistura de cimento, água e agregados finos.

O concreto é um material compósito constituído de duas fases, uma contínua e uma descontínua. A fase contínua é formada a partir da mistura entre cimento e água enquanto a fase descontínua é formada por agregados finos e grossos. Este concreto convencional é um material frágil e com pouca capacidade para resistir aos efeitos de retração (PELISSER et al., 2010).

Mesmo sem nenhuma solicitação externa e termodinâmica, a argamassa tem tendência a uma retração nas primeiras horas após a moldagem. Sob certas condições, a retração gera trincas na estrutura cimentícia. Essas trincas podem ser internas e microscópicas ou grandes (o tamanho da trinca é visível ao olho humano). As trincas maiores podem facilitar a penetração de agentes agressivos como cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono na estrutura. Isto leva à degradação da matriz de cimento e à corrosão quando esse material possui uma estrutura de aço em seu interior. Se as trincas forem internas e microscópicas elas podem levar a uma posterior propagação das trincas devido à retração do material. Por essas razões é importante controlar a retração nos estágios iniciais da aplicação do material. Esse problema é relacionado a diversos fatores sendo o principal a evaporação da água (MESSAN, IENNY e NECTOUX, 2011).

Um material amplamente utilizado como fase matriz na confecção de compósitos cerâmicos é o cimento Portland que apresenta vantagens como baixa temperatura de solidificação (sinterização) sendo que a fase sólida e a microestrutura são formadas pelo processo químico de hidratação. Quando misturado com água, forma uma pasta capaz de endurecer devido a reações químicas exotérmicas sendo suas propriedades mais importantes, a resistência mecânica, conseguida à medida que se processa a hidratação da pasta no decorrer do tempo, e a durabilidade, relacionada com a capacidade de se manter agregada sua pasta, depois de endurecida (CORRADINI, 2014).

A adição de uma quantidade relativamente pequena de fibras curtas aleatoriamente a uma matriz de cimento é conhecida por melhorar a resposta mecânica do produto resultante, comumente conhecido como Compósito de Cimento Reforçado com Fibra. Esses materiais têm o potencial de apresentar uma maior resistência e ductilidade em comparação com a argamassa ou concreto não reforçado, que falham sobtensão, imediatamente após a formação de uma única trinca (KIM, NAAMAE e EL-TAWIL, 2008). Estudos vêm sendo realizados na

caracterização e avaliação desses compósitos variando a quantidade de fibras, forma das fibras, etc. (KIM et al., 2010; FRIGIONE, 2010 e RAHMANI et al., 2013).

Hoje em dia, os Concretos Reforçados com Fibras (CRF), são amplamente utilizados para pisos industriais, revestimento de túneis, em estruturas expostas a ataques químicos ou em fase de reabilitação estrutural (FRATERNALI, SPADEA e BERARDI, 2014). A melhoria do concreto com rejeitos serve como um meio para diminuir a quantidade de material em aterros e reduzir o uso de materiais virgens, reduzindo o impacto que a indústria da construção civil tem no meio ambiente (PARIS et al., 2016).

A incorporação de fibras em uma matriz de cimento é utilizada para melhorar diversas de suas propriedades como tenacidade, pseudoencruamento, resistência ao cisalhamento, tanto quanto resistência ao impacto e a vida em fadiga. A principal característica da inserção de fibras é agir como pontes entre os lados de uma trinca para dificultar a sua propagação. Portanto, o desempenho estrutural é fortemente controlado pelo comportamento de ponte das fibras que atravessam uma trinca na matriz (ZHANG e LI, 2002).

As características mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também do grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. A magnitude da ligação interfacial entra as fases fibra e matriz é importante para a extensão dessa transferência de carga. Sob a aplicação de tensão, essa ligação fibra-matriz cessa na extremidade da fibra, produzindo um padrão de deformação da matriz como mostrado na figura 1 (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

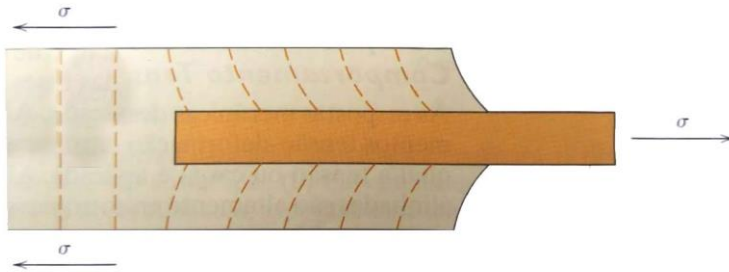


Figura 1 - Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra que está submetida à aplicação de uma carga de tração. Fonte: Callister e Rethwisch, 2013

Um determinado comprimento crítico de fibra é necessário para que haja aumento efetivo na resistência e na rigidez do material compósito. Esse comprimento é apresentado na equação 1:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

l_c = comprimento crítico de fibra (mm)

σ_f^* = limite de resistência à tração da fibra (MPa)

d = diâmetro da fibra (mm)

τ_c = resistência da ligação fibra matriz ou tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz, o que for menor (MPa) (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Conforme o comprimento da fibra aumenta, o reforço proporcionado pela fibra torna-se mais efetivo. As fibras para as quais $l \gg l_c$ (normalmente $l > 15l_c$) são denominadas contínuas; as fibras descontínuas ou curtas têm comprimento menor que este. Se as fibras possuírem comprimento significativamente menor que l_c , a matriz deforma-se ao redor da fibra de modo que virtualmente não existe nenhuma transferência de tensão, e há apenas um pequeno reforço devido à fibra. Para haver melhora significativa na resistência do

compósito, as fibras devem ser contínuas (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Costa (2013) determinou que o diâmetro da fibra de celulose extraída da cana-de-açúcar, é de $118,8 \pm 25,7 \mu\text{m}$ e Almeida (2013) apresentou um valor da tensão de cisalhamento de argamassa à base de cimento em média $6,47 \pm 0,38 \text{ MPa}$.

Os compósitos com fibras podem ser classificados de diversos modos quanto ao comprimento e orientação dessas fibras. Os compósitos com fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente podem ser demonstrados esquematicamente na figura 2.

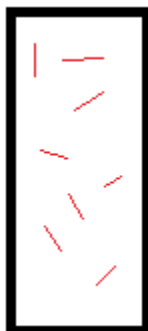


Figura 2 - Representação de um compósito de fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente. Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch, 2013.

Percebe-se a aleatoriedade no sentido das fibras. Para prever o módulo de elasticidade do compósito pode ser utilizada uma expressão da regra das misturas, conforme apresentado na equação 2:

$$E_{cd} = KE_fV_f + E_mV_m \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

E_{cd} = Módulo de elasticidade do compósito (GPa)

K = Parâmetro de eficiência da fibra

E_f = Módulo de elasticidade da fibra (GPa)

V_f = Volume da fibra

E_m = Módulo de elasticidade da matriz (GPa)

V_m = Volume da matriz (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Os compósitos que possuem fibras alinhadas são anisotrópicos, ou seja, o reforço se dá apenas no sentido da orientação das fibras enquanto no sentido transversal a alteração é aproximadamente zero. Os outros modos de distribuição de fibras ficam entre esses dois extremos, sendo que para fibras distribuídas aleatoriamente e uniformemente nas três direções do espaço a eficiência do reforço fica em 1/5 (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

O interesse de pesquisadores e engenheiros vem migrando, ultimamente, de materiais monolíticos tradicionais para polímeros reforçados com fibras. Estes materiais compósitos consistem em fibras de alta resistência mecânica de, por exemplo, carbono, vidro e aramida em uma matriz polimérica de baixa resistência mecânica. Infelizmente essas fibras possuem algumas desvantagens como (CHEUNG et al., 2009):

- Não renováveis;
- Não recicláveis;
- Alto consumo energético no processo de fabricação;
- Risco à saúde quando inaladas e;
- Não biodegradáveis.

Estudos vêm sendo realizados para a utilização de fibras para reforço externo em estruturas que sofreram abalos sísmicos (COLOMBO, et al., 2016).

A fibra de reforço atua como uma ponte entre os flancos de uma trinca que promove um aumento da resistência com o aumento da sua extensão. Esse efeito de endurecimento via ponte de fibras, não aumenta, apenas, a energia necessária para iniciar a trinca, mas também leva para um estado conhecido como regime estacionário das trincas. Regime estacionário ocorre como resultado do balanço entre o aumento da tenacidade do compósito e o fator de intensidade de tensão (LI e LEUNG, 1992).

Em alguns compósitos quando a tensão aplicada pelo ambiente excede o limite de resistência da matriz, uma trinca plana pode ser iniciada em um defeito pode se estender infinitamente através da peça.

Neste caso, a propagação da trinca e a tensão aplicada se mantêm constantes e as ligações ponte sustentam e transmitem a carga sem que ocorram rupturas ou diminuição das fibras. Outras cargas provocam início de trincas em outros locais e subsequente propagação das mesmas. Formações repetidas de trincas em regime estacionário resultam em múltiplas fraturas e encruamento do material (YANG e LI, 2007).

O comportamento mecânico do compósito não depende apenas das características da fibra e da matriz, mas também das propriedades da interface. Além do comprimento das fibras, a tenacidade é regida pela ligação fibra-matriz. Uma boa interação entre elas permite que a fibra seja arrancada e faz com que a tensão seja transferida da matriz para a fibra, efeito necessário para que se obtenha um compósito de fibras de celulose em uma matriz de cimento com alta tenacidade. Apesar de haver vários estudos na interface de compósitos, apenas poucos tratam de fibras naturais (ARDANUY, 2015).

Existem vários tipos de interação entre fibra e matriz que conduzem a uma absorção de energia enquanto as fibras atuam como pontes em um concreto reforçado com fibra. Isso inclui interface não ligante, atrito e efeitos associados à variação de ângulo de orientação das fibras. Embora a quantidade de energia associada com cada mecanismo para uma única fibra pode não ser significativa, a grande quantidade de fibras, atuando como pontes podem fornecer um enorme efeito de endurecimento para o compósito (LI e MAALEJ, 1996).

A influência da geometria é mais aparente no ensaio de resistência à flexão do que no de resistência à compressão, provavelmente devido a um gradiente de tensão que atrasa a propagação da trinca, levando à falha final. Agregados com ângulos maiores normalmente apresentam resistência à flexão maior do que agregados em formas circulares, especialmente em misturas com baixas proporções entre água e cimento (SILVA, BRITO e DHIR, 2013).

A fim de melhorar o comportamento de argamassas e concretos as fibras devem ser facilmente dispersáveis na mistura, possuir propriedades mecânicas adequadas e ser duráveis na matriz de cimento altamente alcalino (SILVA et al., 2005).

A permeabilidade do concreto sem trincas é relacionada, principalmente, com a densidade das partículas do composto, tipicamente função da razão entre água e cimento. À medida que a densidade das partículas aumenta, há menos poros que permitem o fluxo do fluido através da matriz. A adição de fibras pode ajudar a manter uma permeabilidade mais baixa após o surgimento das primeiras trincas pois diminui a tendência de iniciação de trincas e seu aumento. Além disso, ocorre a diminuição do tamanho das trincas devido às fibras o que leva a uma redução da permeabilidade do concreto trincado a níveis semelhantes ao do concreto sem trincas (LEPECH e LI,2009).

3.5 - FIBRAS NATURAIS

Desde que o conceito de sustentabilidade foi introduzido em 1970, a possibilidade de utilizar fibras naturais para melhorar as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios tem atraído o interesse de pesquisadores (TIAN e ZHANG, 2016).

Existem duas abordagens para o desenvolvimento de novos materiais em fibrocimento. A primeira é baseada na produção de peças de parede fina e a segunda em componentes livres de amianto (AGOPYAN et al., 2005).

Os recentes avanços no desenvolvimento de fibras naturais, na engenharia genética e na ciência de compósitos aliados ao aumento da pressão de ativistas ambientais, a preservação dos recursos naturais, o aumento no rigor das leis aprovadas nos países em desenvolvimento e a atenção dos consumidores a esses aspectos, oferecem oportunidades para o desenvolvimento de materiais melhorados a partir de recursos renováveis que auxiliam na sustentabilidade global independente de combustíveis fósseis. (CHEUNG, 2009; JAWAID e KHALIL, 2011; HOSSAIN et al., 2014). Estes fatores levaram ao desenvolvimento de materiais naturais com foco em matérias-primas renováveis. As indústrias de fabricação de compósitos começaram a utilizar reforços de fibras naturais à base de plantas como o linho, cânhamo, juta, sisal, quenafa e banana como um material substituinte à madeira sólida. Fibras lignocelulósicas tem a vantagem de que são recursos renováveis e possuem um apelo ao seu marketing. Polímeros reforçados com fibras de celulose têm sido utilizados para várias aplicações como componentes automotivos, peças aeroespaciais, artigos esportivos e indústria da construção civil. As principais vantagens desses materiais

estão na sua baixa densidade, alta resistência mecânica, formabilidade livre e substancial resistência à corrosão e fadiga (JAWAID e KHALIL, 2011).

Apesar de todas as vantagens já citadas, a produção de compósitos com matriz de cimento reforçado com fibra vegetal está limitada pela durabilidade a longo tempo deste material. Este problema é associado a um aumento na fratura da fibra e um decréscimo na densidade de ligações químicas devido a uma combinação de enfraquecimento das fibras por ataque alcalino, mineralização da fibra devido à migração de produtos de hidratação e variação de espaço e volume em razão da alta absorção de água. Esses problemas precisam ser solucionados antes da utilização, em larga escala, desses compósitos (ARDANUY, CLARAMUNT e TOLEDO FILHO, 2015; WEI e MEYER, 2015).

Pesquisas sobre os mecanismos de degradação das fibras naturais no complexo meio alcalino e rico em minerais, caracterizado por processo de hidratação, cristalização, fixação e endurecimento, são raramente realizadas. Poucas publicações têm como objetivo estudar a falha de fibras naturais em compósitos de cimento (WEI e MEYER, 2015).

O papel das fibras celulósicas como reforço reside em uma ligação interfacial adequada entre matriz e reforço que, portanto, garante a durabilidade do material (ARDANUY, CLARAMUNT e TOLEDO FILHO, 2015).

Considerando que as fibras lignocelulósicas são renováveis, degradáveis, recicláveis e neutras, quanto à emissão de CO₂, estas fibras são menos poluentes e contribuem para prevenir o aquecimento global. Portanto, os benefícios ambientais, sociais e econômicos, motivam os cientistas e engenheiros de materiais a explorar o uso de fibras naturais em compósitos reforçados com fibras (HOSSAIN et al., 2014).

3.6 - BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CELULOSE

Segundo dados estimados do CONAB (2016), o Brasil terá, na safra 2016/17, mais de 9 milhões de hectares de área plantada de cana-de-açúcar e uma produção estimada de 690,98 milhões de toneladas.

O resíduo fibroso da cana-de-açúcar, conhecido como bagaço, é um dos maiores resíduos da agricultura mundial. Uma análise do bagaço indica que seus principais constituintes são a celulose, hemicelulose, lignina, cera e minerais que após queimado se transformam em cinza. Esta composição faz com que ele seja ideal para ser aplicado e utilizado como fibra de reforço com o objetivo de criar novos materiais com propriedades físicas e químicas distintas (LOH et al., 2013).

Em 1838 o químico francês Anselme Payen descreveu um sólido fibroso resistente, proveniente de vários tecidos vegetais, que, na presença de ácidos ou amônia e subsequente extração com água, álcool ou éter, se forma. Ele determinou sua fórmula molecular por análise elementar e observou ser um isômero do amido. O termo “celulose” para este componente dos vegetais foi usado pela primeira vez em 1839 em um relatório da Academia Francesa no trabalho de Payen (KLEMM et al., 2005).

Fibras de celulose são amplamente encontradas em vários países em desenvolvimento, provenientes de madeira ou plantações. Elas apresentam diversas vantagens, particularmente sua baixa densidade, seu caráter bio renovável e sua disponibilidade a baixo custo em várias morfologias e razões entre comprimento e espessura, que a tornam materiais convenientes para reforço em uma matriz, tal qual um compósito polimérico ou em aplicações fibrocimento (TONOLI et al., 2009). A principal vantagem de se reforçar um material frágil, como pasta de cimento, argamassa, ou concreto com uma fibra, é o comportamento do concreto após o início da trinca. A tenacidade pós-fissuração que a fibra produz no material, pode permitir uma maior utilização desses materiais na construção civil (AGOPYAN et al., 2005).

A celulose é o biopolímero renovável que está em maior quantidade no planeta. Aproximadamente 33 % de toda a matéria das plantas é celulose (EBNESEJAAD, 2013). A figura 3 apresenta a estrutura molecular da celulose.

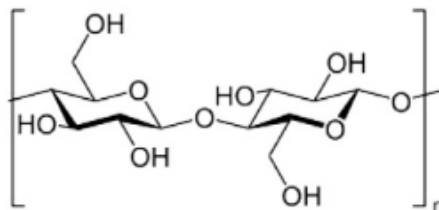


Figura 3 - Estrutura molecular da celulose. Fonte: Ebnesejaad, 2013

Celulose é um glucopolissacarídeo de fórmula geral $(C_6H_{10}O_5)_n$ e é o principal constituinte do tecido vegetal. Raramente é encontrado em seu estado puro na natureza, mas normalmente encontrado junto a hemicelulose, óleos, taninos, etc.. Possui uma estrutura molecular similar à do amido, porém, as unidades de D-glucose estão ligadas as β -glicosídica na celulose enquanto no amido estão ligadas as α -glicosídica. Em razão disso, as moléculas da celulose possuem um formato de hastes longas e duras. Os vários grupos hidroxila de uma cadeia formam pontes de hidrogênio com átomos de oxigênio de outra molécula mantendo a estrutura fortemente unida formando cristalitos (celulose nano whiskers). Ela forma cadeias de, aproximadamente, 10.000 unidades de glicose dispostas em micro fibrilas unidas por ligações de hidrogênio. Estas ligações conferem alta resistência à tração e tornam a celulose insolúvel na maioria dos solventes. A hemicelulose é um polissacarídeo formado por um diferente número de unidades de açúcar onde xilose é o açúcar predominantemente presente. Possui natureza amorfa e tem uma estrutura aleatória com ramificação nas cadeias do polímero. A lignina é um polímero fenólico, amorfo e reticulado de hemicelulose. Proporciona resistência mecânica para as plantas e, por causa de sua natureza hidrofóbica, impede a absorção de água através das paredes das células (HOI e MARTINCIGH, 2013; EBNESAJJAD, 2013).

O que se chama de fibra é, em verdade, um conjunto de filamentos individuais formados por fibrilas unidas por componentes químicos orgânicos não cristalinos (lignina e hemicelulose). Estas fibrilas são compostas por moléculas de celulose e estão orientadas em ângulos distintos, formando as diversas camadas que compõem a macro fibra. Esta composição química determina a estabilidade aos efeitos da degradação, propriedade importante para o uso em compósitos (SILVA, 2002).

A fibra obtida do bagaço é uma das fibras naturais mais promissoras devido sua biodegradabilidade e disponibilidade. Quando o bagaço é queimado, cria poluição atmosférica. A composição do bagaço da cana-de-açúcar, como mostrado na tabela 1, é de, aproximadamente:

Percentual	Constituinte
54,3 – 55,2 %	Celulose
16,8 – 29,7 %	Hemicelulose
24,3 – 25,3 %	Lignina

Tabela 1 - Composição química do bagaço de cana-de-açúcar. Fonte: Satyanarayana, Guimaráes e Wypych, 2007.

Devido seu baixo teor de minerais (2,4 %) comparada a outros resíduos vegetais como a palha do arroz e do trigo, a fibra da cana-de-açúcar tem grandes vantagens. Cerca de 71 % das fibras de cana-de-açúcar são utilizadas para a fabricação de papel e outros 16 % atuam como fonte de energia em *boilers* ou na produção de etanol. Essas fibras são muito usadas na fabricação de plástico, móveis, cera, painéis de fibra, aditivos para madeira e material de filtragem. Polímeros reforçados com fibras são usados em aplicações automobilísticas (HOSSAIN et al., 2014; ANDRADE e COLODETTE, 2014).

As principais propriedades mecânicas das fibras de celulose, apresentadas na tabela 2, segundo Ashby e Jones (2007) são:

Propriedade	Valor
Densidade	1,61 Mg m ⁻³
Módulo de Elasticidade	60 GPa
Resistência à Fratura	1.200 MPa

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas das fibras de celulose. Fonte: Ashby e Jones, 2007.

Valores específicos para fibras de celulose provenientes da cana-de-açúcar não foram encontradas em muitas fontes. Candido (2014) indica que tanto na medida de densidade quanto de resistência à tração o diâmetro é importante. Fibras de diâmetro menor são mais densas e resistentes que as de maior diâmetro. Isso indica que fibras de menor diâmetro são mais compactas e possuem menos espaços vazios em sua microestrutura que as fibras de maior diâmetro, isto é menos defeitos estruturais.

O interesse por trás deste biopolímero é resultado de sua estrutura específica. Esta macromolécula composta de cadeias repetidas de glicose possui especificidades surpreendentes e diversas arquiteturas, reatividades e funções. Diferentemente de carboidratos de baixo peso molecular, a reatividade e propriedades da celulose são determinadas pelas interações intermoleculares, ligações cruzadas, comprimento de cadeia, distribuição do peso molecular e pela distribuição dos grupos funcionais nas unidades repetitivas e em toda a cadeia do polímero. A celulose se diferencia dos polímeros sintéticos pela sua distinta polifuncionalidade, sua rígida cadeia e pela sua sensibilidade quanto à hidrólise e oxidação dos grupos acetais que determinam sua química e manuseio (KLEMM et al., 2005).

A hemicelulose, juntamente com a lignina, encapsula e restringe o acesso à celulose. Neste sentido, vários grupos de pesquisas estão envolvidos em projetos que visam a seleção de variedades de cana-de-açúcar a fim de encontrar plantas com teor de lignina reduzido ou facilitar a sua extração em plantas transgênicas. Em todos os casos, a ideia é eliminar a necessidade de pré-tratamentos severos (MENDES et al., 2015).

Para obter diferentes produtos a partir do bagaço da cana-de-açúcar é necessário submetê-la a um processo de separação dos seus constituintes. No entanto, é um desafio isolar a celulose. Uma variedade de métodos tais como: organosolv, explosão de vapor e hidrólise enzimática têm sido utilizados na tentativa para isolá-la e identificá-la. Um dos métodos mais adequados para a extração e separação da celulose é a deslignificação alcalina (MOUBARIK, GRIMI e BOUSSETTA, 2013).

Tratamento alcalino ou mercerização é o tratamento de fibras de celulose com solução aquosa de NaOH. É um dos métodos químicos mais utilizados, remove certa quantidade de lignina, ceras e óleos que cobrem a superfície externa das fibras naturais. A modificação importante atingida por esse tratamento é o rompimento das pontes de hidrogênio na estrutura, aumentando assim a rugosidade da superfície (FARUK et al., 2012). Este processo altera a estrutura fina, a morfologia da fibra como também a conformação das cadeias de celulose. Durante esse processo, o material expande-se e as cadeias do polissacarídeo são rearranjadas. Estas mudanças resultam em alta adsorção devido à mercerização aumentar a área da superfície específica

da fibra, fazendo com que os grupos hidroxila das macromoléculas de celulose tornem-se facilmente acessíveis (GURGEL, 2007).

Moubarik, Grim e Boussetta (2013) realizaram o tratamento de mercerização nas fibras de cana-de-açúcar inicialmente colocando o bagaço durante 2 h em um banho de água a 70 °C e posterior tratamento em NaOH 15 % a 98 °C durante uma hora e trinta minutos e citaram nos resultados de seu trabalho que esse método se mostrou eficiente para eliminar a hemicelulose e a lignina do bagaço. Gurgel (2007) utilizou uma solução contendo 20 % de NaOH a 25 °C durante 16 h e propôs o seguinte esquema de reação, apresentado na figura 4:

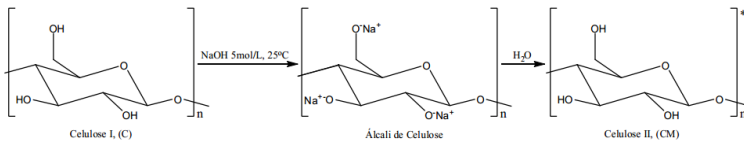


Figura 4 - Mercerização da celulose: alteração de conformação das cadeias de celulose com conversão de celulose I em celulose II. Fonte: Gurgel, 2007

A reação da figura 4 mostra que a celulose não foi alterada e mostra, também, a importância de lavar a fibra após o tratamento alcalino para que os radicais Na⁺ sejam substituídos por hidrogênios.

A insolubilidade da celulose em água e na maioria dos solventes orgânicos causada pela sua estrutura supramolecular é a razão pelo qual todos os produtos disponíveis comercialmente são obtidos via reação em estado sólido ou no estado inchado (reação heterogênea). Devido ao fato de cada unidade repetitiva da celulose possuir três grupos hidroxila disponíveis para reação, a estabilidade do grupo acetal, que forma a estrutura, é limitada pelos reagentes, oxigênio e as cargas mecânicas e térmicas. No caso de reação heterogênea, a acessibilidade e reatividade dos grupos OH é determinada pela etapa de ruptura das ligações dos hidrogênios (por compostos alcalinos como o hidróxido de sódio) e pela interação com o meio reativo. O controle da ativação da celulose e o tipo de reação heterogênea permitem um controle efetivo dos produtos da síntese com reprodutibilidade e similaridade nas propriedades tanto em escala laboratorial quanto industrial (KLEMM et al., 2005).

4 - MÉTODOS

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar as alterações nas propriedades de resistência à flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade e densidade de um compósito tendo como variáveis na fibra o comprimento e a quantidade adicionada a uma matriz padrão.

O método experimental utilizado foi 2^2 com um ponto central.

O procedimento completo deste trabalho pode ser resumido no fluxograma a seguir na Figura 5:

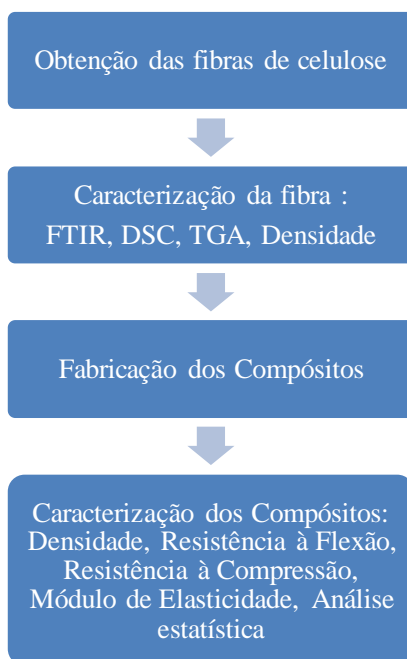


Figura 5 – Procedimento do presente trabalho

4.1 - OBTENÇÃO DAS FIBRAS

Inicialmente, o bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) foi coletado na COOFASUL-Cooperativa Familiar Agroindustrial Sul Catarinense em abril de 2016 e foi colocado para

secar ao ambiente durante 24 h e posterior secagem em estufa a 30 °C com ventilação forçada por 48 h. O bagaço foi então armazenado em sacos plásticos durante todo o período de trabalho. Nesse ponto, foram realizados ensaios de TGA, DSC e FTIR para caracterização do material.

A composição dos compósitos obedeceu ao exposto na tabela 3.

Código Compósito	Comprimento de Fibra (mm)	% Fibra em massa
C0	0	0,000 %
C1	20	0,250 %
C2	20	0,500 %
C3	25	0,375 %
C4	30	0,250 %
C5	30	0,500 %

Tabela 3 – Metodologia experimental dos compósitos. Fonte: Autor, 2016.

Estes valores foram baseados na equação do comprimento crítico onde foi utilizado o valor de limite de resistência à tração da fibra, diâmetro e tensão ao cisalhamento ao escoamento da matriz conforme encontrado na literatura e já citado nesse texto, resultando em um valor de comprimento crítico de 11,017 mm. Foi levado em consideração ainda, o tipo de fibra e tamanho do corpo de prova e foram escolhidos valores médio de 25 mm com composições acima e abaixo desse valor. Obtendo um razão l/d (comprimento / diâmetro), apresentado na tabela 4, de:

Comprimento de Fibra (mm)	l/d
0	0
20	169,5
25	211,9
30	254,2

Tabela 4 – Razão l/d teórica das fibras. Fonte: Autor, 2016.

Devido à fibra de celulose ser, ainda, pouco explorada como reforço para matrizes cimentíceas, esse comprimento foi comparado com valores utilizados por Fraternali (2011), que utilizou fibras de PET (com 40 e 52 mm) e PP (47 mm), porém são fibras com diâmetro maior resultando, assim, numa razão l/d menor que a estudada nesse trabalho.

O percentual de fibra foi determinado via comparação com estudos feitos com fibras de celulose de outras fontes. Lenoir, Preteiselle e Ricordel (2016) utilizaram valores de 0,1 %, 0,2 % e 0,3 % de fibras de cânhamo, Bilba (2003) utilizou 1 % e 2 % de fibra proveniente da cana-de-açúcar. É importante salientar que um dos objetivos desse trabalho é avaliar as mudanças de propriedades em baixas concentrações de fibra, por esse motivo foram escolhidos os valores citados na tabela 3.

O processo de obtenção das fibras de celulose se deu de acordo com Moubarik, Grimi e Boussetta (2013). Esse processor foi escolhido por ser acessível, relativamente simples e ter demonstrado um resultado satisfatório na obtenção de fibras de celulose. O procedimento está representado no fluxograma da figura 6.

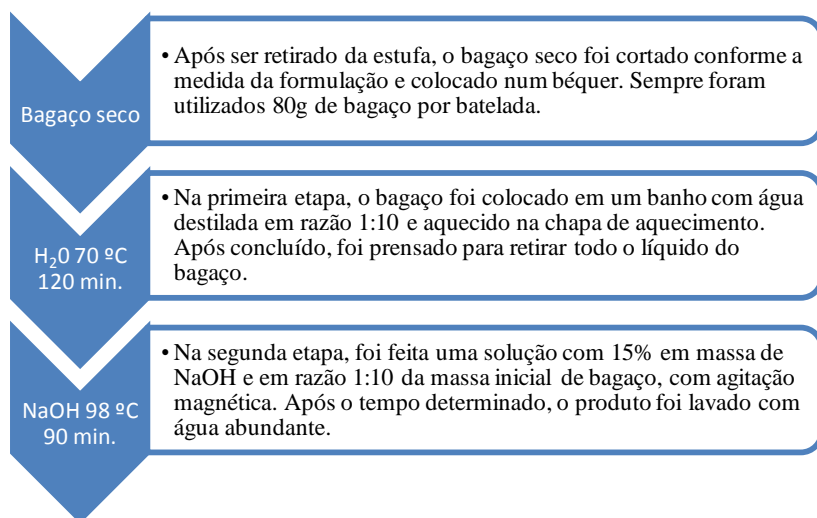


Figura 6 – Fluxograma de obtenção das fibras de celulose

Este processo tem como função solubilizar a hemicelulose na primeira etapa e a lignina na segunda etapa. Depois de concluído o processo, as fibras foram colocadas em 3 litros de água durante 24 h e lavadas, novamente, com água em abundância e mantidas em uma estufa durante 48 h a 30 °C com ventilação forçada. Após secas as fibras foram separadas manualmente, outros métodos como ar comprimido e agitação mecânica foram testados, porém não se mostraram eficientes.

Foi utilizado hidróxido de sódio Sigma-Aldrich em pérolas e dissolvido em água destilada produzida no próprio laboratório.

Depois de concluído o processo de obtenção das fibras, foram realizados ensaios de TGA e FTIR para comparação com o bagaço pré-tratamento. A figura 7 apresenta a fibra tratada após secagem.



Figura 7 - Aparência da fibra pronta para fabricação do compósito.

Fonte: Autor, 2016.

O rendimento do processo de remoção da lignina e da hemicelulose foi calculado do seguinte modo:

$$ppm (\%) = \left(\frac{m_{bi} - m_{bf}}{m_{bi}} \right) * 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

ppm = percentual de perda de massa

m_{bi} = massa inicial do bagaço (g)

m_{bf} = massa final do bagaço (g)

4.2 – TERMOGRAVIMETRIA (TG) E CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC)

Os ensaios de TG e DSC foram utilizados para observar se o tratamento de remoção da lignina e da hemicelulose foi eficiente além de permitir a observação das temperaturas de transição dos materiais.

O equipamento SDT Q 600 realiza os dois ensaios de modo simultâneo. Os parâmetros do ensaio foram 10 °C/min de taxa de aquecimento, e temperatura máxima de ensaio 700 °C utilizando gás nitrogênio e amostras de aproximadamente 10 mg.

4.3 - ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Assim como nos ensaios de TG e DSC, o ensaio de FTIR tem como função avaliar as alterações na fibra de celulose obtida da cana-de-açúcar. O equipamento utilizado foi um Shimadzu IRAffinity-1S.

Os ensaios de FTIR foram realizados com amostras de 1,5 mg misturadas a 100 mg de KBr na faixa de 4000-400 cm^{-1} com resolução de 2 cm^{-1} , 258 scans. A figura 8 apresenta o bagaço cortado e a mostra o material durante o processo de mercerização.



Figura 8 – Material cortado pré tratamento, Fonte: Autor, 2016



Figura 9 - Início e final do processo de obtenção das fibras. Fonte: Autor, 2016.

4.4 - FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO

Os corpos de prova para o ensaio de compressão foram fabricados de acordo com a norma NBR 7215:1996, os ensaios de flexão seguiram a norma NBR 12142: 2010. Para cada composição foram realizados ensaios após 3, 7 e 28 dias, utilizando três corpos de prova para compressão e três corpos de prova para flexão. Foi ainda realizado ensaio para determinação do índice de consistência normal, segundo a mesma norma.

Todo o processo foi feito em uma argamassadeira construída conforme a norma, respeitando os tempos e velocidades de mistura.

Inicialmente era adicionada a água, em seguida uma mistura de fibra (caso fosse uma das formulações em que ela estivesse presente) e cimento. Após o período indicado na norma, era adicionada a mistura

das areias. As areias utilizadas eram padrão IPT e o cimento o CP-II F 32 MPa da Itambé cimentos. A argamassa foi fabricada com uma relação água/cimento (w/c) de 0,48 e os corpos de prova de compressão possuíam 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura enquanto os de flexão eram prismas de 40 mm x 40 mm x 160 mm.

Inicialmente foram realizados ensaios de abatimento para todas as formulações. Esse ensaio é realizado medindo com o auxílio de um paquímetro uma massa conhecida de material, e respeitando a norma NBR 7215:1997, em duas direções ortogonais. O valor é a média de todas as medidas.

O material foi então colocado nos moldes conforme a norma e mantidos tampados durante 24 h, conforme mostrado na figura 10. As amostras foram então retiradas dos moldes e colocadas em banho normalizado.



Figura 10 - Corpos de prova logo após serem fabricados. Fonte: Autor, 2016.

48 h antes da realização dos ensaios, os corpos de prova para o ensaio de compressão eram retirados da água e capeados com argamassa. Depois eram mantidos por 24 h no ambiente para a cura do material, retornando para o banho durante as 24 h finais e sendo retirados apenas para a realização dos ensaios. Uma exceção foi feita aos

corpos de prova preparados para serem ensaiados com 72 h, onde 24 h após o capeamento eles foram rompidos sem retornar ao banho. Isso se deu devido ao fato de ser julgado mais importante mantê-los em água durante as 24 h iniciais do que durante as 24 h finais.

4.5 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA NORMAL (ICN)

A determinação do ICN foi realizada conforme a norma NBR 7215:1996 utilizando equipamento construído conforme a norma e tem como função avaliar a trabalhabilidade do material.

O método consiste, basicamente, de colocar o material logo após o preparo em um corpo de prova padrão e golpear uma quantidade de vezes estabelecida em norma e medir as duas diagonais com um paquímetro.

4.6 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Os ensaios mecânicos de compressão foram realizados nas datas pré-determinadas respeitando as tolerâncias de tempo. Foi realizado num equipamento EMIC SSH 200 com $0,25 \pm 0,05$ MPa/s e as resistências foram calculadas segundo a equação 4:

$$\sigma = \frac{F_m}{A} \quad \text{Eq.4}$$

Onde:

σ = Tensão máxima suportada (MPa)

F_m = Força máxima suportada durante o ensaio (N)

A = Área da seção transversal do corpo de prova (mm^2)

A resistência à compressão foi calculada individualmente para cada corpo de prova, sendo, então, calculada a média aritmética para cada formulação em cada um dos tempos de cura.

4.7 - ENSAIOS DE FLEXÃO

O ensaio de flexão foi realizado em uma Máquina de Ensaio Universal EMIC DL 10000 com velocidade de 1mm/min conforme

norma NBR 12142:2010. E os valores foram calculados segundo a equação 5:

$$\sigma_R = \frac{3 P L}{2 b h^2} \quad \text{Eq.5}$$

Onde:

σ_R = Resistência à Flexão (MPa)

P = Força no momento da ruptura (N)

L = Distância entre apoios (mm)

b = espessura do corpo de prova (mm)

h = altura do corpo de prova (mm)

A resistência à flexão foi calculada individualmente para cada corpo de prova, sendo, então, calculada a média aritmética para cada formulação em cada um dos tempos de cura. A figura 11 demonstra um ensaio em andamento.



Figura 11 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de flexão nos compósitos. Fonte: Autor, 2016

A resistência à flexão foi calculada individualmente para cada corpo de prova, sendo, então, calculada a média aritmética para cada formulação em cada um dos tempos de cura, o espaçamento utilizado foi de 100 mm.

4.8 - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade foi determinado pela Técnica da Excitação por Impulso onde um corpo de prova de tamanho e massa conhecidos sofre um leve impacto mecânico causando um som. Este som, ou resposta acústica, é composto pelas frequências naturais de vibração do corpo que são proporcionais aos módulos de elasticidade e sua amplitude decai de acordo com o amortecimento do material. O equipamento utilizado foi um Sonelastic da fabricante ATCP Engenharia Física.

Corpos de prova para esse ensaio foram produzidos conforme as medidas indicadas no manual do equipamento (06 mm x 12 mm x 48 mm) utilizando uma serra de precisão Isomet 1000.

Esse ensaio foi realizado apenas com amostras aos 28 dias, sendo três amostras de cada composição e tendo como resultado o valor médio. Foi calculado também o módulo de elasticidade específico que é a razão entre o módulo de elasticidade e a densidade aparente.

4.9 - DENSIDADE APARENTE

Para o ensaio de densidade aparente foram utilizadas as mesmas amostras utilizadas no ensaio de determinação do módulo de elasticidade e sendo realizado pelo método de imersão em água seguindo o princípio de Arquimedes. O procedimento foi efetuado em uma balança Schimadzu modelo AUY 220.

Inicialmente as peças foram impermeabilizadas com óleo fugante com 24 h de antecedência à medição da densidade. As peças foram pesadas e na sequência imersas individualmente em água. O próprio equipamento fornece o valor de densidade da amostra em g/cm^3 .

Esse ensaio foi realizado com duas amostras de 28 dias de cada composição sendo que o resultado para cada uma delas foi obtido duas vezes.

4.10 - DENSIDADE REAL

As fibras tratadas tiveram sua densidade real medida via Picnômetro Utrapyc 1200e do fabricante Quantachrome, apresentado na figura 12. Foi preparada uma amostra moída de fibra e peneirada em 35

mesh. O objetivo desse ensaio é comparar os resultados obtidos com os encontrados na literatura.



Figura 12 - Picnômetro utilizado para determinação da densidade real da fibra. Fonte: Autor, 2016.

A picnometria é uma técnica já bem conhecida onde uma câmara de volume conhecido recebe uma quantidade de material e a completa com outro produto químico, nesse caso o hélio. Sabendo o volume de hélio e o volume total, ele indica o volume da amostra. Foram realizados cinco ensaios e o resultado foi a média aritmética.

4.11 - MICROSCOPIA ÓPTICA E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Visando avaliar a interface matriz/reforço, foram realizados ensaios de microscopia tanto óptica quanto eletrônica de varredura.

O microscópio óptico utilizado foi um Olympus BX41M-LED e ampliações de 50 x e 100 x. E o microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10.

4.12 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para expressar os resultados foram utilizados alguns métodos estatísticos como ANOVA e DOE. Foram avaliados os efeitos individuais e combinados sobre a resistência à compressão e a resistência à flexão dos compósitos considerando relevantes os que possuem P-valor $< 0,05$. As análises foram feitas utilizando o Software Statistica.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO E DA FIBRA

5.1.1 – Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

O resultado comparativo do FTIR, mostrado na figura 13 demonstra, em geral, um deslocamento para a esquerda dos picos e aumento na intensidade de alguns.

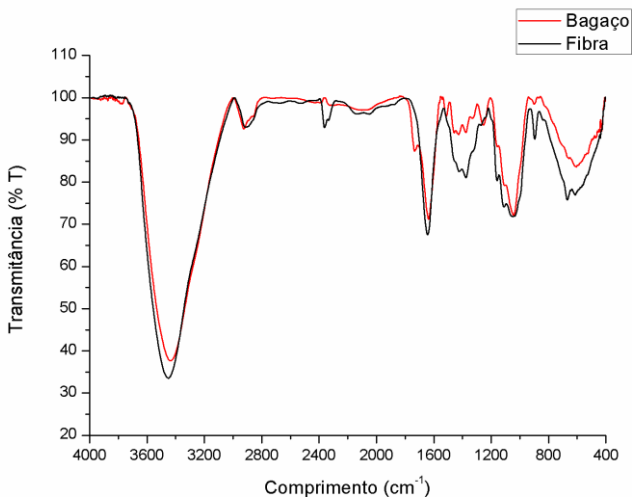


Figura 13 - Resultados dos ensaios de FTIR para amostra do bagaço e da fibra de celulose pós-tratamento. Fonte: Autor, 2016

Os valores característicos para a celulose, segundo Moubarik, Grimi e Boussetta(2013) e Liu et al. (2006) são: 3370, 2870, 1628, 1436, 1373, 1320, 1211, 1172, 1113, 1026 e 896 cm⁻¹. Houve o desaparecimento da banda a 1726 cm⁻¹. Em 1513 cm⁻¹ houve um aumento no pico em decorrência do aumento da quantidade relativa de ligações C-H tendo em vista que pelo processo de eliminação da lignina (que possui basicamente anéis aromáticos ligados a radicais) se tornam proeminentes as ligações da celulose.

A mudança de intensidade no pico a 3450 cm^{-1} é explicada pelo aumento na concentração das ligações de hidrogênio intra e intermoleculares (MOTAUNG e ANANDJIWALA, 2015).

Na amostra da fibra, podem ser evidenciados os seguintes picos (GURGEL, 2007; LIU et al. 2006):

- 3450 cm^{-1} : Estiramento O-H
- 2910 cm^{-1} : Estiramento C-H
- 1610 cm^{-1} : H_2O absorvida
- 1375 cm^{-1} , 1457 cm^{-1} e 1424 cm^{-1} : Deformação C-H₂
- 1157 cm^{-1} : Estiramento C-O-C
- 1111 cm^{-1} : Vibração do C-O-H
- 1044 cm^{-1} : Estiramento C-O
- 896 cm^{-1} : Estiramentos C-O-C, C-C-O e C-C-H
- 666 cm^{-1} : Deformação C-O-H

5.1.2 – Termogravimetria (TGA)

O resultado comparativo das termogravimetrias é apresentado na figura 14.

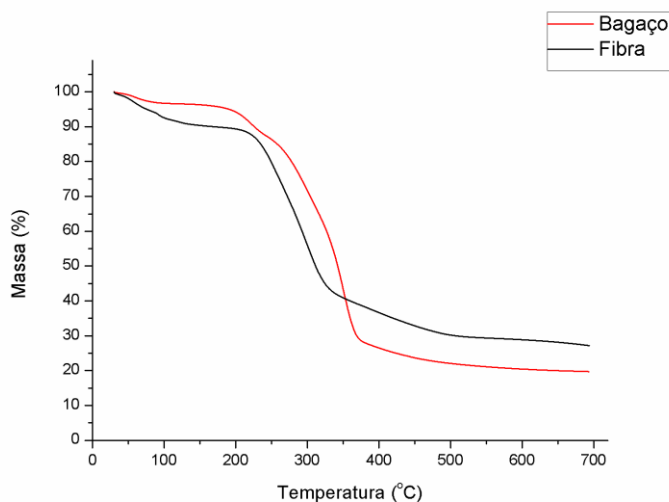


Figura 14 - Análise termogravimétrica do bagaço e da fibra de celulose pós-tratamento. Fonte: Autor, 2016.

A figura 15 apresenta os gráficos de derivada da termogravimetria.

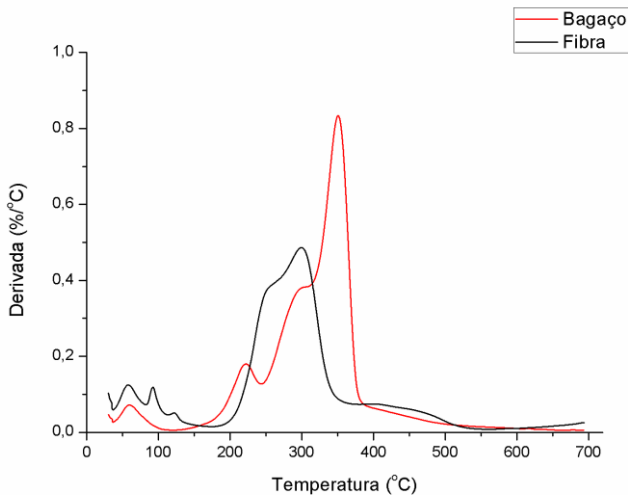


Figura 15 - Derivada da análise termogravimétrica do bagaço e da fibra de celulose pós-tratamento. Fonte: Autor, 2016.

O bagaço possui um pico inicial a 59 °C e a fibra a 58 °C relacionado com a perda da água por evaporação. Nesse ponto há um decréscimo de massa para 98,5 % no bagaço e 97 % na fibra. A fibra apresenta um segundo pico a 92,3 °C ainda em decorrência da eliminação da água. A 100 °C quando ocorre a estabilização da perda de água o bagaço está com 96,7 % da massa inicial e a fibra com 92,6 % da massa inicial.

O bagaço apresenta um pico a 220 °C temperatura próxima da qual se acentua a perda de massa da fibra, e apresentam duas etapas de decomposição, um primeiro ombro a 310 °C atribuído à despolimerização, desacetilação e desidratação da hemicelulose e desidratação e quebra de ligações α - e β -aril-aquil-éter da lignina. Um valor máximo em 350,6 °C é atribuído à decomposição da celulose, quebra de ligação C-C entre unidades estruturais de lignina, conduzindo a reações de descarbonilação e descarboxilação (GURGEL, 2007).

O tratamento com NaOH remove lignina e polioses. A fibra tratada apresenta um pico de decomposição a 299,5 °C. Essa diminuição pode ser atribuída à remoção da lignina que pirolisa a temperaturas mais altas que a celulose (GURGEL, 2007).

A 700 °C houve a conservação de 19,7 % da massa da amostra do bagaço e 27,2 % da massa da amostra da fibra de celulose.

As diferenças observadas nos resultados de FTIR e TG entre o presente trabalho e os obtidos por Gurgel (2007) e Motaung e Anandjiwala (2015), podem ser função da própria matéria-prima que por se tratar de um produto natural apresenta variações de propriedades e estrutura e, ainda, por diferença nas concentrações, tempo e temperatura do processo de mercerização da fibra de celulose.

5.1.3 - Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

O ensaio de DSC foi realizado como complemento ao ensaio de termogravimetria. O resultado pode ser observado na figura 16.

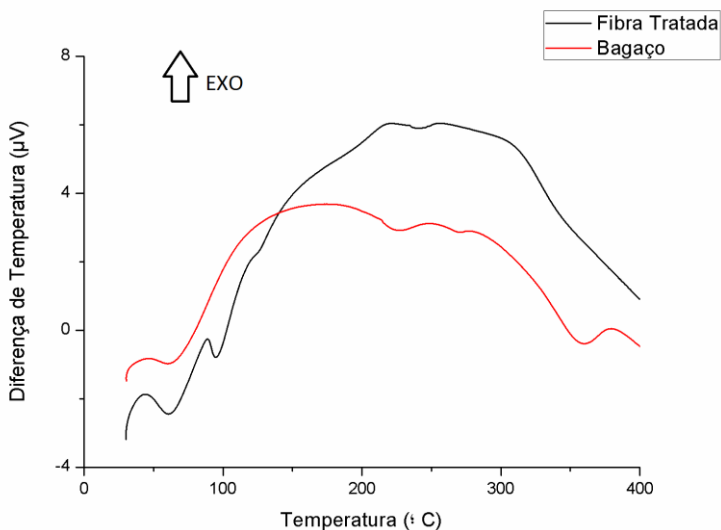


Figura 16 – Análise de DSC do bagaço e da fibra de celulose pós-tratamento. Fonte: Autor, 2016.

Inicialmente, se percebe uma série de processos endotérmicos até 100 °C ligados diretamente à evaporação da água ainda presente. Na faixa de 100 a 350 °C ocorrem processos exotérmicos no bagaço associados às rupturas das ligações enquanto na fibra apresentaram maior liberação de energia nessa mesma faixa, tendo os maiores valores entre 200 e 300 °C. A partir de 400 °C com a ruptura das ligações primárias, principalmente carbono-carbono ocorre a estabilização dos valores.

5.1.4 - Densidade Real da Fibra

A densidade da fibra foi medida via picnometria a hélio. Seu valor foi de $1,6885 \pm 0,0332 \text{ Mg m}^{-3}$. Os valores apresentados na literatura mostram como Ashby e Jones (2007) para uma fibra de celulose genérica o valor de $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$.

5.1.5 - Perda de massa

Após a produção das fibras e sua secagem, elas foram novamente pesadas e obteve-se uma perda de massa de 55 %.

5.2 – CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

5.2.1 - Índice de consistência normal

O índice de consistência normal foi avaliado em todas as composições e em todas as idades gerando seis valores para cada composição, duas por idade. Os resultados estão expressos na Tabela 5 e na Figura 17:

Código	Comprimento de Fibra (mm)	Quantidade de Fibra (%)	ICN (mm)
C0	0	0,000	160,23 ± 9,43
C1	20	0,250	148,47 ± 2,74
C2	20	0,500	135,45 ± 1,88
C3	25	0,375	137,95 ± 5,17
C4	30	0,250	139,48 ± 3,09
C5	30	0,500	130,22 ± 4,89

Tabela 5 - Índice de consistência normal para todas as formulações.

Fonte: Autor, 2016.

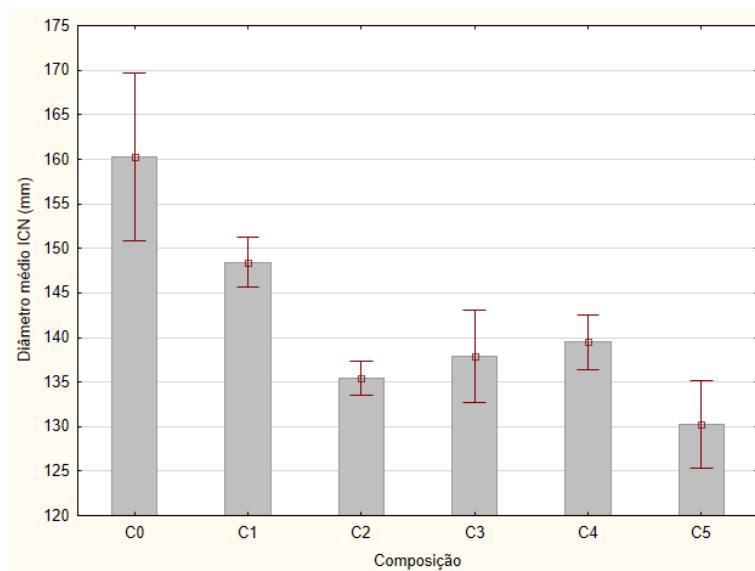


Figura 17 - Gráfico de barras relacionando o ICN com a composição. As linhas representam \pm o desvio padrão. Fonte: Autor, 2016.

Menores valores de espalhamento denotam a materiais com maior dificuldade para escoar. Todas as composições com fibra apresentaram valores menores do que a composição sem fibra. Isso se deve a dois fatos principais: (1) devido a sua estrutura química a fibra absorve grandes quantidades de água durante o processo de mistura da argamassa, o que dificulta o escoamento do material e (2) a própria fibra cria ligações fracas com o cimento, dificultando o escoamento do material. As formulações com fibra apresentaram, ainda, menor desvio padrão que da amostra de referência (C0).

Fica ainda evidente pela tabela 5 e pela figura 18 que as duas composições com 0,50 % de fibra (C2 e C5) foram as que apresentaram os menores valores de ICN.

5.2.2 – Resistência à Compressão

Os valores obtidos para os ensaios mecânicos de resistência à compressão são apresentados na tabela 6 e no gráfico da figura 18.

Resistência à Compressão (MPa)			
Código	3 dias	7 dias	28 dias
C0	17,13 ± 0,25	28,63 ± 2,00	32,57 ± 3,14
C1	14,99 ± 0,32	23,77 ± 1,50	23,28 ± 1,63
C2	11,89 ± 0,88	18,48 ± 0,71	22,05 ± 0,99
C3	13,16 ± 2,56	17,78 ± 0,83	23,45 ± 1,25
C4	13,70 ± 1,70	20,47 ± 1,61	25,50 ± 0,62
C5	11,65 ± 1,23	17,29 ± 0,50	20,50 ± 0,88

Tabela 6 - Valores de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de cada formulação com o respectivo desvio padrão. Fonte: Autor, 2016.

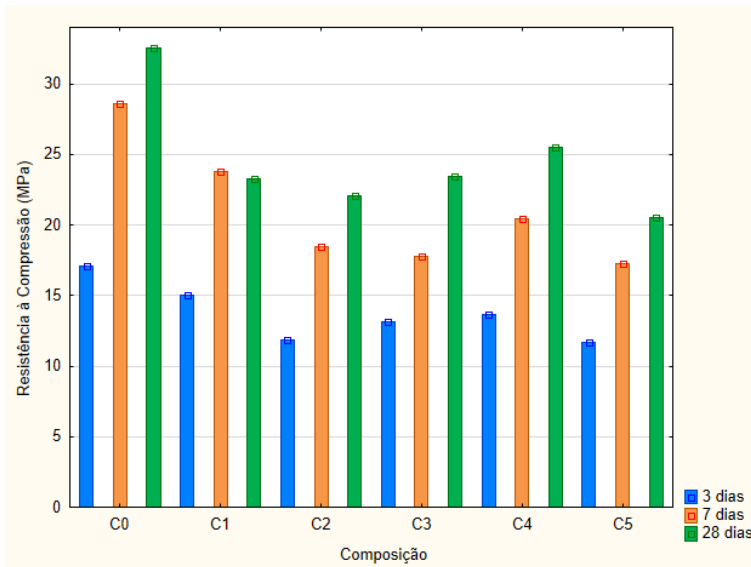


Figura 18 - Representação gráfica da resistência à compressão. Fonte: Autor, 2016.

Todas as amostras com adição de fibras apresentaram valores menores que o padrão. O fato da fibra de celulose ser altamente hidrofílica contribuiu para a geração de trincas internas no pois a água inicialmente disponível para hidratar o cimento durante os momentos iniciais de cura acabou sendo absorvida pela fibra.

A C1 apresentou valores maiores de resistência em 7 que em 28 dias, ao contrário do esperado, mesmo os valores de desvio padrão se apresentaram dentro do esperado e similares as outras amostras avaliadas. Tanto os valores em 3 quanto em 7 dias se mostraram superiores se comparados com os valores obtidos para outras amostras com fibras, algo que não ocorreu na amostra em 28 dias que teve desempenho similar às composições com fibras.

É importante avaliar os resultados das amostras em 28 dias pois representam os resultados finais dos corpos-de-prova. Inicialmente deve-se destacar o fato de que todas as amostras com fibra apresentarem valores de desvio padrão menores que o da referência (C0). Isso é extremamente desejável por apresentar menor variação de propriedades no material aumentando, assim, a confiabilidade.

Foram realizadas análises estatísticas para avaliar quais os fatores da fibra significativos no que diz respeito à resistência à compressão. A ANOVA, conforme tabela 7, demonstra que a única variável com $p < 0,05$, ou seja, a única que é significativa, é o percentual de fibra (com $p = 0,010092$) que pode ser visualizado no gráfico de Pareto da figura 19.

	SS	df	MS	F	P
Quantidade de Fibra	21,80905	1	21,80905	9,614272	0,010092
Comprimento da Fibra	0,04320	1	0,04320	0,019044	0,892734
1 * 2	6,19203	1	6,19203	2,729687	0,126727
Erro	24,95245	11	2,26840		
Total SS	52,99673	14			

Tabela 7 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão. Fonte: Autor, 2016.

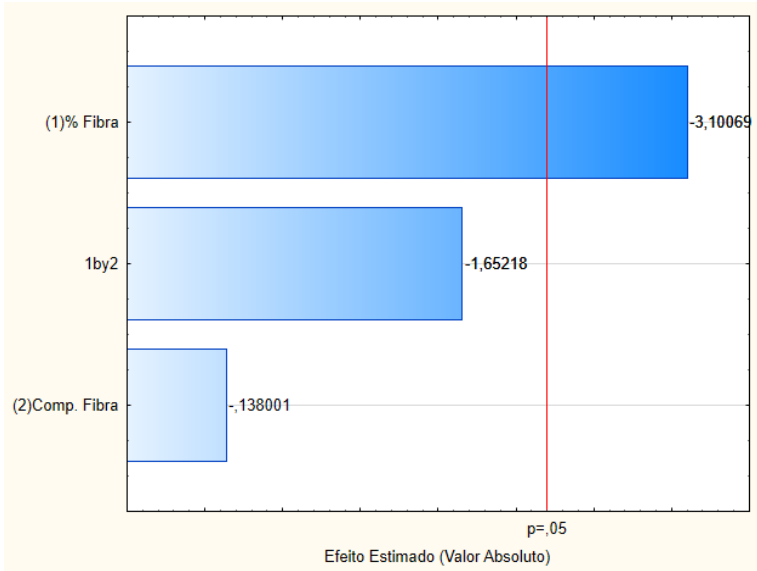


Figura 19 - Gráfico de Pareto para resistência à compressão para $p < 0,05$.
Fonte: Autor, 2016.

Para mostrar o efeito dos fatores sobre a resistência à compressão foram apresentados os resultados em forma de superfície de resposta e curvas de nível, figuras 19 e 20.

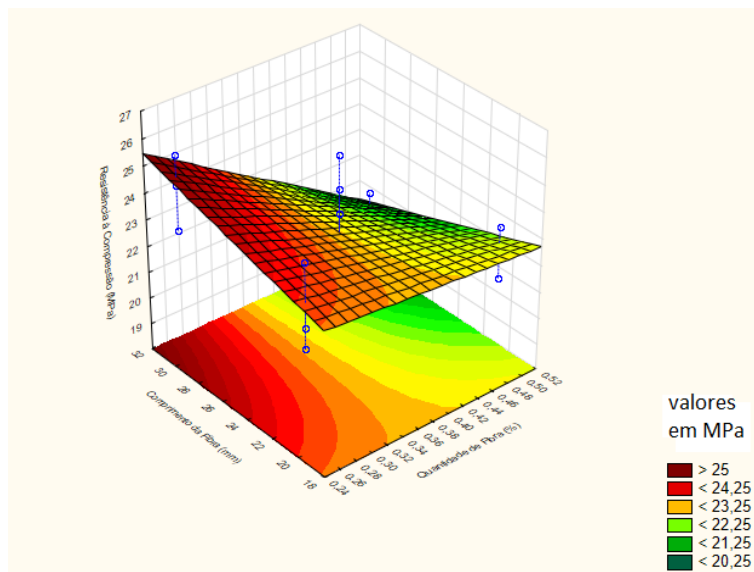


Figura 20 - Gráfico de superfície de resposta representando a relação entre comprimento de fibra, percentual de fibra e resistência à compressão. Fonte: Autor, 2016.

Pelo gráfico de superfície de resposta mostrado na figura 19, os maiores valores de resistência à compressão são obtidos para a combinação de maior comprimento de fibra com menor quantidade de fibra.

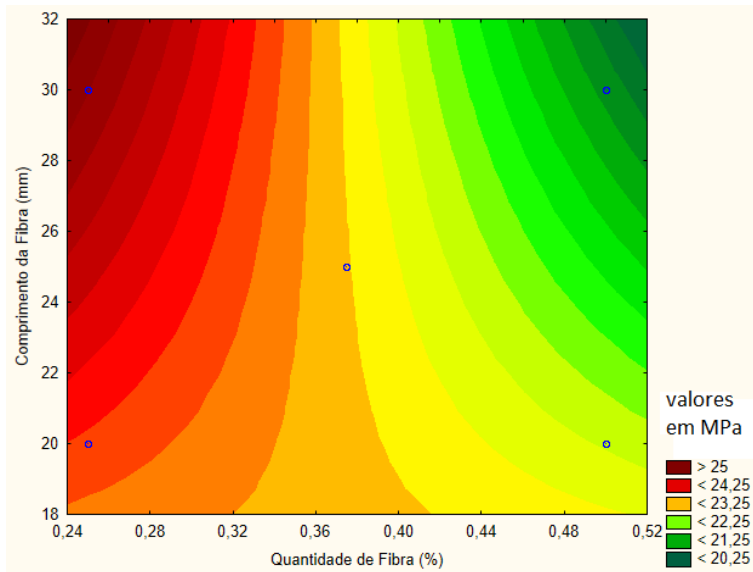


Figura 21 - Gráfico de curva de nível representando a relação entre comprimento de fibra, percentual de fibra e resistência à compressão.

Fonte: Autor, 2016.

Fica evidente que os maiores valores de resistência à compressão estão nos compósitos com 0,25% de fibra. As possíveis causas são (1) menor quantidade de fibra e, conseqüentemente, maior oferta de água para o cimento o que dificulta o surgimento de trincas durante a reação de endurecimento, (2) menor área superficial das fibras, sendo que a interface entre dois materiais é sempre uma região propensa à formação de trincas devido ao surgimento de tensões durante o período de cura da argamassa.

A composição que apresentou o maior valor médio de resistência à compressão foi a C4, com fibras de 30mm e 0,25% de fibra. Fibras mais longas atuam melhor como pontes entre os flancos de uma trinca e têm relação com o comprimento crítico de fibra, onde fibras mais compridas fornecem maior aumento de resistência, principalmente à tração.

5.2.3 - Resistência à Flexão

A determinação da resistência à flexão dos compósitos é o resultado mais importante deste trabalho, pois o resultado esperado da adição de fibras em uma matriz frágil é de aumentar, principalmente a resistência à tração. Considerando que um corpo submetido à flexão possui uma região com esforços trativos e outra com esforços compressivos, esperava-se um aumento nessa propriedade.

Os ensaios foram realizados conforme norma já citada neste trabalho e apresentaram os resultados apresentados na tabela 8 e na Figura 22.

Resistência à Flexão (MPa)			
Código	3 dias	7 dias	28 dias
C0	4,29 ± 0,44	6,19 ± 0,19	5,73 ± 1,14
C1	4,74 ± 0,25	6,17 ± 0,45	6,57 ± 0,32
C2	3,37 ± 0,33	5,10 ± 0,25	7,03 ± 0,11
C3	4,13 ± 0,38	6,00 ± 0,34	7,34 ± 0,23
C4	3,87 ± 0,14	5,77 ± 0,35	7,46 ± 0,36
C5	3,97 ± 0,28	5,40 ± 0,37	6,59 ± 0,66

Tabela 8 - Valores dos resultados dos ensaios de flexão aos 3, 7 e 28 dias de cada composição com o respectivo desvio padrão. Fonte: Autor, 2016.

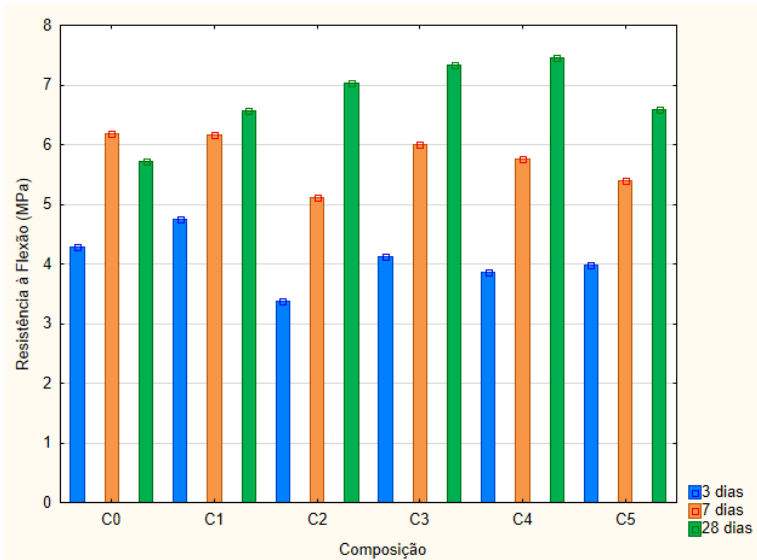


Figura 22 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios de flexão.
Fonte: Autor, 2016.

Inicialmente, se observa que o padrão (C0) apresentou maiores valores de resistência à flexão em 7 que em 28 dias. Uma possível causa é o ensaio em 28 dias apresentar um desvio padrão acima dos demais demonstrando alta variação nos resultados. As três amostras apresentaram valores de resistência à flexão de: 4,54; 6,81 e 5,83 MPa. A amostra de 4,54 MPa apresentou uma trinca inicial visível e ruptura de forma precoce. Considerando apenas as duas outras amostras, a média seria de 6,32 MPa, condizente com o esperado.

Cabe ainda destacar que todas as amostras com fibra apresentaram diminuição no desvio padrão e aumento na média da resistência à flexão. Isso é decorrência do aumento de resistência em função da presença da fibra.

Como já discutido neste trabalho, a principal característica da inserção de uma fibra de alta tenacidade à fratura e alta resistência à tração é atuar como uma ponte entre os lados de uma trinca em propagação. Essa ponte faz com que seja necessário um aumento da energia por unidade de área para fazer com que a trinca se propague, pois esse aumento provoca a extração ou ruptura da fibra. Sendo assim,

percebe-se que a fibra se mantém íntegra após 28 dias mesmo dentro de um meio alcalino agressivo como é o cimento pós-cura. Como as próprias fibras são tratadas em um meio alcalino para deslignificação, as reações esperadas ocorrem na etapa de mercerização da fibra.

Foram realizadas análises estatísticas para avaliar quais os fatores da fibra significativos no que diz respeito à resistência à flexão. A ANOVA, apresentada na tabela 9, demonstra que a única variável com $p < 0,05$ ou seja, a única que é significativa é a interação entre as variáveis ($p = 0,01783$), sendo que as duas variáveis individualmente não foram consideradas significantes, segundo o gráfico de Pareto da figura 23.

	SS	Df	MS	F	p
Quantidade de Fibra	0,130283	1	0,130283	0,760056	0,401939
Comprimento da Fibra	0,151875	1	0,151875	0,886019	0,366771
1 * 2	1,326675	1	1,326675	7,739653	0,017839
Erro	1,885540	11	0,171413		
Total SS	3,494373	14			

Tabela 9 – ANOVA dos resultados de resistência à flexão. Fonte: Autor, 2016.

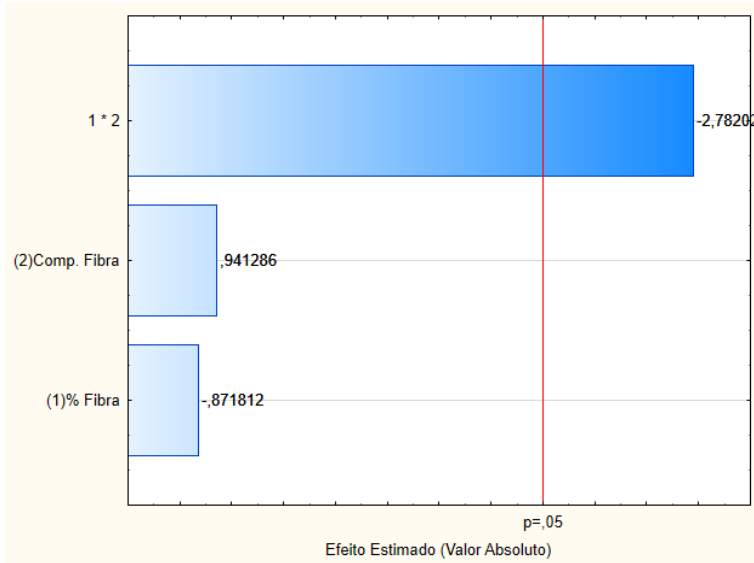


Figura 23 - Gráfico de Pareto para resistência à flexão para $p < 0,05$.

Fonte: Autor, 2016.

Para mostrar o efeito dos fatores de estudo sobre a resistência à flexão das amostras os resultados foram grafados como superfície de resposta (3D) curvas de nível (2D), figuras 24 e 25.

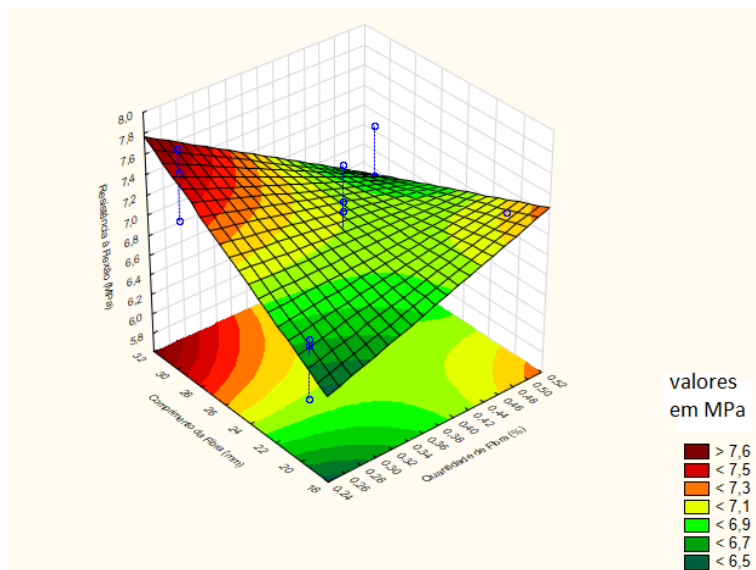


Figura 24 - Gráfico de superfície de resposta representando a relação entre comprimento de fibra, percentual de fibra e resistência à flexão.

Fonte: Autor, 2016.

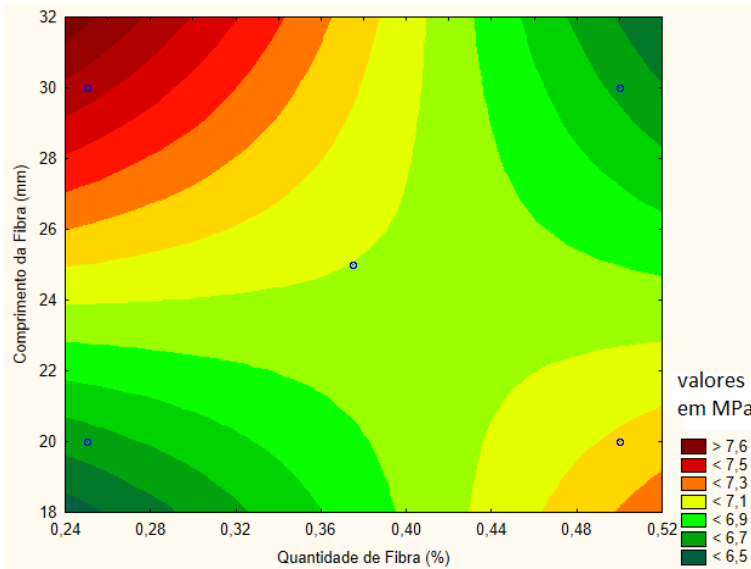


Figura 25 - Gráfico de curva de nível representando a relação entre comprimento de fibra, percentual de fibra e resistência à flexão. Fonte: Autor, 2016.

A concentração que apresentou maior valor médio de resistência à flexão foi a composição C4 com fibras de 30 mm e 0,25%. Porém as composições C2 e C3, ou seja, o ponto médio e o outro extremo (20 mm e 0,50 %) também apresentaram valores altos, demonstrando o que a ANOVA indicou da significância da interação entre as duas propriedades avaliadas. Coincidentemente, tanto nos resultados dos ensaios de flexão e compressão a composição C4 foi a que apresentou valores mais altos.

5.2.4 - Microscopia Óptica

Foram realizadas microscopias de diversas amostras procurando identificar locais onde a interface fibra/matriz estivesse evidente a fim de evidenciar a interação entre elas e avaliar se houve uma real união. Todas as microscopias ópticas foram realizadas em amostras de 28 dias.

Além disso, esse ensaio também serviu para determinar o diâmetro médio das fibras obtidas e compará-lo com o utilizado no cálculo de comprimento crítico da fibra, que foi encontrado na literatura. As imagens obtidas são apresentadas nas figuras 26, 27 e 28.

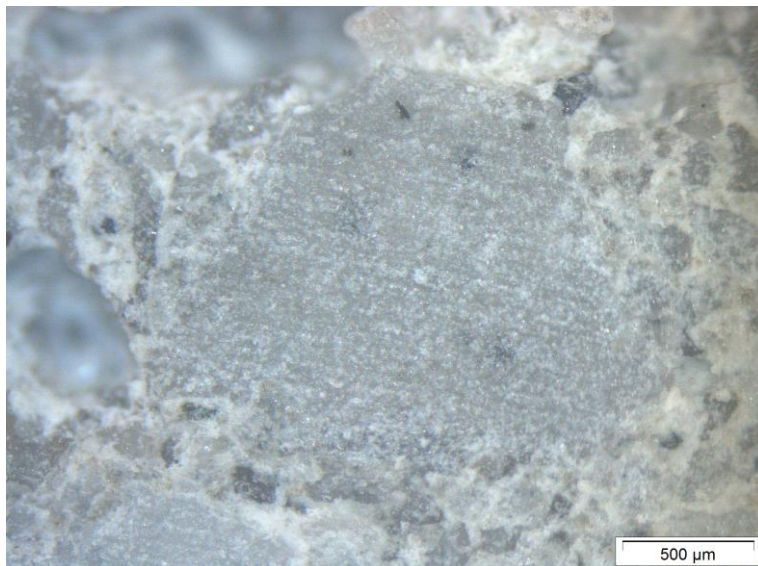


Figura 26 - Microscopias ópticas da matriz de cimento. Fonte: Autor, 2016.



Figura 27 - Microscopias ópticas apresentando uma fibra. Fonte: Autor, 2016.



Figura 28 - Microscopias ópticas de amostras dos compósitos. Fonte: Autor, 2016.

Inicialmente, na figura 26, tem-se uma amostra da C0, ou seja, sem fibras, apenas para demonstrar a microestrutura formada pelo processo de obtenção da argamassa.

A figura 27 mostra uma fibra no sentido paralelo ao compósito. Pode-se observar que não há espaços vazios aparentes e que existe uma fina camada mais clara ao redor da fibra. Essa camada se deve ao fato de que quando preparada a argamassa, a fibra era colocada num primeiro estágio com água e cimento e devido à polaridade dos três criava-se uma reação inicial presente no produto final. Ainda pode-se destacar que, mesmo após o processo de preparo e o processo de cura, a fibra se mantém com aparência similar à observada no período pós mercerização do bagaço, evidenciando que se trata de um processo recomendado para esse meio.

Na figura 28, tem-se uma fibra que foi cortada durante o processo de preparação da amostra, onde uma região rica em fibras está evidente. Essa figura serve também para destacar a dificuldade em uma boa distribuição da fibra no compósito pois a natureza da fibra e o modo de produção dos compósitos além de fatores como o comprimento da

fibra para o tamanho do corpo de prova dificultam uma melhor homogeneidade no material.

5.2.5 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foram realizadas análises de MEV para visualizar com maior clareza a interface fibra/cimento. A microscopia óptica deu indícios de uma boa interface entre reforço e matriz, porém só o MEV pode exibir com clareza os resultados necessários. Os locais indicados com seta são onde se encontram as fibras dispersas. O resultado está demonstrado nas imagens 29, 30, 31, 32, 33 e 34.

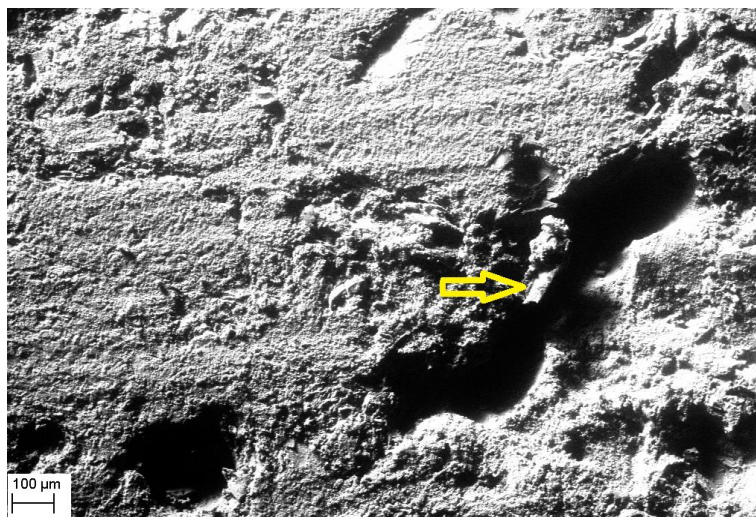


Figura 29 – Microscopia eletrônica de varredura, observa-se uma fibra.

Fonte: Autor, 2016

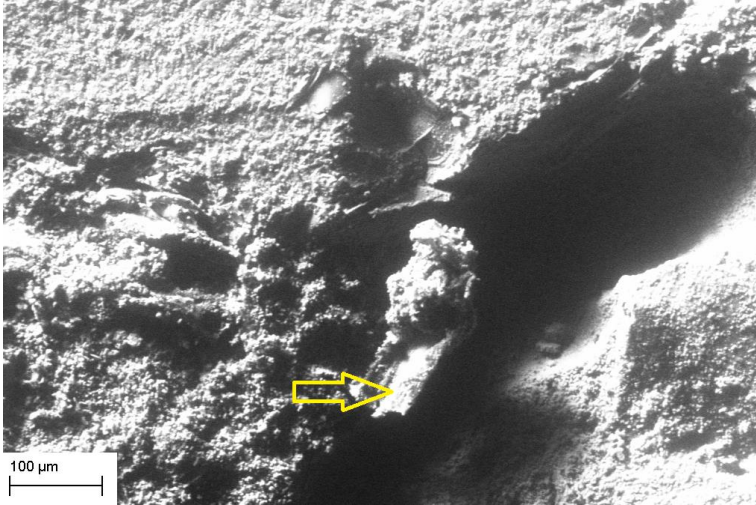


Figura 30 – Microscopia eletrônica de varredura aproximada da figura 29. Fonte: Autor, 2016

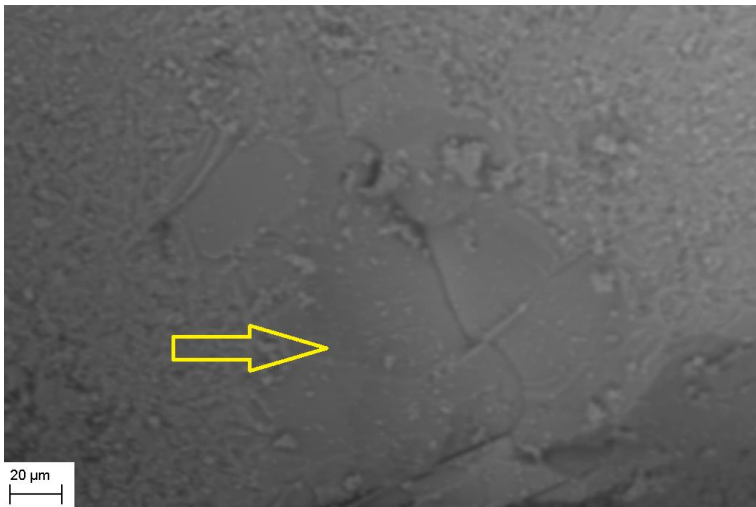


Figura 31 – Microscopia eletrônica de varredura de uma porção de material com uma fibra na transversal. Fonte: Autor, 2016

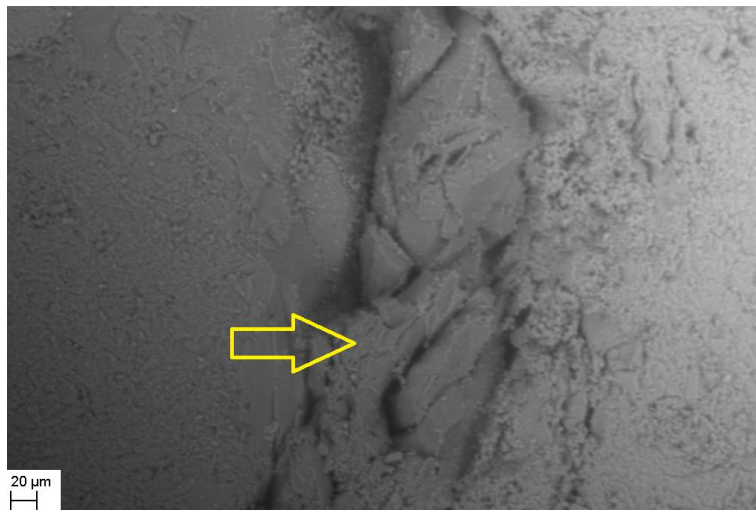


Figura 32 – Microscopia eletrônica de varredura indicando região rica em fibra. Fonte: Autor, 2016

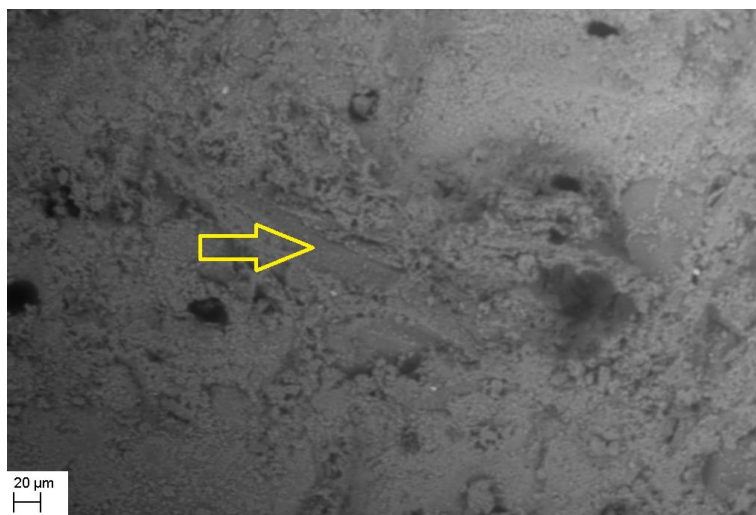


Figura 33 – Microscopia eletrônica de varredura. Fonte: Autor, 2016

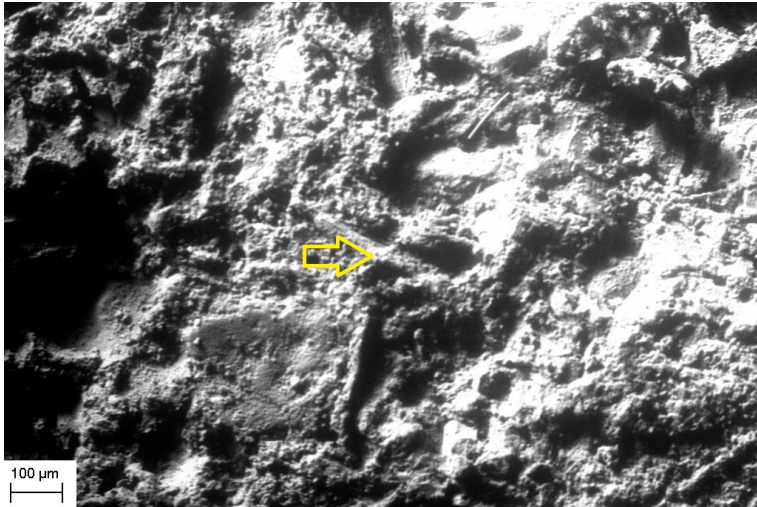


Figura 34 – Microscopia eletrônica de varredura de região com fibra.
Fonte: Autor, 2016

As Figuras 29 e 30 representam a mesma área com aumentos diferentes. O vazio formado pode ser decorrente de uma partícula de agregado fino que se desprende durante a preparação da amostra. Nelas pode se ver claramente uma fibra saindo da matriz, indicando que ocorre o arrancamento da fibra antes de ocorrer a ruptura dela por esforço mecânico, condição essa desejável em um bom compósito e função das ligações químicas formadas e do tamanho da fibra.

A Figura 31 representa uma fibra cortada na transversal. O que se observa nessa imagem é a não presença de vazios na interface fibra/cimento sendo mesmo difícil de observar onde se inicia uma e se finda a outra.

Na Figura 32 mostra uma fibra no sentido da matriz. E as Figuras 33 e 34 mostram a mesma região com modos de captura diferente, sendo elétrons retro espalhados e elétrons secundários respectivamente, destacando a mesma fibra em ambas.

Após avaliar os MEVs é evidente que está havendo uma boa interface entre matriz e reforço levando a crer que se trata de uma combinação com perspectivas de aplicação em larga escala.

5.2.6 - Densidade Aparente, Módulo de Elasticidade, Parâmetro de eficiência da fibra e Módulo de Elasticidade Específico

A tabela 10 apresenta os valores de densidade, Módulo de Elasticidade, parâmetro de eficiência da fibra e Módulo de Elasticidade Específico dos compósitos.

Código	Densidade (Mg m⁻³)	Módulo De Elasticidade (GPa)	Fator K	E/p (KN m g⁻¹)
C0	2,038 ± 0,046	13,55 ± 0,39		6,65
C1	2,015 ± 0,004	22,96 ± 1,33	0,383	11,40
C2	2,040 ± 0,031	22,62 ± 0,82	0,377	11,09
C3	2,012 ± 0,008	20,61 ± 0,71	0,344	10,24
C4	2,019 ± 0,007	22,68 ± 1,77	0,379	11,23
C5	2,011 ± 0,015	22,75 ± 0,89	0,380	11,31

Tabela 10 - Valores obtidos de Densidade Aparente e Módulo De Elasticidade e valores calculados do Parâmetro de Eficiência da Fibra e Módulo de Elasticidade Específico. Fonte: Autor, 2016.

Inicialmente observa-se uma pequena variação de densidade entre as amostras. Isso decorre de (1) a adição de fibra ser muito baixa na matriz, (2) a densidade da fibra não possuir grande diferença em relação à densidade da matriz e (3) as microscopias mostraram uma excelente interface o que faz com que não ocorram vazios ao redor da fibra que fariam a densidade aparente diminuir.

Diferentemente da densidade aparente, o módulo de elasticidade apresentou uma enorme mudança. Todas as composições com fibra apresentaram valores próximos enquanto a composição C0 apresentou um valor condizente com o da argamassa. Esse aumento na rigidez torna o material propício para toda uma nova gama de aplicações, uma que se pode destacar é como matéria-prima para telhas de fibrocimento, utilizando a fibra de celulose em substituição ao amianto. Cabe ressaltar que devido ao modo de orientação das fibras na matriz a melhora das propriedades ficou em 20 % do máximo possível, que necessitaria todas as fibras paralelas.

O fator K (Parâmetro de eficiência da fibra) foi calculado segundo a equação. Callister e Rethwish (2013) indicam que valores

comuns são de 0,1 a 0,6. Os valores encontrados ficaram acima da metade dessa escala indicando que a adesão entre fibra e matriz é satisfatória.

Como as densidades foram todas similares o módulo de elasticidade específico apresentou grande semelhança com os resultados obtidos de módulo de elasticidade.

6 – CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos experimentalmente e por meio das discussões apresentadas, pode-se concluir que:

- Avaliando individualmente o processo de obtenção da fibra, e analisando via FTIR, DSC e TGA mostrou-se que houve uma alteração nos teores de lignina e hemicelulose, requisito para aumentar a resistência da fibra no meio alcalino.

- Para a resistência à compressão apenas a quantidade de fibra foi considerada de modo estatístico, como significativa e funcionando do modo inverso, ou seja, menores teores de fibras apresentaram maior resistência à compressão.

- Entre as variáveis avaliadas na resistência à flexão, a única que se mostrou significativa foi o comprimento de fibra e a quantidade de fibra quando trabalhando juntas. Individualmente nenhuma foi considerada significativa.

- Os fatores módulo de elasticidade, densidade aparente e parâmetro de eficiência da fibra todas as amostras contendo fibra apresentaram valores próximos. O módulo de elasticidade, característica fundamental para a utilização de compósitos, apresentou substancial aumento em relação à amostra padrão.

- Todos esses fatores são decorrentes da boa interação entre fibra e reforço observada na microscopia óptica e na microscopia eletrônica de varredura.

- A composição indicada para trabalhos futuros, por apresentar maiores valores médios de resistência à compressão e resistência à flexão foi a C4.

7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar tratamentos com menores teores de NaOH.
- Avaliar a resistência à flexão e à compressão em maiores períodos (365 dias).
 - Estudar a possibilidade de orientar as fibras em um único sentido.
 - Avaliar a decomposição da fibra no meio alcalino do cimento.

8 - REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12142:2010. **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** 2010.
- ABNT NBR 7215:1997. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** 1997.
- AGOPYAN V, et al.. **Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview.** Cement & Concrete Composites 27 (2005) 527–536.
- AKADIRI PO, OLOMOLAIYE PO, CHINYIO EA. **Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects.** Automation in Construction 30 (2013) 113–125.
- AKADIRI PO. **Understanding barriers affecting the selection of sustainable materials in building projects.** Journal of Building Engineering 4 (2015) 86–93.
- ALMEIDA RS, et al.. **Avaliação da resistência ao cisalhamento em argamassas à base de cimento.** Iniciação Científica CESUMAR - jan./jun. 2013, v. 15, n. 1, p. 5-11 - ISSN 1518-1243.
- ANDRADE MF, COLODETTE JL. **Dissolving pulp production from sugar cane bagasse.** Industrial Crops and Products 52 (2014) 58–64.
- ARDANUY M, CLARAMUNT J, TOLEDO FILHO RD. **Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research.** Construction and Building Materials 79 (2015) 115–128.
- ASHBY MF, JONES DRH. **Engenharia de Materiais.** Rio De Janeiro: Elsevier, 2007.
- BILBA K, ARSENE M-A, OUENSANGA A. **Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite.** Cement & Concrete Composites 25 (2003) 91–96.
- CALLISTER JR. WD, RETHWISCH DG. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 8ª Edição. Rio De Janeiro: LTC, 2013.

CANDIDO VS. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar.** Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia. 2014.

CHEUNG H, et al.. **Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications.** Composites: Part B 40 (2009) 655–663.

COLOMBO M, et al.. **Fibre reinforced mortar application for out-of-plane strengthening of schist walls.** Construction and Building Materials 121 (2016) 185–197.

CONAB – Companhia Nacional do Abastecimento. **Cana-de-açúcar – Brasil** - série histórica de área plantada. 2016.

CORRADINI RM. **Adição de fibras de cana-de-açúcar tratadas com resina fenólica em matriz cimentícia.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de São João Del-Rei, 2014.

COSTA SM, et al.. **Use of sugar cane straw as a source of cellulose for textile fiber production.** Industrial Crops and Products 42 (2013) 189–194.

DANIEL I. **Failure of Composite Materials under Multi-axial Static and Dynamic Loading.** Procedia Engineering 88 (2014) 10–17.

DICKER MPM, et al.. **Green composites: A review of material attributes and complementary applications.** Composites: Part A 56 (2014) 280–289.

EBNESEJAAD S. **Handbook of biopolymers and biodegradable plastics.** United States: Elsevier, 2013.

FARUK O, et al.. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010.** Progress in Polymer Science 37 (2012) 1552–1596.

FLORES L, CASTRO-LACOURTE D. **Optimization model for sustainable materials selection using objective and subjective factors.** Materials and Design 46 (2013) 310–321.

FRATERNALI F, et al.. **Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete.** Composite Structures 93 (2011) 2368–2374.

FRATERNALI F, SPADEA S. BERARDI VP. **Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes.** Construction and Building Materials 61 (2014) 293–302.

FRIGIONE M. **Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete.** Waste Management 30 (2010) 1101 –1106.

GASSER B. **About composite materials and their use in bone surgery.** Injury, Int. J. Care Injured 31 (2000) S-D48-53.

GOODMAN JE, et al.. **Electricians' chrysotile asbestos exposure from electrical products and risks of mesothelioma and lung cancer.** Regulatory Toxicology and Pharmacology 68 (2014) 8–15.

GURGEL LVA. **Mercerização e modificação química de celulose e bagaço de cana-de-açúcar com anidrido succínico e trietilenotetramina: Preparação de novo materiais quelantes para a adsorção de Pb (II), Cd (II), Cr (VI) e Cu (II).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto. 2007.

HOI LWS, MARTINCIGH BS. **Sugar cane plant fibres: Separation and characterisation.** Industrial Crops and Products 47 (2013) 1–12.

HOSSAIN MK, et al.,. **Comparative mechanical and thermal study of chemically treated and untreated single sugarcane fiber bundle.** Industrial Crops and Products 58 (2014) 78–90.

JAWAID M, KHALIL HPSA. **Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review.** Carbohydrate Polymers 86 (2011) 1–18.

KIM DJ, NAAMAE AE, EL-TAWIL S. **Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites.** Cement & Concrete Composites 30 (2008) 917–928.

KIM SB, et al.. **Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete.** Cement & Concrete Composites 32 (2010) 232–240.

KLEMM D, et al.. **Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material.** Angew. Chem . Int. Ed. 44 (2005) 3358 – 3393.

LENOIR T, PRETESEILLE M, RICORDEL S. **Contribution of the fiber reinforcement on the fatigue behavior of two cement-modified soils.** International Journal of Fatigue 93 (2016) 71–81.

LEPECH MD, LI VC. **Water permeability of engineered cementitious composites.** Cement & Concrete Composites 31 (2009) 744–753.

LI VC E MAALEJ M. **Toughening in Cement Based Composites. Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites.** Cement & Concrete Composites 18 (1996) 239-249.

LI VC, LEUNG C. **Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites.** J. Eng Mech, 118 (1992), 2246-2264.

LINDAHL P, et al.. **Strategic sustainability considerations in materials management.** Journal of Cleaner Production 64 (2014) 98-103.

LIU CF et al. **Isolation and Characterization of Cellulose Obtained from Ultrasonic Irradiated Sugarcane Bagasse.** J. Agric. Food Chem. 54 (2006) 5742–5748.

LOH YR, et al.. **Sugarcane bagasse—The future composite material: A literature review.** Resources, Conservation and Recycling 75 (2013) 14–22.

MENDES FM, et al.. **Topochemical characterization of sugar cane pretreated with alkaline sulfite.** Industrial Crops and Products 69 (2015) 60–67.

MESSAN A, IENNY P, NECTOUX D. **Free and restrained early-age shrinkage of mortar: Influence of glass fiber, cellulose ether and**

EVA (ethylene-vinyl acetate). Cement & Concrete Composites 33 (2011) 402–410.

MOTAUNG TE, ANANDJIWALA RD. **Effect of alkali and acid treatment on thermal degradation kinetics of sugar cane bagasse.** Industrial Crops and Products 74 (2015) 472–477.

MOUBARIK A, GRIMI N, BOUSSETTA N. **Structural and thermal characterization of Moroccan sugar cane bagasse cellulose fibers and their applications as a reinforcing agent in low density polyethylene.** Composites: Part B 52 (2013) 233–238.

NEVÁREZ LM, et al.. **Biopolymers-based nanocomposites: Membranes from propionated lignin and cellulose for water purification.** Carbohydrate Polymers 86 (2011) 732–741.

PARIS JM, et al.. **A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete.** Journal of Cleaner Production 121 (2016) 1-18.

PELISSER F, et al.. **Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking.** Construction and Building Materials 24 (2010) 2171 –2176.

RAHMANI E, et al.. **On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles.** Construction and Building Materials 47 (2013) 1302–1308.

RUDIN A, CHOI P. **Ciência e Engenharia de Polímeros.** 3ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SATYANARAYANA KG, GUIMARÃES JL, WYPYCH F. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications.** Composites: Part A 38 (2007) 1694–1709.

SILVA AC. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibra de celulose.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Civil, 2002.

SILVA DA, et al.. **Degradation of recycled PET fibers in Portland cementbased materials.** Cement and Concrete Research 35 (2005) 1741 – 1746.

SILVA RV, BRITO J E DHIR RK. **Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials 83 (2015) 108–118.

TALREJA R. **Assessment of the fundamentals of failure theories for composite materials.** Composites Science and Technology 105 (2014) 190– 201.

TIAN H, ZHANG YX. **The influence of bagasse fibre and fly ash on the long-term properties of green cementitious composites.** Construction and Building Materials 111 (2016) 237–250.

TONOLI GHD, et al.. **Cellulose modified fibres in cement based composites.** Composites: Part A 40 (2009) 2046–2053.

TREVISIO A, et al.. **Damping in composite materials: Properties and models.** Composites Part B 78 (2015) 144-152.

VAN DER MAAREL JRC. **Introduction to Biopolymer Physics.** Singapore: World Scientific Publishing Co., 2008.

WANG XR, et al.. **Cancer mortality among Chinese chrysotile asbestos textile workers.** Lung Cancer 75 (2012) 151 –155.

WEI J, MEYER C. **Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites.** Cement and Concrete Research 73 (2015) 1–16.

YANG E, LI VC. **Numerical study on steady-state cracking of composites.** Composites Science and Technology 67 (2007) 151 –156.

ZHANG J, LI VC. **Effect of inclination angle on fiber rupture load in fiber reinforced cementitious composites.** Composites Science and Technology 62 (2002) 775–781.

ZHOU J, ET AL.. Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence. *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 342–348.