

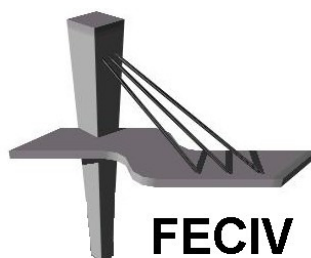
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 624

**ESTUDO DE PAINÉIS SANDUÍCHES DE
POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRAS
VEGETAIS PARA APLICAÇÃO COMO FORRO**

MONISE RAMOS DA SILVA FERREIRA

UBERLÂNDIA, 28 DE FEVEREIRO DE 2013



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Monise Ramos da Silva Ferreira

ESTUDO DE PAINÉIS SANDUÍCHES DE POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRAS VEGETAIS PARA APLICAÇÃO COMO FORRO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof. Dra. Leila A. de Castro Motta

Coorientador: Prof. Dr. Jesiel Cunha

Uberlândia, 28 de fevereiro de 2013



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 109/2013

CANDIDATA: Monise Ramos da Silva Ferreira

ORIENTADORA: Prof.^a Dr.^a Leila Aparecida de Castro Motta

TÍTULO: "Estudo de painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras vegetais para aplicação como forro"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

DATA DA DEFESA: 28 de fevereiro de 2013

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 14h 40min - 17h 50min

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

☒ APROVADA

☐ REPROVADA

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professora Orientadora: **Prof.^a Dr.^a Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima - UEFS**

Membro: **Prof. Dr. Turibio José da Silva – FECIV/UFU**

Uberlândia, 28 de FEVEREIRO de 2013.

*Ao meu melhor amigo, companheiro e marido, Eduardo,
pelo carinho e compreensão, e à minha mãe Maria de
Fátima pela força e otimismo de viver.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela constante inspiração durante a realização deste trabalho e pela benção de acreditar no poder do ser humano e de que somos capazes de tudo na vida.

A minha querida orientadora professora Leila Aparecida de Castro Motta por ser uma referência em minha vida. Obrigada pelas ideias, paciência e dedicação no desenvolvimento deste trabalho. Ao meu coorientador professor Jesiel Cunha, pelas ideias e assistência, que contribuíram de forma positiva no desenvolvimento desta dissertação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil e aos técnicos de laboratório, pelos ensinamentos e subsídios tão necessários para o desenvolvimento deste trabalho. As alunas de iniciação científica, pela ajuda sempre que requerida.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa, à FAPEMIG e CAPES, pelo apoio financeiro. Ao Laboratório de Construções Rurais e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, pela caracterização das fibras, e ao Laboratório Multiuso de Microscopia da Faculdade de Engenharia Química, pelas micrografias eletrônicas de varredura (MEV) usadas neste trabalho.

A minha mãe Maria de Fátima, minha avó Dirce e meu irmão Ivan, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim, mesmo à distância. Ao meu marido Eduardo, que é minha fortaleza e minha inspiração de todos os dias. Aos meus amigos Ana Clara, Thiago Ribeiro, Thiago Omena, Paula, Sheila, Lauren, Angela, Benício, Mohammed, Thaís e Isabel, pela ajuda, pelo tempo de convivência, experiência, apoio, provas e alegrias proporcionadas durante esta jornada.

*A diferença entre o possível e o
impossível está na vontade humana.*

Louis Pasteur

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de matriz e reforço de um material compósito.....	19
Figura 2 – Classificação dos compósitos.....	21
Figura 3 – Representação esquemática de uma molécula de poliéster insaturado ortoftálico .	25
Figura 4 – Classificação da orientação das fibras de reforço	27
Figura 5 – Estrutura celular da fibra vegetal	30
Figura 6 – Planta de rami.....	32
Figura 7 – Corte transversal da estrutura do caule do rami	33
Figura 8 – Processo de beneficiamento do rami.....	34
Figura 9 – Bucha vegetal	36
Figura 10 – Estruturas de painéis sanduíches.....	39
Figura 11 – Tipos de configuração de faces do painel sanduíche	42
Figura 12 – Materiais de núcleos homogêneos e estruturados	44
Figura 13 – Modelos de núcleos corrugados	45
Figura 14 – Modelos de núcleos colmeias	45
Figura 15 – Bucha vegetal	54
Figura 16 – Composições do rami.....	54
Figura 17 – Poliestireno expandido	55
Figura 18 – Fibras de rami alinhadas.....	56
Figura 19 – Tecido bidirecional de rami prensada	56
Figura 20 – Buchas preparadas para reforço dos compósitos	57
Figura 21 – Buchas usadas para o núcleo.....	57
Figura 22 – Fôrma metálica usada para preparação dos compósitos	58
Figura 23 – Produção dos compósitos.....	59
Figura 24 – Prensagem do compósito	60
Figura 25 – Fluxograma de produção dos compósitos	61
Figura 26 – Placas dos compósitos.....	62
Figura 27 – Produção do núcleo de bucha vegetal	63
Figura 28 – Painéis sanduíches.....	64
Figura 29 – Corpos de prova para a determinação da massa específica da resina de poliéster	64
Figura 30 – Corpo de prova usado no ensaio de tração.....	65
Figura 31 – Corpos de prova dos compósitos	65
Figura 32 – Ensaio de tração dos compósitos.....	66
Figura 33 – Ensaio de compressão dos núcleos	67
Figura 34 – Corpos de prova dos painéis sanduíches.....	68
Figura 35 – Configuração padrão de ensaio de flexão em 4 pontos.....	68
Figura 36 – Ensaio à flexão dos painéis sanduíches.....	69
Figura 37 – Elementos usados na modelagem dos painéis no ANSYS®	70
Figura 38 – Detalhes dos painéis sanduíches simulados gerado pelo ANSYS®	76
Figura 39 – Modelo de painel gerado no ANSYS® com as condições de carregamento e apoio	77
Figura 40 – Modelos do painel gerado pelo ANSYS® com condições de apoio e de carregamento	78

Figura 41 – Corpos de prova ensaiados à tração dos compósitos de fibras alinhadas de rami	82
Figura 42 – Propriedades mecânicas dos compósitos de fibras alinhadas de rami	82
Figura 43 – Corpos de prova ensaiados à tração dos compósitos de tecido de rami.....	84
Figura 44 – Propriedades mecânicas dos compósitos de tecido bidirecional de rami.....	85
Figura 45 – Corpos de prova ensaiados à tração dos compósitos de bucha vegetal.....	87
Figura 46 – Propriedades mecânicas dos compósitos de bucha vegetal.....	87
Figura 47 – Valores de resistência à tração dos tipos de reforços	90
Figura 48 – Ruptura da seção transversal dos compósitos de poliéster reforçado com fibras alinhadas de rami	91
Figura 49 – Ruptura da seção transversal dos compósitos de poliéster reforçados com tecido bidirecional de fios de rami	92
Figura 50 – Ruptura da seção transversal dos compósitos de poliéster reforçados com bucha vegetal.....	93
Figura 51 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches com reforço de fibras alinhadas de rami de dimensão 1 m × 0,5 m, obtidos pela simulação numérica.....	98
Figura 52 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches com reforço de fibras alinhadas de rami de dimensão 3 m × 1 m, obtidos pela simulação numérica.....	99
Figura 53 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches com reforço de tecido bidirecional de fios de rami de dimensão 1 m × 0,5 m, obtidos pela simulação numérica	101
Figura 54 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches reforçados com tecido bidirecional de de dimensão 3 m × 1 m, obtidos na simulação numérica	102
Figura 55 – Propriedades mecânicas dos painéis sanduíches.....	95
Figura 56 – Tipos de falha dos núcleos	96
Figura 57 – Deslocamentos (flechas em m) dos painéis sanduíches simulados numericamente à flexão	105
Figura 58 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches obtidos pela simulação numérica	106

Ferreira, M. R. S. Estudo de painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras vegetais para aplicação como forro. 119 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é produzir e caracterizar mecanicamente painéis sanduíches para uso como forro em edificações, a partir de compósitos de poliéster reforçado com fibras vegetais de rami e bucha vegetal, e núcleos constituídos de bucha vegetal impregnada de resina poliéster e poliestireno expandido - EPS. Os compósitos foram produzidos com diferentes teores de fibras, caracterizados mecanicamente à tração e testados numericamente como constituintes das faces do painel sanduíche. O EPS e a bucha vegetal foram estudados como componentes de núcleo dos painéis. O desempenho mecânico à flexão dos painéis foi testado experimentalmente e pelo Método dos Elementos Finitos. A simulação numérica foi usada também como ferramenta de análises qualitativas para o pré-dimensionamento dos componentes dos painéis, com variação de materiais, teores de volumes de fibras dos compósitos e espessuras de faces e núcleos. As faces dos painéis sanduíches foram constituídas com o compósito de matriz de poliéster reforçada com o tecido bidirecional de fios de rami e combinadas com os núcleos de EPS e bucha vegetal. Os resultados obtidos permitiram concluir que é viável a utilização dos painéis sanduíches estudados para uso como forro.

Palavras-chave: Painel sanduíche – Compósitos – Poliéster – Rami - Bucha vegetal – EPS – Forro.

.

Ferreira, M. R. S. Sandwich panels of polyester reinforced with natural fibers for application as ceiling. 119 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2013.

ABSTRACT

The purpose of the work is to produce and characterize mechanically sandwich panels to using as ceiling in buildings. The faces of the panels were made of composites reinforced by ramie and sponge gourd fibers, and the cores were made of sponge gourd and expanded polystyrene-EPS. The faces of the sandwich panels were produced with different fiber contents, characterized for tensile mechanical properties and numerically simulated. The EPS and sponge gourd were studied as core materials. The flexural mechanical performance of the panels was tested experimentally and simulated by Finite Element Method. The numerical simulation was also used as tool for qualitative analyzes in the pre-design of the panel components considering variation of materials, fiber contents and thickness of faces and cores. The faces of the sandwich panels were manufactured with composite of polyester reinforced by ramie bidirectional cloth, and combined with the cores of EPS and sponge gourd. The results show the manufactured sandwich panels are feasible for use as ceiling.

Keywords: Sandwich panel – Composite – Polyester – Ramie – Sponge gourd – EPS – Ceiling.

SUMÁRIO

1 Introdução	15
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos	17
1.3 Organização do trabalho	17
2 Revisão bibliográfica	19
2.1 Materiais compósitos	19
2.2 Matriz polimérica.....	22
2.2.1 Poliéster	24
2.3 Fibras de reforço	26
2.3.1 Fibras vegetais	29
2.3.2 Fibra de rami (<i>boehmeria nivea</i>)	32
2.3.3 Bucha vegetal (<i>luffa cylindrica</i>)	36
2.4 Pannel sanduíche	39
2.4.1 faces	41
2.4.2 núcleos	44
2.4.3 adesivos.....	47
2.4.4 desempenho dos painéis sanduíches	48
2.4.5 simulação numérica de painéis sanduíches.....	50
3 Programa experimental	52
3.1 Etapas do programa experimental.....	52
3.2 Materiais	52
3.3 Preparação e produção dos compósitos, núcleos e painéis	55
3.3.1 Fibras	55
3.3.2 Produção dos compósitos (faces).....	58
3.3.3 Produção dos núcleos	62
3.3.4 Produção dos painéis sanduíches.....	63
3.4 Ensaios de caracterização	64
3.4.1 Massa específica	64

3.4.2 Tração dos compósitos	65
3.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (mev)	66
3.4.4 Compressão dos núcleos	67
3.4.5 Flexão dos painéis sanduíches	67
3.5 Simulação numérica dos painéis sanduíches	69
3.5.1 Considerações iniciais	69
3.5.2 Descrição do modelo do painel.....	70
3.5.3 Propriedades elásticas do painel	71
3.5.4 Primeira etapa da simulação dos painéis	75
3.5.5 Segunda etapa da simulação dos painéis	77
3.5.6 Terceira etapa da simulação dos painéis.....	78
4 Resultados e discussões	80
4.1 Massa específica dos compósitos	80
4.2 Ensaio dos compósitos à tração	81
4.2.1 Resina de poliéster	81
4.2.2 Compósitos de fibras alinhadas de rami	81
4.2.3 Compósitos de tecido bidirecional de rami	84
4.2.4 Compósitos de bucha vegetal	86
4.2.5 Comparação entre os compósitos	89
4.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (mev)	91
4.3 Ensaio dos núcleos à compressão	94
4.4 Ensaio dos painéis sanduíches à flexão	94
4.5 Simulação numéricas dos painéis sanduíches.....	97
4.5.1 Primeira etapa	97
4.5.2 Segunda etapa	97
4.5.2.1 Reforço em fibras alinhadas de rami	97
4.5.2.2 Reforço em tecido bidirecional de rami.....	100
4.5.3 Terceira etapa.....	104
5 Conclusão	109
5.1 Conclusão.....	109
5.2 Propostas para trabalhos futuros	110
Referências	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Materiais compósitos de matriz polimérica são tecnologicamente atraentes no mercado da construção, devido suas propriedades químicas, que são interessantes para projetos de produtos, aliados ao baixo preço, diversificação de funcionalidade, bem como o apelo visual dos produtos consoantes a ideia de eficiência (CANEVAROLO Jr, 2010; HOLLAWAY, 2009; MAZUMDAR, 2002). Entretanto, esses materiais têm recebido especial atenção por causa do longo tempo de decomposição natural e originarem vários problemas de questões ecológicas, como a não biodegradabilidade, dificuldade de reciclagem e gerarem um grande acúmulo de resíduos em depósitos, lixões e na própria natureza.

Em busca de soluções viáveis para esse problema, pesquisas sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, apresentam resultados positivos quanto às propriedades mecânicas (resistência à tração, à flexão e ao impacto), gerando materiais com boa tenacidade e rigidez, além de contribuir para a preservação ambiental ao substituir maior volume de resina por fibras recicláveis e biodegradáveis (FARUK *et al.*, 2012; JAWAID; KHALIL; 2011).

Segundo Marinelli *et al.* (2008) compósitos reforçados com fibras vegetais são ainda apontados como alternativas rentáveis para a fixação de carbono na natureza, reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera durante seu ciclo de produção, processamento e utilização, ganhando assim um incremento de seu potencial econômico devido à possibilidade de comércio de créditos carbonos para a cadeia produtiva. As fibras vegetais, além de serem abundantes e apresentarem vantagens ecológicas, também representam uma nova fonte de renda para a população rural, podendo evitar o enorme fluxo do campo para a cidade, verificado principalmente nas regiões norte e nordeste do país; possuem baixa densidade e alta deformabilidade quando comparadas com materiais similares neste campo de aplicação; e

apresentam baixo custo, em relação aos reforços atualmente empregados (LEVY NETO; PARDINI, 2006; MONTEIRO *et al.*, 2012).

O Brasil por possuir uma ampla biodiversidade de fibras vegetais, tem grande potencialidade de exploração dessas fibras para fabricação de compósitos, visando diversas aplicações na área da construção civil, como por exemplo: em elementos estruturais leves como as estruturas sanduíches (MATTOSO *et al.*, 1996; SATYANARAYANA *et al.*, 2009).

Dentre as fibras vegetais que vem sendo estudadas com vista à aplicação na construção civil, especialmente como reforço em polímeros, as fibras de rami tem se destacado por apresentar boas propriedades mecânicas e boa aderência à matriz polimérica (ANGELINI *et al.*, 1999; SOARES, 2012). Os compósitos reforçados com a bucha vegetal também tem se destacado para a confecção de componentes não estruturais (TANOBE, 2003).

De acordo com Almeida (2009), painéis sanduíches com faces constituídas de compósitos de polímeros reforçados com fibras têm como vantagem leveza, resistência mecânica e à corrosão, boas propriedades de isolamento térmico e durabilidade. No entanto, esses materiais possuem baixa resistência a altas temperaturas e algumas vezes custos de fabricação mais elevados quando comparados a outros materiais tradicionais.

Por se tratar de um material relativamente novo, painéis sanduíches constituídos por compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, tem pouca informação disponível e normas que direcionem a confecção e desempenho desses painéis. Neste sentido, as simulações computacionais funcionam como uma excelente ferramenta para diversos estudos qualitativos e quantitativos, a partir do esquema de desenvolvimento e produção de um produto, determinado não apenas pelas propriedades do material, mas também pela demanda do mercado e normatizações.

Neste sentido, este trabalho visa trazer contribuições científicas e tecnológicas às pesquisas que investigam a viabilidade do uso de fibras vegetais como reforço para a produção de painéis sanduíches para uso em construções, com facilidade de execução e bom desempenho mecânico. As fibras selecionadas (rami e bucha vegetal) como reforço nos compósitos de matriz de poliéster, o EPS e a bucha vegetal como núcleo, têm como função obter materiais mais leves e com propriedades tecnologicamente interessantes para a aplicação dos

componentes como forro. O estudo também tem o intuito de analisar a viabilidade da confecção dos painéis com os materiais selecionados, de modo a encontrar a melhor combinação de materiais, consoante com o melhor percentual de teor de fibras na matriz, e espessura de faces e núcleo.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa objetiva estudar materiais compósitos de matriz de poliéster reforçada com fibras vegetais de rami e bucha vegetal, para a aplicação em painéis sanduíches para uso como forro em edificações.

O presente trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Produzir compósitos de poliéster/rami e poliéster/bucha vegetal com diferentes teores de volume de fibras, para a constituição das faces do painel e caracterizá-los mecanicamente;
- b) Verificar a melhor composição percentual de volume de matriz e fibras dos compósitos a serem usados nas faces do painel;
- c) Estudar a viabilidade de utilização do EPS e da bucha vegetal como componentes de núcleo do painel;
- d) Produzir protótipos de painel sanduíche baseado nos melhores resultados de desempenho mecânico dos compósitos testados, com base no percentual de volume de fibra/matriz e combinação de núcleos, simulados numericamente e ensaiados à flexão;
- e) Estudar a configuração geométrica do painel através de simulações numéricas, com base nos resultados experimentais, verificando seu desempenho estrutural.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação é constituída de seis capítulos, organizados de acordo com a descrição a seguir.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema abordado no contexto da engenharia civil, juntamente com as justificativas e os objetivos que norteiam esta pesquisa.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre materiais compósitos de matrizes poliméricas reforçados com fibras vegetais, ressaltando particularmente as fibras de rami e bucha vegetal, os conceitos gerais de painéis sanduíches e os requisitos para seu desempenho em serviço.

No terceiro capítulo são descritos o programa experimental, com os materiais utilizados e a metodologia aplicada para a produção e caracterização física e mecânica dos compósitos reforçados com fibras vegetais, dos núcleos e do painel sanduíche. Apresenta ainda as considerações para a modelagem numérica dos painéis sanduíches e as simulações realizadas, com a variação dos tipos de reforços nos compósitos e dos teores de volume de fibras, as espessuras das faces e do núcleo e as dimensões dos painéis a serem produzidos.

No quarto capítulo são relatados os resultados obtidos com os experimentos, análises e discussões dos mesmos.

O quinto capítulo apresenta as conclusões do estudo e algumas propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

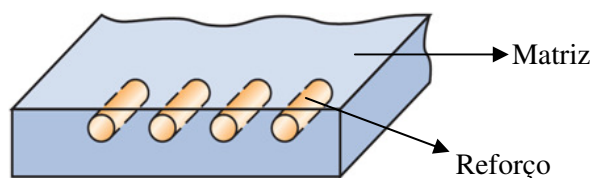
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo Callister (2002), a definição de materiais compósitos está vinculada à existência de um material com caráter multifásico, que apresenta uma proporção das propriedades das fases constituintes do material, devendo também apresentar algumas propriedades emergentes, decorrentes da combinação das mesmas.

Neste conceito, Mendonça (2005) considera que os compósitos podem ser entendidos como materiais que são projetados de modo a conjugar características específicas desejáveis, de dois, ou mais materiais diferentes, para obter um material resultante mais eficiente.

Os compósitos são constituídos por duas fases distintas como exhibe a Figura 1, denominadas de matriz e reforço, onde a matriz se caracteriza como uma fase contínua que circunda a outra fase descontínua ou dispersa, denominada de reforço (CALLISTER, 2002; LEVY NETO; PARDINI, 2006; HOLLAWAY, 2009).

Figura 1 – Componentes de matriz e reforço de um material compósito



Fonte: Callister, 2002.

O componente de matriz tem como função garantir a coesão, a orientação e a proteção do reforço, conectar os seus elementos, além de transmitir aos mesmos, tensões às quais o material é submetido. A matriz deve proteger os componentes de reforço da abrasão e da

degradação devido à exposição a ambientes agressivos, separando-os e dispersando-os. Para que isso ocorra, é importante que a matriz seja compatível quimicamente e termicamente com o reforço (ISIS, 2003). A matriz pode ser de natureza orgânica, metálica ou cerâmica.

O componente de reforço também pode ser de natureza cerâmica, metálica ou polimérica. Geralmente se apresentam sob a forma de partículas, fibras, bastonetes, lâminas ou plaquetas. O reforço tem como função garantir a rigidez, a resistência mecânica do material, bem como o isolamento térmico.

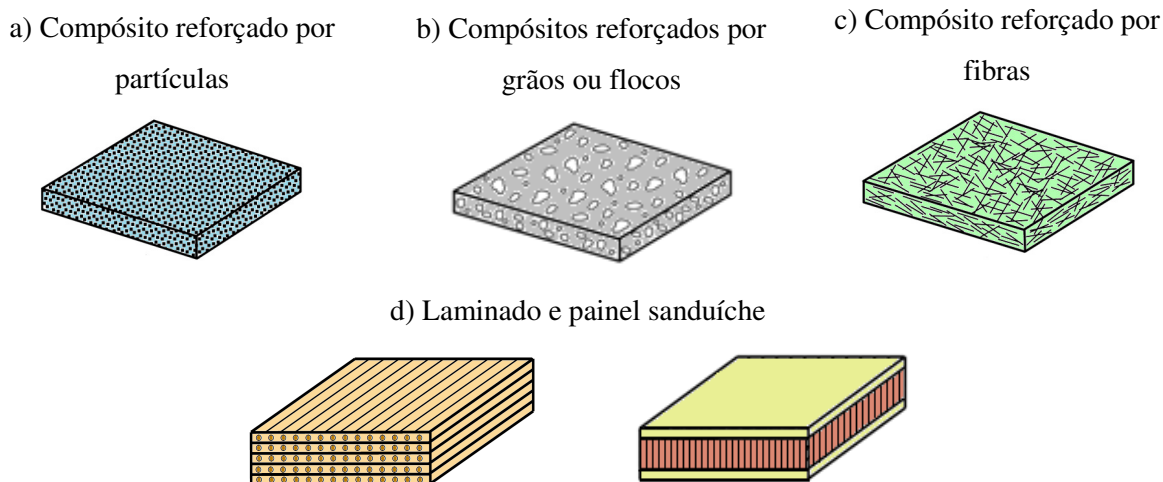
As propriedades mecânicas de um material compósito e o seu comportamento estrutural dependem das propriedades dos constituintes individualmente (matriz e reforço) e da interação entre eles. Os principais aspectos que influenciam são:

- tipo de matriz e de reforço;
- volume de matriz e de reforço;
- formato (seção e comprimento) e distribuição (orientação) do reforço;
- características da interface (aderência) reforço-matriz.

Os compósitos podem ser classificados segundo diversos critérios, mas normalmente classificam-se em função do tipo de reforço utilizado na matriz, que podem ser introduzido em diferentes escalas e distribuído de maneira regular ou aleatória.

A classificação mais adotada, conforme ilustra a Figura 2, consiste na divisão dos compósitos em quatro grupos: (a) compósitos reforçados por partículas, (b) compósitos reforçados por grãos ou flocos, (c) compósitos reforçados por fibras e (d) compósitos estruturais, formado pela combinação de várias camadas como os laminados e painéis sanduíches (ASKELAND, 1998; BRANT, 1995; CALLISTER, 2002).

Figura 2 – Classificação dos compósitos



Fonte: Autora, 2013.

Na prática a utilização dos materiais compósitos data de milhares de anos, conforme cita o Antigo Testamento (Êxodo, 5.7), onde tijolos de barro reforçados com palha vegetal picotada e raízes eram usados por anciãos israelitas no Egito. Outro relato é de laminados de madeira e um compósito de resina e linho também usados pelos egípcios no processo de mumificação e nos sarcófagos em 1500 a.C. (SILVA FILHO e GARCEZ, 2010). O conhecimento sobre o uso das fibras para impedir a fissuração em materiais frágeis foi reconhecido há muito tempo pela humanidade, como por exemplo, o uso das fibras de amianto como reforço que data de até 2500 a.C. na região atual da Finlândia (SWAMY, 1975).

Segundo Jawaid *et al.* (2011), o estudo de plásticos reforçados com fibras lignocelulósicas começou em 1908, com a utilização de material celulósico em compósitos fenólicos. Outro relato da utilização desses compósitos foi de polímero reforçado com fibra de algodão, usado pelos militares em aviões radar, durante a Segunda Guerra Mundial, e ainda na Alemanha Oriental em 1950, na moldura do carro Trabant.

Savastano (2000) relata que o estudo sistemático de fibras vegetais com finalidade de reforço em matrizes para aplicação na construção começou na Inglaterra em 1970, já no Brasil iniciou-se em 1980, pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED) na Bahia, com a aplicação de fibras vegetais no fibrocimento e no concreto fibra, onde foram testadas as fibras de sisal, piaçava, coco, cana de açúcar, bambu e bucha vegetal (CEPED, 1983).

Mazumdar (2002) relata que o setor da construção civil é o segundo maior consumidor de materiais compósitos. De acordo com Silva Filho e Garcez (2010), as matrizes mais tradicionalmente usadas na construção civil são as cerâmicas, onde se destacam as cimentícias usadas nas argamassas e concretos. Entretanto, nas últimas décadas os polímeros têm sido objeto de numerosas aplicações na engenharia, como na fabricação de diferentes elementos usados na construção civil como: pisos e revestimentos, móveis, estruturas, impermeabilizações e vedações. As matrizes poliméricas reforçadas com fibras vêm potencialmente se destacando, em reforços estruturais ou como matéria prima para fabricação de componentes de sistemas de vedação ou perfis pultrudados. O uso de polímeros reforçados com fibras (PRF) na construção, tanto em reforços quanto em componentes estruturais, se deve ao fato desses materiais possuírem baixa densidade, boa rigidez, baixo custo, boa resistência mecânica e fácil manuseio quando comparados aos materiais tradicionais.

Os compósitos desenvolvidos neste trabalho serão constituídos de matriz polimérica de resina de poliéster reforçada com fibras vegetais, detalhadas a seguir.

2.2 MATRIZ POLIMÉRICA

De acordo com Mano e Mendes (1999), a palavra *polímero* vem do Grego (“poly” + “mer”, muitas partes) e foi criada por Berzelius em 1832, para designar compósitos de pesos moleculares múltiplos, em contraposição ao termo *isômero*. Os polímeros são constituídos de macromoléculas orgânicas, sintéticas ou naturais, baseados nos átomos de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, flúor e outros elementos não metálicos, com ligações químicas covalentes entre átomos e ligações secundárias (fracas) entre moléculas.

O uso de polímeros em matrizes apresenta inúmeras vantagens, listadas no Quadro 1, principalmente quando comparados aos metais. Entre essas vantagens a facilidade de fabricação tem maior destaque, isto porque inclui diversos fatores relacionados ao custo final do produto, ou seja, os níveis de força, temperatura e energia necessários para moldar, fundir, cortar, furar, usinar, unir os polímeros são relativamente inferiores aos dos metais estruturais, o que faz com que reflita na redução de capital inicial de investimento em equipamentos. Entretanto, a limitação de seu uso em altas temperaturas ainda é uma restrição não contornável.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais

Vantagens	Desvantagens
Facilidade de fabricação;	Rigidez inferior aos metais, cerâmicos e madeira;
Baixo peso, baixa densidade;	Mais frágil e dureza baixa;
Resistência a ataques químicos;	Mais inflamável e baixa temperatura de uso;
Isolamento térmico e elétrico;	Suscetíveis à deterioração por radiação solar;
Autolubrificação;	Suscetíveis à deformação de fluência;
Aparência decorativa;	Baixa resistência á produtos químicos orgânicos.
Transparência;	
Amortecimento mecânico (absorção de energia).	

Fonte: MENDONÇA, 2005.

As matrizes poliméricas podem ser agrupadas em duas categorias: resinas termoplásticas ou termorrígidas.

As resinas termoplásticas são polímeros que tem a capacidade de serem moldadas diversas vezes, por meio de processos de aquecimentos e resfriamentos sucessivos, o que as permite serem recuperadas e recicladas. Isto ocorre por causa da sua estrutura molecular linear, que quando aquecidas, as moléculas secundárias (entre moléculas) são enfraquecidas tornando possível a movimentação relativa das moléculas. Todavia, a reversibilidade dos termoplásticos é apenas parcial, isto é, a cada processo que é submetida, há uma redução parcial das propriedades mecânicas, e quando sujeitos a temperaturas muito altas, as vibrações moleculares podem se tornar suficientemente violentas para quebrar as ligações covalentes na molécula, levando à degradação irreversível do polímero (MANO; MENDES, 1999; STRONG, 2008). Estas resinas são em geral mais baratas, dúcteis e resistentes ao impacto do que as resinas termorrígidas.

As principais resinas termoplásticas utilizadas são: polipropileno; polietileno; poliestireno; cloreto de polivinil (PVC); ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno); poliamida (nylon); policarbonato; óxido de polifenileno; polisulfona; PEEK (poli-éter-éter-cetona); sulfeto de polifenileno (PPS); PEI (poli-éter-imida). A vantagem de ser reprocessado torna esse tipo de polímero interessante para a conservação do meio ambiente e ao equilíbrio ecológico. Porém a desvantagem de utilização desses polímeros como matriz está na sua alta viscosidade, o que

dificulta sua aplicação, levando a problemas no alinhamento das fibras, assim como a formação excessiva de bolhas na matriz.

A resina termorrígida é um compósito químico que isoladamente, não efetua processo de reticulação ou cura, necessitando da presença de um segundo componente, o agente de cura. Além deste, usa-se o catalisador, que acelera (principalmente) ou retarda as reações químicas. Quando são endurecidas, estas resinas não podem ser fundidas ou amolecidas pelo calor, e quando são aquecidas acima de certo limite de temperatura, entram em combustão e se decompõem. Isto ocorre porque durante a polimerização, ligações cruzadas covalentes são formadas entre cadeias moleculares adjacentes, que ancoram as cadeias entre si, para resistir aos movimentos de vibração e rotação das cadeias a altas temperaturas, o que faz com que apenas aquecimento até temperaturas excessivas cause a quebra das ligações cruzadas e, consequentemente, a degradação do polímero. Polímeros termorrígidos são geralmente mais rígidos do que os termoplásticos, e têm melhor estabilidade dimensional (ASKELAND, 1998; CANEVAROLO Jr, 2010).

Na engenharia as resinas termorrígidas mais utilizadas são do tipo poliéster insaturado, éster-vinílico e epóxi. Em algumas aplicações especiais, são utilizadas resinas fenólicas ou à base de poliimidas (mais resistentes à temperatura), ou de poliuretanos (com alta resistência mecânica). Podem ainda ser usados elastômeros como o silicone (REZENDE; BOTELHO, 2000).

Entre as matrizes termorrígidas usadas, a resina de poliéster tem se destacado. A escolha pelo poliéster geralmente ocorre devido ao seu baixo custo, comparado a outras resinas, fácil manuseio, excelente resistência à corrosão, além de curar em temperatura ambiente (LEVY NETO; PARDINI, 2010).

A seguir é detalhada a resina poliéster usada na confecção dos compósitos e painéis neste trabalho.

2.2.1 POLIÉSTER

O poliéster é da família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis, que quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas e lineares. A reação

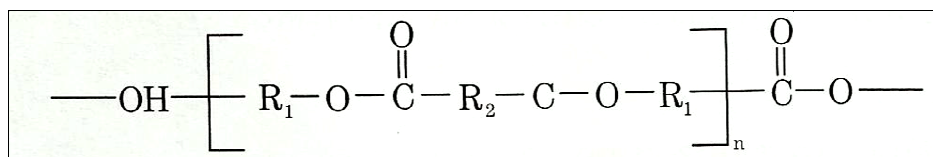
de síntese da resina poliéster é uma reação de polimerização por condensação em etapas, ou seja, a reação de um álcool com um ácido, resultando em uma reação de esterificação, formando um éster e água (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

As resinas de poliéster insaturadas (PI) consistem basicamente de um polímero alquídic, contendo insaturações vinílicas dissolvidas em um monômero reativo, normalmente o monômero de estireno. O PI é obtido pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um biálcool, resultando num produto termorrígido, cuja cadeia molecular é composta por simples e duplas ligações entre os átomos de carbono. A resina é ainda diluída num monômero vinílico inibidor, para facilitar sua utilização. Inicialmente encontra-se no estado líquido e após a adição do catalisador, transforma-se no estado sólido, caracterizando uma estrutura termorrígida irreversível (CASSIS; TALBOT, 1998).

A resina de poliéster usada neste trabalho é do tipo insaturado ortoftálico. O poliéster ortoftálico possui em sua composição o ácido ftálico/anidrido, que se dissolve em álcool e alguns outros solventes. Sua composição é feita por um ácido insaturado, um ácido saturado e um biálcool, conforme ilustra a Figura 3.

O processo de cura do PI é uma reação exotérmica irreversível, onde são formadas ligações químicas primárias sem liberação de voláteis, que envolve a ligação de átomos de duas cadeias lineares e pontes de moléculas de monômero de estireno, formando deste modo as ligações cruzadas (CARRERA, 1988).

Figura 3 – Representação esquemática de uma molécula de poliéster insaturado ortoftálico



Fonte: Levy Neto; Pardini, 2006.

Para iniciar o processo de cura são utilizados catalisadores, geralmente à base de peróxidos de benzoíla ou de metil-etil-cetona, em pequenas concentrações de 0,5 % à 3 %, em massa de resina, que atuam gerando os radicais livres responsáveis pela cura do PI e permitem levá-lo ao seu estado termorrígido (TANOBE, 2003).

De acordo com Hyer (1998), depois de curado, o poliéster pode apresentar valores de módulo de elasticidade variando de 1,2 GPa a 4,5 GPa, de resistência à tração de 40 MPa a 90 MPa, de resistência à compressão de 90 MPa a 250 MPa e deformação de ruptura variando de 2 % a 5 %.

A resina de poliéster combinada com a fibra de vidro tem sido largamente usada, tanto na indústria automotiva quanto na construção civil, pois a combinação desses dois materiais apresenta excelentes propriedades elétricas, durabilidade em temperaturas acima de 100 °C e ainda possui como vantagem a facilidade de aplicação em moldes com estruturas grandes (CASSIS; TALBOT, 1998; SILVA FILHO; GARCEZ, 2010).

Apesar das vantagens de utilização desse compósito, algumas pesquisas com fibras vegetais têm sido realizadas, com a substituição total ou parcial (reforço híbrido) das fibras de vidro, visando melhoria nas propriedades mecânicas, bem como o desenvolvimento de novos compósitos mais ecológicos (JAWAID; KHALIL, 2011).

Um exemplo é o trabalho realizado por De Rosa *et al.* (2009) sobre o estudo das propriedades de resistência ao impacto do compósito de reforço híbrido de juta/vidro, com a variação da combinação de camadas (vidro-E/juta/vidro-E) e (juta/vidro-E/juta), mostrando que esta última combinação apresenta melhor desempenho, suporta maior carga com energia de impacto, de 12,5 J a 15 J, enquanto que para as camadas de (vidro-E/juta/vidro-E) é de até 10 J, permitindo uma redistribuição mais eficaz dos danos de impacto na estrutura.

Outro exemplo é o estudo feito por Mishra *et al.* (2003) sobre a absorção de umidade nos compósitos de sistemas híbridos de poliéster reforçado com tecidos de sisal/vidro e abacaxi/vidro, variando a concentração de fibra de vidro e submetendo a diferentes tratamentos bioquímicos nas fibras vegetais. Os autores mostraram que os resultados da absorção de água nos compósitos híbridos eram menores do que os não híbridos.

2.3 FIBRAS DE REFORÇO

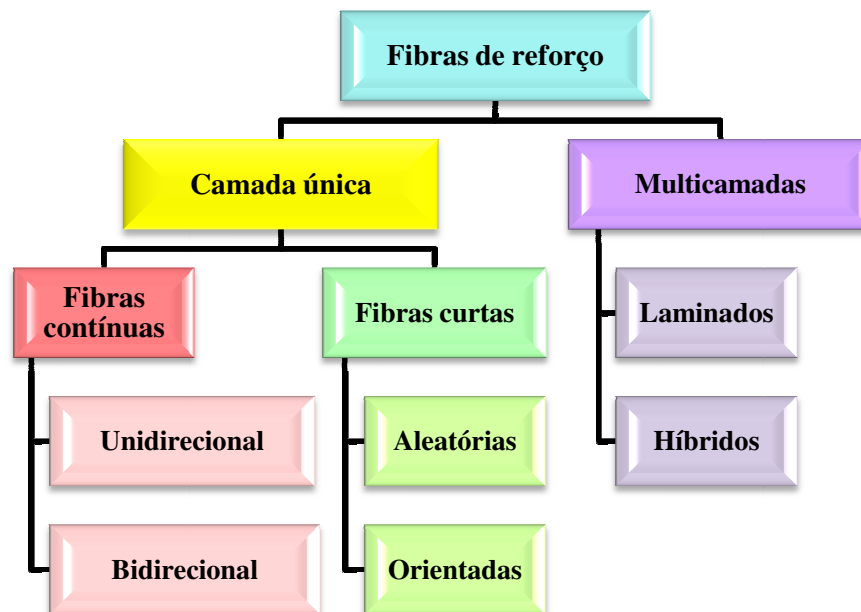
Fibra é um termo geral que designa um corpo flexível, cilíndrico, pequeno, de reduzida seção transversal e elevada razão entre o comprimento e o diâmetro (MANO; MENDES, 1999). O

interesse de profissionais da engenharia de diversos setores (civil, aeronáutica, mecânica, aeroespacial entre outras) pela utilização de compósitos com reforço em forma de fibras se dá por causa das elevadas propriedades de resistência à tração e alto módulo de elasticidade presentes no material quando na forma fibrosa (CALLISTER, 2002).

As fibras usadas para reforço podem ser agrupadas em sintéticas ou artificiais e naturais. As fibras naturais podem ser de origem animal, como a lã e a seda; mineral, como o asbesto ou amianto; ou vegetal como o sisal, o linho, juta, rami e bucha vegetal. As fibras artificiais ou sintéticas são produzidas através da transformação química de matérias-primas naturais, como derivados de petróleo, vidro e metal. Entre as mais conhecidas estão as fibras de vidro, de carbono, aramida e poliamida.

Os compósitos reforçados por fibras podem se apresentar em diferentes classificações decorrentes dos tipos de distribuição das fibras e composição de camadas, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Classificação da orientação das fibras de reforço



Fonte: Autora, 2013.

Entre as propriedades das fibras que governam o desempenho dos compósitos, a relação de aspecto L/D (comprimento/diâmetro), a qualidade da interface, as características de superfície

e natureza química, são de grande importância, pois interferem diretamente na aderência fibra-matriz e na resistência mecânica do compósito (HULL; CLYNE, 1996).

A orientação e a concentração volumétrica de fibras (V_f) existente na seção transversal do compósito também possuem caráter determinante na resistência mecânica (resistência à flexão, à compressão, à tração e ao cisalhamento), pois de acordo com Callister (2002), a conformação das fibras longas e alinhadas na mesma direção apresenta melhores resultados em compósitos do que os que constituem fibras curtas. Isto ocorre porque as fibras longas e alinhadas apresentam máximo efeito de orientação quando solicitadas, enquanto que as fibras curtas apresentam orientações em diversas direções, não garantindo a orientação predominante em uma única direção, devido aos processos de misturas e adensamentos.

Um critério importante para a produção de um compósito está relacionado à escolha do tipo adequado de fibra, que tem caráter decisivo quanto às propriedades mecânicas do material e sua aplicação. A decisão sobre o módulo de elasticidade da fibra é um parâmetro fundamental, uma vez que esta propriedade determina a resposta a esforços mecânicos sofridos pelo material. A Tabela 1 apresenta alguns tipos de fibras comumente usadas como reforço em projetos de materiais compósitos, com suas respectivas propriedades mecânicas e custo.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de fibras comumente usadas como reforço

Fibras	Massa específica (g/cm³)	Deformação máxima (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Preço (kg)
Algodão	1,5 – 1,6	7,0 – 8,0	287 – 597	5,5 – 12,6	7,00 (US\$)
Coco	1,18 – 1,29	3,0	175	4,0 – 6,0	1,50 (US\$)
Juta	1,3	1,5 – 1,8	393 – 773	26,5	4,50 (US\$)
Sisal	1,26 – 1,5	4,0 – 5,4	511 – 635	9,4 – 22	3,45 (US\$)
Rami	1,51	1,8 – 5,3	400 – 938	25 – 128	6,35 (US\$)
Vidro-S	2,55	2,8	2800 - 4750	86	13,0 – 17,5 (US\$)
Kevlar 29	1,44	3,3 – 3,7	3620	58	26,5 – 31,0 (US\$)
Carbono (padrão)	1,4	1,4 - 1,8	2800 – 4000	230 – 250	33 – 44(US\$)

Fonte: BLEDZKI E GASSAN, 1999; LEVY NETO E PARDINI, 2006; MARINELLI *et al.*, 2008; MOTTA, 2005.

As fibras sintéticas (vidro, poliméricas e carbono), mais comumente usadas como reforço, apresentam excelentes propriedades de resistência à tração e módulo elástico, porém ainda possuem custo elevado, devido aos processos de fabricação, são abrasivas e necessitam de alto consumo de energia na produção. Em busca de uma alternativa para o uso das fibras sintéticas, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas ao longo das últimas décadas, sobre fibras vegetais como reforço em materiais compósitos, visando a substituição das fibras sintéticas total ou parcialmente (tecidos híbridos), para diversos fins. As razões que impulsionam tais pesquisas estão relacionadas à questão ambiental, uma vez que estas fibras são oriundas de recursos renováveis, atóxicas e biodegradáveis, além de características como baixa densidade, baixo custo, menor abrasividade aos equipamentos e considerável resistência mecânica (FARUK *et al.*, 2012; MARINELLI *et al.*, 2008; MONTEIRO *et al.*, 2012, ROMANZINI *et al.*, 2012; VIEIRA, 2008).

2.3.1 FIBRAS VEGETAIS

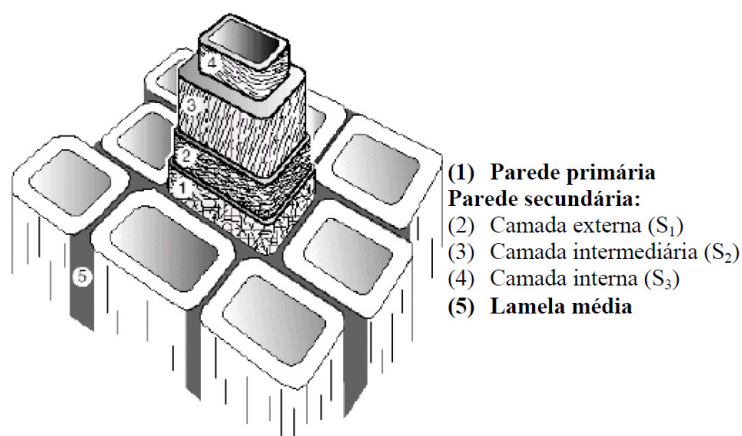
O estudo sobre compósitos reforçados com fibras vegetais, como citado anteriormente, envolve aspectos ambientais, sociais e econômicos importantes, que estão aliados ao desenvolvimento de novos componentes estruturais denominados “materiais verdes”, assim como o fortalecimento e efetivação do setor agro-silvicultura no país, e estímulo a empregos na zona rural (PAIVA *et al.*, 2003; ROWELL, 1997). A utilização de compósitos reforçados com fibras naturais também é reflexo das preocupações ambientais, como a poluição causada por resíduos não biodegradáveis, ou que não podem ser incinerados, assim como as mudanças climáticas devido às emissões de CO₂ associadas aos processos de utilização intensiva de energia.

As fibras vegetais são obtidas do caule, da folha e do fruto das plantas, sendo as fibras das folhas geralmente duras, resistentes e de textura mais rugosa do que as fibras dos caules. As condições ambientais de cultivo das plantas, como clima e características do solo interferem nas propriedades mecânicas dos produtos vegetais, além disso, a idade em que é realizado o corte da planta produtora das fibras, também é um fator de influência de variação (COUTTS, 1988).

A estrutura celular da fibra vegetal é constituída por células individuais, composta por quatro camadas de microfibrilas, com diferentes espessuras, conforme ilustra a Figura 5, e tem em

média dimensões de 10 μm a 25 μm de diâmetro, e 0,3 mm a 6 mm de comprimento (MOTTA, 2005).

Figura 5 – Estrutura celular da fibra vegetal



Fonte: Persson, 2000.

De acordo com Savastano (2000), as fibras são divididas nas seguintes camadas:

- (1) parede primária, mais externa, de estrutura reticulada;
- A parede secundária que se divide em três camadas:
 - (2) camada externa (S_1), de estrutura também reticulada;
 - (3) camada intermediária (S_2), em que as microfibrilas estão orientadas segundo um ângulo θ com relação ao eixo longitudinal da célula, em espiral;
 - (4) camada interna (S_3), também com as microfibrilas em forma de espiral;
- (5) lamela intracelular, que liga as diversas células que compõem a fibra.

No interior da célula há ainda uma cavidade central de seção elíptica com dimensão de 5 μm a 10 μm denominada lúmen. As diversas células que compõem a fibra se encontram aglomeradas pela lamela intercelular. A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade denominada lacuna. As lacunas e lumens são responsáveis pela grande incidência de poros permeáveis nas fibras, que acarreta elevada absorção de água e massa específica aparente bastante inferior a real (AGOPYAN; SAVASTANO, 1998).

Conforme Motta (2005) a composição das fibras vegetais baseia-se em 98 % a 99% de matéria orgânica e o restante material inorgânico (cinzas). A matéria orgânica consiste

basicamente de três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, já o matéria inorgânica é composta por substâncias como a pectina, a celobiose e os extrativos.

A celulose é o principal componente celular dos vegetais, formando a base estrutural das fibras vegetais e está distribuída em todas as plantas e árvores. Ela é um polissacarídeo linear de alto peso molecular, não solúvel em água, constituído exclusivamente de unidade β -D-glicose, que se ligam entre si através dos carbonos 1 e 4, dando origem a um polímero linear (FENGEL; WEGENER, 1989).

A lignina é um polímero tridimensional complexo, de elevado peso molecular e estrutura amorfa, com constituintes aromáticos e alifáticos, que une as fibras celulósicas, formando a parede celular. Fornece resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, enrijecendo a parede celular e protegendo os carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos. A concentração da lignina nas fibras influencia em sua estrutura, propriedades, morfologia, flexibilidade e a taxa de hidrólise (FENGEL; WEGENER, 1989).

As hemiceluloses são polissacarídeos formados pela polimerização de vários açúcares, com estruturas semelhantes à estrutura da celulose. Devida a sua configuração amorfa e baixa massa molar, absorvem água facilmente, contribuindo para o intumescimento, molhabilidade interna, aumento de flexibilidade das fibras e aumento da área específica ou de ligação das mesmas (LEWIN; GOLDENSTEIN, 1991; FENGEL; WEGENER, 1989).

De acordo com Motta (2005), a pectina, a celobiose e os extrativos são substâncias que não fazem parte da estrutura das fibras e são facilmente solúveis em solventes orgânicos neutros ou água. Os extrativos são constituídos por resinas, polifenóis, óleos e graxas, e frequentemente responsáveis por determinadas características da planta, como cor, resistência natural ao apodrecimento, gosto e propriedades abrasivas (ROWELL, 1997).

No trabalho realizado por Agopyan (1991), sobre o emprego de fibras vegetais como reforço em matrizes frágeis, 19 tipos de fibras são destacados como potencialmente úteis para a construção civil, entre elas estão presente as fibras de sisal, bambu, algodão, coco, cana de açúcar, juta, linho, piaçava, rami e cânhamo. A seleção dessas fibras se deu a partir das propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na

ruptura), características físicas, relação entre comprimento e diâmetro, possibilidade de cultivo no Brasil, custo e durabilidade no ambiente natural.

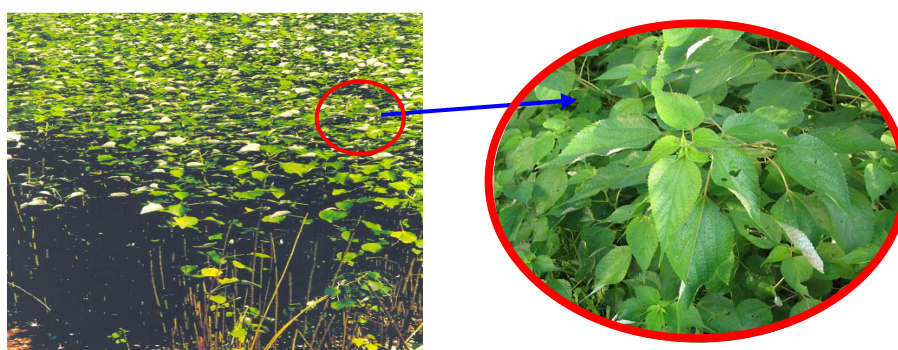
Entre as fibras vegetais estudadas nos últimos tempos para uso como reforço em compósitos, a fibra de rami tem se destacado, devido as suas propriedades mecânicas. Em pesquisas precedentes sobre compósitos reforçados com o rami, realizados por Angelini *et al.* (1999), Lei *et al.* (2006), Bravo Neto *et al.* (2010) e Paiva *et al.* (2003), Soares (2012) revelam que o rami possui alto módulo de elasticidade, boa adesão à matriz de poliéster e promove resultados promissores para este tipo de compósito, tanto na resistência à tração quanto na rigidez.

Outra fibra também estudada como reforço é a bucha vegetal, porém com menor exploração neste âmbito. Pesquisadores como Tanobe (2003), Boynard *et al.* (2000) e Demir *et al.* (2005) desenvolveram compósitos usando a bucha em matrizes de poliéster e polipropileno, obtendo resultados promissores para a utilização em painéis de vedação, sem função estrutural.

2.3.2 FIBRA DE RAMI (*Boehmeria nivea*)

O rami é uma planta originária da Ásia Oriental, em regiões temperadas, cultivada há milhares de anos na China, Japão, Península da Malaia e no último século em vários países como o Brasil. O nome rami vem de *ramish*, palavra de origem malaia, dado à planta e à fibra de um vegetal pertencente à família das urtigas, sob a denominação botânica de *Boehmeria nivea* (Figura 6), que se distingue de outros membros da família pela ausência de pêlos urticantes (MEDINA, 1957; SINGH, 1992).

Figura 6 – Planta de rami

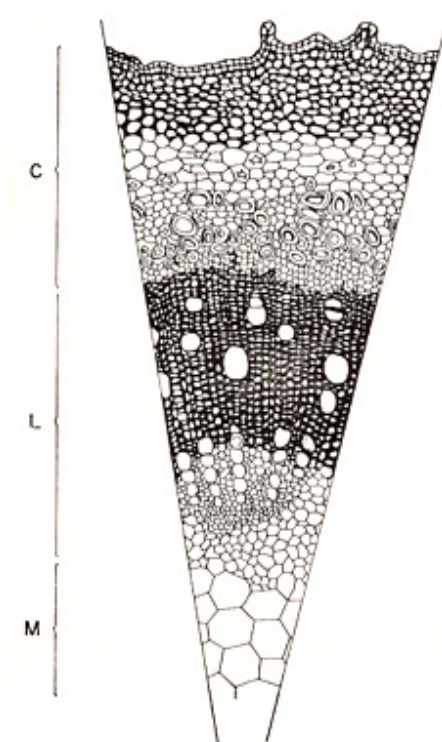


Fonte: Oliveira, 2010.

A planta do rami é uma cultura permanente com duração de até 20 anos e rendimento médio de cultivo de 9 anos, contando a partir do segundo ano. A qualidade e o rendimento das fibras dependem do corte, da variedade da planta, solo e fatores climáticos e podem ser extraídas até 4 vezes ao ano (BNDES, 1996).

A fibra de rami é obtida do caule, de onde se extrai a casca que contém uma fibra liberiana de natureza pecto-celulósica. A Figura 7 mostra um corte transversal da estrutura do caule do rami, constituída de três zonas bem definidas, do exterior para o interior, de onde são extraídas as fibras. Estas zonas são classificadas em: zona cortical, ou casca (C); zona cambial, ou lenho (L); e zona medular ou medula (M) (BENATTI Jr, 1988).

Figura 7 – Corte transversal da estrutura do caule do rami



Fonte: Benatti Jr, 1988.

O processo de beneficiamento da fibra é feito por descorticação e desgoma. A primeira etapa é realizada ainda no campo por meio de máquinas desfibradoras ou descortificadoras, sendo as mais utilizadas, conhecidas como *piriquitos*, que separam as cascas das hastes (Figura 8). Já a desgomagem é feita nas indústrias via processos químicos (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Figura 8 – Processo de beneficiamento do rami

a) Corte do rami



b) Descortinagem do rami



Fonte: Oliveira, 2010; Singh, 1992.

Apesar de ser cultivado quase que exclusivamente para produção de fibras e uso em fabricação de tecidos, cordas, barbantes, tapetes entre outros, o rami foi introduzido no Brasil como planta forrageira para a alimentação de animais (BENATTI JÚNIOR, 1988; OLIVEIRA *et al.*, 2010). O rami é usado como ração para gados e aves tanto em forma de farinha como em folhas, devido à rica quantidade de proteína e minerais como o cálcio, e vitamina A, presente na planta, que é superior à da alfafa e leguminosas como o feijão (SPOLADORE *et al.*, 1984) .

A China é o maior produtor da fibra, seguida do Brasil e Filipinas. Parte dessa produção da fibra é utilizada no Brasil, principalmente por indústrias têxteis, e o restante é exportada para outros países como Japão, Itália, França, Suíça e Estados Unidos (OLIVEIRA, 2007).

A cultura do rami foi implantada no Brasil depois da Segunda Grande Guerra e teve o auge de produção na década de 1970, sofrendo a partir daí um declínio através dos anos no cultivo, principalmente por causa da necessidade de outros tipos de culturas e baixo preço da fibra. Atualmente a cultura do rami no Brasil está totalmente concentrada no estado do Paraná, nos municípios de Londrina, Campo Mourão e Campo da Lagoa. Essa região reflete todo o panorama da cultura do rami no país, de forma que todos os índices de área e produtividade nacionais desse cultivo são realizados no Paraná (IBGE, 2010). De acordo com os dados do SEAB (2012) a evolução da área colhida do rami no Paraná nas últimas décadas pode ser visualizada na Tabela 2.

Tabela 2 – Evolução da área colhida, produção e rendimento do rami no Paraná

Anos	Área (ha)	Produção (t)	Rendimento (kg/ha)
1970	19.211	47.691	2.482
1980	6.780	17.000	2.507
1990	7.139	10.183	1.426
2000	465	1.006	2.163
2010	369	1.014	2.747

Fonte: SEAB, 2012

O interesse pela utilização dessa fibra para uso como reforço se deve pelas características peculiares em suas propriedades químicas, físicas e mecânicas, que as tornam atraentes. Segundo Singh (1992), entre as propriedades físicas, o comprimento e a espessura das fibras do rami são vantajosos, por serem as mais longas (até 1,20 m) e uma das mais finas entre as fibras vegetais (40 μm – 50 μm). Possui boa tenacidade e resistência à ruptura, resistência a agentes atmosféricos e bacterianos, devido a sua composição química, bem como excelentes propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade, mesmo quando combinadas com matrizes frágeis, como evidencia as pesquisas aludidas a seguir (LODHA; NETRAVALI, 2005).

Na Itália, Angelini *et al.* (1999), realizaram um estudo sobre as propriedades químicas, físicas e mecânicas das fibras de rami e vassoura espanhola, para uso em materiais compósitos. Os resultados obtidos pelos autores revelaram, particularmente para a fibra de rami, valores de resistência à tração de 950 MPa e módulo de elasticidade de 65 GPa, que se comparam aos valores das fibras de vidro-E (70 – 90 GPa).

No estudo realizado por Paiva *et al.* (2003), sobre a resistência à tração do compósito de tecido híbrido de algodão/rami na matriz de poliéster, utilizando as fibras de algodão apenas como suporte para unir os fios de rami unidirecionalmente, mostrou que o rami tem potencial como reforço em matrizes poliméricas, apresentando para o compósito com V_f de 45 %, resistência à tração de até 118 MPa.

No trabalho realizado por Soares (2012), sobre a caracterização das fibras de rami e sua aplicação em matriz epóxi, apresenta para a fibra resultados de resistência à tração de 241,87 MPa e módulo de 14,25 GPa, e para os compósitos produzidos com fibras alinhadas

de rami no teor de até 60 % em volume, resistência de 139,2 MPa e módulo de elasticidade de até 20,2 GPa.

Todos os autores relatam a boa compatibilidade do rami com matrizes poliméricas, indicando o grande potencial desta fibra como reforço em materiais compósitos. O uso do rami como reforço em materiais compósitos, além de viável em termos de produção da fibra, é recomendável como sendo uma nova aplicação para a fibra.

2.3.3 BUCHA VEGETAL (*Luffa cylindrica*)

A bucha vegetal é uma planta subtropical abundante na Ásia, América Central e do Sul. Originária da Ásia, pertence à família das Cucurbitáceas, assim como as abóboras, melão e pepino. A planta possui folhas grandes, flores masculinas e femininas de cor amarela e frutos constituídos de bagas, em formato cilíndrico, grossos e compridos (BISOGNIN, 2002), como ilustrado na Figura 9a e 9b.

O nome popular da fruta é bucha vegetal ou bucha de metro e o nome científico é *Luffa cylindrica* (L.) Roem. Os frutos da bucha são alongados, com 0,5 m a 1,6 m de comprimento, dotados de fibras finas, resistentes, elásticas e macias. A fibra é extraída do fruto (*luffa*) dessa planta ainda verde e posta para secar. Seu aspecto é fibroso e com um sistema vascular que formam um tapete natural quando secas (Figura 9c e 9d).

Figura 9 – Bucha vegetal

a) e b) Planta, flor e fruto da bucha vegetal



Figura 9 – Continuação

c) Fibra aberta em forma de manta



d) Fibra seca



Fonte: SEBRAE, 2010; Autora, 2013.

Embora o cultivo da bucha no Brasil tenha bastante popularidade, por ser simples, fácil e favorável às condições climáticas do país, a formalização e implantação da cultura da bucha ainda não possui um controle de qualidade, principalmente quanto à seleção de sementes no mercado, fazendo com que os produtores recorram às regiões tradicionais produtoras para obter as sementes. A carência de pesquisas e informações técnicas para o cultivo e beneficiamento dos frutos é outro fator restritivo, que dificulta novos produtores a ingressarem na atividade (SIQUEIRA *et al.*, 2009).

Segundo SEBRAE (2012) o estado de Minas Gerais apresenta a maior concentração de cultivo das fibras, mas como não é uma cultura regulamentada, há carência de informações técnicas sobre a produção anual, rendimento e evolução da área colhida. Apesar da inexistência de uma classificação oficial, na prática as buchas são classificadas para a comercialização de acordo com o tamanho: pequenas (tamanho até 60 cm), médias (60 cm a 95 cm) e grandes (acima de 95 cm). O rendimento da cultura é bastante variável, podendo produzir de 500 dúzias a 1.800 dúzias por hectare. O valor comercial da bucha depende fundamentalmente do tamanho dos frutos e textura das fibras (SEBRAE, 2012).

O principal uso da bucha é na higiene pessoal, pois se caracteriza como um esfoliante natural que auxilia no processo da renovação celular. As fibras são também exportadas para os EUA e Europa, para uso como esfregões (SATYANARAYANA *et al.*, 2007). Por ser natural, possui forte apelo junto aos consumidores que procuram por este tipo de produto. Também é usada na produção de artefatos artesanais, como chinelos, cestos, tapetes, chapéus, palmilhas para sapatos, correias etc.

Além do uso natural, no setor industrial automotivo a bucha é utilizada como forração no estofamento. A estrutura compacta e fechada da bucha confere ao material uma elasticidade que a torna útil para outros fins, como material de empacotamento de objetos frágeis, enchimento de travesseiros, colchões etc.

Em algumas pesquisas acadêmicas, a bucha também tem sido estudada como material sorvente alternativo de baixo custo para remoção de óleo cru, de derramamento em águas, ou ainda como material absorvente acústico (ANNUNCIADO, 2005; OLIVEIRA; TEODORO, 2005).

Na literatura, os estudos realizados sobre a caracterização da bucha vegetal têm sido baseados, em sua maior parte, apenas na caracterização química, sendo a celulose, lignina e hemicelulose os principais constituintes analisados. No trabalho realizado por Rowell *et al.* (2000), sobre a composição química da bucha vegetal, encontraram teores de 56,39 % para a α -celulose, 13,60 % para a lignina e 15,81 % para a hemicelulose, relatando que os valores de celulose e lignina, estão na mesma faixa de outras fibras como sisal, juta e hibíscus.

Tanobe (2003) obteve os teores de α -celulose de 63 %, para a lignina de 11,2 % e de hemicelulose de 19,4 %. Já Guimarães *et al.* (2009) encontraram os valores de 66,59 % de α -celulose, 15,46 % de lignina e 17,44 % de hemicelulose. Todos estes estudos realizados sobre a bucha visam à modificação da fibra, com propósito de melhora nas propriedades físicas e adesivas entre fibra e matriz polimérica.

Na limitada literatura existente sobre compósitos reforçados com bucha vegetal, Tanobe (2003) apresenta para os compósitos com fibras em forma de manta sem tratamento, resistência à tração de até 18 MPa para o volume de fibra de 35,2 % e módulo de elasticidade de até 3,8 GPa. Demir *et al.* (2005) ao caracterizar compósitos de matriz de polipropileno reforçado com bucha vegetal submetidos a diferentes tratamentos, obtiveram para compósitos com V_f de 15 %, valores de resistência à tração de 19,5 MPa, módulo de elasticidade de 740 MPa e deformação máxima na ruptura de 6 %.

O grande atrativo de utilização da bucha é por causa da durabilidade do fruto depois de lavado e da estrutura resistente e fibrosa do tecido, além da esbeltez dos compósitos para utilização em painéis decorativos como forro, sem função estrutural.

2.4 PAINEL SANDUÍCHE

Os painéis sanduíches aplicados na construção civil tem seu uso voltado para elementos de fechamento, com ou sem função portante, em paredes divisórias, forros, telhas e coberturas. A aplicação desses painéis como forro se deve a duas características mecânicas importantes: leveza e rigidez.

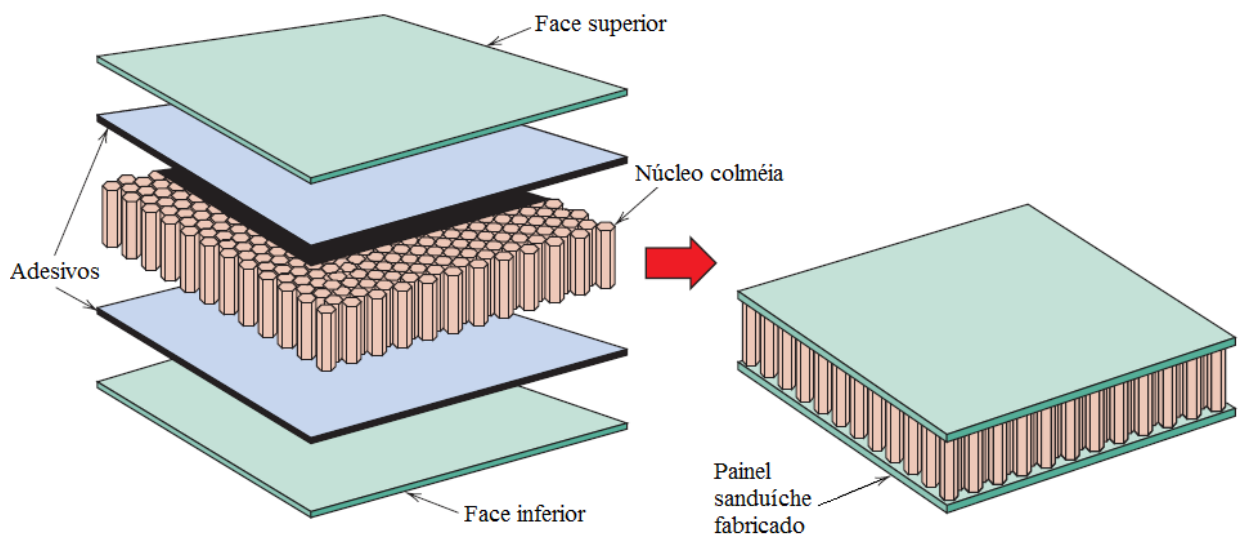
As placas chamadas sanduíches constituem um tipo especial de laminado, composto por três elementos principais: duas camadas externas e finas, chamadas de faces e uma camada interna, espessa, chamada núcleo (CALLISTER, 2002; MENDONÇA, 2005). A Figura 10 mostra uma vista em corte de um painel sanduíche e seus componentes com núcleo em colmeia.

Figura 10 – Estruturas de painéis sanduíches

a) Vista de um corte de um painel



b) Painel sanduíche com núcleo em colmeia



Fonte: Callister, 2002.

As possibilidades de combinações de materiais nas estruturas sanduíches são diversas e proporcionam uma economia no consumo de materiais de melhor desempenho, ao serem combinados com materiais menos nobres, podendo ainda obter elementos com propriedades mecânicas interessantes, como leveza, rigidez à flexão e características de isolamento térmico.

Apesar dessas vantagens, os painéis sanduíches ainda apresentam dificuldade de utilização na construção, relacionadas às falhas no processo tecnológico de fabricação e instalação, resultando em problemas de interface e deficiência de desempenho (ALMEIDA, 2009).

Para evitar a ocorrência de falhas nos painéis, Mendonça (2005) menciona a importância da elaboração do projeto em estruturas sanduíches, onde se deve considerar o tipo de aplicação e desempenho desejado. O autor ainda apresenta um roteiro das principais etapas necessárias no projeto de painéis:

- 1ª etapa** - definição do tipo estrutural;
- 2ª etapa** - identificação dos carregamentos;
- 3ª etapa** - definição dos materiais das faces e do núcleo;
- 4ª etapa** - identificação das propriedades elásticas e de resistência;
- 5ª etapa** - definição das espessuras;
- 6ª etapa** - verificação das dimensões das faces;
- 7ª etapa** - verificação da tensão normal de flexão nas faces;
- 8ª etapa** - verificação da tensão cisalhante no núcleo;
- 9ª etapa** - verificação dos deslocamentos.

Vinson (1999) afirma que a construção de placas sanduíches é relativamente nova, e que sua origem se deu durante a Segunda Guerra Mundial, onde foi criado um sanduíche com faces de plástico reforçado e um núcleo com baixa densidade. O uso das placas sanduíches começou a partir da década de 50, no setor automobilístico e militar. Na década de 60, surgiram os “materiais compósitos avançados”, constituídos por fibras de elevado módulo de elasticidade e resistência, como as fibras de carbono. Devido ao seu elevado custo, nessa época, a sua aplicação estava restringida às indústrias naval e aeroespacial. No intuito de ampliar o uso destes materiais a novos mercados, na década de 70 foi feito um esforço para reduzir o custo de produção, levando à aplicações diversas em artigos de desporto e lazer, como barcos de recreio, aviões, raquetes de tênis e bicicletas.

Em meados do final dos anos 80 e início dos anos 90, estes materiais tiveram seu custo reduzido, e ao mesmo tempo na construção civil começou a surgir a necessidade de renovação de certas infraestruturas, devido a novas exigências funcionais e problemas de durabilidade, expandindo deste modo, essa tecnologia no setor da construção. Desde então, a utilização dos materiais compósitos cresceu muito rapidamente por todo o mundo, juntamente com a necessidade de elementos estruturais leves, como os painéis sanduíches, com elevada rigidez e resistência nas mais diversas aplicações (ALMEIDA, 2009; MENDONÇA, 2005; STRONG, 2008). Entre as diversas áreas de aplicação, os sanduíches são encontrados em uma grande variedade de produtos:

- **Aviões:** pás de rotor de helicóptero, painéis de asas, bico de aeronave, dutos de ar, piso de compartimento de carga, porta e estrutura de portal;
- **Mísseis e veículos espaciais:** aletas e superfícies de controle, tanques, antenas e containers de carga;
- **Construção civil:** abrigos pré-fabricados para defesa civil, divisórias em escritórios, portas, pisos e forros;
- **Outros:** móveis domésticos e de escritório, casco de barcos, piso de trailers e motor-homes, containers e carrocerias, esquis de neve e aquáticos, caiaques, mesas de bilhar, remos etc.

Os painéis sanduíches se diferem de acordo com as combinações de faces e núcleo. Apesar da grande diversidade de materiais e configurações já existentes desses painéis, sempre estão propondo novas combinações de materiais, com diversas finalidades de uso. A seguir são descritos alguns requisitos dos materiais de faces e núcleo, necessários para sua confecção, assim como alguns materiais mais utilizados no mercado.

2.4.1 FACES

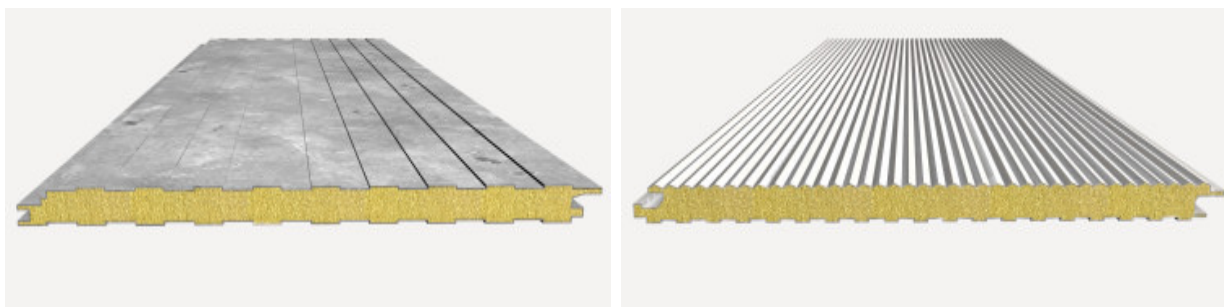
Os materiais que compõem as faces dos painéis sanduíches devem satisfazer uma série de requisitos, em nível de fabricação, funcionalidade ou estrutural, de modo a obter o comportamento pretendido para os painéis.

Entre a funcionalidade do painel, uma das preocupações deve ser a estanqueidade ao vento, à água e ao vapor de água. Quanto ao aspecto estrutural, é importante que tenham uma

capacidade de resistência adequada, não só aos carregamentos ao qual o painel está sujeito como também à corrosão e ao fogo (DAVIES, 2001). Devem ainda ter espessuras adequadas para resistir às tensões de tração e compressão introduzidas pelo carregamento e apresentar um módulo de elasticidade em compressão adequado, de modo a evitar o encurvamento do painel.

Os materiais tipicamente usados na constituição das faces são as ligas de alumínio, plásticos reforçados com fibra, titânio, aço e madeira compensada. Em relação à sua configuração, as faces geralmente se apresentam em lâminas planas, entretanto, podem também apresentar uma superfície não plana, com uma seção transversal recortada, conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 – Tipos de configuração de faces do painel sanduíche



Fonte: Setubal, 2012.

De acordo com Allen (1969), os materiais das faces dos painéis podem ser classificados em dois grupos: metálicos (aço, aço inoxidável, ligas de alumínio e cobre) e não metálicos (madeira e seus derivados, materiais compósitos reforçados com fibras, cimento com amianto e cartão impregnado em resina).

As faces metálicas são as mais utilizadas nos painéis sanduíches, por apresentarem elevada resistência, rigidez, boa qualidade no acabamento e custo reduzido. Porém, apresentam problemas como densidade elevada, susceptibilidade à corrosão e difícil aderência entre as faces e o núcleo, o que faz com que o material necessite de proteção galvanizada ou metalização, e revestimento adicional de acordo com as condições ambientais que o painel estará exposto, ou ainda de tratamento na superfície das faces, adicionando uma camada primária orgânica para aumentar a eficiência da ligação (LEITE *et al.*, 2004).

As faces de madeira são configuradas geralmente na forma de compensado ou de laminados. A limitação desse material está relacionada ao fato das faces serem produzidas com comprimentos fixos que não excedem geralmente os 3,5 m, impossibilitando a utilização em sistemas de produção contínua, sem a necessidade de juntas especiais para painéis com maiores dimensões. Outro fator de influência é a estabilidade dimensional da madeira relacionada com a variação da umidade relativa, desfavorecendo sua utilização em ambientes com grande variação de umidade (ALMEIDA, 2009).

As faces de compósitos poliméricos reforçados com fibras são usadas devido às vantagens de relação resistência/peso próprio e rigidez/peso próprio, leveza, durabilidade em ambientes agressivos, resistência à fadiga e facilidade de produção em qualquer configuração. Os obstáculos de utilização dessas faces se devem ao elevado custo de produção (ainda pouco competitivo na maior parte das situações), a inexistência de regulamentação específica da deformação do painel e à susceptibilidade a fenômenos de instabilidade (CORREIA, 2004).

Na Tabela 3 são apresentadas algumas propriedades físicas e mecânicas de alguns materiais citados, usados na constituição das faces dos painéis sanduíche.

Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas de materiais usados na composição das faces de painéis sanduíches

Materiais	Massa específica (kg/m³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação de ruptura (%)	Temperatura de transição vítrea (°C)
Aço inoxidável	7700	200	540 – 680	–	230 – 240
Ligas de alumínio	2700	70	200 – 250	200 – 250	165 – 180
Cobre	8900	118	220	220	180 – 350
Compensado	550 – 700	11 – 15	30 – 70	0,001 ^a 0,45 ^b	–
Laminados de madeira	600 – 750	12 – 19	30 – 40	0,004 ^a -0,3 ^b	–
Epóxi	1200 – 1300	2,0 – 4,0	60 – 80	1,0 – 8,0	100 – 270
Poliéster	1200 – 1300	2,0 – 3,0	20 – 70	1,0 – 5,0	70 – 120
Fenólica	1000 – 1250	3,6	30 – 50	1,8 – 2,5	260

a – Direção paralela às faces em condição úmida;

b – Direção perpendicular às faces em condição úmida.

Fonte: ALMEIDA, 2009.

Neste trabalho serão testados os compósitos de matriz de poliéster reforçada com fibras de rami e bucha vegetal como componentes de face.

2.4.2 NÚCLEOS

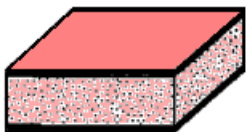


Os materiais usados como componentes de núcleo também devem apresentar boas propriedades isolantes térmicas e acústicas, impermeabilidade e bom desempenho ao fogo. Estruturalmente, o núcleo deve exercer basicamente duas funções:

- separar as faces, garantindo um alto momento de inércia e resistir às deformações perpendiculares ao plano da face;
- proporcionar um grau de rigidez mínimo à compressão, de modo que evite o esmagamento do painel.

O núcleo deve também ser suficientemente rígido ao cisalhamento, para garantir que, quando o painel for fletido, as faces não deslizem entre si. Neste sentido, para impedir movimentos relativos entre as faces e o núcleo, é importante que a aderência entre estes não seja muito flexível e que o material adesivo consiga também suportar as tensões cisalhantes do núcleo (ALLEN, 1969; LEITE *et al.*, 2004). Vale ressaltar que, com o aumento da espessura do núcleo, é possível obter maior rigidez à flexão no painel.

O núcleo pode ser constituído por diversos materiais e formas construtivas bem leves, tais como: espumas poliméricas expandidas, borrachas sintéticas, cimentos inorgânicos, corrugados, colmeias e madeira de balsa (VINSON, 1999). Os núcleos podem ser divididos em núcleos homogêneos e núcleos não homogêneos, de acordo com os tipos de materiais (Figura 12).

Figura 12 – Materiais de núcleos homogêneos e estruturados

Homogêneos	Não homogêneos	
Espuma	Núcleo corrugado (suporte unidirecional de faces)	Núcleo colmeia (suporte bidirecional de faces)
		

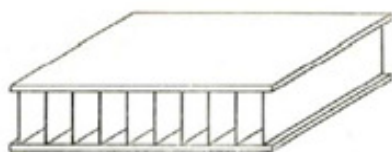
Fonte: Berthelot, 1992.

Os núcleos homogêneos podem ser constituídos por espumas, lãs, diferentes tipos de plásticos expandidos, madeira de balsa ou até mesmo concreto leve e produtos de argila. São geralmente utilizados em aplicações onde os painéis têm de possuir uma reduzida condutividade térmica e leveza, aliados a um custo mais reduzido (DIAB, 2003).

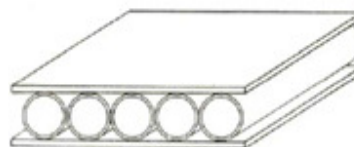
Segundo Almeida (2009) os núcleos corrugados são constituídos por células abertas na direção das faces, ligadas pontualmente à face superior e inferior do painel e apresentam-se de diversas formas. Na Figura 13 são mostrados alguns modelos dos núcleos corrugados.

Figura 13 – Modelos de núcleos corrugados

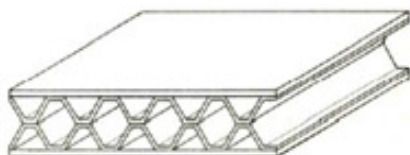
(a) Arranjo simples de tiras paralelas dispostas na vertical



(b) Elementos tubulares



(c) Treliça dupla



(d) Núcleo ondulado semelhante a embalagens de ovos

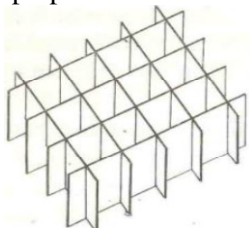


Fonte: Almeida, 2009.

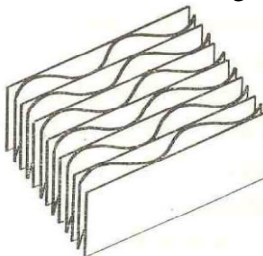
Os núcleos do tipo colmeia, ao contrário dos núcleos corrugados, são constituídos por células abertas na direção transversal às faces, proporcionando um suporte bidirecional das mesmas. As boas propriedades mecânicas das colmeias e a sua densidade reduzida conferem a este tipo de núcleo um bom desempenho por unidade de peso. As colmeias podem apresentar-se em diferentes configurações, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Modelos de núcleos colmeias

a) Tiras retas dispostas perpendicularmente



b) Folhas lisas e corrugadas



c) Folhas corrugadas

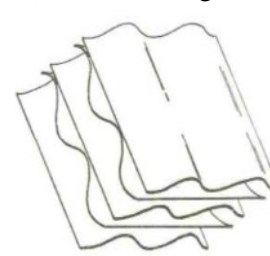
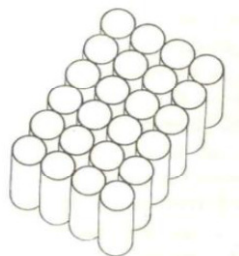
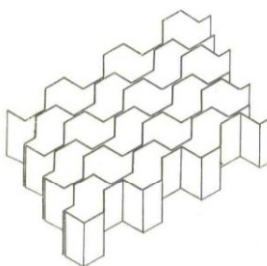


Figura 14 – Continuação

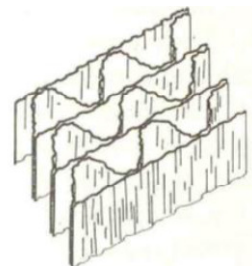
d) Elementos tubulares dispostos transversalmente às faces



e) Folhas deformadas



f) Folhas onduladas e enrugadas



Fonte: Almeida, 2009.

Os materiais de núcleo utilizados nos painéis sanduíches podem ser divididos em três grupos: espumas rígidas, materiais inorgânicos e colmeias.

As espumas são materiais plásticos muito porosos, produzidos num processo chamado espumação (ou formação de espuma). Tanto os polímeros termoplásticos quanto os termorrígidos podem ser produzidos em forma de espuma, mediante inclusão de um agente soprador, que no aquecimento se decompõe com a liberação de um gás. Bolhas de gás são geradas através de toda a massa enquanto fluida, que remanescem como poros no resfriamento e dão origem a uma estrutura esponjosa.

As propriedades e a estrutura das espumas rígidas plásticas dependem da sua formulação e do seu processo de fabricação, que permite controlar o nível de rigidez e flexibilidade, assim como a necessidade de uma estrutura aberta ou fechada. Essa estrutura celular é a razão do bom isolamento térmico nas espumas, juntamente com o gás que se encontra aprisionado nas células, que faz com que a transferência de calor através da espuma seja muito reduzida. De acordo com Davies (2001), as propriedades mecânicas das espumas dependem da densidade do material e de sua variação em relação à temperatura e à umidade, sobretudo para carregamento de longa duração, devido sua elevada fluência.

Na construção civil, o EPS tem tido uso crescente, isto ocorre não apenas por causa das suas propriedades isolantes, mas também por possuir baixa densidade, boa resistência, facilidade de manuseio e custo reduzido (SARTORI, 2009).

Segundo a ABRAPEX (Associação Brasileira de Poliestireno Expandido), o EPS foi descoberto em 1949 pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz, no laboratório da Basf, na

Alemanha. A constituição do EPS é resultado da polimerização do estireno com água, onde é empregado como agente expensor o penteno, um hidrocarbureto que se deteriora rapidamente pela reação fotoquímica gerada pelos raios solares. Através desse processo é obtido um plástico celular rígido, constituído de um compósito de pérolas expandidas de até 3 mm de diâmetro (constituído de 98 % de ar e 2 % de estireno).

No presente trabalho serão usados como núcleos a espuma de poliestireno expandido (EPS) e a bucha vegetal impregnada com resina.

2.4.3 ADESIVOS

Segundo Callister (2002), um adesivo é uma substância usada para unir as superfícies de dois materiais sólidos (denominadas superfícies aderentes), com intuito de produzir uma junta com alta resistência ao cisalhamento. Os adesivos devem ainda ser homogêneos e molhar o substrato, pois a uniformidade de textura evita a formação de pontos de concentração de tensões, que diminuem a resistência mecânica.

Para a ocorrência de uma boa adesão entre as superfícies a serem unidas, o adesivo deve apresentar no momento de sua aplicação uma energia de coesão menor do que a energia de adesão, isto é, deve ser fluido o suficiente para molhar toda a superfície de contato do substrato, de modo a evitar a formação de bolhas de ar e atuar como foco de tensão, enfraquecendo a junta adesiva (MANO; MENDES, 1999).

Os adesivos podem ser classificados em três tipos, de acordo com sua origem. Podem ser naturais, semissintéticos e sintéticos. Os adesivos naturais podem ser obtidos de fontes animais como, por exemplo, os peixes e ossos; vegetais, como dextrina e goma arábica; e minerais, como os silicatos. Os adesivos semissintéticos são derivados dos produtos naturais que sofrem modificação química como, por exemplo, o nitrato de celulose e o poliuretano (PU) baseado em óleo de mamona. Os adesivos sintéticos são formados através da reação de poliadição e policondensação, como é o caso dos polímeros poli-acetato de vinila, poliuretano, resina uréica e resina epóxi (MANO; MENDES, 1999).

Nos painéis sanduíches os adesivos possuem uma importância crucial, pois a ligação entre as faces e o núcleo deve ser muito forte, para que não ocorra o descolamento do painel. As

propriedades mecânicas dos adesivos devem também ser tão boas quanto às propriedades dos núcleos (ALMEIDA, 2009).

A escolha do material adesivo ocorre de acordo com o processo de fabricação e o tipo de material usado nas faces e no núcleo. A partir disso, podem-se utilizar dois tipos de materiais para o processo de adesão dos componentes:

- (a) adesivos de base solvente;
- (b) adesivos de dois componentes.

O primeiro tipo de adesivo é constituído por uma base solvente que é aplicada em ambas as superfícies a serem unidas. Após um período curto de secagem, as superfícies são prensadas em conjunto. Os materiais adesivos possuem uma boa capacidade de aderência inicial e o seu tempo de endurecimento pode ser reduzido através da aplicação de pressão e temperatura.

Os adesivos bicomponentes são misturados no momento da aplicação e após um determinado período de tempo, os componentes reagem e endurecem rapidamente. No entanto, estas resinas necessitam ser mantidas sobre pressão durante mais tempo do que outros tipos de adesivo (CALLISTER, 2002).

Os materiais usados neste trabalho como adesivos serão as resinas de poliéster ortoftálica e epóxi.

2.4.4 DESEMPENHO DOS PAINÉIS SANDUÍCHES

Na análise do desempenho dos painéis sanduíches, as propriedades mecânicas devem ser avaliadas levando-se em conta a complexidade da interação mecânica e adesão entre as faces e o núcleo. O comportamento de um painel sanduíche pode ser comparado a uma viga em I, onde as faces funcionam como banzos, suportando os esforços de tração e compressão, e o núcleo funciona como alma do perfil, estabelecendo deste modo a distância entre as faces e suportando os esforços cisalhantes.

O aumento da espessura do núcleo no painel ocasiona um aumento da rigidez de flexão, assim como, numa viga, a rigidez aumenta com a distância entre os banzos. Logo, a teoria das vigas

pode ser adaptada para painéis sanduíches com as devidas modificações. Segundo Allen (1969) e Mendonça (2005), a validade desta teoria baseia-se nas seguintes hipóteses:

- a) as três camadas estão firmemente ligadas;
- b) a rigidez das faces é significativamente superior à rigidez do núcleo;
- c) a seção transversal é plana e ortogonal ao eixo longitudinal do painel, e assim permanece quando o painel é fletido (hipótese de Bernoulli).

No comportamento do painel devem ainda ser avaliados os parâmetros de rigidez e de resistência à ruptura. Estes parâmetros são independentes entre si, e na constituição do painel é possível ter um material com elevada rigidez (deformação reduzida) e reduzida resistência à ruptura, ou vice-versa, um painel com rigidez reduzida (deformação elevada) e elevada resistência à ruptura (ALMEIDA, 2009).

No dimensionamento de painel sanduíche, o parâmetro de deformação é determinante, seguido da resistência ao cisalhamento. As deformações máximas dos painéis constituem um critério de dimensionamento importante para os estados limites de serviço, e se torna imprescindível na limitação do valor das flechas dos painéis e nas deformações ao longo do tempo. As flechas são, sobretudo, devidas às deformações do painel causadas por esforços axiais, de flexão das faces e por esforços cisalhantes do núcleo, podendo ainda ser aumentadas pelas deformações locais do núcleo ou nas ligações junto aos apoios.

De acordo com Almeida (2009), um critério importante que deve ser avaliado nos painéis sanduíches é a sua resistência. Estes painéis apresentam diversos modos de ruptura que podem limitar e condicionar sua capacidade resistente. A resistência de um painel depende dos materiais constituintes dos componentes (faces e núcleo), da aderência entre eles, das dimensões do painel (espessura, largura ou a forma das faces) e da geometria da estrutura em si (vão, da largura dos suportes ou das fixações).

Os modos de ruptura de painéis sanduíches podem também ser influenciados por diferentes fatores como, por exemplo, o tipo de carregamento, a idade do painel, a temperatura e a umidade relativa presentes no ambiente, entre outros. Entre os vários modos de ruptura de um painel, Davies (2001) menciona como principais:

- ruptura por tração das faces;
- ruptura por instabilidade local das faces, devido a esforços de compressão;
- ruptura por cisalhamento do núcleo ou do material de aderência entre o núcleo e a face;
- ruptura por esmagamento da face e do núcleo junto a um apoio;
- ruptura nas zonas de fixação, por tração, compressão ou cisalhamento.

2.4.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PAINÉIS SANDUÍCHES

Projetos de painéis sanduíches requerem formulações matemáticas complexas, principalmente se tratando de materiais compósitos, onde o comportamento no regime elástico do material é de vital importância no desempenho mecânico do painel. As propriedades mecânicas de um painel sanduíche, geralmente podem ser determinadas experimentalmente, porém é de grande utilidade dispor de modelos analíticos, baseados em métodos numéricos, que permitam estimar e descrever o comportamento do material precedente à sua fabricação.

Entre os métodos mais utilizados para simular modelos experimentais, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é, atualmente, um dos mais importantes para se obter a solução aproximada de problemas físicos modelados através de equações diferenciais parciais, onde é possível através de simulações computacionais reduzir a quantidade de protótipos de testes, e executar múltiplas análises, que podem ser testadas com rapidez, eficiência, e economia de custo e tempo (CHAVES, 2010).

O MEF é uma ferramenta matemática bastante utilizada nos problemas de engenharia em análise mecânica de problemas estruturais. O método consiste basicamente em dividir o domínio do problema estudado em várias regiões menores interconectadas, denominadas *elementos*, e a partir daí chegar à solução geral (ALVES FILHO, 2005).

Após a determinação das matrizes elementares inicia-se o processo de montagem das matrizes globais, que leva em consideração a interconexão dos nós e as condições de contorno. Posteriormente a esse processo são inseridas no problema as ações externas conhecidas, e com isto são completadas as equações matriciais a serem resolvidas (COOK, 1989).

Atualmente, a análise do comportamento estrutural de material pode ser feita por meio de um programa computacional, onde é possível a criação do modelo geométrico, geração do modelo discretizado, além da definição e aplicação das propriedades dos materiais, carregamento, condições de apoio etc. Entre os vários programas computacionais de análise de estruturas, o ANSYS® é um programa que possui grande versatilidade de modelagem em diversos setores da engenharia. Para realizar simulações no ANSYS®, adota-se basicamente os fundamentos do MEF, onde as seguintes etapas devem ser definidas:

- a) tipo de elemento utilizado (viga, placa, sólido etc.);
- b) propriedades mecânicas do material (propriedades elásticas, físicas etc.);
- c) propriedades geométricas (área e inércia da seção transversal etc.)
- d) geração do modelo (malha de elementos finitos: nós e elementos);
- e) aplicação das forças atuantes na estrutura;
- f) imposição das condições de contorno (condições de apoio);
- g) tipo de cálculo a ser efetuado (estático, dinâmico, flambagem etc.);
- h) análise dos resultados (listar, gerar gráficos e exportar).

No presente trabalho a simulação numérica servirá como ferramenta de análise qualitativa, na verificação da viabilidade de confecção dos painéis sanduíches, com facilidade de variação da geometria, tipos de materiais, orientação do reforço, assim como as condições de apoio e de carregamento. As simulações numéricas também possibilitarão analisar o desempenho estrutural do painel a ser fabricado para uso como forro.

No capítulo a seguir serão apresentados os materiais e métodos usados no desenvolvimento deste trabalho.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

No programa experimental, prepararam-se os compósitos e os protótipos dos painéis sanduíches e efetuaram-se os seguintes ensaios para a caracterização mecânica dos painéis e dos seus materiais constituintes:

- Métodos de preparo e produção dos compósitos, dos núcleos e dos painéis sanduíches;
- Massa específica;
- Ensaio à tração dos compósitos das faces;
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos compósitos;
- Ensaio à compressão dos núcleos;
- Ensaio à flexão dos painéis sanduíches;
- Simulação numérica dos painéis sanduíches.

3.2 MATERIAIS

As seguintes matérias-primas foram utilizadas neste trabalho:

- **Resina poliéster:** utilizou-se o poliéster insaturado ortoftálico, adquirido da empresa Avipol Comercial Ltda, com o catalisador à base de metil-etil-cetona (BUTANOX), na proporção de 3 % em massa, conforme recomendado pelo fornecedor. As características da resina poliéster, segundo informações do fabricante, estão apresentadas na Tabela 4. A resina de poliéster foi usada na confecção dos compósitos, na impregnação do núcleo de bucha vegetal e como adesivo nos painéis sanduíches com núcleo de bucha vegetal. A escolha do poliéster foi devida a boa compatibilidade com fibras vegetais e por ser de fácil manuseio (SILVA FILHO; GARCEZ, 2010).

Tabela 4 – Características da resina de poliéster utilizada

Características	Resina Poliéster	Catalisador Butanox
Aparência	Líquido viscoso âmbar	Líquido incolor
Viscosidade 25 °C, cPs	1600	–
Peso específico, 25 °C, (g/cm ³)	1,20 ± 0,05	1,14 ± 0,05

Fonte: AVIPOL, 2012.

- **Resina epóxi:** utilizou-se dois tipos de resina epóxi bicomponente: epóxi fluida (EF) e epóxi incolor (EI). A epóxi fluida BotaFIX EPF é da empresa MC – Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., e a epóxi incolor e o endurecedor, referência SQ2001/3155, foram adquiridos da empresa Avipol Comercial Ltda. Ambas resinas são produtos de sistema resultante da reação da epiclorigidrina com o bisfenol A, e o endurecedor é à base de poliamina modificado. As características dos componentes, segundo informações dos fabricantes, estão apresentadas na Tabela 5. A resina epóxi foi utilizada apenas como adesivo nos painéis sanduíches com núcleo de EPS, devido a incompatibilidade do poliéster com o EPS. A escolha destas resinas como adesivo foi devida a excelente aderência a diversos substratos, elevadas resistências mecânicas e por possibilitar o preparado diretamente sobre a superfície a ser colada (VIEIRA, 2008).

Tabela 5 – Características da resina epóxi utilizada

Características	Resina Epóxi Fluida	Resina Epóxi Incolor	Endurecedor
Aparência	Líquido pastoso cinza	Líquido viscoso incolor	Líquido amarelado
Viscosidade 20 °C, cPs	–	11000 – 14000	100 máx.
Peso específico, 20 °C, (g/cm ³)	–	1,16 ± 0,01	1,005 ± 0,015
Proporção de mistura (g) (resina:endurecedor)	70 – 100	100	23

Fonte: MC, 2012; SILAEX, 2012.

- **Bucha vegetal:** utilizou-se buchas com comprimento variando de 85 cm à 100 cm e diâmetro de 2 cm à 9 cm, colhidas na mesma safra e oriundas do Estado de Minas Gerais. As buchas foram recebidas em natura, sem a epiderme e excesso de sementes, pré-lavadas e secas, conforme comercializadas pela empresa Buchas Isa Ltda. do Estado de São Paulo (Figura 15). A bucha vegetal foi selecionada devido à disponibilidade no

mercado e por ter uma constituição estrutural natural que formam um tecido tridimensional com boa resistência (TANOBE, 2003).

Figura 15 – Bucha vegetal



Fonte: Autora, 2013.

- **Fibra de rami:** usou-se fibras de rami não fiadas (Figura 16a) e tecido bidirecional com fios de rami de diâmetro aproximado de 0,5 mm, conhecido como telinha (Figura 16b), oriundas do Estado do Paraná. As fibras foram adquiridas da Sisalsul Indústria e Comércio Ltda., do Estado de São Paulo. A fibra de rami foi escolhida por causa de suas propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade, comprimentos (longas com até 1,2 m) e disponibilidade no mercado (SOARES, 2012; ANGELINI, 1999).

Figura 16 – Composições do rami

a) Fibra de rami



b) Tecido de fio de rami



Fonte: Autora, 2013.

- **EPS:** as espumas de EPS utilizadas são do tipo blocos, usadas na construção civil em enchimentos de lajes de concreto armado, com dimensão de 125 cm × 40 cm × 7 cm, da empresa Termotécnica Ltda. (Figura 17). A opção pelo EPS foi devido a suas propriedades mecânicas e isolantes, disponibilidade de aquisição e que pode ser 100 % reciclado.

Figura 17 – Poliestireno expandido



Fonte: Mundo, 2012.

3.3 PREPARAÇÃO E PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS, NÚCLEOS E PAINÉIS

3.3.1 FIBRAS

Os feixes de fibra de rami foram cortados em comprimentos de 20,5 cm e alinhados em camadas finas, conforme a Figura 19a. Depois as camadas foram secas em estufa a 60 °C por 24 horas e conformadas na prensa hidráulica, aplicando-se uma força de até 500 kN por até 12 horas (Figura 18).

A trama do tecido bidirecional (telinha) foi cortada em peças de 20,5 cm × 20,5 cm, secas em estufa à 60 °C por 24 horas e conformadas em uma prensa hidráulica com força aproximada de 500 kN por até 12 horas (Figura 19).

Figura 18 – Fibras de rami alinhadas

a) Antes da prensagem



b) Depois da prensagem



Fonte: Autora, 2013.

Figura 19 – Tecido bidirecional de rami prensada



Fonte: Autora, 2013.

As buchas foram umedecidas e cortadas ao meio para retirada do excesso do miolo (parte mais espessa no interior da bucha). Em seguida, foram cortadas com comprimento de 20,5 cm. As mantas foram conformadas na prensa hidráulica ainda úmidas, aplicando-se uma força de até 600 kN por 24 horas e depois secas em estufa por até 24 horas a 60 °C (Figura 20).

As buchas usadas para a confecção do núcleo foram lavadas e cortadas com comprimento de 3 cm, depois secas em estufa a 60 °C por até 24 horas e resfriadas no dessecador (Figura 21).

Figura 20 – Buchas preparadas para reforço dos compósitos

a) Antes da prensagem

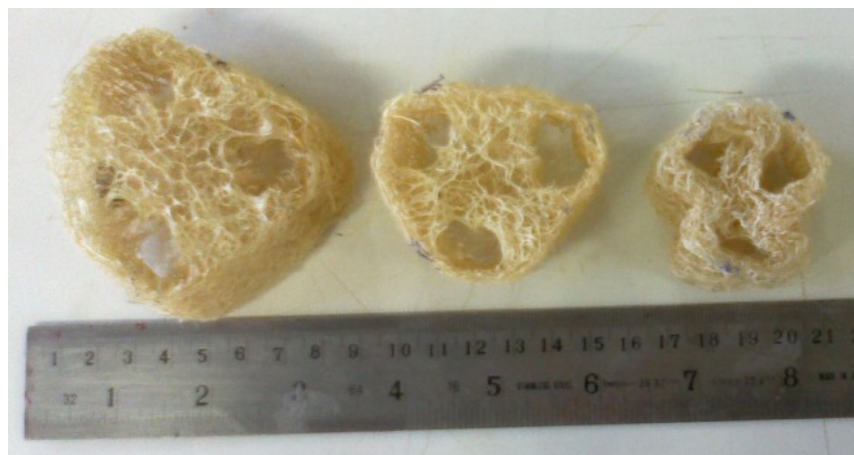


b) Depois de prensadas



Fonte: Autora, 2013.

Figura 21 – Buchas usadas para o núcleo



Fonte: Autora, 2013.

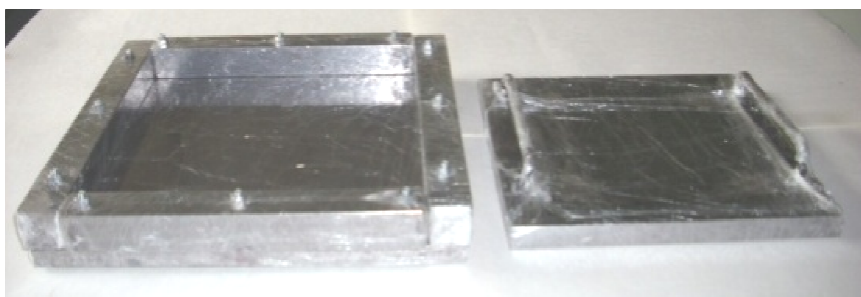
O processo de prensagem das fibras foi para facilitar a moldagem dos compósitos. A carga usada no processo de prensagem das fibras foi definida experimentalmente, de modo a obter uma espessura desejada de 3 mm.

Após o processo de secagem de todas as fibras na estufa, observou-se uma perda de umidade de aproximadamente 10 %. Este resultado é coerente com os valores encontrados na literatura por Bledzki e Gassan (1999).

3.3.2 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS (FACES)

Os compósitos foram moldados por compressão à frio, sob a base de uma fôrma metálica do tipo macho-fêmea, revestidas de papel alumínio para uma melhor desmoldagem dos compósitos. Este procedimento resulta em compósitos com baixo teor de vazios, além de serem de fácil execução e baixo custo. A fôrma metálica usada possui dimensões internas de 20,5 cm × 20,5 cm × 2,5 cm e a tampa dimensões de 20,3 cm × 20,3 cm × 1,8 cm, conforme Figura 22.

Figura 22 – Fôrma metálica usada para preparação dos compósitos



Fonte: Autora, 2013.

Para a produção dos compósitos, fixou-se a espessura das placas em 3 mm. Esta espessura foi definida por facilidade de produção e manuseio, bem como, desempenho mecânico adequado para a produção dos painéis.

Os teores de volume de fibras (V_f) selecionados para a confecção dos compósitos foram de 20 %, 30 % e 40 %, para os compósitos de poliéster/bucha vegetal e de 30 %, 40 %, e 50 %, para os compósitos de poliéster/rami. Os volumes das fibras e das matrizes dos compósitos foram calculados em função da massa da fibra e da resina e suas respectivas massas específicas, para cada teor pretendido. Na literatura estes tipos de compósitos reforçados com fibras vegetais são geralmente produzidos com volumes de fibras aproximados de 5 % à 30 %. Visando investigar o desempenho mecânico desses compósitos com maior volume de fibra, tomou-se o V_f de 20 % e 30 % como referencial comparativo e variou-se até 40 % e 50 %, buscando a substituição de maior volume de material não biodegradável por outro biodegradável, além, é claro, de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos. A Tabela 6 apresenta os teores de fibra em volume para os compósitos produzidos.

Tabela 6 – Massa de resina e fibra para cada compósito

Tipo de compósito	Teor de fibra em volume nominal (%)	Massa de fibra (g)	Massa de resina (g)
Rami / Poliéster	30	60,14	104,14
	40	80,18	89,26
	50	100,23	74,38
Bucha vegetal / Poliéster	20	37,72	119,01
	30	56,58	104,14
	40	75,43	89,26

Fonte: AUTORA, 2013.

Todos os compósitos foram preparados com a aplicação de camadas alternadas de fibras em apenas uma direção (0°) e resina previamente misturada com o catalisador (Figura 23a e 23b). Para cada placa de compósito utilizou-se de duas a três camadas, de acordo com os teores adotados de fibras. Utilizou-se o tempo de preparo de 5 min a 10 min, conforme o número de camadas adicionadas na preparação do compósito. Em cada camada adicionada fez-se o adensamento das fibras com a resina (Figura 23c). No processo de adensamento foi necessário usar uma massa de resina equivalente até duas vezes a massa de fibra, com o intuito de garantir a molhabilidade e impregnação das fibras, conforme o procedimento de Soares (2012).

Figura 23 – Produção dos compósitos

a) Aplicação de resina na forma



b) Adição da camada de fibra



Figura 23 – Continuação

c) Adensamento das fibras com a resina de poliéster



d) Aplicação de resina nas fibras



Fonte: Autora, 2013.

Após este procedimento a fôrma foi fechada com a tampa e colocada em uma prensa hidráulica (Figura 24), marca EMIC, modelo PCN 100/20, capacidade 1200 kN. Em seguida aplicou-se uma força que variou de 100 kN até 600 kN, obtidas experimentalmente para cada tipo de compósito (Tabela 7), com os objetivos de eliminar o máximo de vazios, atingir a espessura fixada em 3 mm. O excesso de resina foi retirado com a aplicação da força pela folga de 1 mm deixada em cada lateral entre a tampa e o molde metálico.

Figura 24 – Prensagem do compósito



Fonte: Autora, 2013.

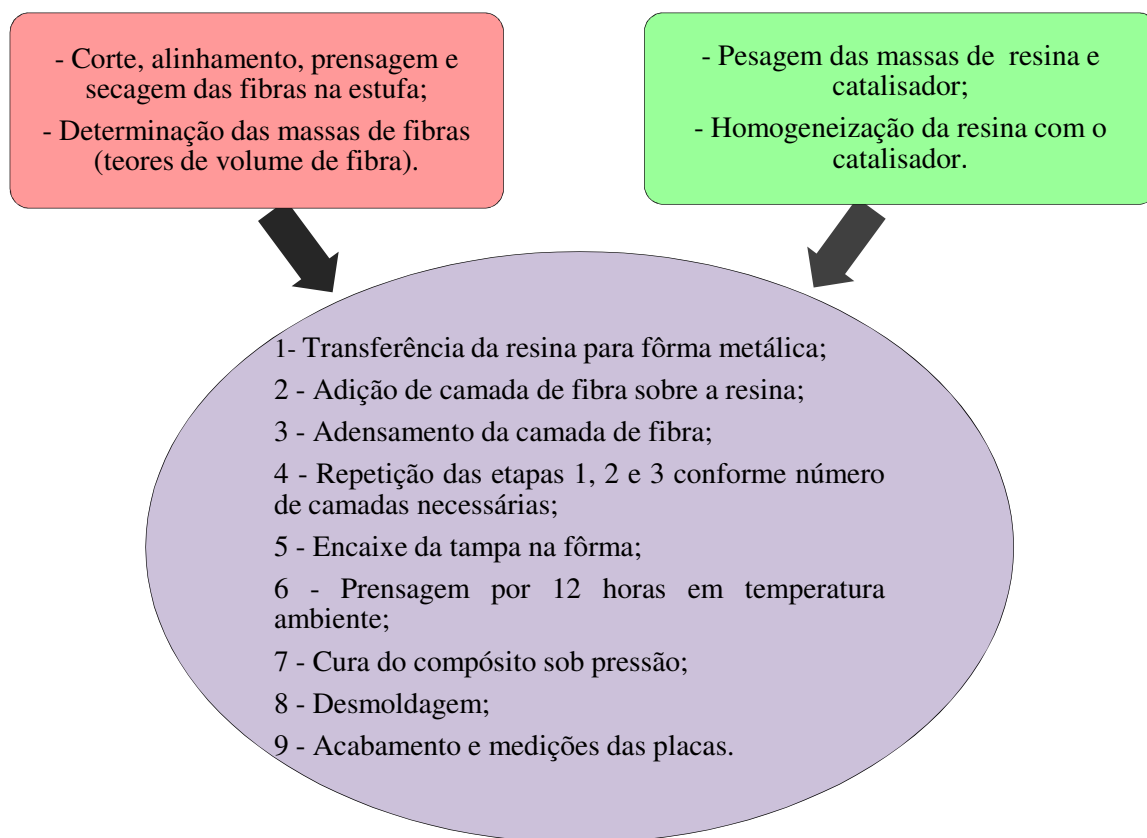
Tabela 7 – Força aplicada na preparação dos compósitos

Tipo de compósito	Teor de fibra em volume nominal (%)	Força (kN)
Rami / Poliéster	30	150
	40	300
	50	500
Bucha vegetal / Poliéster	20	100
	30	500
	40	600

Fonte: AUTORA, 2013.

A cura dos compósitos foi feita em temperatura ambiente entre 25 °C e 30 °C, por 12 horas na prensa hidráulica sob o efeito da força aplicada. Depois de curadas, as placas foram desmoldadas e passou pelo processo de lixamento para retirar os excessos de resina nas bordas, medição das dimensões e determinação da massa. Em seguida calcularam-se os volumes das placas e massa específica, obtidos para cada compósito. As principais etapas de preparação e confecção dos compósitos feitos neste trabalho estão resumidas na Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma de produção dos compósitos



Fonte: Autora, 2013.

As placas dos compósitos produzidos nas dimensões de 20,5 cm × 20,5 cm são mostradas na Figura 26.

Figura 26 – Placas dos compósitos

a) Poliéster/fibras alinhadas de rami



b) Poliéster/tecido bidirecional de rami



c) Poliéster/bucha vegetal



Fonte: Autora, 2013.

3.3.3 PRODUÇÃO DOS NÚCLEOS

Para a produção dos núcleos fixou-se a espessura de 3 cm. Esta espessura foi definida de acordo com os resultados obtidos nas simulações numéricas dos painéis sanduíches, apresentados na seção 3.2.4.1.

Os blocos de EPS foram medidos e cortados na dimensão de 20,5 cm × 20,5 cm, depois as superfícies foram lixadas para se obter uma textura rugosa, permitindo uma melhor aderência entre as faces e o núcleo.

Para a preparação dos núcleos de bucha vegetal foi utilizada uma fôrma de madeira com fundo vazado de dimensões interna de 21 cm × 21 cm × 2 cm. O uso da fôrma com fundo vazado foi necessário para que o excesso de resina usada na impregnação do núcleo escoasse e não formasse uma camada rígida na superfície inferior do núcleo.

Os núcleos de bucha foram preparados com o encaixe das fatias de bucha recortadas em 3 cm na fôrma de madeira, depois impregnadas com resina poliéster por toda sua superfície e deixadas curar em temperatura ambiente (25° C a 30° C) por 12 horas. Após este procedimento os núcleos foram desenformados, medidos e pesados (Figura 27). O uso da bucha nesta configuração impregnada com resina de poliéster foi feita com o intuito de obter

um núcleo com geometria semelhante ao do núcleo colmeia. A impregnação da bucha com a resina poliéster foi feita para dar maior rigidez à estrutura natural da bucha vegetal, além de servir como proteção contra umidade e outros agentes degradantes à bucha.

Figura 27 – Produção do núcleo colmeia de bucha vegetal



Fonte: Autora, 2013.

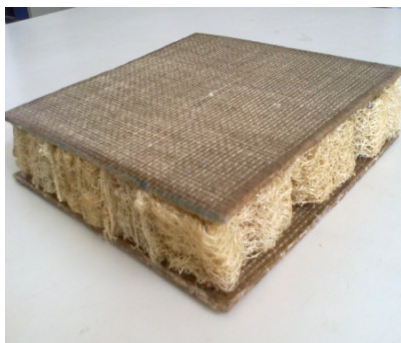
3.3.4 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS SANDUÍCHES

Para a confecção dos protótipos dos painéis selecionou-se o compósito de poliéster/tecido bidirecional de rami, com volume de 50 % de fibra, na espessura de 2 mm para a constituição das faces, e 3 cm para os dois tipos de núcleo. A escolha do tipo de reforço do compósito, o teor em volume de fibras dos compósitos e das espessuras dos componentes de faces e núcleos, foi feita de acordo com os resultados obtidos na simulação numérica dos deslocamentos dos painéis (seção 3.2.4.1), bem como pela facilidade de produção dos compósitos reforçados com tecido e dos painéis nessas dimensões.

As resinas usadas como adesivo foi o poliéster, nos painéis com núcleo de bucha, e as resinas epóxi fluida (cinza) e epóxi incolor para os painéis com núcleo em EPS. O uso da resina epóxi nos painéis de EPS foi devido à incompatibilidade de resina de poliéster com o EPS. A resina de poliéster possui solventes agressivos que degradam o EPS. As resinas foram preparadas nas proporções conforme especificações técnicas dos fabricantes (Tabelas 4 e 5), espalhadas na superfície dos compósitos e coladas nos núcleos. Os componentes foram prensados e curados sob pressão, em temperatura ambiente por 72 horas. A Figura 28 apresenta os painéis produzidos.

Figura 28 – Painéis sanduíches

a) Bucha vegetal e adesivo poliéster



b) EPS e adesivo epóxi incolor



c) EPS e adesivo epóxi cinza



Fonte: Autora, 2013.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.4.1 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica da resina curada foi determinada pela relação entre massa e volume de três corpos de prova cilíndricos moldados, conforme mostrado na Figura 29, com a mistura da resina com o catalisador, na proporção de 3 % em massa. A massa específica média obtida para a resina de poliéster foi de $1,18 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Figura 29 – Corpos de prova para a determinação da massa específica da resina de poliéster



Fonte: Autora, 2013.

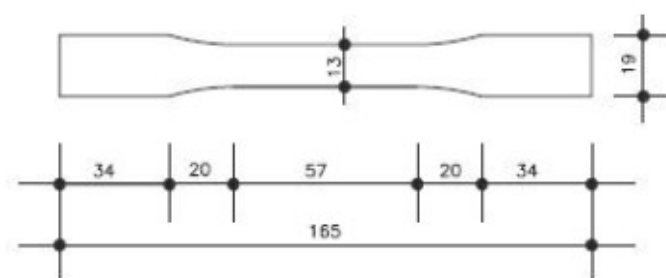
A massa específica das fibras foi determinada seguindo procedimento adotado por Motta (2005), por picnometria, no equipamento multipicnômetro da marca Quantachrome Instruments com gás hélio. As amostras foram previamente secas em estufa a $60 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ até constância de massa, em seguida resfriadas à temperatura ambiente em um dessecador com sílica gel. Realizaram-se cinco determinações para cada tipo de fibra. As massas específicas média das fibras vegetais, obtidas foram de $1,59 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ para as fibras de rami, e de $1,50 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ para a bucha vegetal. As massas específicas obtidas das fibras de rami e de bucha vegetal são maiores dos que os encontrados na literatura, que é de $1,51 \text{ g/cm}^3$ para as

fibras de rami e de $0,92 \text{ g/cm}^3$ para a bucha vegetal (SATYANARAYNA, 2007; TANOBE, 2003).

3.4.2 TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS

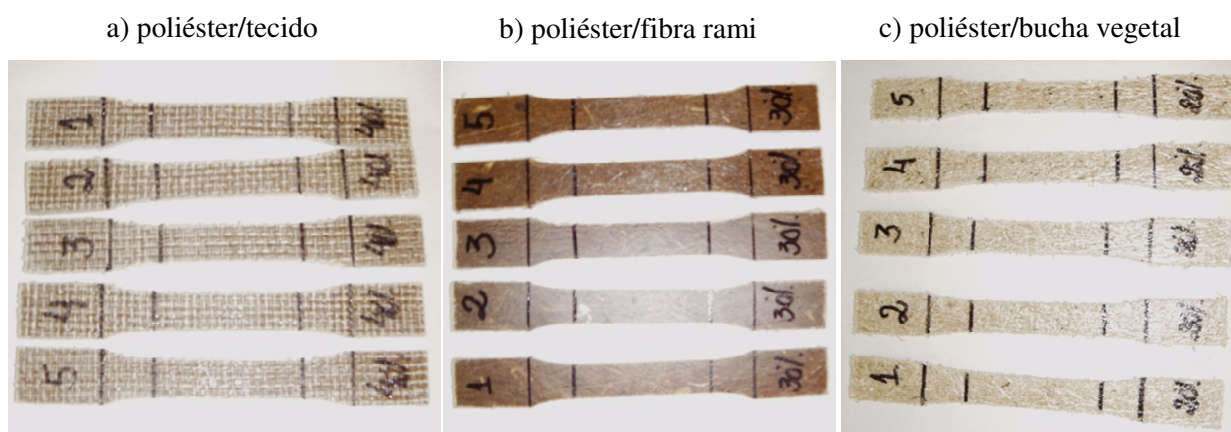
Na caracterização dos compósitos à tração, ensaiaram-se 5 corpos de prova (Figura 31) de cada formulação com os respectivos teores de fibras apresentados anteriormente, na Tabela 6. Os corpos de prova foram recortados com precisão no sentido do alinhamento das fibras, no formato e dimensão da Figura 30, de acordo com a ASTM D638:2010, em uma máquina de corte de precisão com fresa, marca ROUTER.

Figura 30 – Corpo de prova usado no ensaio de tração



Fonte: Soares, 2012.

Figura 31 – Corpos de prova dos compósitos



Fonte: Autora, 2013.

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a ASTM D3039:2008, que estabelece os procedimentos para ensaios de tração em compósitos. A velocidade de deslocamento das garras da máquina de ensaio foi de 2 mm/min .

O equipamento usado foi uma máquina universal de ensaios da marca INSTRON, modelo 5982, com célula de carga de 100 kN. Para a medida do alongamento foi utilizado um extensômetro, também da marca INSTRON, com capacidade de alongamento máximo de 25 mm (Figura 32).

Figura 32 – Ensaio de tração dos compósitos



Fonte: Autora, 2013.

No ensaio de tração foram determinadas as seguintes propriedades mecânicas de acordo com a ASTM D3039:2008:

- módulo de elasticidade longitudinal;
- limite de resistência à tração longitudinal;
- limite de deformação à tração longitudinal.

3.4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

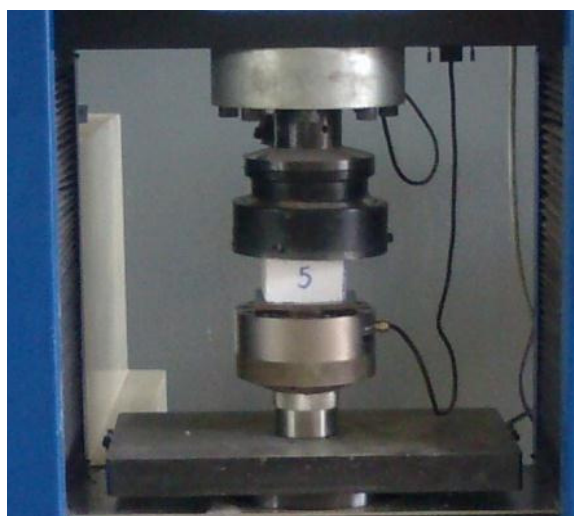
As amostras analisadas foram retiradas dos compósitos reforçados com fibras e submetidas à análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o ensaio de tração, com o objetivo de avaliar a superfície de fratura dos compósitos. A metalização das amostras foi feita pelo recobrimento de uma fina camada com ouro (15 nm). As micrografias das seções de

ruptura foram feitas num equipamento CARL ZEISS, modelo EVO MA10, com feixes de elétrons de 5 KV e detector de elétrons secundários.

3.4.4 COMPRESSÃO DOS NÚCLEOS

Na caracterização dos núcleos à compressão, ensaiaram-se 10 corpos de prova de cada núcleo. Os corpos de prova foram confeccionados em dimensão de 8 cm de largura \times 8 cm de comprimento, 5 cm de altura para o EPS e 3 cm para a bucha vegetal. O ensaio de compressão seguiu as recomendações da ABNT NBR 8082:1983 que adota como resistência à compressão a tensão a 10 % de deformação, ou no seu colapso em caso da força máxima ser atingida antes de 10 % de deformação. Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 60000, e velocidade de ensaio de 0,25 cm/min (Figura 33). Determinou-se também o módulo de elasticidade dos núcleos para utilização na simulação dos painéis sanduíches.

Figura 33 – Ensaio de compressão dos núcleos



Fonte: Autora, 2013.

3.4.5 FLEXÃO DOS PAINÉIS SANDUÍCHES

O ensaio de flexão ocorreu de acordo com a ASTM C393/C393M:2011, que estabelece os procedimentos para a realização de ensaios de painéis sanduíches à flexão. De acordo com as dimensões dos corpos de prova e vão recomendados pela norma, os únicos modos de falha do painel são de cisalhamento do núcleo ou descolamento entre as faces e núcleo.

Na caracterização dos painéis, ensaiaram-se 7 corpos de prova dos painéis com núcleo de bucha e de EPS com adesivo epóxi fluida (EF), e 4 corpos de prova dos painéis com núcleo de EPS e adesivo epóxi incolor (EI). Os corpos de prova foram recortados dos painéis produzidos (Fig. 28), com 5 cm de largura e 20 cm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Corpos de prova dos painéis sanduíches

a) Poliéster/bucha vegetal



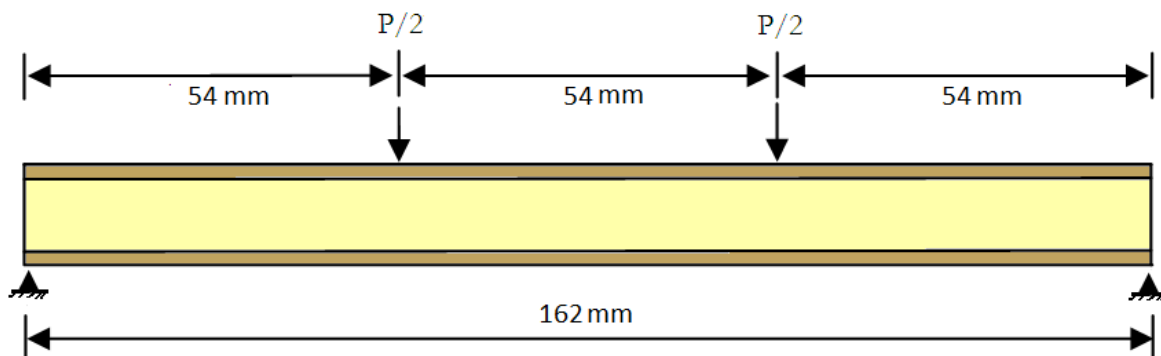
b) EF/EPS e EI/EPS



Fonte: Autor, 2013.

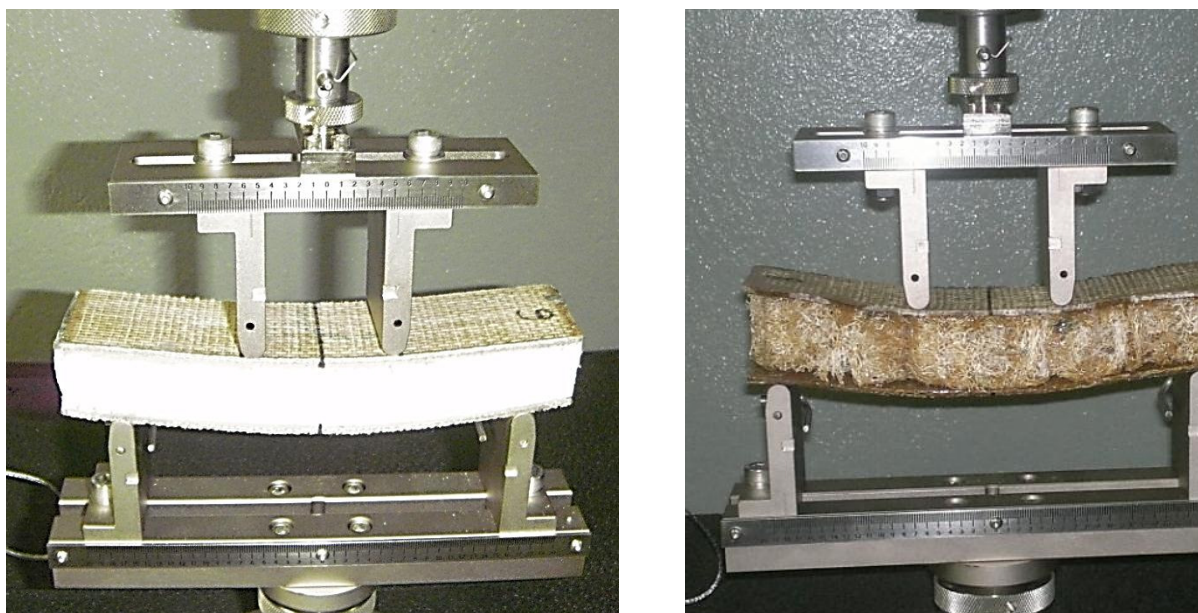
O ensaio de flexão foi realizado em 4 pontos, como ilustrado na Figura 35, com vão de 162 mm e velocidade de 6 mm/min. O equipamento usado no ensaio foi uma máquina universal de ensaios da marca INSTRON, modelo 5982 e célula de carga de 5 kN (Figura 36). A flecha foi medida apenas com o deslocamento das garras durante o ensaio. O módulo de elasticidade do painel foi determinado pela inclinação do trecho inicial (elástico) da curva tensão \times deformação obtida no ensaio de flexão.

Figura 35 – Configuração padrão de ensaio de flexão em 4 pontos



Fonte: Autora, adaptado de ASTM C393/C393M:2001, 2013.

Figura 36 – Ensaio à flexão dos painéis sanduíches



Fonte: Autora, 2013.

3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS PAINÉIS SANDUÍCHES

3.5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A simulação numérica apresentada nesta seção tem como objetivo o desenvolvimento de modelos numéricos capazes de simular o desempenho estrutural dos painéis sanduíches em serviço e dos materiais constituintes. Através dos modelos desenvolvidos, pretende-se constituir uma ferramenta de cálculo, calibrada com os resultados experimentais, que auxilie nas análises do comportamento do painel, ao variar as geometrias, materiais, condições de apoio e de carregamento do painel.

Os modelos numéricos foram construídos com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) através do programa computacional ANSYS®. A modelagem numérica consistiu em empregar elementos disponíveis na biblioteca do ANSYS® para simular as partes características dos componentes do painel.

As simulações foram divididas em três etapas. A **primeira etapa** foi realizada antes da confecção dos compósitos usados nas faces, com o objetivo de estimar as propriedades e espessuras a serem adotadas para os compósitos. A **segunda etapa** foi feita após a

caracterização mecânica dos compósitos das faces, com os valores obtidos experimentalmente, para a seleção dos componentes a serem produzidos para a constituição dos painéis. A **terceira etapa** foi realizada com intuito de reproduzir o comportamento do protótipo do painel ensaiado à flexão, para posteriormente aplicar esta modelagem em painéis com dimensões similares a componente de forro disponível no mercado, para eventual produção e aplicação dos mesmos.

3.5.2 DESCRIÇÃO DO MODELO DO PAINEL

O programa ANSYS® apresenta vários tipos de elementos finitos, selecionados de acordo com que se deseja analisar. Para análises de painéis pode-se usar elementos tipo SOLID, no qual analisa peças levando em consideração seu volume, e elementos tipo SHELL, que são usados para análise de placas.

Os elementos usados na modelagem foram o elemento SHELL99 e o SHELL63, conforme ilustra a Figura 37a e 37b, que são elementos do tipo placa estratificada, com a configuração de oito nós, com seis graus de liberdade em cada nó (deslocamentos em x, y e z, e rotações em torno de x, y e z), e o elemento SOLID45 (Figura 37c), que é um elemento sólido usado para placas de camadas espessas, com três graus de liberdade por nó (deslocamentos em x, y e z).

Figura 37 – Elementos usados na modelagem dos painéis no ANSYS®

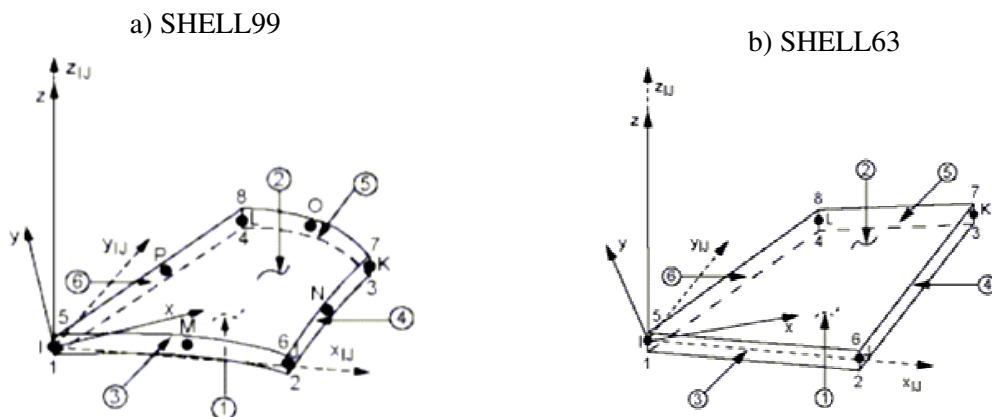
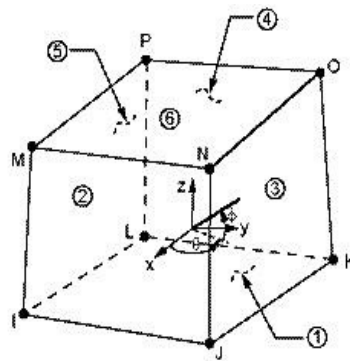


Figura 37 – Continuação

c) SOLID45



Fonte: Adaptado do ANSYS®, 2013.

O elemento SHELL99 foi utilizado para simular os painéis sanduíches na primeira e segunda etapa. O elemento SHELL63 foi utilizado para modelar os compósitos das faces do painel e o SOLID45 foi utilizado para simular os núcleos na terceira etapa. O uso destes dois elementos para o modelo de viga foi feito conforme procedimento usado por Almeida (2009) e Manalo *et al.* (2010).

3.5.3 PROPRIEDADES ELÁSTICAS DO PAINEL

As propriedades elásticas usadas na modelagem por elementos finitos foram calculadas teoricamente através de formulações da Micromecânica (BERTHELOT, 1992). As formulações matemáticas usadas no cálculo das propriedades elásticas das camadas dos painéis foram determinadas em função das propriedades elásticas dos elementos constituintes das faces (matriz e reforço) e do núcleo:

$$C_{ij} = f(E_f, E_m, V_f, V_m, \nu_f, \nu_m)$$

onde:

C_{ij} : propriedades elásticas do compósito ($E_1, E_2, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$);

E_f, E_m : módulos de elasticidade da fibra e da matriz, respectivamente;

ν_f, ν_m : coeficientes de Poisson da fibra e da matriz, respectivamente;

V_f, V_m : volume de fibras e da matriz.

Na primeira etapa foi usado o método da Micromecânica para o cálculo das propriedades elásticas para cada tipo de camada de reforço, apresentado a seguir:

a) **Camada de reforço unidirecional** (BOGDANOVICH, 1996):

- Módulo de elasticidade longitudinal (E_1)

$$E_1 = E_f V_f + E_m E_m \quad (1)$$

- Módulo de elasticidade transversal (E_2)

$$E_2 = \frac{\eta[1+(\eta-1)V_f]E_m}{[V_f+\eta(1-V_f)][1+(\eta-1)V_f]-(\eta V_m-v_{12}^f)^2 V_f(1-V_f)} \quad (2)$$

onde:

$$\eta = \frac{E_f}{E_m} \quad (3)$$

v_{12}^f : coeficiente de Poisson da fibra no plano 12.

- Coeficiente de Poisson (v_{12}) = (v_{13})

$$v_{12} = v_{12}^f V_f + v_m(1 - V_f) \quad (4)$$

- Coeficiente de Poisson (v_{23})

$$v_{23} = \frac{[v_{23}^f V_f + \eta V_m(1 - V_f)][1 + (\eta - 1)V_f] + (\eta V_m - v_{23}^f)^2 V_f(1 - V_f)}{[V_f + \eta(1 - V_f)][1 + (\eta - 1)V_f] - (\eta v_{23}^f - V_m)^2 V_f(1 - V_f)} \quad (5)$$

onde:

v_{23}^f : coeficiente de poisson da fibra no plano 23.

- Módulo de cisalhamento $(G_{12}) = (G_{13})$

$$G_{12} = G_m \frac{(G_f/G_m)(1+V_f)+(1-V_f)}{(G_f/G_m)(1-V_f)+(1+V_f)} \quad (6)$$

sendo:

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+v_f)} \quad \text{e} \quad G_m = \frac{E_m}{2(1+v_m)} \quad (7) \text{ e } (8)$$

onde:

(G_f) e (G_m) : são os módulos de cisalhamento da fibra e da matriz.

- Módulo de cisalhamento (G_{12})

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1+v_{23})} \quad (9)$$

b) Camada de reforço com tecido bidirecional equilibrado (BERTHELOT, 1992):

- Módulo de elasticidade longitudinal e transversal $(E_1) = (E_2)$

$$E_1 = \frac{1}{2}(1 - \alpha)\alpha_u(E_1^u + E_2^u) \quad (10)$$

- Coeficiente de Poisson $(v_{12}) = (v_{13})$

$$v_{12} = \frac{2v_{12}^u}{1 + \frac{E_1^u}{E_2^u}} \quad (11)$$

- Módulo de cisalhamento (G_{12}) = (G_{13})

$$G_{12} = G_{12}^u \quad (12)$$

sendo:

$$\alpha = \frac{4v_{12}^u}{\left(1 + \frac{E_1^u}{E_2^u}\right)^2} \quad \alpha_u = \frac{1}{1 - \frac{E_2^u}{E_1^u}v_{12}^u} \quad (13) \text{ e } (14)$$

onde:

E_1^u , E_2^u , G_{12}^u e v_{12}^u : são as propriedades elásticas da camada com reforço unidirecional que possui um volume de fibras igual ao volume de fibras da camada de tecido considerada.

c) **Camada de reforço de fibras contínuas dispersas aleatoriamente** (CHOU, 1992):

- Módulo de elasticidade(E)

$$E = \frac{E_f V_f}{3} \quad (15)$$

- Módulo de cisalhamento (G)

$$G = \frac{E_f V_f}{8} \quad (16)$$

- Coeficiente de Poisson (v)

$$v_{12} = \frac{1}{3} \quad (17)$$

Na segunda e terceira etapa foram usadas as fórmulas da Micromecânica apenas nos cálculos das propriedades de coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento, os quais não foram caracterizados experimentalmente.

3.5.4 PRIMEIRA ETAPA DA SIMULAÇÃO DOS PAINÉIS

O dimensionamento dos painéis foi baseado na ABNT NBR 14371:1999 – Forros de PVC rígido para instalação em obra – procedimento e na ABNT NBR 15366/1:2006 – Painéis e placas industrializadas com espuma rígida de poliuretano - parte 1. Dentre os ensaios recomendados por estas normas, foi escolhido o de *Determinação da deformação à flexão*, por ser um bom indicador do desempenho estrutural do painel. As flechas máximas admissíveis entre os pontos de fixação do painel, quando submetidos a uma força uniformemente distribuída, são: 3 mm (ABNT NBR 14371:1999) e 15 mm (ABNT NBR 15366/1:2006).

Nesta etapa inicial, as dimensões dos painéis foram fixadas conforme ilustrado na Tabela 8, na condição biapoiada e carregamento uniformemente distribuído de 500 N/m². Devido a carência de informações sobre especificações técnicas de procedimento de ensaio sobre o desempenho estrutural para componentes de forro, adotou-se este carregamento, referenciado pela ABNT NBR 15366/1:2006, em função do possível uso do painel em situações com acesso de pessoas. Quanto às dimensões, os valores foram adotados de acordo com os tamanhos e vãos considerados pelas normas consultadas.

As espessuras testadas para a constituição das faces e dos núcleos estão apresentadas na Tabela 8. Os valores adotados para as espessuras das faces e dos núcleos se deram em função da necessidade da configuração de estruturas delgadas para uso como forro. Os volumes de fibras usados na composição dos painéis foram os mesmos da confecção dos compósitos (30 %, 40 % e 50 %).

Tabela 8 – Espessuras dos componentes dos painéis sanduíches

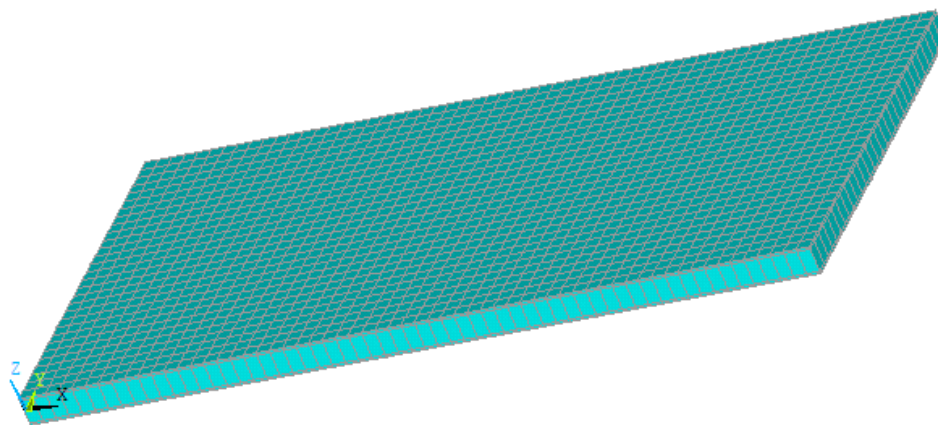
Dimensão dos painéis (m)	Faces (mm)	Núcleos (mm)
1,0 × 0,5	1, 2 e 3	10, 20 e 30
3,0 × 1,0	1, 2 e 3	10, 20, 30, 40 e 50

Fonte: Autora, 2013.

A densidade de malha escolhida para a simulação dos painéis foi de 60 × 30 elementos (Figura 38), com três camadas, sendo a primeira camada e a última constituída pelos materiais selecionados para as faces e a segunda camada constituída pelo material selecionado para os

núcleos. Outras malhas foram testadas, porém a variação entre os resultados foram insignificantes, adotando-se essa densidade devido a rapidez de cálculo.

Figura 38 – Modelo de painel sanduíche simulado gerado pelo ANSYS®



Fonte: Autora, 2013.

Nas simulações numéricas dos painéis realizados no ANSYS®, foi feita a variação dos teores de volume de fibras, das espessuras das faces e dos núcleos. Nesta etapa, os valores usados para o cálculo das propriedades elásticas dos materiais foram adotados da literatura conforme apresentadas na Tabela 9. Os painéis constituídos com bucha vegetal não foram simulados devido à falta de informação de suas propriedades mecânicas na literatura.

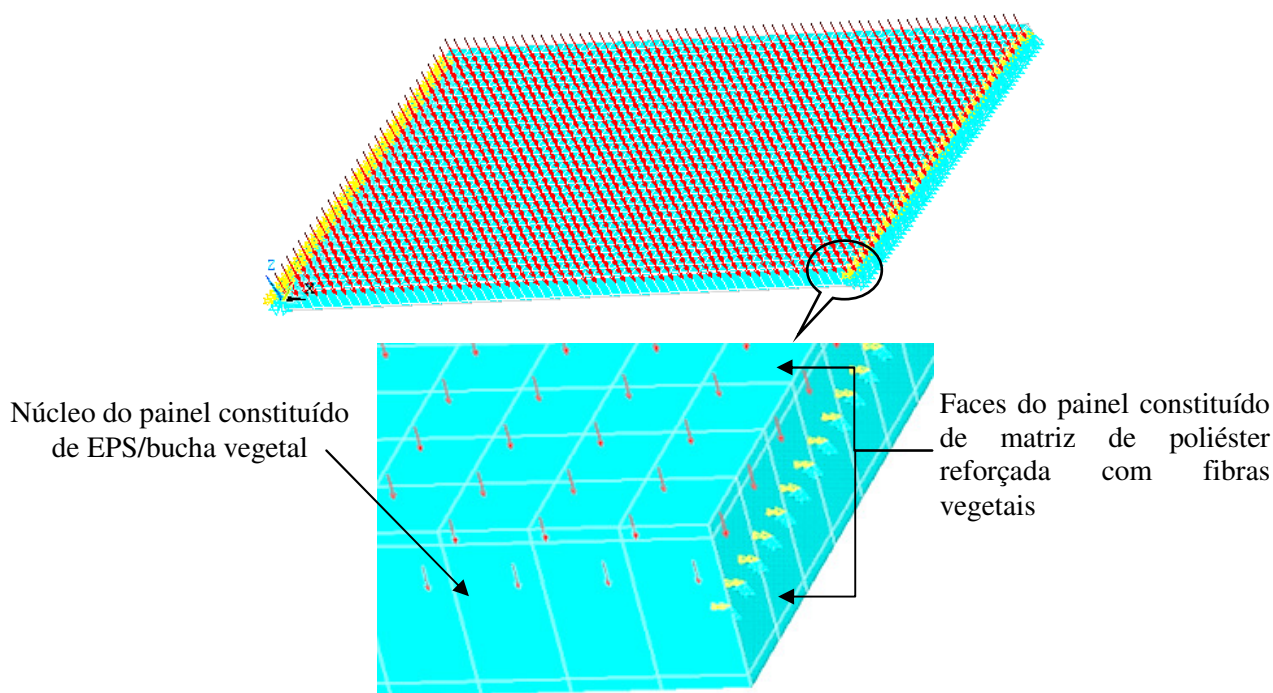
Tabela 9 – Propriedades elásticas (coeficiente de Poisson, módulo de elasticidades e de cisalhamento) dos materiais adotados na simulação numérica dos painéis

Materiais	Poliéster	Fibra de rami	EPS
Módulo de elasticidade (GPa)	3,2	30	0,002
Poisson	0,36	0,35	0,33
Módulo de Cisalhamento (MPa)	—	—	0,184

Fonte: FOAM, 2012; SMITH, 1990; SOARES, 2012; TERMOTÉCNICA, 2012.

A título de exemplo, a Figura 39 ilustra alguns detalhes de um modelo numérico do painel, obtido pelo ANSYS®.

Figura 39 – Modelo de painel gerado no ANSYS® com as condições de carregamento e apoio



Fonte: Autora, 2013.

3.5.5 SEGUNDA ETAPA DA SIMULAÇÃO DOS PAINÉIS

Nesta etapa, foram usados os valores das propriedades elásticas obtidos experimentalmente na caracterização da matriz de poliéster e dos compósitos à tração (seção 4.2).

Assim como na etapa anterior, o dimensionamento dos painéis foi baseado nas normas citadas, com as mesmas condições de apoio, contorno e carregamento, e as flechas máximas admissíveis entre os pontos de fixação do painel de 3 mm e 15 mm.

As espessuras testadas para a constituição das faces e dos núcleos foram as mesmas apresentadas na primeira etapa (Tabela 8). Os volumes de fibras usados na composição dos painéis foram os mesmos da confecção dos compósitos (20 %, 30 %, 40 % e 50 %). A densidade de malha escolhida para a simulação dos painéis foi de 60×30 elementos com três camadas, sendo a primeira camada e a última constituída pelos materiais selecionados para as faces e a segunda camada constituída pelo material selecionado para os núcleos. Outras malhas foram testadas, porém a variação entre os resultados foram insignificantes, adotando-se essa densidade devido a rapidez de cálculo.

A simulação dos painéis foi realizada com a variação dos teores de volume de fibras, das espessuras das faces e dos núcleos.

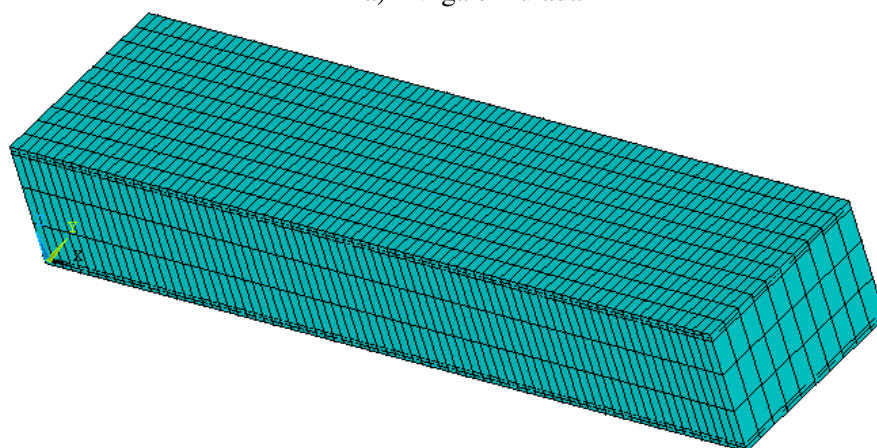
3.5.6 TERCEIRA ETAPA DA SIMULAÇÃO DOS PAINÉIS

Como citado anteriormente, o objetivo da simulação numérica na terceira etapa foi ajustar as propriedades elásticas do painel sanduíche, de modo que o modelo numérico representasse o comportamento do protótipo ensaiado à flexão, a fim de modelar possíveis painéis a serem produzidos industrialmente.

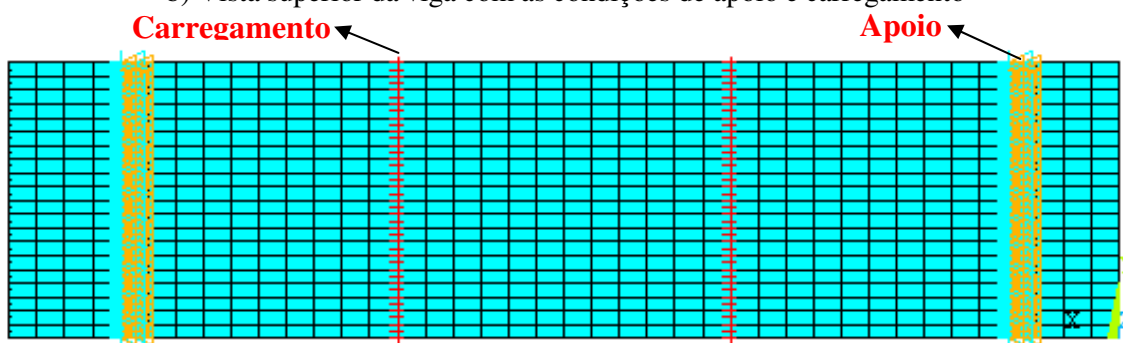
As dimensões dos painéis, as condições de apoio, carregamento e contorno no processo de ajuste das propriedades mecânicas das faces e núcleos, foram modeladas conforme os corpos de prova caracterizados experimentalmente à flexão na seção 3.4.5, como ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Modelos da viga gerada pelo ANSYS® com condições de apoio e de carregamento

a) Viga simulada



b) Vista superior da viga com as condições de apoio e carregamento



Fonte: Autora, 2013.

Após o ajuste, os painéis foram dimensionados em dois tamanhos padrões, baseados em forros disponíveis no mercado, de medidas de 1,25 m × 0,625 m e 0,625 m × 0,625 m e nas duas dimensões simuladas anteriormente na primeira etapa, a saber, 1,0 m × 0,5 m e 3,0 m × 1,0 m. As espessuras dos núcleos foram determinadas entre 1 cm e 10 cm, e as condições de apoio, e contorno, foram realizadas como descrito na primeira etapa, biapoiados nos bordos e a carga aplicada de 500 N/m² uniformemente distribuída.

A densidade da malha adotada na simulação da viga na fase de ajuste foi de 80 × 10 × 3 elementos, e para os modelos dos painéis foram adotadas as seguintes densidades de malha: 80 × 40 × 3 para os painéis de 3,0 m × 1,0 m, 1,25 m × 0,625 m e 1,0 m × 0,5 m, e malha de 40 × 40 × 3 para o painel de 0,625 m × 0,625 m. Outras densidades foram testadas nas duas fases, no entanto a variação entre os resultados foi insignificante, adotando-se as malhas citadas devido a rapidez de cálculo. Os deslocamentos máximos dos painéis foram analisados conforme a ABNT NBR 15366/1:2006, com 15 mm de deslocamento máximo admissível.

A seguir são apresentados os resultados adquiridos nos procedimentos adotados neste trabalho juntamente com as análises e discussões dos mesmos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS

Os valores da massa específica dos compósitos estão expressos na Tabela 10. As massas específicas obtidas são menores do que outros tipos de materiais usados como reforço em matrizes poliméricas, como por exemplo, compósitos de poliéster reforçado com fibras de vidro-E, que apresenta massa específica de 1,85 g/cm³, ou ainda o compósito de carbono/epóxi, que é de 1,58 g/cm³ (BARBERO; 1999).

Tabela 10 – Massa específica das placas dos compósitos

Tipo de compósito	Volume de fibra (%)	Massa específica da placa (g/cm ³)
Fibra de rami/Poliéster	30	1,24
	40	1,26
	50	1,48
Tecido de rami/Poliéster	30	1,14
	40	1,22
	50	1,42
Bucha vegetal/Poliéster	20	0,96
	30	1,00
	40	1,02

Fonte: AUTORA, 2013.

As massas específicas dos compósitos também se apresentaram abaixo dos valores obtidos das massas da matriz de poliéster e as fibras vegetais. Isto ocorreu devido a quantidade de vazios presentes nos compósitos. Os compósitos reforçados com fibras alinhadas de rami apresentaram menores volumes de vazios, variando entre 5 % e 8 %. Nota-se que a medida que aumenta o teor de volume de fibra nos compósitos os valores de massa específica tendem a convergir para o valor da massa da fibra de rami de $1,59 \pm 0,02$ g/cm³. Para os compósitos reforçados com tecido bidirecional de rami, os valores da massa específica também aumentaram com o teor de fibra na matriz, entretanto apresentaram maiores volumes de

vazios nos compósitos, variando entre 2 % e 16 %. Este fato pode ser associado ao tipo de configuração da fibra torcida que dificulta o preenchimento de resina no seu interior. Os compósitos reforçados com bucha vegetal apresentaram uma grande quantidade de vazios, variando entre 27 % e 28 %, motivo pelo qual exibiu massas específicas abaixo do que a matriz de poliéster, de $1,18 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

4.2 ENSAIO DOS COMPÓSITOS À TRAÇÃO

4.2.1 RESINA DE POLIÉSTER

Os resultados obtidos na caracterização da resina de poliéster estão apresentados na Tabela 11. Nota-se que os valores obtidos quanto ao módulo de elasticidade e deformação máxima estão próximas dos valores mencionados na literatura por Hull (1996), Hyer (1998), e Smith (1990). Porém, o valor obtido da resistência à tração é inferior aos valores citados pelos respectivos autores.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas da resina de poliéster ortoftálica

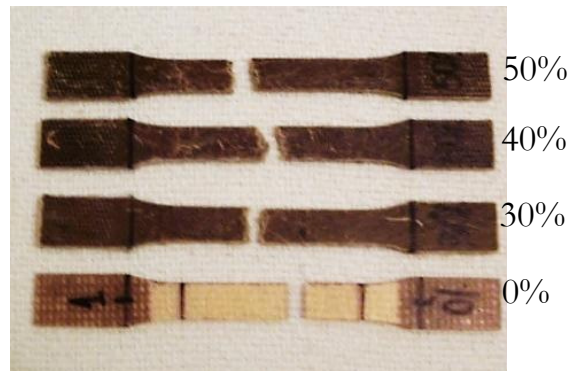
Poliéster	Massa específica (g/cm^3)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação Máxima (%)
Autora	1,18	$18,32 \pm 5,6$	$3,92 \pm 0,45$	$2,24 \pm 0,1$
Hull	1,2 – 1,5	40 – 90	2,0 – 4,5	2
Hyer	1,10 – 1,50	40 – 90	1,2 – 4,5	2 – 5
Smith	1,23	65	3,2	2

Fonte: HULL, 1996; HYER, 1998; SMITH, 1990.

4.2.2 COMPÓSITOS DE FIBRAS ALINHADAS DE RAMI

Os corpos de prova referentes a cada volume de fibra dos compósitos foram ensaiados à tração até a ruptura, conforme apresentado na Figura 41.

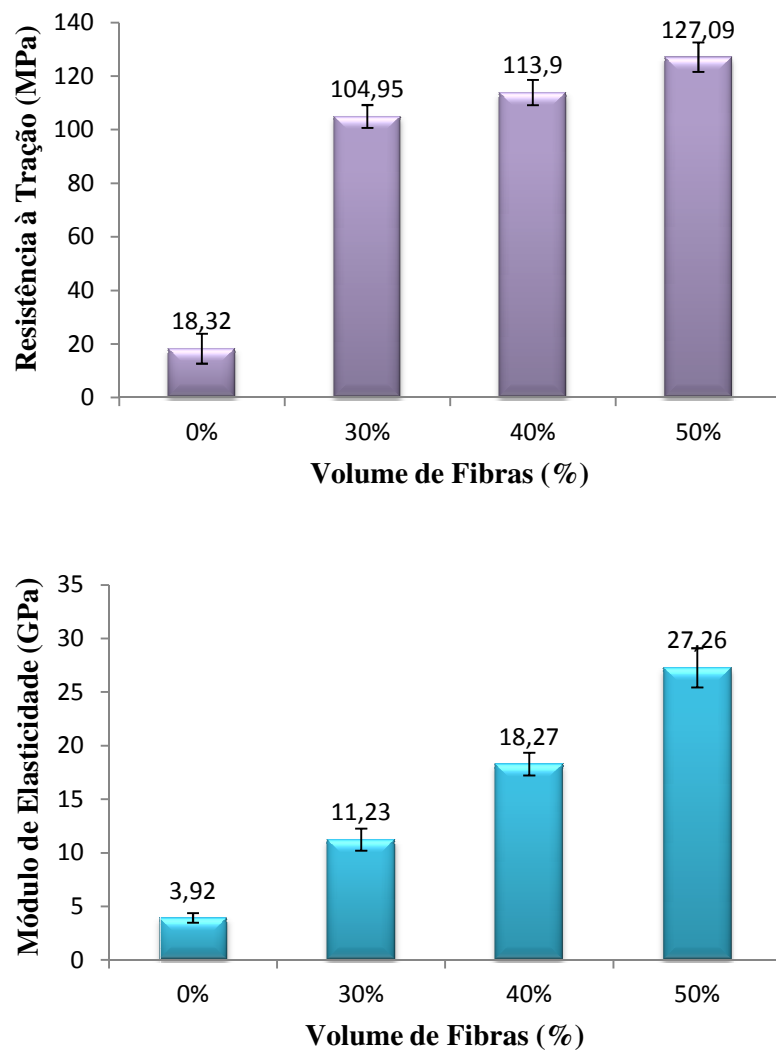
Figura 41 – Corpos de prova ensaiados à tração dos compósitos de fibras alinhadas de rami

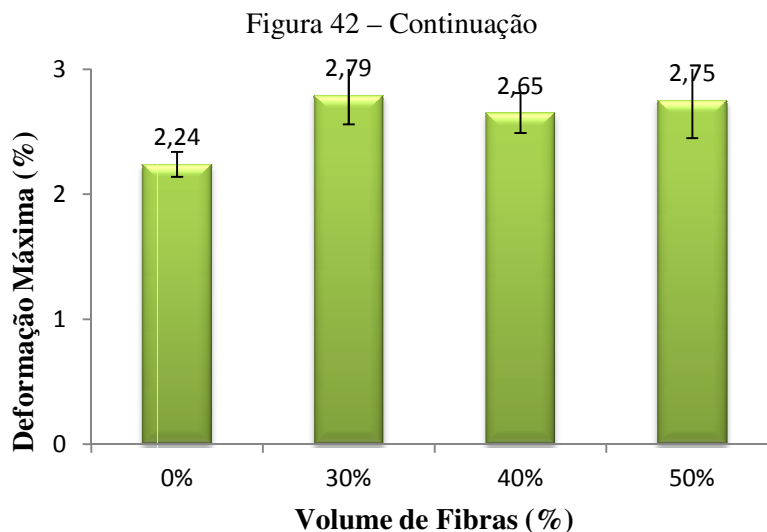


Fonte: Autora, 2013.

Os resultados obtidos das propriedades mecânicas dos compósitos com a variação do teor em volume de fibras alinhadas de rami de 0 %, 30 %, 40 % e 50 % são apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Propriedades mecânicas dos compósitos de fibras alinhadas de rami





Fonte: Autora, 2013.

Os resultados mostram que a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos compósitos aumentam significativamente com a incorporação de fibras na matriz. Conforme ocorreu a variação do teor de fibras de 0 % para 30 % em volume, houve um aumento de 472 % na resistência à tração e de 186 % no módulo de elasticidade. Os valores máximos para a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos compósitos foram obtidos para o teor de 50 % de volume de fibra, atingindo um aumento percentual de 593 % na resistência e de 595 % no módulo, em relação à matriz, e de 21 % na resistência e 142 % no módulo, em relação ao volume de 30 % de fibra.

A deformação máxima na ruptura, com a incorporação de fibras também apresentou um aumento em relação à matriz sem fibras, o que era esperado, considerando a natureza frágil da matriz, devido ao rompimento das ligações cruzadas na estrutura do poliéster durante a fratura.

A melhora das propriedades mecânicas com o incremento do teor de fibras é expressiva, não só na resistência à tração e no módulo de elasticidade, como também no aumento da deformação de ruptura dos compósitos. Vale ressaltar que este resultado da resistência e do módulo é devido às boas propriedades da fibra de rami e do tipo de orientação, que exerce papel fundamental na resistência do material, uma vez que, compósitos longitudinalmente orientados são por natureza anisotrópicos e o máximo na resistência é obtido quando o material é solicitado na direção do alinhamento das fibras.

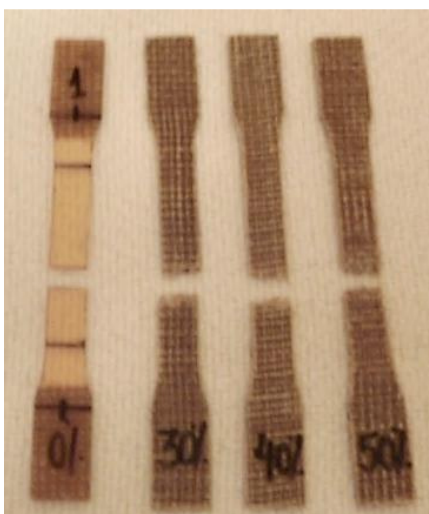
Comparando os resultados das propriedades mecânicas deste compósito com pesquisas semelhantes na literatura, os valores obtidos revelam melhor desempenho. No trabalho realizado por Bravo Neto *et al.* (2010), onde analisam o comportamento à tração de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras finas alinhadas de rami, com teor de fibra de até 30 % em volume, os valores máximos obtidos para a resistência (67,30 MPa) e módulo de elasticidade (2,79 GPa) para este volume, estão muito abaixo dos valores obtidos neste trabalho, que é de 104,95 MPa de resistência e 11,23 GPa de módulo elástico. Os autores revelam ainda que o módulo de elasticidade do compósito apresenta comportamento estatisticamente constante com o crescimento do teor de fibras. Este fato pode estar vinculado ao método de moldagem dos compósitos em formas de silicone sem pressão, que apresenta maior quantidade de vazios, prejudicando a interação entre fibra e matriz.

4.2.3 COMPÓSITOS DE TECIDO BIDIRECIONAL DE RAMI

Os corpos de prova de cada volume de fibra foram ensaiados à tração até a ruptura, como mostrados na Figura 43. Os compósitos de matriz poliéster reforçados com tecido bidirecional de fios de rami, apresentam em seus corpos de prova ruptura bastante uniforme, ocorrida na maioria das vezes no entremeio da trama do tecido.

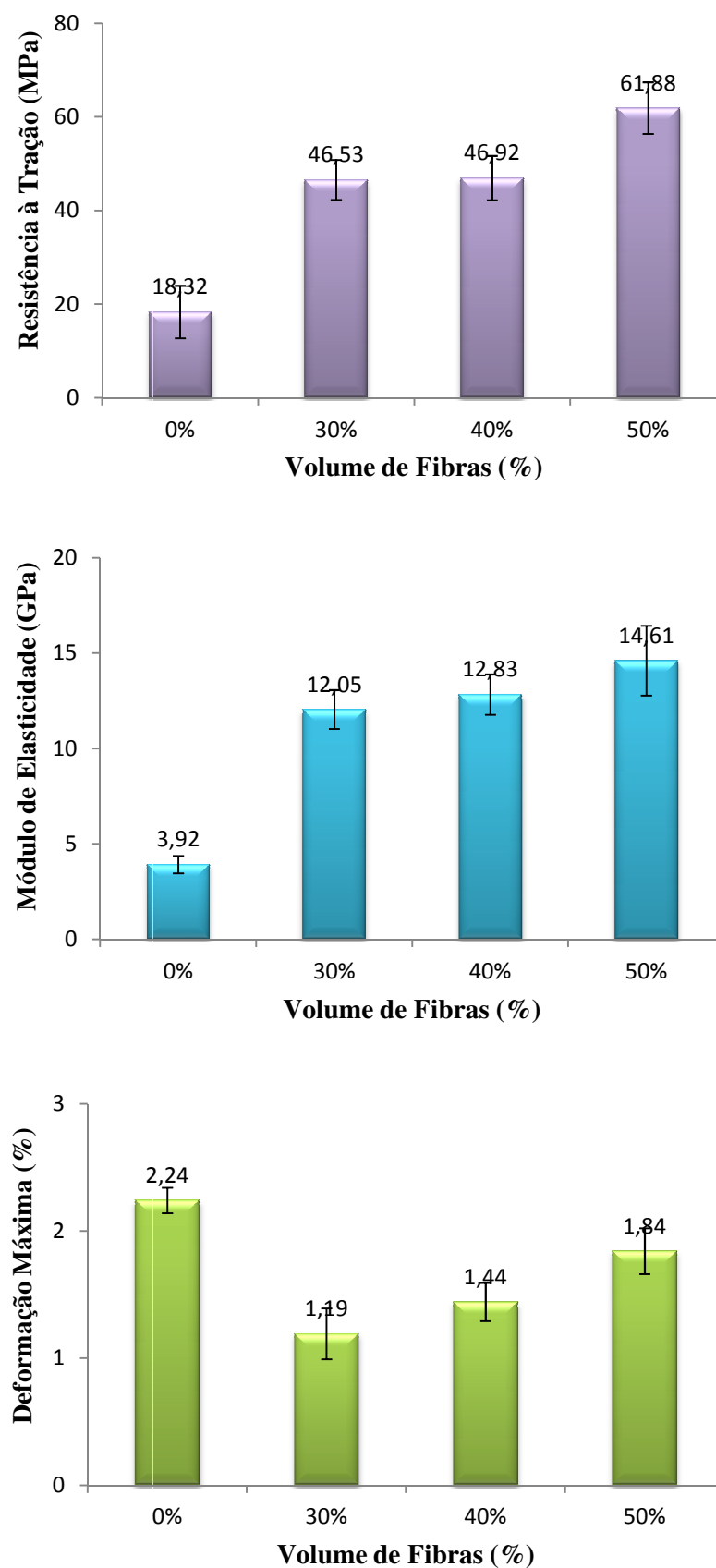
A Figura 44 apresenta as propriedades mecânicas à tração dos compósitos com os teores em volume de reforço em tecido de 0 %, 30 %, 40 % e 50 %.

Figura 43 – Corpos de prova ensaiados à tração dos compósitos de tecido de rami



Fonte: Autora, 2013.

Figura 44 – Propriedades mecânicas dos compósitos de tecido bidirecional de rami



Fonte: Autora, 2013.

Os resultados mostram que a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos compósitos aumentam com a variação do teor de fibras. Quando se variou o teor de fibras de 30 % para 40 % em volume não se percebeu incremento significativo nas propriedades mecânicas. Os valores máximos obtidos para a resistência à tração e módulo de elasticidade foram obtidos para o compósito com 50 % de volume de fibra (61,88 MPa e 14,61 GPa), atingindo um aumento percentual de 238 % na resistência e 273 % no módulo em relação à matriz de poliéster e de 33 % na resistência e 21 % no módulo, em relação ao volume de 30 % de fibra.

A melhora das propriedades mecânicas com o incremento do teor de fibras é satisfatória, com o crescimento da resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos. Vale ressaltar ainda que os compósitos apresentaram boas propriedades mecânicas, mesmo com o reforço sendo igualmente distribuído em duas direções perpendiculares entre si.

Entre os trabalhos realizados com tecidos bidirecionais de fios de rami, os valores das propriedades mecânicas mostraram-se semelhantes aos deste trabalho. No estudo de Paiva Jr *et al.* (2004), sobre compósitos de matriz de poliéster reforçada com tecido híbrido de rami/algodão, onde são comparados diferentes configurações dos fios no tecido (i.e. 0/90; 0/90/0;90/0/90 e 0/90/0/90)¹, apresentando para o tecido com configuração de 0/90 e 50 % de fibra em volume, sendo 26 % de fios de rami e 24 % de fios de algodão, resistência média de 62,00 MPa. No estudo realizado por Lei *et al.* (2006) sobre compósitos de poliéster/tecido bidirecional de rami, obtiveram para o V_f de 30 %, valores de resistência à tração aproximada de 43,00 MPa, e 6,4 GPa para o módulo de elasticidade.

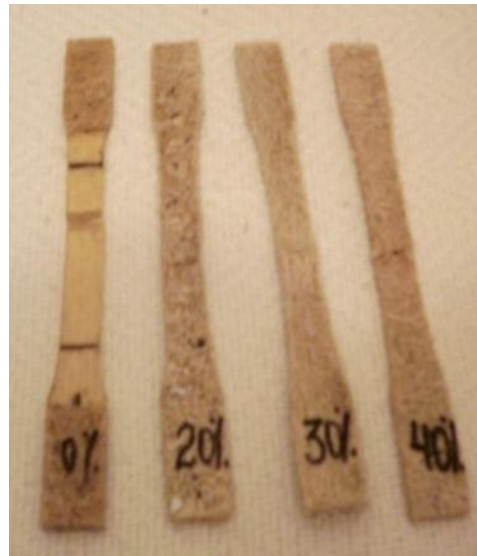
Comparando com os resultados obtidos nesta pesquisa com os destes autores, tem-se que os compósitos de tecido bidirecional de fios de rami com V_f de 30 % e 50 %, possuem resistência próxima ao valor obtido pelos autores e módulo de elasticidade superior.

4.2.4 COMPÓSITOS DE BUCHA VEGETAL

Os compósitos reforçados com bucha vegetal, ao serem ensaiados à tração, não tiveram os corpos de prova totalmente separados, pois parte das fibras não foram rompidas (Figura 45).

¹Direção (0) refere-se a fios de rami alinhados com a direção do teste de tração e a direção (90) refere-se a fios perpendiculares à direção do teste.

Figura 45 – Corpos de prova ensaiados à tração dos compósitos de bucha vegetal



Fonte: Autora, 2013.

A Figura 46 apresenta os resultados obtidos no ensaio à tração para as propriedades mecânicas dos compósitos com os teores em volume de reforço em tecido de 20 %, 30 % e 40 %.

Figura 46 – Propriedades mecânicas dos compósitos de bucha vegetal

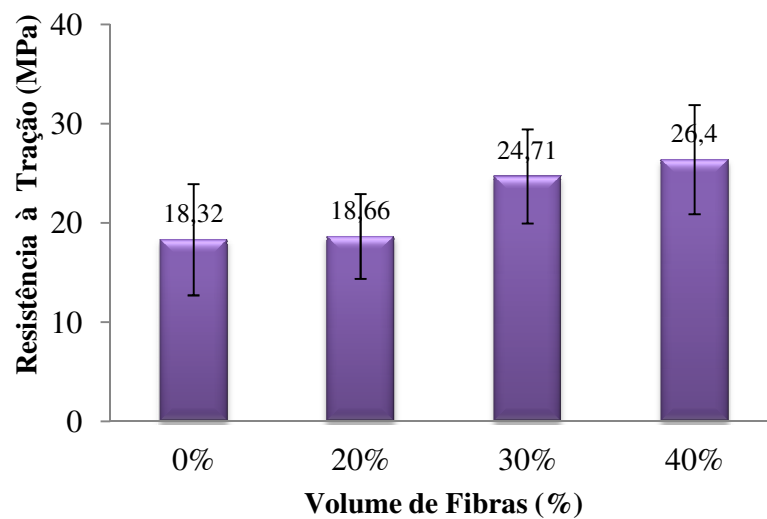
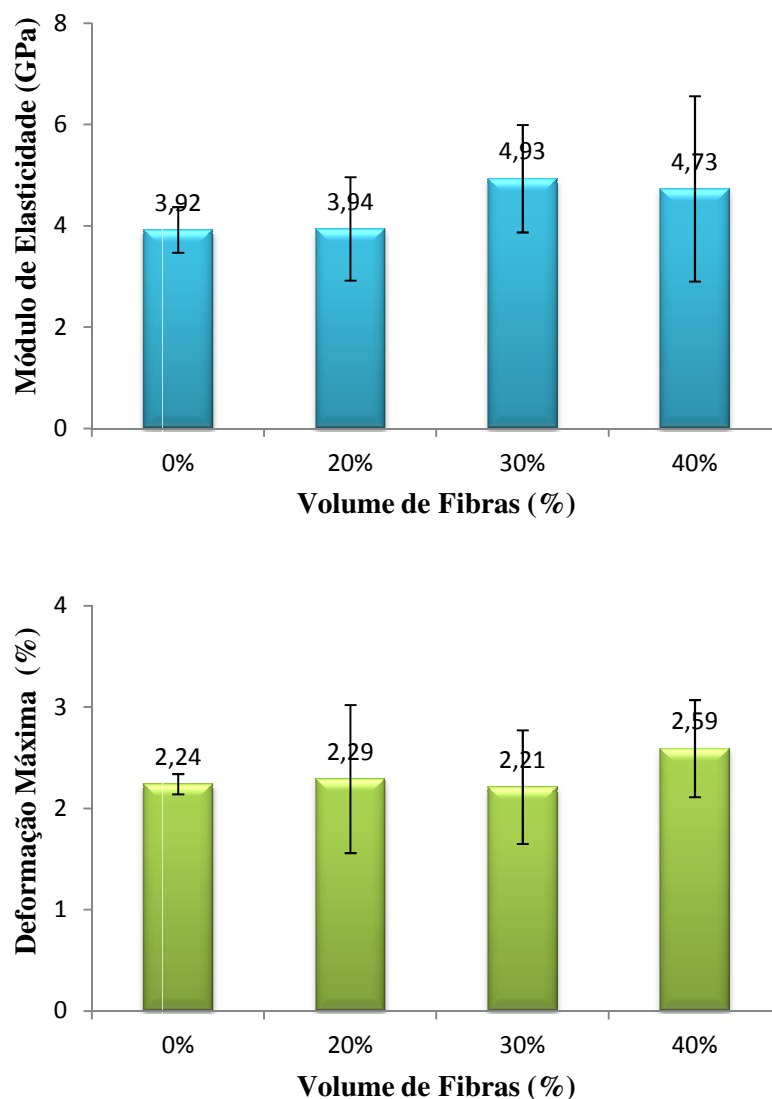


Figura 46 – Continuação



Fonte: Autora, 2013.

Os resultados do módulo de elasticidade e da resistência à tração dos compósitos reforçados com bucha vegetal em forma de mantas aumentam sutilmente em relação à matriz de poliéster. Entre os três percentuais de volume de fibras testados nos compósitos, o de 40% apresentou os maiores valores de resistência à tração (26,40 MPa) e deformação na ruptura (2,59 %).

Os resultados obtidos para este compósito se mostraram bem inferiores, comparados aos outros dois tipos de reforços. A resistência à tração, embora revele um pequeno crescimento com o aumento do teor de volume de fibras, não apresentam um expressivo ganho na resistência, bem como os valores do módulo de elasticidade.

A deformação máxima na ruptura, com a incorporação do volume de 20 % de fibras não aumentou significativamente em relação à matriz sem fibras (de 2,24 % para 2,29 %), e à medida que houve o aumento do teor de fibra (40 %), teve um sensível acréscimo, demonstrando pouco incremento na ductilidade do compósito.

Os valores obtidos para as propriedades de resistência, módulo de elasticidade e deformação, estão de acordo com os trabalhos realizados por Tanobe (2003) e Boynard *et al.* (2000), pois o reforço de bucha vegetal em forma de mantas em matrizes poliméricas não apresentam caráter estrutural, e as mesmas características quanto às propriedades mecânicas e o comportamento de fratura foram observados pelos autores.

Os valores das propriedades de resistência e módulo de elasticidade dos compósitos produzidos nesta pesquisa revelam desempenho superior quando comparados com pesquisa semelhante na literatura. No estudo de Tanobe (2003), realizado com matriz de poliéster e bucha vegetal em forma de mantas sem tratamento, obteve-se para o compósito com V_f de até 32,5% de fibra, resistência de 17 MPa e módulo de elasticidade de 3,5 GPa.

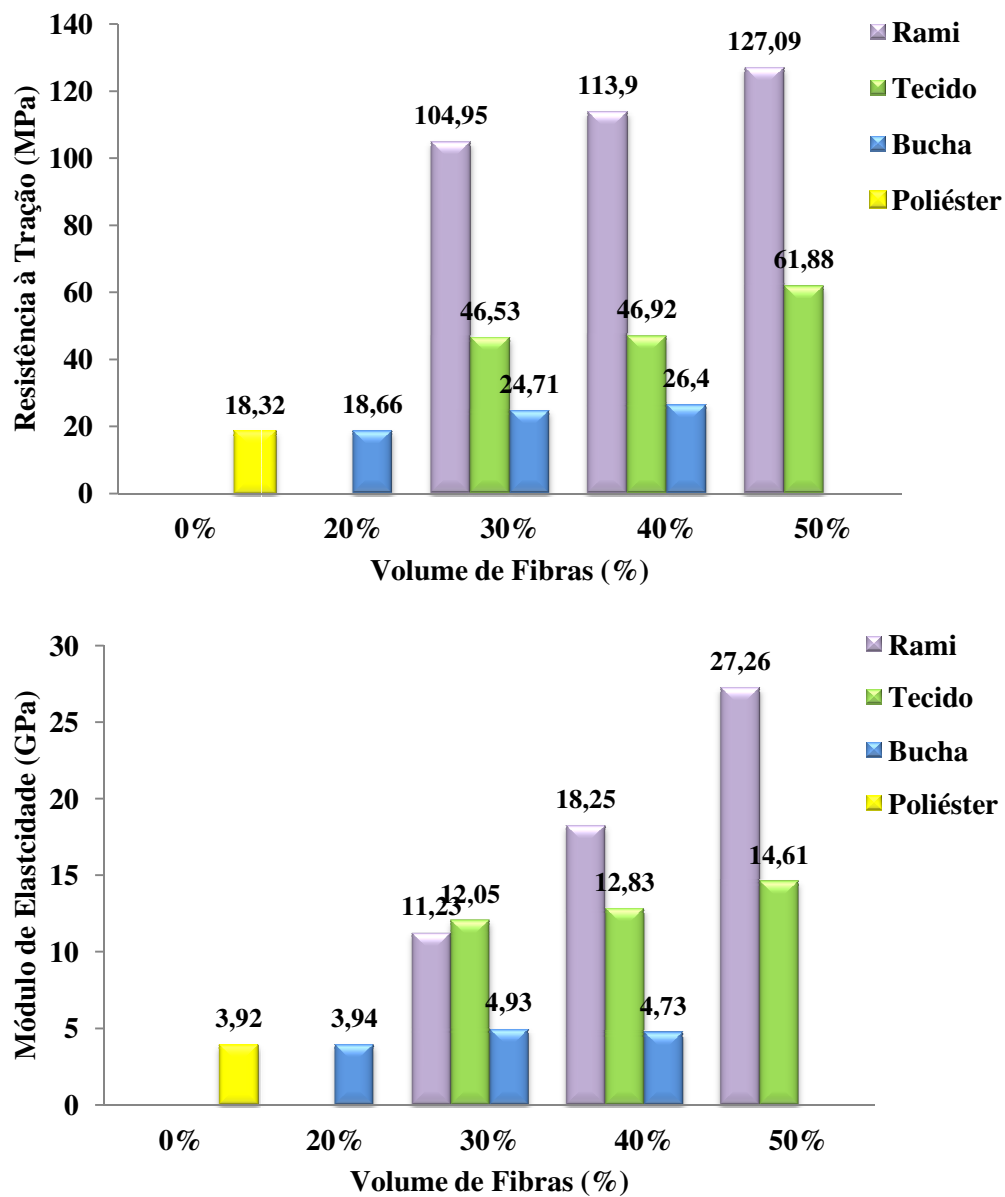
4.2.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS

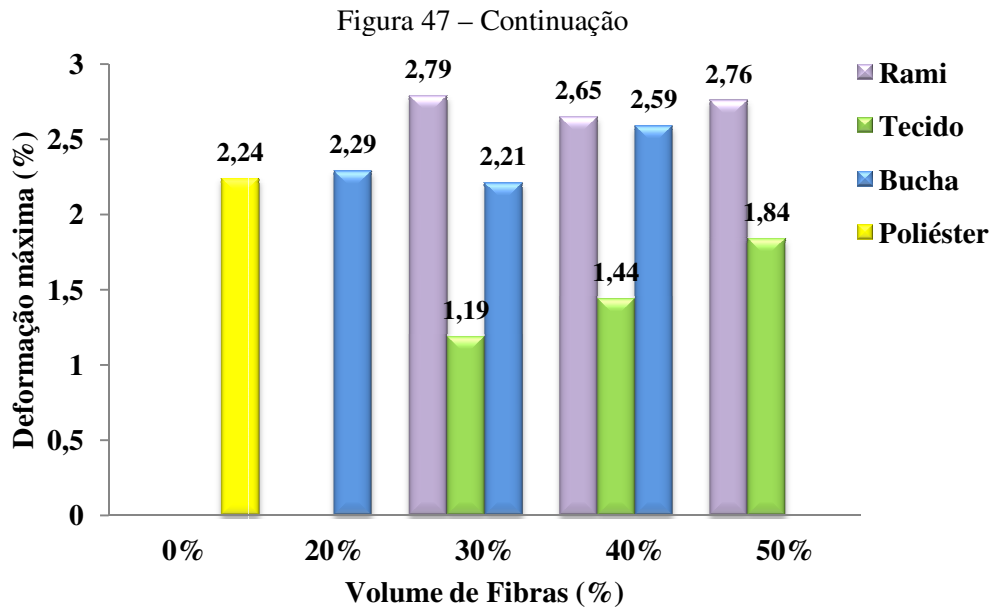
Os resultados de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação obtido nos ensaios à tração dos diferentes compósitos estão apresentados na Figura 47. Analisando o gráfico de resistência à tração, o compósito que apresenta melhor desempenho entre os três tipos de reforço são as fibras alinhadas de rami. Quanto ao volume de fibras, todos os compósitos com a maior porcentagem de fibra revelam melhor desempenho de resistência à tração. Para os teores de fibra de 30 % e 40 % em volume, os compósitos reforçados com fibras alinhadas de rami se mostraram bastante expressivos. O teor de fibra de 20 % no reforço de bucha não apresentou um incremento na resistência da matriz de poliéster.

Comparando os valores do módulo de elasticidade, os compósitos de fibras alinhadas de rami apresentam os maiores módulos para os teores de volume de fibra de 40 % e 50 %. O reforço de tecido bidirecional também exhibe valores satisfatórios de módulo, principalmente para o V_f de 30 %, que é maior entre os três tipos de reforço neste teor de fibra.

A deformação máxima obtida nos compósitos apresentaram diferenças significativas, principalmente entre os reforços de fibras alinhadas de rami e os de tecido bidirecional de rami. Apesar de se tratar do mesmo tipo de fibra, este resultado deixa clara a interferência da configuração e distribuição do tipo de reforço nas propriedades dos compósitos, comprovando que reforços orientados unidirecionalmente, quando solicitados no sentido das fibras, apresentam melhores resultados do que reforços em outras configurações.

Figura 47 – Valores de resistência à tração dos tipos de reforços





Fonte: Autora, 2013.

4.2.6 MICROSCÓPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As micrografias da seção de ruptura dos compósitos reforçados com fibras alinhadas de rami são mostradas na Figura 48. Pode-se observar que a ruptura das fibras ocorreu em detrimento do seu arrancamento da matriz, o que era esperado, considerando a configuração do ensaio e também do comprimento elevado das fibras e a boa aderência entre as fibras e a matriz.

Figura 48 – Ruptura da seção transversal dos compósitos de poliéster reforçado com fibras alinhadas de rami

a) 30 %, 1000x

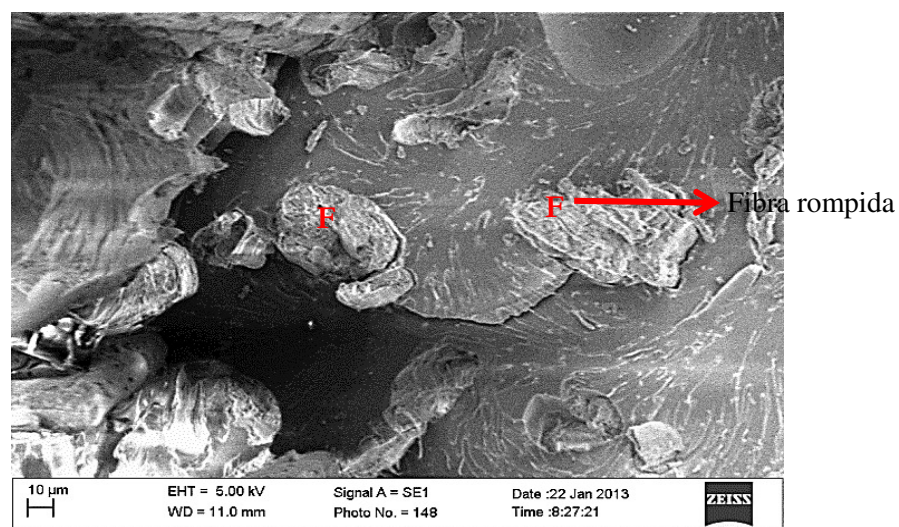
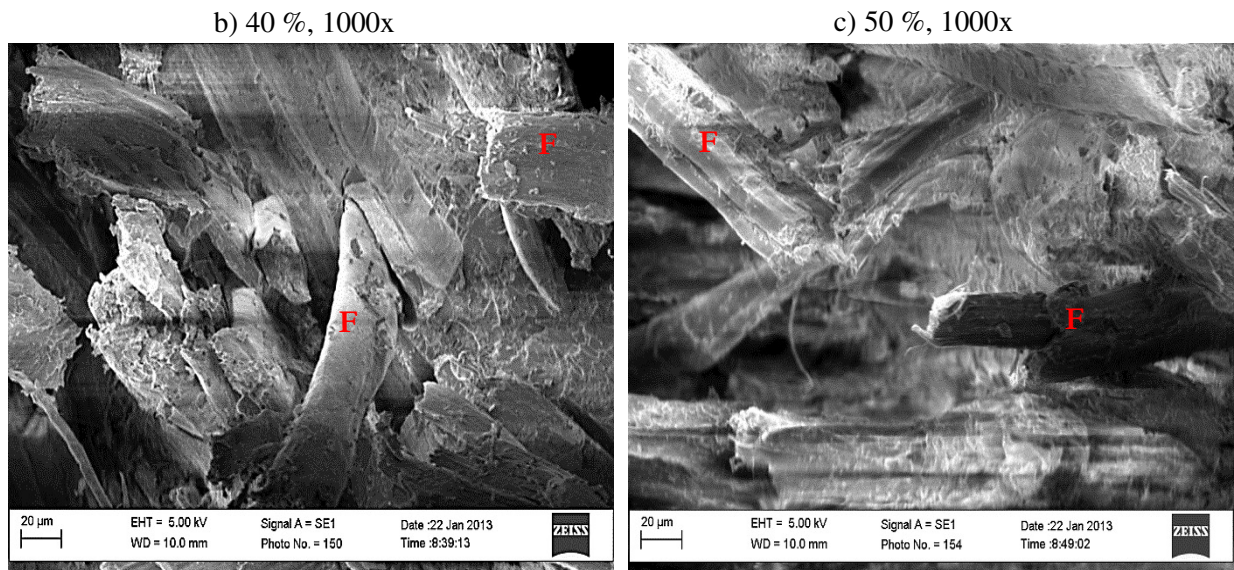


Figura 48 – Continuação



Fonte: Autora, 2013.

A Figura 49 mostra as micrografias da seção de ruptura dos compósitos reforçados com tecido bidirecional de fios de rami. Nota-se que as fibras foram rompidas de forma semelhante aos compósitos de fibra de rami, havendo também uma boa aderência entre as fibras e a matriz.

Figura 49 – Ruptura da seção transversal dos compósitos de poliéster reforçados com tecido bidirecional de fios de rami

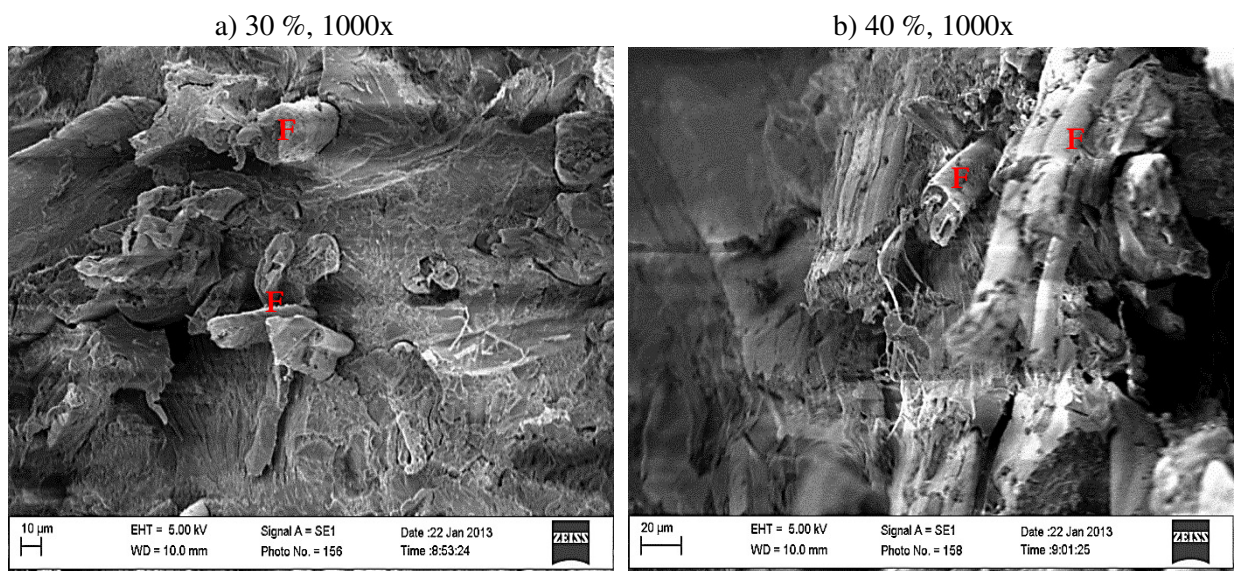
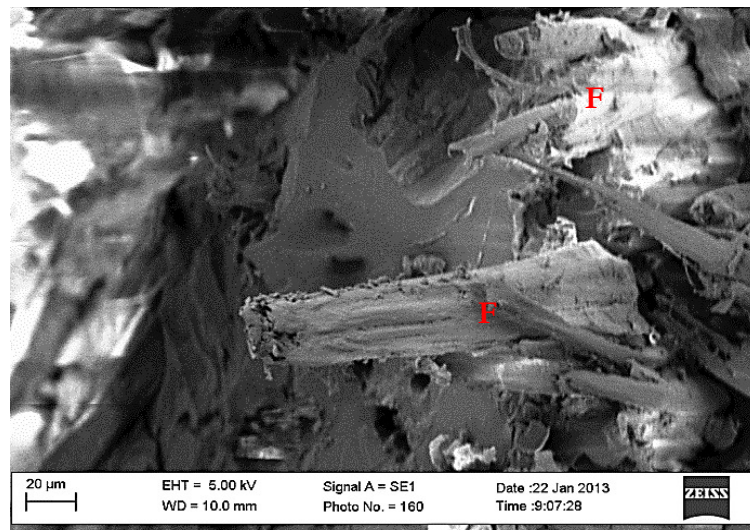


Figura 49 – Continuação
c) 50 %, 1000x



Fonte: Autora, 2013.

As micrografias dos compósitos reforçados com buchas, apresentadas na Figura 50, revelam que apesar da boa estrutura entrelaçada da fibra, a grande quantidade de vazios na matriz observado nestes compósitos juntamente com a baixa adesão da fibra com a matriz de poliéster, prejudica o desempenho do compósito. Na Figura 50b, nos compósitos com teor de 20 % de fibra, observa-se claramente a baixa adesão da fibra com a matriz, onde há um descolamento entre as duas superfícies.

Figura 50 – Ruptura da seção transversal dos compósitos de poliéster reforçados com bucha vegetal

a) 20 %, 100x

b) 20 %, 500x

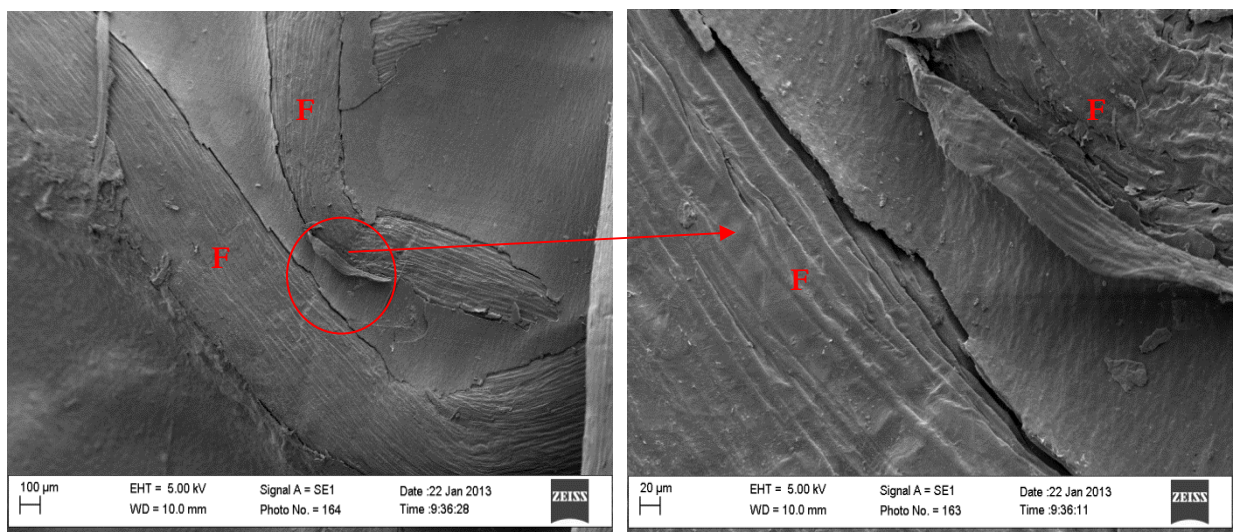
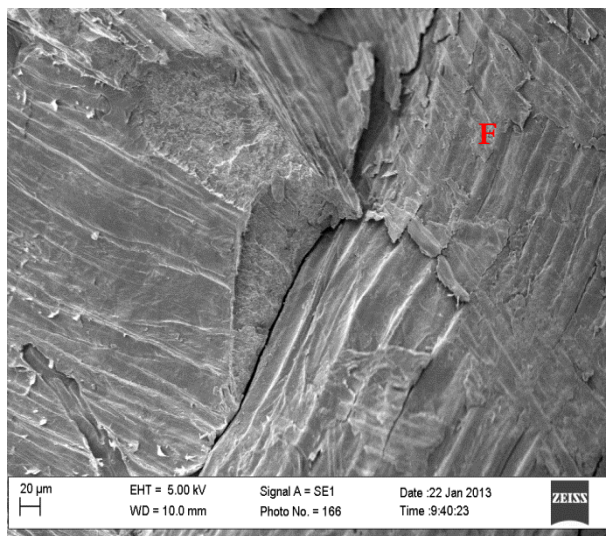
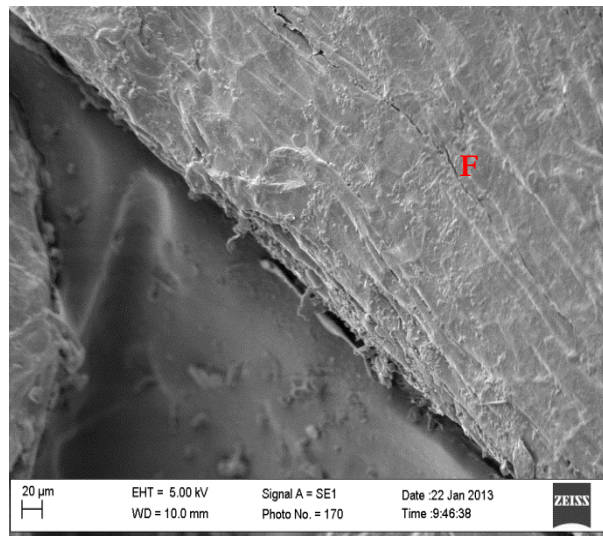


Figura 50 – Continuação

c) 40 %, 500x



d) 40 %, 500x



Fonte: Autora, 2013.

4.3 ENSAIO DOS NÚCLEOS À COMPRESSÃO

Analizando os resultados dos ensaios de compressão transversal dos núcleos, mostrados na Tabela 12, pode-se observar a diferença de comportamento apresentados pelos dois tipos de núcleos. O núcleo de bucha impregnada apresentou maiores valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, do que o núcleo de EPS. A configuração da bucha impregnada em forma de colmeia para uso como núcleo revelou ser um ótimo material, com boa rigidez e leveza.

Tabela 12 – Resistência à compressão dos núcleos

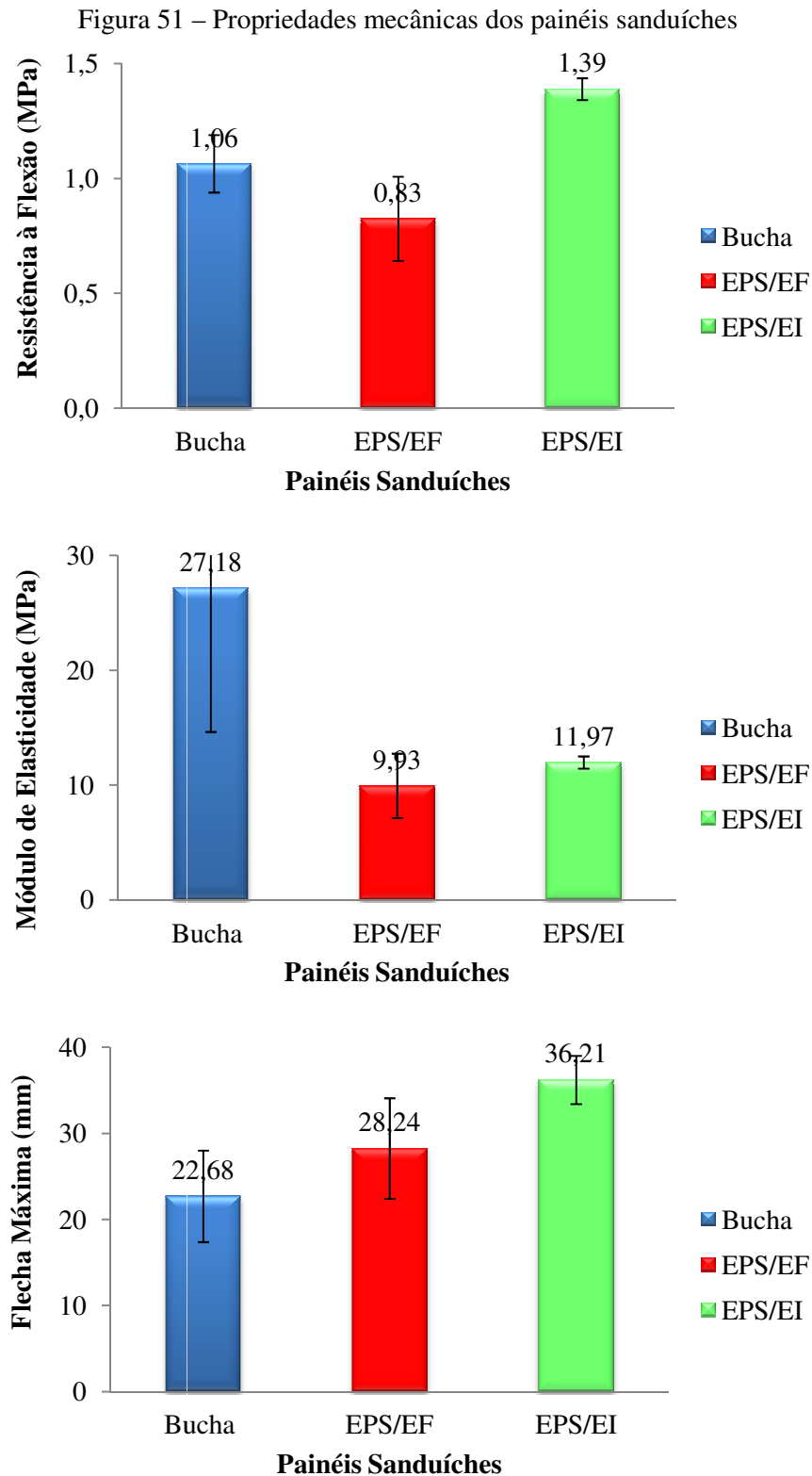
Núcleos	Força (N)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
EPS	14,50 ± 3,69	0,02 ± 0,002	0,25 ± 0,011
Bucha vegetal	41,18 ± 6,59	0,11 ± 0,063	1,27 ± 6,5

Fonte: AUTORA, 2013.

4.4 ENSAIO DOS PAINÉIS SANDUÍCHES À FLEXÃO

Nos resultados dos ensaios à flexão apresentados na Figura 51, observou-se que os valores máximos de resistência à flexão, calculados através da força sobre a área, e deslocamentos

foram alcançados pelos painéis com núcleo de EPS e adesivo de epóxi incolor (EI). O painel com maior módulo de elasticidade, calculado através da curva de tensão \times deformação foi com núcleo de bucha vegetal, que é até 125 % maior que os núcleos de EPS.



Fonte: Autora, 2013.

Entre os painéis com núcleo de EPS, a diferença entre o desempenho à flexão de acordo com tipo de adesivo, pode estar associada à maior espessura das faces dos compósitos, ocorrida involuntariamente, devida a erro de moldagem, sendo o painel de EPS e adesivo incolor (EI) de espessura de 2,5 mm e o painel de EPS e adesivo fluidp (EF) de 2,00 mm. O motivo pelo uso dessas faces com o adesivo epóxi incolor foi por causa do maior peso que os painéis com adesivo epóxi fluido apresentaram, enquanto que os painéis com adesivo de epóxi incolor mostraram-se mais leves. Embora os dois painéis contenham o mesmo teor de volume de fibra, não é possível realizar uma análise comparativa mais completa entre a influência da resistência do epóxi nos resultados, por causa do número reduzido de corpos de prova ensaiados.

O painel que obteve menor flecha foi o de núcleo de bucha impregnada de resina. Este resultado mostra-se coerente, uma vez que este núcleo possui rigidez muito mais elevada do que o EPS.

Levando-se em conta o tipo de fratura apresentado no ensaio de flexão, os painéis com núcleo de EPS falharam por cisalhamento do núcleo, conforme pode ser visualizado na Figura 52a. Nos painéis com núcleo de bucha constataram-se dois tipos de falhas, por descolamento das faces e por cisalhamento do núcleo (Figura 52b). Os descolamentos das faces apresentados nesses painéis ocorreram devido a deformações excessivas no ensaio.

Figura 52 – Tipos de falha dos núcleos

- a) Falha por cisalhamento no núcleo de EPS b) Falha por descolamento das faces no núcleo de bucha impregnada de resina



Fonte: Autora, 2013.

4.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICAS DOS PAINÉIS SANDUÍCHES

4.5.1 PRIMEIRA ETAPA

As simulações numéricas realizadas na primeira etapa, com as propriedades mecânicas da resina e das fibras adotadas da literatura, serviu para estimar os parâmetros iniciais para a confecção dos componentes de face e núcleos dos painéis. Através dos resultados obtidos dos modelos simulados, verificou-se que era viável a utilização dos materiais selecionados, assim como as configurações iniciais definidas para o painel. Apesar desses resultados serem estimativas aproximadas do modelo experimental, o modelo numérico serviu como ponto de partida para a produção dos compósitos caracterizados, tomando como referência a espessura, a orientação das camadas e teor de volume de fibras adotados no procedimento experimental dos compósitos (seção 3.3.2).

4.5.2 SEGUNDA ETAPA

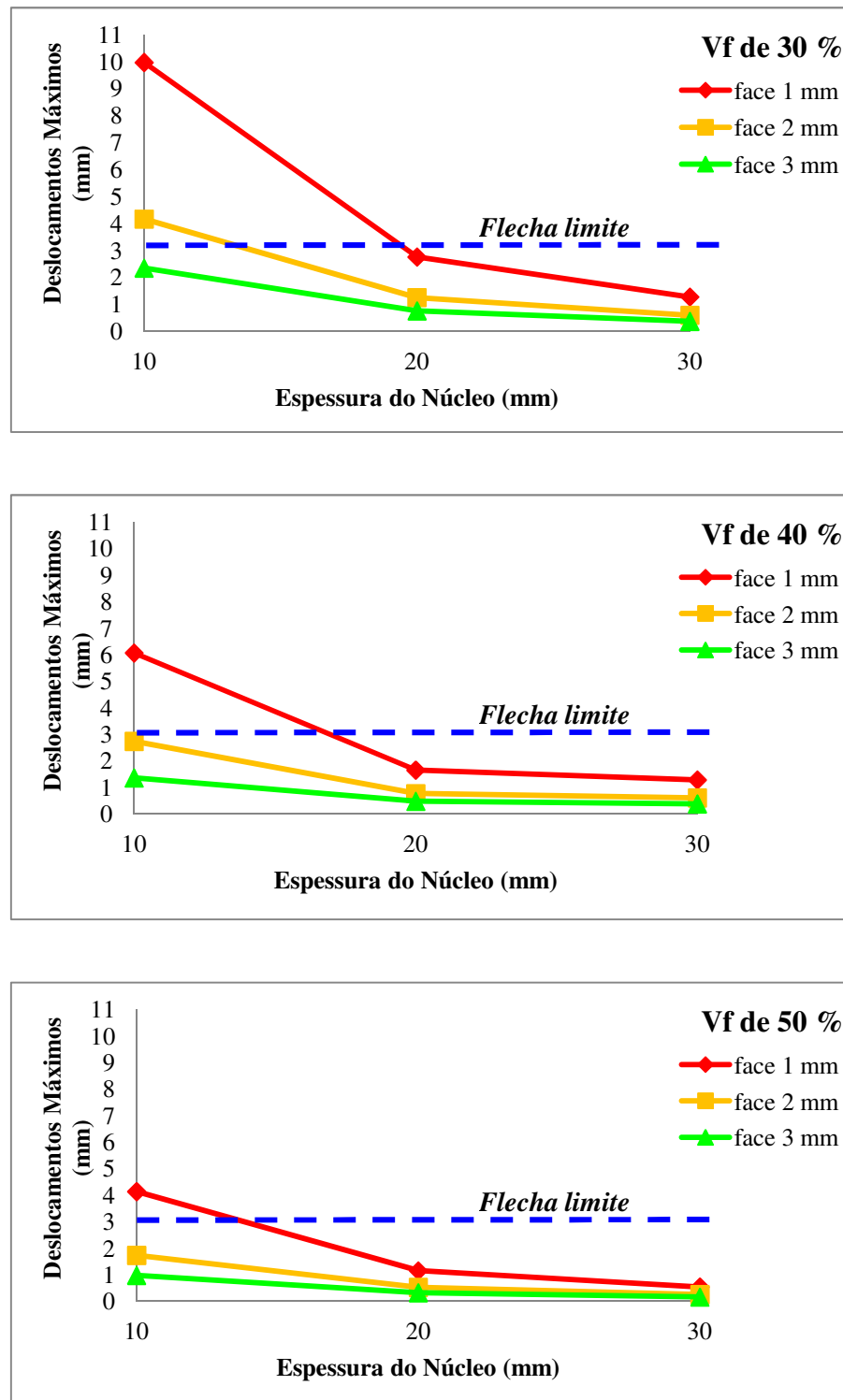
A segunda etapa de simulação dos painéis foi realizada com as propriedades elásticas obtidas experimentalmente, na caracterização dos compósitos das faces. Os resultados obtidos das simulações são detalhados a seguir, de acordo com os tipos de reforço.

4.5.2.1 REFORÇO EM FIBRAS ALINHADAS DE RAMI

Os resultados dos deslocamentos dos painéis obtidos através das simulações numéricas com dimensão de 1 m × 0,5 m, que atende a ABNT NBR 14371:1999 (deslocamentos máximos de 3 mm), são apresentados na Figura 53, para os teores de volume de fibras de 30 % à 50 %.

Analisando os gráficos percebe-se que a constituição dos painéis para os compósitos com 30 % em volume de fibra, é viável para faces com espessuras a partir de 1 mm e núcleo com espessura a partir de 20 mm, para faces a partir de 2 mm e núcleo a partir de 20 mm. Para os compósitos com volume de fibra de 40 % e 50 %, são viáveis a partir de 1 mm de espessura de face e 20 mm de núcleo.

Figura 53 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches com reforço de fibras alinhadas de rami de dimensão 1 m x 0,5 m, obtidos pela simulação numérica



Fonte: Autora, 2013.

Entre os três tipos de espessuras selecionadas para os componentes, a configuração que atende a norma e permite maior possibilidade de combinação são para as faces a partir de 2 mm, e os núcleos, a partir de 20 mm de espessura. Entre os três volumes de fibra usados como reforço

nos compósitos, o teor de 50 %, apresenta maior rigidez e consequentemente melhor opção de confecção do painel.

A Figura 54 apresenta os deslocamentos em função das espessuras das faces e dos núcleos, obtidos por simulações numéricas realizadas para os painéis com dimensões de 3 m × 1 m, com a variação do volume de fibras de 30 % a 50 %. Nesta configuração dos painéis foi selecionada maior quantidade de espessura para os núcleos. Os motivos deste procedimento foi obter uma variação maior de geometria, visando atender a ABNT NBR 15366/1:2006, que limita o deslocamento máximo em 15 mm.

Figura 54 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches com reforço de fibras alinhadas de rami de dimensão 3 m × 1 m, obtidos pela simulação numérica

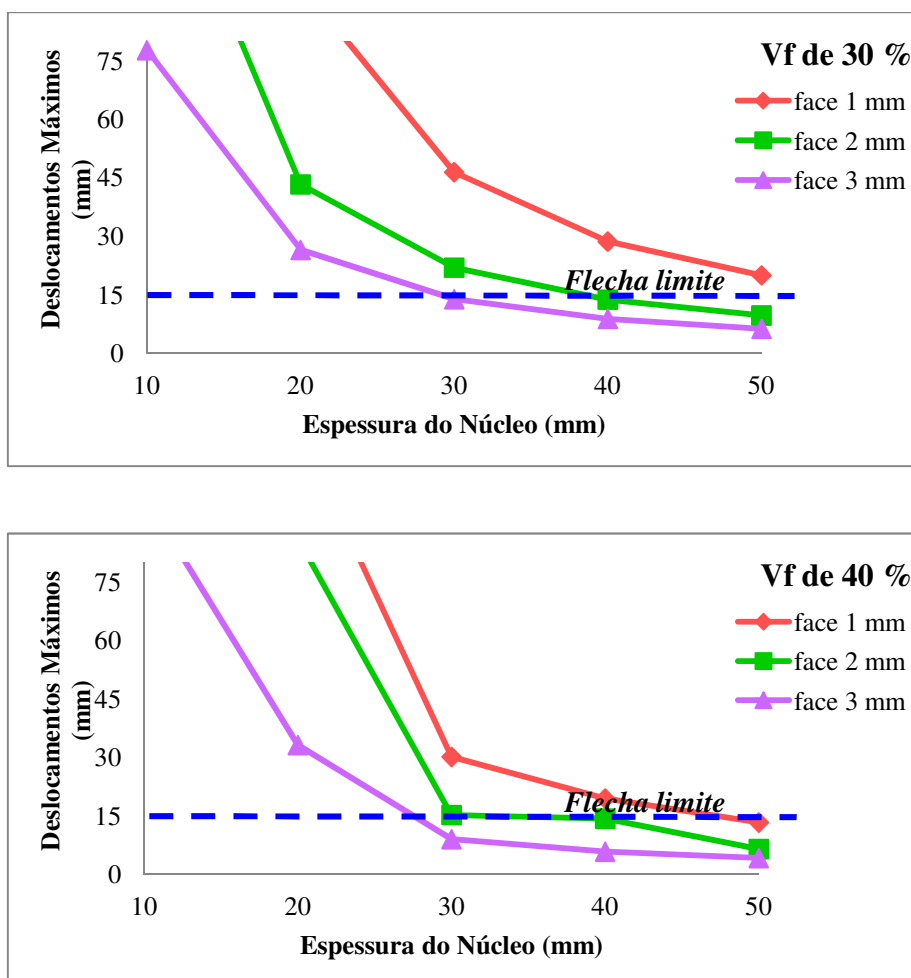
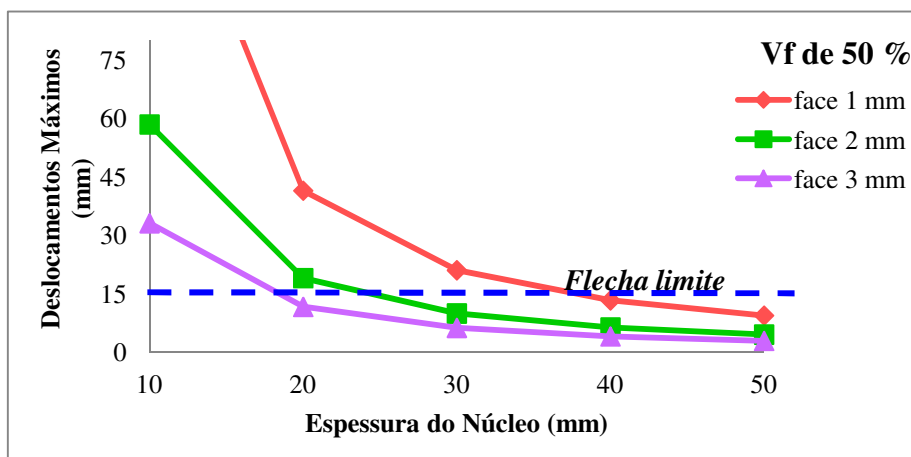


Figura 54 – Continuação



Fonte: Autora, 2013.

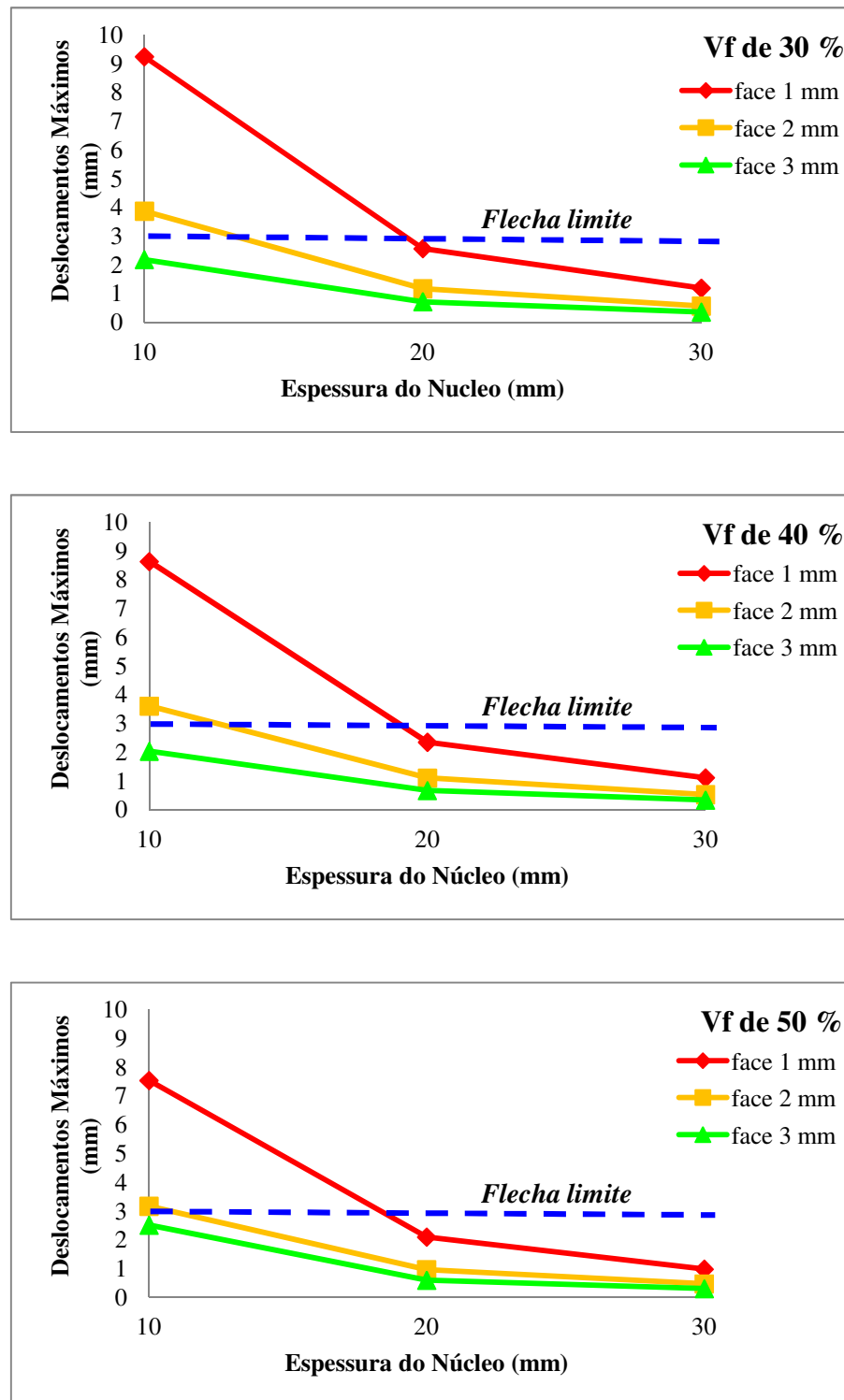
Os resultados para os painéis simulados com 30 % em volume de fibra, mostram que as espessuras dos componentes que atendem os valores exigidos de flecha (15 mm) são com faces de 2 mm e núcleo a partir de 40 mm e faces de 3 mm e núcleo a partir de 30 mm. Os painéis com volume de 40 % de fibra, as configurações viáveis são para as faces com 1 mm e núcleo de 50 mm de espessura, para as faces com 2 mm e 3 mm são viáveis com núcleos a partir de 30 mm de espessura. Os painéis com V_f de 50 %, apresentam configurações que satisfazem os requisitos da norma com espessura de faces de 1 mm e núcleo a partir de 40 mm, para faces com 2 mm e núcleo a partir de 30 mm, e faces com 3 mm e núcleo a partir de 20 mm.

Entre os três teores de volume de fibra testados, os compósitos com volume de 50 % de fibra apresentam melhores resultados e possibilidades de confecção. Dentre as espessuras selecionadas que atendem a norma, as faces a partir de 2 mm e núcleos a partir de 30 mm apresentam as melhores possibilidade de confecção dos painéis para forro.

4.5.2.2 REFORÇO EM TECIDO BIDIRECIONAL DE RAMI

Na Figura 55 são apresentados os deslocamentos obtidos nas simulações numéricas para os painéis reforçados com tecido bidirecional de fios de rami, nas dimensões de 1 m × 0,5 m, com variação do volume de fibras de 30 % à 50 %, que atende a ABNT NBR 14371:1999, com deslocamentos admissíveis de 3 mm.

Figura 55 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches com reforço de tecido bidirecional de fios de rami de dimensão 1 m × 0,5 m, obtidos pela simulação numérica



Fonte: Autora, 2013.

Analisando os resultados obtidos para os compósitos com 30 % de volume de fibras, os painéis simulados que apresentam constituição viável são com espessuras a partir de 1 mm de faces e 20 mm de espessura de núcleo e para faces a partir de 2 mm e núcleo a partir de 20

mm. Para os painéis com os volumes de 40 % e 50 % de fibras, são viáveis com espessuras de faces a partir de 1 mm e 20 mm de núcleo. As melhores possibilidades de constituição dos painéis são para as faces a partir de 2 mm e núcleos a partir de 2 cm de espessura.

Na Figura 56 são apresentados os deslocamentos obtidos para as simulações numéricas realizadas para os painéis com dimensões de 3 m × 1 m, com a variação de volume de fibras, que atende a ABNT NBR 15366/1:2006, com deslocamento máximo admissível de 15 mm.

Figura 56 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches reforçados com tecido bidirecional de dimensão 3 m × 1 m, obtidos na simulação numérica

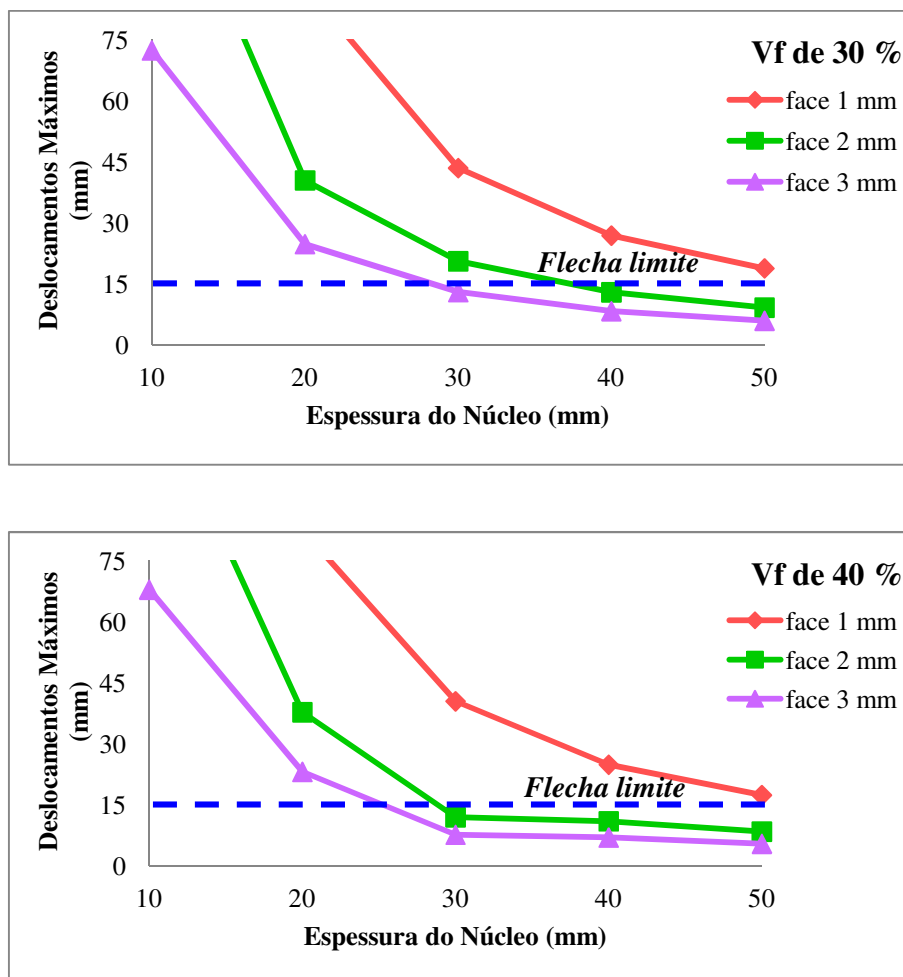
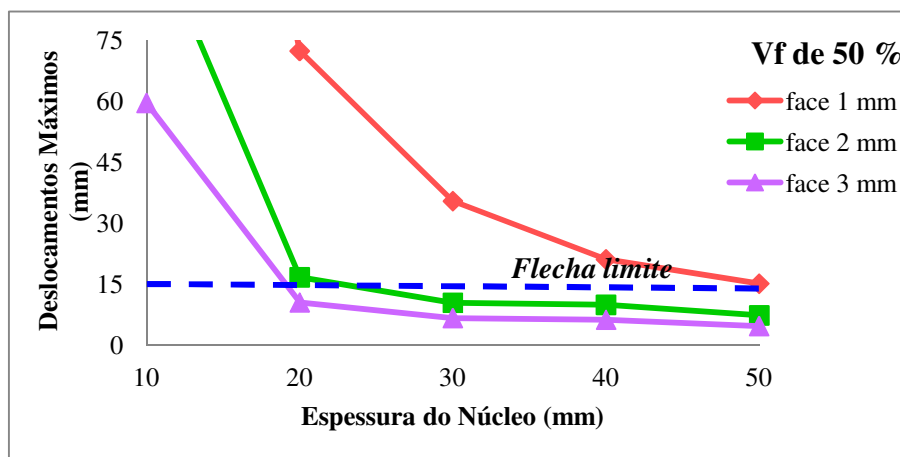


Figura 56 – Continuação



Fonte: Autora, 2013.

Os painéis simulados com 30 % em volume de fibras, que atendem os valores exigidos de deslocamento pela norma, são para faces com espessura de 2 mm e núcleos a partir de 40 mm e faces de 3 mm e núcleo a partir de 30 mm. Para os painéis com 40 % de volume de fibra, as configurações viáveis são para as faces de 2 mm e núcleos a partir de 30 mm e faces de 3 mm e núcleos a partir de 30 mm. Para os painéis com V_f de 50 %, são para as faces de 2 mm e núcleo a partir de 30 mm e faces de 3 mm e núcleo a partir de 20 mm.

Os painéis com compósitos com 50 % de volume de fibra apresentam melhores resultados e possibilidades de confecção e as espessuras das faces a partir de 2 mm e núcleos a partir de 30 mm, para uso como forro.

As simulações numéricas realizadas para os painéis com reforço em mantas de bucha vegetal não apresentaram valores viáveis para a constituição do painel em nenhuma das duas configurações.

Os resultados obtidos nas simulações realizadas no ANSYS® nesta segunda etapa serviram como referência qualitativa para a produção dos painéis. Comparando os dois tipos de reforço usados nas faces, as simulações revelam que os compósitos reforçados com fibras alinhadas de rami e o tecido bidirecional, apresentam resultados semelhantes, indicando que ambos são viáveis para a confecção do painel. Entre as espessuras propostas para a configuração do painel, as faces a partir de 2 mm e o núcleo a partir de 30 mm revelam-se como melhores opções de confecção. Dos três teores de volume de fibra propostos, o de 50 % mostra-se mais

adequado, pois além de apresentar melhores propriedades mecânicas, ainda tem a substituição de um material não-biodegradável por outro ecologicamente correto em uma significativa porcentagem, reduzindo também as quantidades finais de materiais para a confecção do painel.

A partir dos resultados das simulações numéricas e das considerações apresentadas definiu-se como espessura de referência para a confecção das faces o valor de 2 mm e para os núcleos o valor de 30 mm. Entre os tipos de reforço testados, selecionou-se o tecido bidirecional de fios de rami, por apresentar desempenho semelhante ao das faces reforçadas com fibras alinhadas de rami e ter maior facilidade no procedimento de moldagem das placas.

4.5.3 TERCEIRA ETAPA

Os painéis com núcleos de EPS simulados numericamente apresentaram comportamento próximo ao dos painéis ensaiados à flexão, não sendo necessário efetuar nenhum ajuste. Porém, os modelos dos painéis com núcleo de bucha, por apresentarem resposta bastante irregular, quanto à uniformidade do comportamento e do mecanismo de ruptura, teve que ser ajustado, para que representasse o protótipo ensaiado. Após o ajuste, que consistiu da modificação das propriedades elásticas, a modelagem numérica apresentou resultados similares aos resultados experimentais, conforme pode-se observar na Tabela 13.

Tabela 13 – Deslocamentos máximos dos ensaios à flexão dos painéis sanduíches experimentais e simulados

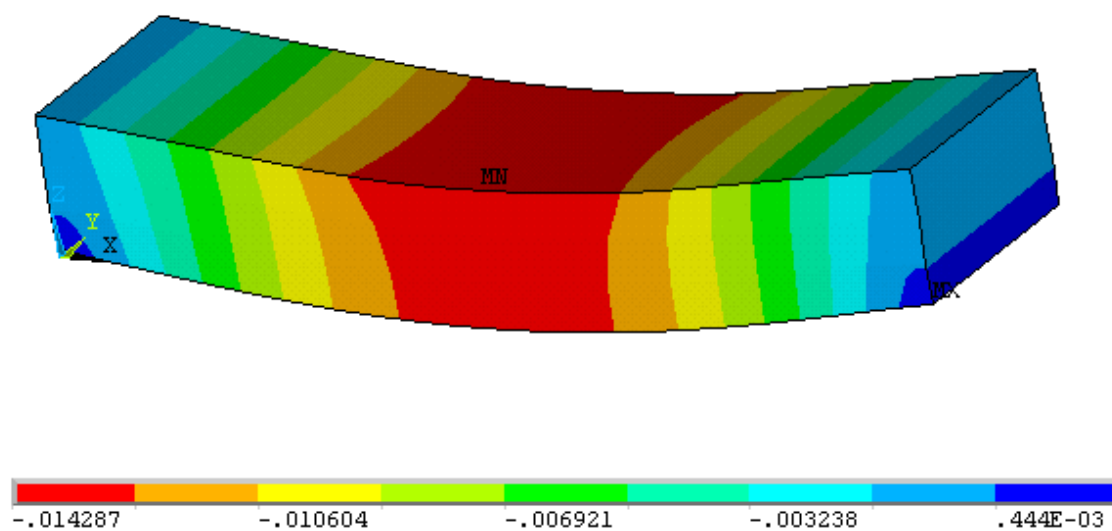
CPs	EPS/Epóxi incolor (mm)		EPS/Epóxi fluida (mm)		Bucha vegetal impregnada (mm)	
	Experimental	Simulado	Experimental	Simulado	Experimental	Simulado
1	39,39	37,64	22,02	19,61	19,54	18,58
2	38,24	35,97	33,56	27,83	24,92	24,15
3	32,24	32,49	22,48	19,12	28,09	31,05
4	34,99	35,28	18,15	22,72	13,29	16,32
5	—	—	30,09	28,69	21,63	20,92
6	—	—	33,10	27,79	20,81	22,44
7	—	—	32,67	27,05	27,29	28,76

Fonte: AUTORA, 2013.

A título de exemplo, a Figura 57 ilustra os deslocamentos (flechas) de painéis ensaiados numericamente no ANSYS®, com dois bordos apoiados sob carregamento uniforme.

Figura 57 – Deslocamentos (flechas em m) dos painéis sanduíches simulados numericamente à flexão

a) Viga ensaiada



b) Pannel com dimensão de 1,0 m × 0,5 m

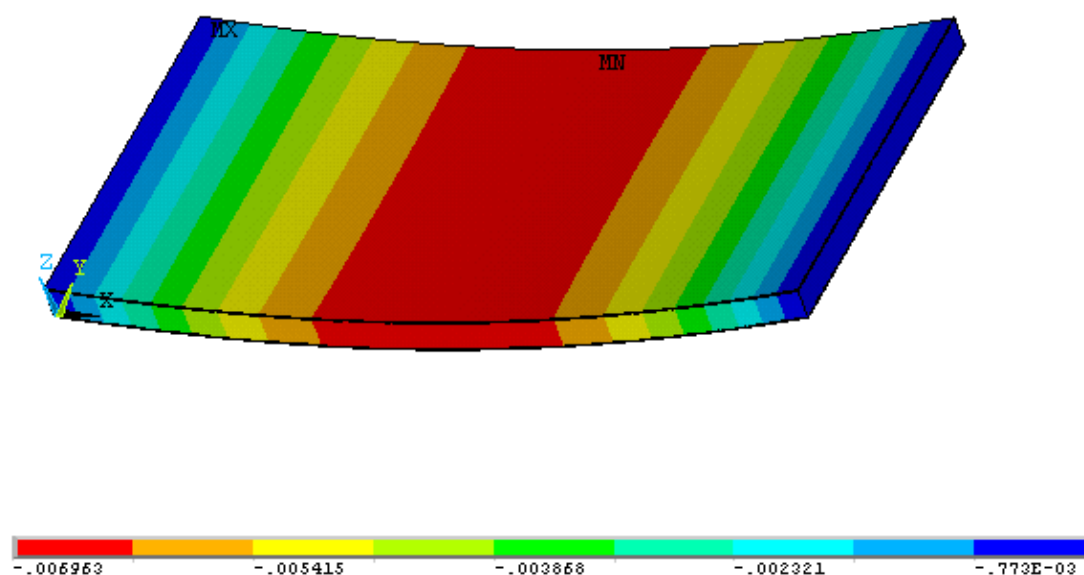
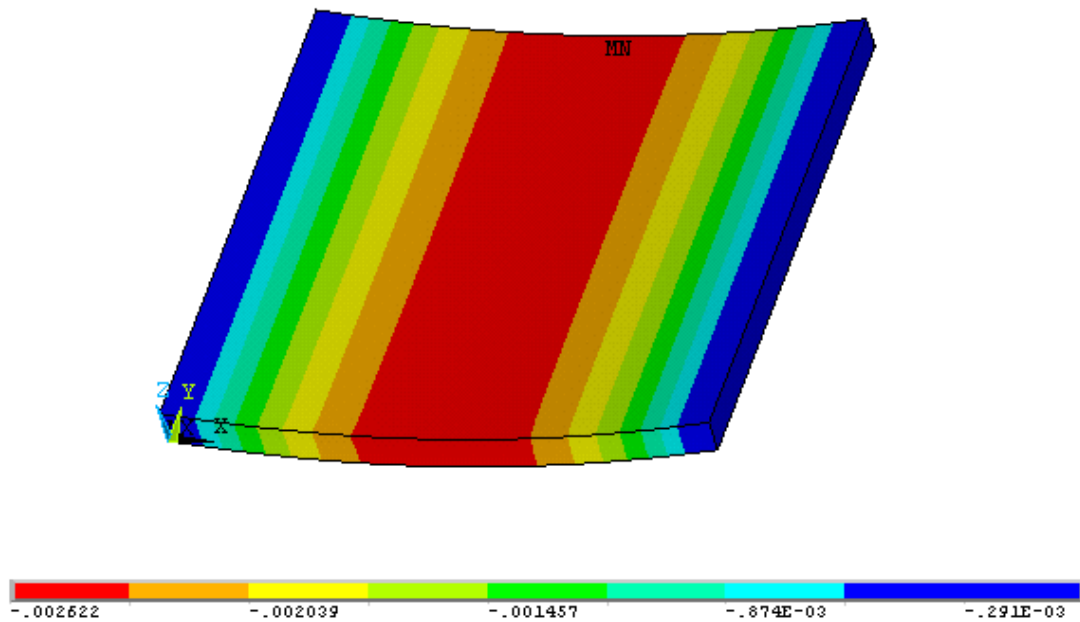


Figura 57 – Continuação

c) Painel com dimensão de 0,625 m × 0,625 m



Fonte: Autora, 2013.

Os resultados das simulações realizadas na terceira etapa, usando os modelos ajustados, ou seja, modelos com comportamento similar aos protótipos ensaiados à flexão, são apresentadas na Figura 58, de acordo com as dimensões de cada painel reproduzido.

Figura 58 – Deslocamentos máximos dos painéis sanduíches obtidos pela simulação numérica

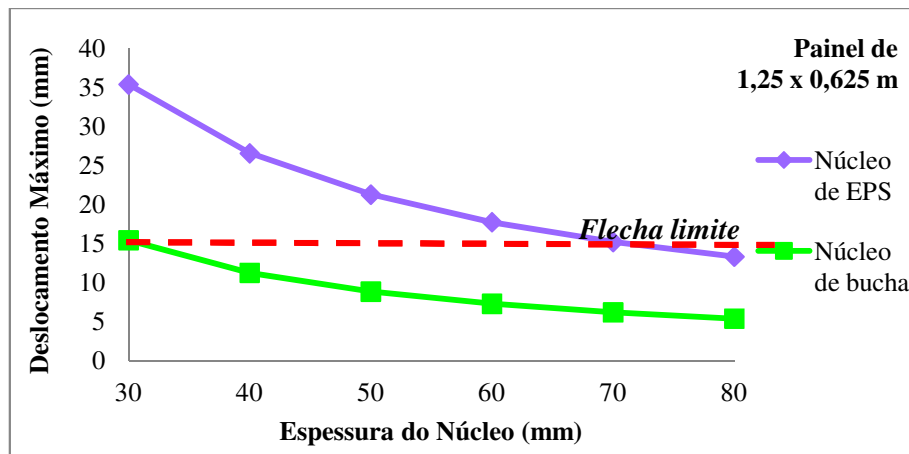
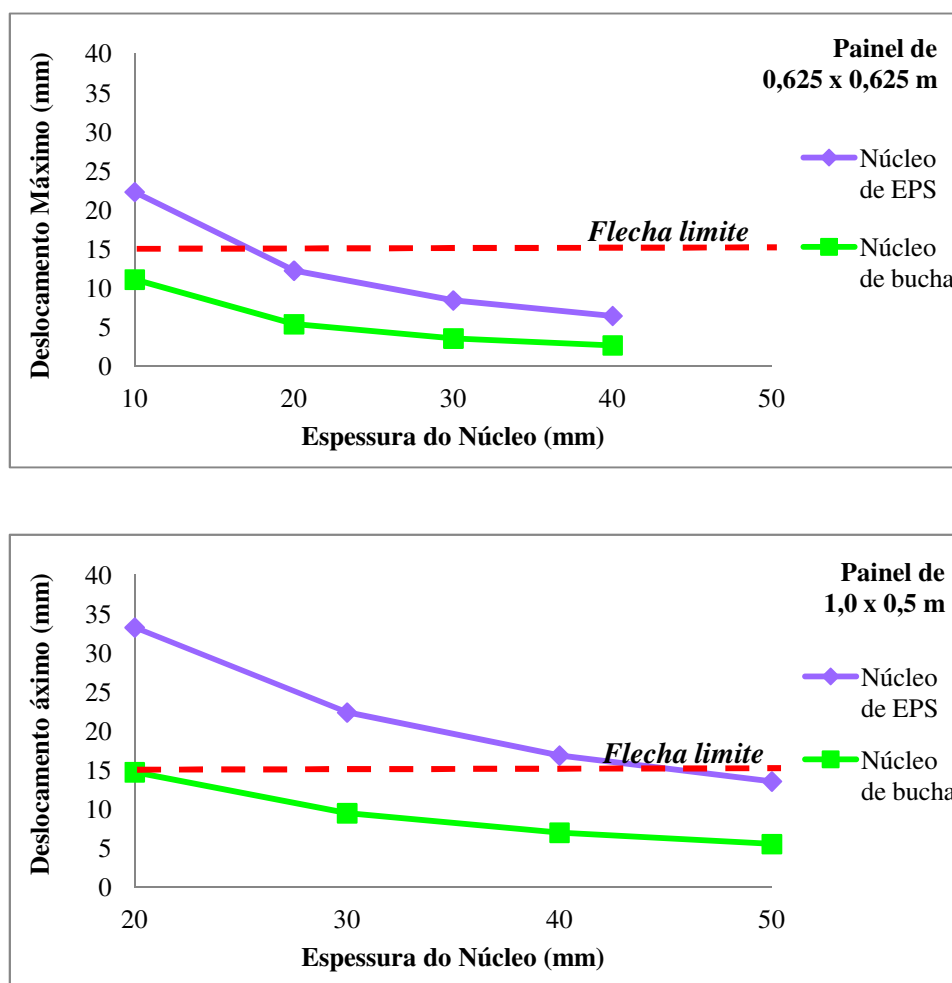


Figura 58 – Continuação



Fonte: Autora, 2013.

Os painéis simulados com dimensões de 3,0 m × 1,0 m, não apresentaram resultados com espessuras razoáveis, com até 100 mm, que atendessem o deslocamento máximo de 15 mm, com carregamento de 500 N/m².

As espessuras dos núcleos que satisfazem os requisitos da norma para os painéis com dimensões de 1,0 m × 0,5 m, constituídos com núcleo de bucha são a partir de 20 mm e para os painéis constituídos com núcleo de EPS, a partir de 50 mm.

Os painéis com dimensões de 1,25 m × 0,625 m, apresentaram possibilidades de confecção para painéis com núcleo de bucha vegetal com espessuras a partir de 30 mm. Os painéis com núcleo de EPS, nestas dimensões, apresentam confecção viável com núcleos a partir de 70 mm de espessura.

Os painéis simulados com dimensões de 0,625 m × 0,625 m, mostram que as espessuras dos núcleos de bucha, que atendem os valores exigidos de flecha (15 mm) são a partir 10 mm. Para os painéis com núcleo de EPS as espessuras admissíveis são a partir de 20 mm.

A diferença de resultados entre estes dois núcleos para painéis com dimensão maior que 1 m, revela o núcleo de bucha como melhor opção, principalmente para painéis com espessuras delgadas, comprovando a maior rigidez desta estrutura. Para os painéis com menor dimensão, como o de 0,625 m × 0,625 m, o núcleo de EPS apresenta rigidez adequada.

Perante os resultados obtidos, pode-se concluir que é viável a confecção de painéis sanduíches constituídos de compósitos reforçados com tecido bidirecional de fios de rami e núcleos de EPS e bucha vegetal, para aplicação como forro. O uso de bucha vegetal como núcleo e o compósito reforçado com o tecido de rami em painéis, revela uma nova alternativa de aproveitamento dessas fibras para aplicação no setor da construção.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÃO

Foi estudado neste trabalho o uso de fibras vegetais de rami e bucha vegetal em componentes de faces e núcleo em painéis sanduíches para uso como forro em edificações.

Entre os três tipos de reforços testados em compósitos para a constituição das faces dos painéis, apenas os reforços de fibras alinhadas de rami e tecido bidirecional de fios de rami mostraram-se adequados e com grande potencial de emprego em estruturas de forros.

O compósito com fibras alinhadas de rami foi o melhor material obtido, com maior resistência à tração e módulo de elasticidade, apresentando resultados superiores aos encontrados na literatura. Esta consistência poderia ser atribuída à distribuição alinhada do reforço e aos métodos e cuidados no processo de moldagem.

Os compósitos reforçados com tecido bidirecional de fios de rami também apresentaram boas propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade e, se mostram adequados para aplicação em faces de painéis, devido à facilidade no processo de moldagem e por ter a configuração das fibras igualmente distribuídas em duas direções perpendiculares entre si.

Comparando os três percentuais de fibras testados, os valores obtidos para os compósitos com 50 % de volume de fibra revela-se adequado, pois além de apresentar melhores propriedades mecânicas, ainda tem a substituição de um material não-biodegradável por outro ecologicamente correto em uma significativa porcentagem, reduzindo também as quantidades finais de materiais para a confecção do painel, considerando seu melhor desempenho.

O EPS e a bucha vegetal apresentaram bons resultados para uso como núcleo em painéis sanduíches. A bucha impregnada de resina exibe excelente propriedade de rigidez e desponta como um ótimo material de preenchimento, devido a sua configuração natural, leveza e opções de confecção de painéis com dimensões maiores e delgados.

Os estudos do desempenho estrutural dos painéis sanduíches através das simulações numéricas revelaram que é viável a confecção de painéis sanduíches constituídos de compósitos reforçados com tecido bidirecional de fios de rami e núcleos de EPS e bucha vegetal impregnada de resina, para aplicação como forro, em diferentes dimensões, como as comercialmente usadas, por exemplo, $1,250\text{ m} \times 0,625\text{ m}$ e $0,625\text{ m} \times 0,625\text{ m}$.

Painéis com dimensões maiores que 1 m , revelam que o núcleo de bucha impregnada apresenta-se como melhor opção de confecção, principalmente para painéis com espessuras delgadas, comprovando a maior rigidez desta estrutura. Para painéis com menor dimensão, como o de $0,625\text{ m} \times 0,625\text{ m}$, o núcleo de EPS apresenta rigidez adequada e semelhante ao núcleo de bucha.

A contribuição deste trabalho foi no sentido de mostrar que o uso de fibras vegetais, em particular, a bucha vegetal e o rami, são materiais com grande potencial para aplicação em componentes para a construção civil, com boas propriedades mecânicas e leveza, comparados com outros materiais tradicionalmente usados.

5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Os painéis sanduíches constituem um material relativamente recente no setor da construção, o que torna o campo de investigação deste tipo de material e das estruturas por eles compostos muito ampla, necessitando de estudos mais aprofundados. Os resultados encontrados neste trabalho até o momento, que incidem fundamentalmente no processo de fabricação e no comportamento mecânico do painel e dos componentes de faces e núcleo, deixam várias questões relacionadas aos materiais compósitos reforçados com fibras vegetais, que também necessitam ser investigadas. Nesse sentido, alguns aspectos e materiais passíveis de serem desenvolvidos e investigados em trabalhos futuros são indicados:

-
- Estudo dos painéis utilizando outros tipos de compósitos nas faces;
 - Estudo de diferentes materiais e configurações de núcleos nos painéis;
 - Estudo sobre os diferentes modos de ruptura do painel;
 - Estudo do desempenho térmico e acústico dos painéis sanduíches aplicados como forros;
 - Estudo do comportamento dos painéis sanduíche em situação de incêndio;
 - Estudo da durabilidade dos painéis sanduíches;
 - Estudo dos sistemas de ligação dos painéis entre si e a outros elementos construtivos.
 - Levantamento dos custos dos painéis em relação a outros painéis utilizados comercialmente;
 - Procedimentos práticos de produção industrial dos painéis.

REFERÊNCIAS

ACKELRUD, L. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. 1 ed. Barueri: Manole, 2007.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H. Fibras vegetais na construção civil. experiência brasileira. **Téchne. Revista de tecnologia da construção**. São Paulo, v.5, n.32, p.38-43, 1998.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H. Fibras vegetais como material de construção. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, p.1539-1558, 2007.

ALLEN, H. G. **Analysis and design of structural sandwich panels**. Oxford: Pergamon Press, 1969.

ALMEIDA, M. I. A. de. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2009.

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 4. ed. São Paulo: Ética, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C393/C393M**: Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure. Philadelphia, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Philadelphia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638**: Standard test method for tensile properties of plastics. Philadelphia, 2010.

ANGELINI, L. G.; LAZZERI A.; LEVITA G.; FONTANELLI, D.; BOZZI, C. Ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) and Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibers for composite materials: agronomical aspects, morphology and mechanical properties. **Industrial Crops and Products**, v. 11, p. 145-161, 1999.

ANNUNCIADO, T. R. **Estudo da *chorisia speciosa* e outras fibras vegetais como sorventes para o setor de petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro Politécnico, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

ANSYS 11.0 Notice. Computational Applications and System Integration Inc., 2012.

ASKELAND, D. R. **Ciência e ingeniería de los materiales**. 3 ed. México: International Thomson, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8082**: Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmica – resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14371**: Forros de PVC rígido para instalação em obra - procedimento. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: Informação e documentação – trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15366/1**: Painéis industrializados com espuma rígida de poliuretano - parte 1. Rio de Janeiro, 2006.

ABRAPEX - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO. Disponível em: <http://www.abrapex.com.br/01OqueeEPS.html>. Acessado em: 02 de Junho de 2012.

BARBERO, E. J. **Introduction to composite materials design**. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.

BENATTI JÚNIOR, R. **Rami: planta têxtil e forrageira**. São Paulo: Nobel, 1988.

BERTHELOT, J. M. **Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures**. Paris: Masson, 1992.

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

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composite reinforced with cellulose based fiber. **Polymer Science**, v 24, p. 200-272, 1999.

BNDES. **Rami, uma cultura em extinção**. Rio de Janeiro, 1996. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/publicacoes/consulta_expressa> Acesso em: 28 de Junho de 2012.

BOGDANOVICH, A. E.; PASTORE, C. M. **Mechanics of textile and laminated composites, with applications to structural analysis**. London :Chapman & Hall, 1996.

BOYNARD, C. A.; ALMEDIA, J. R. M. Morphological characterization and mechanical behaviour of sponge gourd (*Luffa cylindrica*) – polyester composite materials. **Polym Plast Technol Eng**, v. 39, p. 489-499, 2000.

BRANDT, A. M. **Cement-based composites: materials, mechanical properties and performance**. London: E & FN Spon, 1995.

BRAVO NETO, J.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N. Comportamento em tração de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras finas alinhadas de rami. In : 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...** Campos do Jordão/SP, 21 a 25 de novembro de 2010.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia dos materiais – uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

CANEVAROLO Jr, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3 ed. São Paulo: Artliber, 2010.

CARRERA, L. C. M. **Aspectos sobre as estabilidades fotooxidativa e hidrolítica das resinas de poliéster insaturada (PI), visando suas futuras utilizações em coletores solares térmicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 1988.

CASSIS, F. A.; TALBOT, R. C. **Polyester and vinyl ester resins. Handbook of composites**. Chapman & Hall: London, 1998.

CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia. Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra. Rio de Janeiro: BNH-DEPEA, 72 p., 1982

CHAVES, L. P. **Estudo da distribuição do reforço de lajes de concreto armado com fibras de carbono, usando otimização topológica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2010.

CHOU, T-W. **Microstructural design of fiber composites**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and applications of finite element analysis**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.

CORREIA, J. R. **Perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP). Aplicação de vigas mistas GFRP-betão na construção**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2004.

CORREIA, J.R. **GFRP Pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008.

COSTA, F. R. **Situação atual e perspectiva de utilização de materiais no interior de aeronaves executivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2009.

COUTTS, R. S. P. **Wood fibre reinforced cement composites**. In: Swamy, R. N. Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete. 1ed. Glasgow: Blackie, v. 5, p. 1-62, 1988.

DAVIES, J. M., **Lightweight Sandwich Construction**. Osney Mead Oxford OX2: Blackwell Science Ltd, 2001.

DEMIR, H.; ATIKLER, U.; BLAKOSE, D.; TIHMINLIOGLU, F. The effect of surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene - luffa cylindrica composites. **Composites A**, 2005.

DE ROSA, I. M.; SANTULLI, C.; SARASINI, F.; VALENTE, M. Post-impact damage characterization of hybrid configurations of jute/glass polyester laminates using acoustic emission and IR thermography. **Composites Science and Technology**, 2009.

DIAB, **Sandwich concept** - DIAB Sandwich Handbook, 2003.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. K.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, p. 1552-1596, 2012.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultrastructures, reaction**. 2 ed. Munich: Walter de Gruyter, 1989.

GUIMARÃES, J. L.; FROLLINI, E.; SILVA, C. G. da; SATYANARAYANA, K. G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 30, p. 407-415. 2009.

HOLLAWAY, L. C. Polymer composites in construction: a brief history. **Engineering and Computational Mechanics** 162, p. 107-118, 2009.

HU, H.; BELOUETTAR, S.; POTIER-FERRY, M.; DAYA, E. M. Review and assessment of various theories for modeling sandwich composites. **Composite Structures**, v. 84, p. 282–292, 2008.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An introduction to composite materials**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

HYER, M. W. **Stress analysis of fiber-reinforced composite materials**. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1998.

IBGE. 2012. **Principais produtos das lavouras temporárias**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/tabela1pam_2001.shtm. Acessado em: 22 de junho de 2012.

IBGE. **Produção agrícola municipal do Paraná**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2010/tabelas_pdf/tabela02.pdf. Acessado em: 20 de Janeiro de 2012.

ISIS - INTELLIGENT SENSING FOR INNOVATIVE STRUCTURES. ISIS Educational Module about FRP. ISIS Educational Module 1 to 4 – Intelligent Sensing for Innovative Structures. Winnipeg: ISIS, 2003.

- JAWAID, M.; ABDUL KALIL, H. P.S. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, p. 1-18, 2011.
- LEI, W.; LE, W. G.; REN, C. Effect of volume fraction of ramie cloth on physical and mechanical properties of ramie cloth/UP resin composite. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Science press, v. 16, p. 474 - 477, 2006.
- LEITE, M.; FREITAS, M.; SILVA, A. **Sandwich construction**. Apresentação IST, Design Studio, 2004.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais – ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- LEWIN, M.; GOLDENSTEIN, I. **Wood structure and composition. International fiber science and technology series**. USA: Marcel Dekker, v. 11, 1991.
- LODHA, P.; NETRAVALI, A. N. Characterization of steriac acid modified soy protein isolate resin and ramie fiber reinforced ‘green’ composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, p. 1211-1225, 2005.
- MANALO, A. C.; ARAVINTHAN, T.; KARUNASENA, W.; ISLAM, M. M. Flexural behaviour of structural fibre composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions. **Composites Structures**, v. 92, p. 984 – 995, 2010.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução à polímeros**. 2 ed. Revista e Ampliada. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D. Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.18, v. 2, p. 92-99, 2008.
- MATTOSO, L. H. C.; FRAGALLE, E. P. Uso de fibras vegetais na indústria automobilística: necessidade ecológica, oportunidade para o Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos/SP, 1996.
- MATTOSO, L. H. C.; PEREIRA, N.; SOUZA, M. L. de; AGNELLI, J. A. M. Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos. Brasília: **EMBRAPA Produção e Informação**. v. 3, p. 1-4, 1996.
- MAZUMDAR, S. K.. **Composites manufacturing: material, product, and process engineering**. New York: CRC Press, 2002.
- MEDINA, J.C. O rami como planta forrageira. **O agrônomo**, v. 9, p. 11-12, 1957.
- MENDONÇA, P. T.R. **Materiais compósitos e estruturas – sanduíche**. 1 ed. Barueri: Manole, 2005.

MISHRA, S.; MOHANTY, A.K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK S. K. Studies on mechanical performance of biofibre/ glass reinforced polyester hybrid composites. **Composites Science and Technology**, 2003.

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

MOTTA, L. A. C. **Melhoria do desenvolvimento de fibras de coco e sisal para reforço de matrizes cimentícias através do tratamento termomecânico e impregnação de resinas**. 133p. Tese (Doutorado da Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

MUNDO. **Poliestireno expandido**. Disponível em: <www.mundocerto.com.br>. Acesso em: 12 mai 2012.

NOGUEIRA, C. L.; MARLET, J. M. F.; REZENDE, M. C. Processo de obtenção de pré-impregnados poliméricos termoplásticos via moldagem por compressão a quente. **Polímeros**, São Carlos, v. 9, n. 3, 1999.

OLIVEIRA, A. L. M. Composição química do rami (*bohemia nivea*, *Gaud.*) submetido à adubação orgânica e a diferentes intervalos de cortes. **Revista da FZVA**. Uruguaiana, v. 14, n. 1, p. 53-68. 2007.

OLIVEIRA, C. B. de; GUSMÃO, A. B.; ALEGRO, R. C. **Crônicas da cultura do rami em Uraí: lembranças de trabalhadores, 1960 – 1980**. 2010. Disponível em: <http://confins.revues.org/5973> ; DOI : 10.4000/confins.5973. Acessado em: 22 de Junho de 2012.

OLIVEIRA, E. C. de; TEODORO, E. B. Avaliação do desempenho acústico da luffa cylindrica (bucha vegetal), por meio de análises experimentais em tubo de impedância. 15º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. **Anais...EDUFU**. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2005.

PAIVA JÚNIOR, C. Z.; DE CARVALHO, L. H.; FONSECA, V. M.; MONTEIRO, S. N.; D'ALMEIDA, J. R. M. Analysis of the tensile strength of polyester/hybrid ramie–cotton fabric composites. **Polymer Testing**, 2003.

PERSSON, K. Micromechanical modelling of wood and fibre properties. 223p. Tese (Doutorado) – Lund, University of Lund, 2000.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, n. 2, p. 4-10, 2000.

ROMANZINI, D.; ORNAGHI Jr., H. L.; AMICO, S. C.; ZATTERA, A. J. Preparation and characterization of ramie-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. **Materials Research**, v. 13, n. 3, p. 415-420, 2012.

ROWELL, R. M. Agro-fiber based composites: exploring the limits. In: **Proceedings of the 18th Riso Internacional Symposium on Materials Science: Polymeric Composites – Expanding the Limits**. Dinamarca. 1997.

ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and factors affecting fiber properties. In: **Natural Polymers and Agrofibers Composites**. Embrapa, São Carlos, p. 115-133, 2000.

SARTORI, A. P. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Sanduíche para Isolamento Térmico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2009.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: source, production, morphology, properties and applications. **Composites: Part A**, v. 38, p. 1694–1709, 2007.

SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G. C.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers - An overview. **Progress in Polymer Science**, v. 34, p. 982-1021, 2009.

SAVASTANO Jr, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 152p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

SEAB. **Rami (fibra seca): evolução da área colhida, produção, rendimento, participação e colocação** Paraná/Brasil, p. 17, 2012. Disponível em: www.pr.gov.br/seab/deral/lpa0405_rami.xls. Acessado em: 10 de Agosto de 2012.

SEBRAE. **Bucha vegetal**. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/setor-/fruticultura/osetor/frutas-de-a-a-f/bucha-vegetal>. Acessado em: 05 de Abril de 2012.

SETUBAL. **Forros**. Disponível em: www.setubal.geradordeprecos.info. Acessado em: 05 de Abril de 2012.

SILVA FILHO, L. C. P. da; GARCEZ, M. R. **Compósitos de Engenharia de Matriz Polimérica**. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010.

SINGH, D. P. **Ramie (*Boehmia nivea*)**. **Central Research Institute for Jute and Allied Fibers – Indian Council of Agricultural Research**. New Delhi: India Council of Agricultural Research, 1992.

SIQUEIRA, R. G.; SANTOS, R.H. S.; MARTINEZ, H. E. P.; CECOM, P. R. Crescimento, produção e acúmulo de nutrientes em *Luffa Cylindrica* M. Roem. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n.5, p. 685-696, 2009.

SMITH, C. S. **Design of marine structures in composite materials**. London: Elsevier Applied Science, 1990.

SOARES, I. M. **Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2012.

SPOLADORE, D. S.; BENATTI Jr, R.; TEIXEIRA, J. P. F.; ZULLO, M. A. T.; AZZINI, A. Composição química das folhas e dimensões das fibras lenhosas em rami. **Bragantia**, Campinas, p. 229 – 236, 1984.

STRONG, A. B. **Composites manufacturing – materials, methods, and applications**. 2 ed. Dearborn – Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2008.

SWAMY, R.N. Fibre reinforcement of cement and concrete. **Materials and Structures**, v. 8, n. 45, p. 235-254, 1975.

TANOBE, V. O. A. **Caracterização de fibras de esponjas de luffa cylindrica para utilização em compósitos com matriz polimérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

VIEIRA, C. A. **Avaliação de métodos de fabricação de mantas híbridas de fibras curtas de vidro e sisal em compósitos poliméricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caixias do Sul, Caixias do Sul, 2008.

VINSON, J. R. **The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials**. 1 ed. Lancaster: Technomic Publishing Company, INC, 1999.