



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA

BRUNO GOMES SILVEIRA CALDAS

ESTRUTURA SANDUÍCHE DE MATRIZ POLIÉSTER
REFORÇADO COM TECIDO DE SISAL CONFORMADO POR
INFUSÃO A VÁCUO

Salvador
2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

BRUNO GOMES SILVEIRA CALDAS

**ESTRUTURA SANDUÍCHE DE MATRIZ POLIÉSTER
REFORÇADO COM TECIDO DE SISAL CONFORMADO POR
INFUSÃO A VÁCUO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho
Coorientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Salvador
2014

C145 Caldas, Bruno Gomes Silveira.

Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo / Bruno Gomes Silveira Caldas. – Salvador, 2014.

121 f. : il. color.

Orientador: Prof. Ricardo Fernandes Carvalho.

Co-orientador: Prof. Sandro Campos Amico.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

1. Estrutura sanduíche. 2. Sisal (fibra). 3. Poliéster. 4. Infusão a vácuo I. Carvalho, Ricardo Fernandes. II. Amico, Sandro Campos. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 693.92

BRUNO GOMES SILVEIRA CALDAS

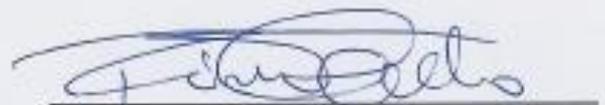
ESTRUTURA SANDUÍCHE DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADO
COM TECIDO DE SISAL CONFORMADO POR INFUSÃO À VÁCUO

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

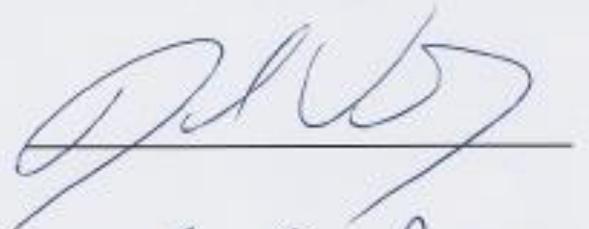
Salvador, 29 de agosto de 2014

Banca Examinadora:

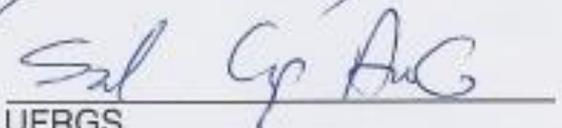
Profº. Drº. Ricardo Fernandes Carvalho
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Profº. Drº. Daniel Véras Ribeiro
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Profº. Drº. Sandro Campos Amico
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS



Profº. Drº. Romildo Dias Toledo Filho
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ



Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Ricardo Fernandes Carvalho, pela confiança, pelo empenho dedicado, pelos conselhos e conversas ao corredor e principalmente pela orientação para conclusão deste trabalho.

Ao meu Coorientador Prof. Sandro Campos Amico, por não medir esforços para que pudesse concluir este trabalho, a consideração que tenho pelo senhor não tem como mensurar.

Ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira (APAEB) pelo fornecimento das fibras de sisal.

À empresa Hamilton Rios Indústria Comércio e Exportação Ltda pelo fornecimento dos fios de sisal.

À ELEKEIROZ Ltda pelo fornecimento da resina poliéster.

Quero ainda agradecer aos meus colegas da turma 2012.1 pelo companheirismo durante as disciplinas.

Aos amigos do GPSFibras: Rayana (que trabalho tivemos, hein?), Sidnei, Tícilla, Maryana, Caio, Adilson, Catharine, Aydil, Carmem Teresa e Roberto Plech, vocês não sabem o quanto me ajudaram. Ao amigo Gabriel, que também estava sempre disposto a ouvir e me aconselhar, muito obrigado.

Aos Professores Dayana e Jardel, pelas conversas nos corredores, sempre me motivando a fazer o melhor.

Ao laboratório de construção e estruturas S. P. Timoshenko, em especial à Maia ajuda na caracterização mecânica dos constituintes (Sisal e Poliéster).

Ao grupo GECIM (Danilo, Paula, Pati, Luiz, Cleide e Prof(a). Nádía) pela amizade e pela caracterização física e estrutural dos meus constituintes, muito obrigado.

Ao Laboratório de Polímeros – LAPOL da UFRGS pela caracterização mecânica das estruturas sanduíches.

Um obrigado especial para toda a turma de Porto Alegre (Prof. Sandro, Eduardo, Clarissa, Garay, Laís, Fernanda, Camila, Ana, Felipe (Light), Chris, Gabbardo, Maikson, Álvaro, Letícia, André Catto, Humberto e Márcia), o tratamento e a forma que fui recebido, eu nunca vou esquecer. Um especial para Eduardo, Clarissa, Garay e o Vídeo por me

ajudarem nas moldagens, e Laís por me ajudar nos ensaio aos 45 min do segundo tempo. Vocês podem contar comigo para o que precisarem.

À minha amiga Pablina, por seu cuidado, amor e carinho, por estar sempre me apoiando no meu crescimento como profissional e como pessoa, por estar sempre pronta a escutar meus problemas e me aconselhar.

Os meus agradecimentos finais e mais importantes, a Deus por estar sempre presente na minha vida e por ter me dado força e perseverança pra nunca desanimar, apesar das dificuldades. Agradeço do fundo do coração à minha família que é meu alicerce, meus pais Ranulfo e Maria José, meus irmãos Pablo e Danillo, poder estar perto de vocês deixou tudo mais fácil. Um obrigado especial ao meu pai, que esteve sempre disposto a me ajudar, principalmente nas análises estatísticas. Amo muito vocês.

Resumo

A necessidade de elementos estruturais leves, com elevada rigidez e resistência nas mais diversas aplicações tem contribuído para o aumento da utilização de materiais compósitos, nos quais se incluem as estruturas em sanduíche. Com isso, a utilização de tecidos como reforços de estruturas sanduíches têm ganhado grande visibilidade devido as ótimas propriedades mecânicas obtidas, junto a isso a utilização de fibras vegetais em especial o sisal (*Agave sisalana*) como reforço dessas estruturas e o uso de diferentes técnicas de moldagem como a infusão a vácuo tornam o desenvolvimento de novos materiais ainda mais interessante. O objetivo deste trabalho é desenvolver estruturas sanduíches de matriz poliéster reforçada com tecido de sisal nas faces, utilizando a moldagem por infusão a vácuo (IV). Para isso foram desenvolvidos novos tecidos unidirecionais de sisal com a intenção de obter o melhor comportamento mecânico, cujos constituintes (sisal e poliéster) foram caracterizados por meio de TG, DSC, DRX, FTIR, ensaios de tração e flexão. Foi obtida uma nova estrutura sanduíche reforçada com tecido de sisal e com núcleo de PET, a caracterização do material se deu por MEV, dureza shore D, compressão transversal, compressão longitudinal e flexão. Também foram desenvolvidas estruturas reforçadas com tecido de fibra de vidro, com o intuito de saber se o material desenvolvido com tecido de sisal pode substituir estruturas com tecido sintético. O material obtido é leve, com excelente acabamento, e através da técnica de conformação utilizada, foi possível obter estruturas sanduíches com frações volumétricas variando entre 23% e 34%. Outra característica obtida pela conformação por IV foi a homogeneidade das placas conformadas, ocasionando numa variabilidade dos resultados mecânicos inferior a 10%. Os ensaios mecânicos realizados apresentaram resultados que tornam os compósitos sanduíches reforçados com tecido de sisal uma alternativa na substituição dos compósitos sanduíches reforçados com fibra de vidro. Dentre as estruturas reforçadas com tecido de sisal que apresentou o melhor comportamento mecânico foi o PET1TSI, que utilizou uma camada de tecido com arranjo Simples, já em relação às estruturas reforçadas com tecido de fibra de vidro, o melhor comportamento foi da estrutura reforçada com três camadas de fibra de vidro (PET3TV). Durante os ensaios de flexão e compressão longitudinal, as estruturas com fibra de vidro apresentaram delaminação entre as laminas e o núcleo, esse comportamento pode caracterizar uma interface ruim. Devido à dificuldade em impregnar os tecidos com fios de sisal, as estruturas apresentaram espessuras das lâminas superiores às estruturas reforçadas com tecido de fibra de vidro, essa maior espessura influenciou negativamente no comportamento mecânico das estruturas. Os resultados mecânicos mostraram que as

estruturas reforçadas com tecidos de sisal podem competir diretamente com os tecidos de fibra de vidro no desenvolvimento de novas estruturas que suportem determinados esforços.

Palavras-Chave: Estrutura sanduíche, Tecido de sisal, Poliéster, Infusão a vácuo.

Abstract

The need for lighter, stiffer and stronger structural elements in different applications has contributed to increase the use of composite materials, among which sandwich panels are included. Thus the use of fabrics as reinforcements of structures sandwiches have gained great visibility due to the excellent mechanical properties obtained, along with it the use of natural fibers in particular sisal (*Agave sisalana*) to reinforce these structures and the use of different molding techniques and vacuum infusion make the development of new materials even more interesting. The aim of this study is to develop sandwich structures reinforced polyester matrix and woven sisal layers, using the vacuum infusion (VI) molding. For this new unidirectional sisal fabrics with the intention of obtaining the best mechanical behavior, whose constituents (sisal and polyester) were characterized by TG, DSC, XRD, FTIR, tensile and bending were developed. A new sandwich structure reinforced with sisal cloth and with PET core was obtained, the characterization of the material is given by SEM, shore D hardness, transverse compression longitudinal compression and flexure. Reinforced structures have been developed with glass fiber fabric, in order to know whether the developed material with sisal fabric may replace structures with synthetic fabric. The obtained material is lightweight, with excellent workmanship, and by forming technique, it was possible to get sandwiches structures with volume fractions ranging between 23% and 34%. Another characteristic obtained by forming VI was homogeneity of shaped plates, resulting in a variability of less than 10% mechanical results. The results of the mechanical tests showed that make sandwich composite reinforced with woven sisal replacement of an alternative sandwich composites reinforced with fiberglass. Among the structures reinforced with sisal which presented the best mechanical behavior was PET1TSI, which used a layer of fabric with Simple arrangement, as compared to structures reinforced with glass-fiber fabric, the better behavior of the structure was reinforced with three glass fiber layers (PET3TV). During the tests, longitudinal compressive bending, the glass fiber structures showed delamination between the sheets and the core, this behavior may characterize a poor interface. Due to the difficulty of impregnating fabrics with sisal, the structures presented thicknesses greater than those reinforced with glass fiber fabric strip structures, the increased thickness negatively influence the mechanical behavior of structures. The results showed that the mechanical reinforced with woven sisal structures may compete directly with the tissues of glass fiber in the development of new structures that support certain efforts.

Keywords: Sandwich structure, Sisal fabric, Polyester, Vacuum infusion.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivo geral | 3 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 3 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 4 |
| 2.1 Fibras Vegetais | 4 |
| 2.1.1 Fibra de sisal..... | 5 |
| 2.2 Fios..... | 7 |
| 2.3 Arranjo dos Tecidos..... | 8 |
| 2.4 Caracterização térmica de fibras vegetais..... | 9 |
| 2.5 Caracterização Estrutural | 11 |
| 2.6 Massa específica | 13 |
| 2.7 Resina Poliéster..... | 13 |
| 2.8 Compósitos com fibras de sisal e poliéster..... | 14 |
| 2.9 Estruturas Sanduíches | 16 |
| 2.10 Conformação dos compósitos..... | 21 |
| 2.11 Vantagens e desvantagens da infusão a vácuo..... | 25 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 28 |
| 3.1 Reforços – Fibras, Fios e Tecidos de sisal (<i>Agave sisalana</i>)..... | 29 |
| 3.2 Núcleo..... | 31 |
| 3.3 Tecido de Fibra Vidro..... | 31 |
| 3.4 Matriz - Resina Termofixa Insaturada de Poliéster | 32 |
| 3.5. Caracterização dos constituintes (sisal e resina poliéster) | 32 |
| 3.6 Ensaios mecânicos em Fibras, Fios, Tecidos e Matriz. | 35 |
| 3.6.1 Fibras vegetais..... | 35 |
| 3.6.2 Fio de Sisal..... | 37 |
| 3.6.3 Tecido de Sisal | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 3.6.4 Matriz Poliéster | 38 |
| 3.7 Moldagem dos compósitos por infusão a vácuo (IV) | 40 |
| 3.8 Caracterização das estruturas sanduíches | 42 |
| 3.8.1 Determinação da fração volumétrica do reforço nas faces (% V_f)..... | 43 |
| 3.8.2 Ensaio de Dureza Shore D | 44 |
| 3.8.3 Ensaio de Compressão Transversal..... | 44 |
| 3.8.4 Ensaio de Compressão Longitudinal..... | 45 |
| 3.8.5 Ensaio de Flexão em 3 pontos..... | 46 |
| 3.8.6 Análises Estatísticas dos resultados | 49 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 50 |
| 4.1 Caracterização dos constituintes – Sisal e Poliéster | 50 |
| 4.1.1 Ensaio de tração em fibras de sisal..... | 57 |
| 4.1.2 Ensaio de Tração nos Fios de Sisal. | 58 |
| 4.1.3 Ensaio de tração dos tecidos de sisal. | 60 |
| 4.1.4 Ensaio de Tração da Resina Poliéster | 62 |
| 4.1.5 Ensaio Flexão Resina Poliéster | 63 |
| 4.2 Ensaio mecânicos nas estruturas sanduíches..... | 64 |
| 4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura das estruturas sanduíches | 65 |
| 4.2.2 Dureza Shore D | 68 |
| 4.2.3 Compressão Transversal. | 70 |
| 4.2.4 Compressão Longitudinal | 74 |
| 4.2.5 Ensaio de Flexão 3 pontos..... | 79 |
| 4.2.5.1 Resistência ao cisalhamento do núcleo | 89 |
| 4.2.5.2 Resistência à Flexão das faces..... | 90 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 93 |
| 6 REFERÊNCIAS..... | 95 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Demonstração da torção das fibras na produção do fio de fibras vegetais. | 7 |
| Figura 2 - Tipos de arranjos encontrados para tecidos tramados: a) Simples, b) Cesto, c) Cetim e d) Sarja. | 9 |
| Figura 3 - Esquema do arranjo dos tecidos tramados..... | 9 |
| Figura 4 - Materiais de núcleos homogêneos e estruturados..... | 18 |
| Figura 5 - Esquema do processo de infusão a vácuo utilizado na fabricação das amostras. | 23 |
| Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos realizados na caracterização dos materiais..... | 28 |
| Figura 7 - Fibra de sisal In natura..... | 29 |
| Figura 8 - Fio de sisal (700 m/kg) para desenvolvimento dos tecidos. | 29 |
| Figura 9 - a) Desenvolvimentos dos tecidos de sisal Simples em tear manual. b) Tecido de sisal Tramado Sarja (direita)..... | 30 |
| Figura 10 - Tecido de sisal desenvolvido por Cerchiaro (2010). | 30 |
| Figura 11 - Núcleo espuma de PET para utilização no compósito sanduíche..... | 31 |
| Figura 12 - Tecido unidirecional de fibra de vidro para reforço do sanduíche. | 32 |
| Figura 13 - Equipamento utilizado para a picnometria a gás Hélio. | 33 |
| Figura 14 - Equipamento utilizado para análise Termogravimétrica dos constituintes. | 33 |
| Figura 15 - Equipamento utilizado para análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos constituintes..... | 34 |
| Figura 16 - Dimensões dos corpos de prova com fibra de sisal. | 36 |
| Figura 17 - a) dimensões do corpo de prova com fio de sisal. b) imagem final do corpo de prova. | 37 |
| Figura 18 - Dimensões dos corpos de prova com tecido de sisal (a) e imagem final do corpo de prova (b)..... | 38 |
| Figura 19 - Dimensões e geometria do corpo de prova para o ensaio de tração na matriz. | 38 |
| Figura 20 - Corpos de prova de resina poliéster para ensaio de tração. | 39 |
| Figura 21 - Dimensões e geometria do corpo de prova para o ensaio de flexão na matriz. | 39 |
| Figura 22 - Corpos de prova de resina poliéster para ensaio de flexão. | 40 |
| Figura 23–a)Posicionamento do reforço e do núcleo no molde. b) Tela <i>peelply</i> posicionada em cima do reforço. c) Posicionamento da tela <i>airflow</i> no sanduíche. | 41 |
| Figura 24 - a) Colagem da tela de vácuo e posicionamento das mangueiras de resina e vácuo. b) Acompanhamento do fluxo de resina no compósito. c) Impregnação completa da resina no | |

| | |
|---|----|
| compósito. d) Retira da tela de vácuo depois de decorrido uma hora. e) Retirada das telas <i>peelply</i> e <i>airflow</i> simultaneamente. | 42 |
| Figura 25 - Equipamento utilizado para o ensaio de dureza Shore D. | 44 |
| Figura 26 - Corpo de prova posicionado para ensaio de compressão transversal. | 45 |
| Figura 27 - Corpo de prova posicionado para ensaio de compressão longitudinal. | 46 |
| Figura 28 – Esquema da estrutura sanduíche para o calculo da inércia das lâminas. | 47 |
| Figura 29 - Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão. | 49 |
| Figura 30 - Curvas de TGA e DTGA sobrepostas da fibra de sisal. | 50 |
| Figura 31 - Curvas de TGA e DTGA sobrepostas da resina poliéster. | 51 |
| Figura 32 - Curvas TG sobrepostas da fibra de sisal e resina poliéster. | 52 |
| Figura 33 - Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) da fibra de sisal e resina poliéster. | 53 |
| Figura 34 - Difratoograma de raios X da fibra de sisal. | 54 |
| Figura 35 - Difratoograma de raios X da resina poliéster. | 54 |
| Figura 36 - Espectros de FTIR da fibra de sisal e da matriz poliéster. | 55 |
| Figura 37–Micrografias das fibras de sisal. | 56 |
| Figura 38 - Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nas fibras de sisal. | 57 |
| Figura 39 - Curva tensão x deformação específica do ensaio de tração em fios de sisal. | 59 |
| Figura 40 - Curva força x deslocamento do ensaio de tração no Tecido Sisal Sarja. | 60 |
| Figura 41 - Curvas força x deslocamento do ensaio de tração no tecido de sisal Simples (TSI). | 61 |
| Figura 42 - Curvas força x deslocamento no ensaio de tração da matriz poliéster. | 63 |
| Figura 43 – Curvas força x deslocamento na flexão da matriz poliéster. | 64 |
| Figura 44 - MEV das amostras PET2TC (a) e PET1TV (b). | 66 |
| Figura 45 - MEV das amostras PET1TSI (a) e PET2TV (b). | 67 |
| Figura 46 - MEV das amostras PET1TSA (a) e PET3TV (b). | 68 |
| Figura 47 - Resultados de dureza Shore D dos compósitos sanduíches. | 69 |
| Figura 48 - Curvas força x deslocamento das amostras PET2TC e PET1TV para ensaio de compressão transversal. | 70 |
| Figura 49 - Curvas força x deslocamento das amostras PET1TSI e PET2TV para ensaio de compressão transversal. | 71 |
| Figura 50 - Curvas força x deslocamento das amostras PET1TSA e PET3TV para ensaio de compressão transversal. | 71 |
| Figura 51 - Resultados de resistência no ensaio de compressão transversal dos compósitos sanduíches. | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 52-Resultados de rigidez no ensaio de compressão transversal dos compósitos sanduíches..... | 73 |
| Figura 53 - Curvas força x deslocamento das amostras PET2TC e PET1TV para ensaio de compressão longitudinal..... | 74 |
| Figura 54 - Corpos de prova após o ensaio de compressão longitudinal para as amostras PET2TC (a) e PET1TV (b)..... | 75 |
| Figura 55 - Curvas força x deslocamento das amostras PET1TSI e PET2TV para ensaio de compressão longitudinal..... | 75 |
| Figura 56 - Corpos de prova após o ensaio de compressão longitudinal para as amostras PET1TSI (a) e PET2TV (b)..... | 76 |
| Figura 57 - Curvas força x deslocamento das amostras PET1TSA e PET3TV para ensaio de compressão longitudinal..... | 76 |
| Figura 58 - Corpos de prova após o ensaio de compressão longitudinal para as amostras PET1TSA (a) e PET3TV (b). | 77 |
| Figura 59 – Resultados de resistência a compressão longitudinal dos compósitos sanduíches. | 78 |
| Figura 60 - Curvas força x deslocamento na flexão para os diferentes sanduíches reforçados com tecido de sisal..... | 79 |
| Figura 61 - Curvas força x deslocamento na flexão para os diferentes sanduíches reforçados com tecido de fibra de vidro..... | 81 |
| Figura 62 - Curvas força x deslocamento na flexão para as amostras PET2TC e PET1TV. | 83 |
| Figura 63 - Resultados força máxima (a) e rigidez (b) das amostras PET2TC e PET1TV para o ensaio de flexão. | 83 |
| Figura 64 - Análises dos comportamentos à flexão mais típicos das amostras PET2TC e PET1TV..... | 84 |
| Figura 65 - Curvas força x deslocamento na flexão para as amostras PET1TSI e PET2TV. .. | 85 |
| Figura 66 - Resultados força máxima (a) e rigidez (b) das amostras PET1TSI e PET2TV para o ensaio de Flexão. | 85 |
| Figura 67 - Análises dos comportamentos à flexão das amostras PET1TSI (a) e PET2TV (b). | 86 |
| Figura 68 - Curvas força x deslocamento na flexão para as amostras PET1TSA e PET3TV.. | 87 |
| Figura 69 - Resultados força máxima (a) e rigidez (b) das amostras PET1TSA e PET3TV para o ensaio de flexão. | 87 |

| | |
|---|----|
| Figura 70 - Análises dos comportamentos à flexão das amostras PET1TSA (a) e PET3TV (b). | 88 |
| Figura 71 – Resultados de resistência ao cisalhamento do núcleo dos compósitos sanduíches. | 89 |
| Figura 72 – Resultados de resistência das faces dos compósitos sanduíches..... | 91 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação Geral das Fibras Têxteis..... | 4 |
| Tabela 2 - Diferentes tipos de resinas poliéster..... | 14 |
| Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração obtidos para o tecido de sisal. | 31 |
| Tabela 4 - Propriedades da resina poliéster insaturada..... | 32 |
| Tabela 5 - Nomenclatura das amostras produzidas. | 43 |
| Tabela 6 - Resultados do ensaio de tração na fibra de sisal. | 58 |
| Tabela 7 - Resultado do ensaio de tração no fio de sisal..... | 59 |
| Tabela 8- Resultados do ensaio de tração obtidos para o tecido de sisal sarja..... | 61 |
| Tabela 9 - Resultados do ensaio de tração obtidos para o tecido de sisal simples. | 62 |
| Tabela 10 - Teste "t" para a variável, força máxima, para o ensaio de tração dos tecidos de sisal Simples e Sarja. | 62 |
| Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração em matriz poliéster..... | 63 |
| Tabela 12 - Resultados do ensaio de flexão em matriz poliéster..... | 64 |
| Tabela 13 - Nomenclatura e especificações das estruturas sanduíches desenvolvidas. | 65 |
| Tabela 14 - Resultado de dureza Shore D dos diferentes sanduíches. | 70 |
| Tabela 15 - Teste "t" para as variáveis resistência e rigidez das diferentes estruturas sanduíches na compressão transversal..... | 73 |
| Tabela 16 - Teste t para a resistência à compressão longitudinal das estruturas sanduíches. .. | 79 |
| Tabela 17 - Resultados de força máxima e rigidez das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal. | 80 |
| Tabela 18 – Resultados de inércia, módulo de elasticidade e %V _f das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal..... | 81 |
| Tabela 19 - Resultados de força máxima e rigidez das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de fibra de vidro..... | 82 |
| Tabela 20 - Resultados de inércia, módulo de elasticidade e %V _f das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de fibra de vidro. | 82 |
| Tabela 21 - Resultados de inércia, módulo de elasticidade e %V _f das estruturas sanduíches PET2TC e PET1TV..... | 84 |
| Tabela 22 - Resultados de inércia, módulo de elasticidade e %V _f das estruturas sanduíches PET1TSI e PET2TV..... | 86 |
| Tabela 23 - Resultados de inércia, módulo de elasticidade e %V _f das estruturas sanduíches PET1TSA e PET3TV. | 88 |

| | |
|--|----|
| Tabela 24 - Teste "t" para a variável resistência ao cisalhamento do núcleo (MPa) das Amostras PET2TC e PET1TV. | 90 |
| Tabela 25 - Teste "t" para a variável resistência à flexão das faces (MPa) para as amostras PET2TC e PET1TV. | 92 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

% V_f - fração volumétrica do reforço nas lâminas

ALMACO - Associação Latino - Americana de Materiais Compósitos

APAEB - Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira

ASTM - American Society for Testing Materials

DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial

DRX - Difração por Raios X

DTGA – Derivada da curva Termogravimétrica

E - Módulo de Elasticidade

FTIR - Espectrômetro por Transformada de Fourier

IR – Infra vermelho ou infra red

IV - Infusão a Vácuo

LAPOL - Laboratório de Polímeros

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

PET - Politereftalato de etileno

PMI - Polymethacrylimide

PVA - Álcool Polivinílico

PVC – Policloreto de Vinila

RTM - Moldagem por Transferência de Resina (RTM)

SAEG - Sistema para Análises Estatísticas (SAEG).

SI - Sistema Internacional

TC – Tecido de sisal Cherchiaro

TGA – Análise Termogravimétrica

TSA – Tecido sisal Sarja

TSI – Tecido de sisal Simples

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as necessidades da sociedade moderna demandam por um crescente e constante desenvolvimento tecnológico. Entretanto, o processo de elaboração e domínio de novas tecnologias passa por várias etapas. Entre estas etapas, uma que é geralmente limitante do processo é a elaboração de materiais com alto desempenho que atendam aos pré-requisitos exigidos para determinada aplicação. Na medida em que as tecnologias ficam mais sofisticadas, torna-se mais difícil que os materiais até então disponíveis satisfaçam plenamente às necessidades, sejam por questões de propriedades mecânicas, características, formas de obtenção ou custo (RAMIRES, 2010).

A aplicação industrial de compósitos nas diversas áreas vem crescendo consideravelmente em virtude do aperfeiçoamento nos processos de produção, bem como da concepção de novos agentes de reforço e estruturas sanduíches. Destaca-se, também, a evolução do uso de compósitos à base de fibras naturais em elementos estruturais submetidos a pequenos esforços. Isso porque as fibras naturais, em geral, apresentam propriedades mecânicas inferiores às das fibras manufaturadas, restringindo o seu uso em elementos estruturais de desempenho limitado (CORREIA, 2011).

A utilização de reforços naturais em compósitos à base de polímero continua sendo um desafio inovador a essa classe de materiais. A procura de melhores propriedades físicas, mecânicas e químicas para os novos compósitos, conduzem os pesquisadores ao estudo de novos materiais que possam atender às exigências do mercado. (THWE *et al.* 2002; AQUINO *et al.* 2003).

Nos últimos anos, observa-se um aumento de estudos que focam na substituição de fibras sintéticas por naturais em compósitos poliméricos. Estudos demonstram que compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais são adequadas a um grande número de aplicações e seu uso é vantajoso em termos econômicos e ambientais (SILVA, 2010). O setor brasileiro de materiais compósitos em 2013 faturou R\$ 3,250 bilhões, alta de 9% em comparação ao ano anterior. No período, foram processadas 210.000 toneladas, volume 1,7% superior ao registrado em 2012 (ALMACO, 2014). A construção civil corresponde à 49% deste faturamento, permanecendo à frente do setor automotivo (17%), corrosão (11%) e saneamento (6%), entre outros, consumindo cerca de 154.000 toneladas. Segundo a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO), estima-se elevação de 11,5% na receita do setor de compósitos para os próximos anos, totalizando R\$ 3,623 bilhões.

As estruturas sanduíches são materiais constituídos por uma estrutura de três camadas: duas lâminas finas de reforço, separadas por uma camada de um material de baixa densidade, em geral menos rígido, menos resistente e, mais leve. Inicialmente aplicados nas indústrias aeroespacial e naval, foi a partir dos anos 1960 que os painéis sanduíche começaram a ser aplicados em novos campos, nomeadamente na construção.

Devido à sua estrutura, os compósitos sanduíches apresentam-se como materiais com elevadas relações entre rigidez/massa específica e resistência/massa específica. A sua facilidade de montagem, devido ao seu reduzido peso e ao fato de serem geralmente pré-fabricados, permite uma economia de tempo e de custo. Estes compósitos caracterizam-se ainda pelas suas boas propriedades de isolamento térmico, pela sua durabilidade, mesmo em ambientes quimicamente agressivos e por permitirem a combinação de diferentes materiais, possibilitando a criação de formas relativamente complexas.

As propriedades de um compósito polimérico reforçado com uma fibra vegetal dependerão das propriedades dos componentes individuais (matriz e reforço), da fração volumétrica de fibra utilizada no compósito (em geral entre 20% e 30%) e, principalmente, da região de interface, ou seja, a interação entre a matriz e o reforço. A interação química entre a matriz e o reforço irá determinar o desempenho mecânico do compósito final. Dependendo do tipo de interação que houver na interface, as tensões localizadas que se concentram nessa região podem funcionar como pontos de tensão ocasionando a falha prematura no material (ARAÚJO, 2009).

Na busca por novas aplicações ao sisal, Cherchiaro (2010) desenvolveu um tecido de sisal unidirecional com o intuito de reforçar compósitos de resina poliéster, porém, o tecido possui limitações: como a fibra de sisal na produção do tecido é posicionada transversalmente (trama), e as fibras possuem cerca de 90cm a 120cm de comprimento, este fato limita a largura do tecido e, com isso, é necessário trabalhar com emendas o que contribui para o surgimento de falhas no compósito. Um dos objetivos deste trabalho é acabar com essa limitação do comprimento do tecido, proporcionando sua produção industrial. Para isso foi desenvolvido um tecido com fios de sisal (700m/kg), utilizando o fio de sisal na trama e linha de algodão no urdume.

A fibra de sisal também apresenta desvantagens para a sua utilização, como a acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas, baixa estabilidade dimensional, sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade), influência significativa das condições do solo, época da colheita, além de seções transversais de

geometria complexa e não uniforme e, propriedades mecânicas inferiores em relação aos materiais fibrosos sintéticos (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

A utilização de fibras vegetais como carga de reforço não é uma prática nova, porém, atualmente, com a escassez do petróleo e seus derivados, de maneira geral, têm se buscado um maior aproveitamento dos recursos naturais renováveis. A busca por novas técnicas de moldagem para compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais têm passado por grande evolução, pois a indústria exige a associação entre design, desempenho e redução nos custos do processo. Uma alternativa para processamento de compósitos com matriz polimérica termofixa é a Infusão a Vácuo (IV). A utilização da técnica de IV para moldagem desse compósito se dá pela necessidade de industrialização do processo, pois quando se pensa em materiais para a construção civil, não se pode trabalhar com técnicas como a moldagem manual. Com a IV, apesar do maior custo do processo em relação à laminação manual, torna-se possível uma produção em larga escala e também uma melhor impregnação da resina nos fios de sisal, além de se obter peças com muita qualidade tanto no acabamento quanto nas propriedades mecânicas.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver estruturas sanduíches de matriz poliéster reforçada com tecido de sisal nas faces, utilizando a moldagem por infusão a vácuo, na obtenção de um novo material.

1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver tecidos com fios de sisal para reforço de estruturas sanduíches com matriz poliéster.
- Caracterizar o comportamento mecânico dos materiais constituintes, fibras, fios, tecidos e poliéster.
- Conformar placas de compósitos sanduíches de matriz poliéster e o novo tecido de sisal com a técnica de IV, obtendo fração volumétrica superior a 20% volume de fibra de sisal no compósito.
- Avaliar o desempenho e o comportamento mecânico das estruturas sanduíches reforçado com tecido sisal e compara-los com as estruturas sanduíches reforçadas com tecido de fibra de vidro com gramaturas semelhantes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Materiais compósitos são materiais resultantes da combinação de dois ou mais componentes, que diferem nas propriedades físicas e químicas de cada um e são imiscíveis. A finalidade da combinação é prover características específicas para o material resultante, para cada tipo de aplicação desejada (CARVALHO, 2005). A indústria vem buscando desenvolver novos materiais com baixo impacto ambiental, dessa forma, novas técnicas de moldagem vem sendo estudadas e desenvolvidas, diferentes constituintes, entre eles as fibra vegetais, vêm ganhando bastante espaço. O presente referencial teórico busca apresentar, por meio de conceitos e trabalhos já desenvolvidos, algumas informações sobre as fibras vegetais, em especial o sisal, a utilização dessas fibras como reforço em compósitos e a utilização da infusão a vácuo no desenvolvimento de estruturas sanduíches.

2.1 Fibras Vegetais

As fibras são classificadas em fibra naturais e fibras manufaturadas, sendo que estas últimas podem ser divididas em artificiais ou sintéticas. As fibras naturais podem ser classificadas em vegetais (compostas basicamente por celulose, hemicelulose e lignina), animais (originárias dos pêlos ou da secreção animal, que são compostas por proteínas) e minerais (retiradas de certos tipos de rochas). A Tabela 1 mostra a classificação geral das fibras têxteis.

Tabela 1 - Classificação Geral das Fibras Têxteis

| | | |
|---------------|-------------|--|
| Naturais | Animal | Seda, Lã, Pêlo. |
| | Vegetal | Semente (Algodão, Kapok, Coco, etc.). |
| | | Caule (Linho, juta, Rami, etc.). Folha (Abacaxi, Tenax, Sisal, curauá, etc.). |
| Míneral | Amianto | |
| Manufaturadas | Sintéticas | PP, PE, aramida, poliéster, náilon, acrílico, etc. |
| | Artificiais | Alginato, borracha, viscose, acetato, tênsel, etc. |
| | Outras | Carbono, Vidro, metálica, cerâmica. |

Fonte: LADCHUMANANANDASIVAM, 2002.

As fibras manufaturadas surgiram a partir da necessidade do homem encontrar uma solução para minimizar os prejuízos causados pelas intempéries que comprometiam a safra e, por conseguinte, diminuam os lucros. As desvantagens iniciais em relação às fibras naturais (aparência, toque e conforto) foram sanadas com o passar do tempo, através do

aperfeiçoamento de novas técnicas de produção, tornando-as bastante competitivas (LEÃO, 2008).

As vantagens de se utilizar fibras naturais em relação a materiais de reforço tradicionais, tal como fibra de vidro, são: baixo custo, alta tenacidade, boas propriedades mecânicas, redução do desgaste de máquina, facilidade de separação e biodegradabilidade, e uso reduzido de instrumentos para o seu tratamento ou processamento. Já foram relatados na literatura compósitos reforçados com fibra de madeira com propriedades específicas similares aos compósitos de polipropileno com fibra de vidro (RANA *et al.* 2003; FINKLER *et al.* 2005;).

O emprego de fibras vegetais para o reforço de resinas poliméricas não é novo; contudo, as fibras de vidro e cargas minerais ainda são bastante utilizadas como materiais de reforço com alto desempenho, devido às fibras vegetais possuírem grande volume (baixa densidade aparente), pouca estabilidade térmica e alta absorção de umidade (LEÃO, 2008).

Na última década, porém, o interesse pelas fibras vegetais aumentou novamente, devido ao fato de serem provenientes de fontes renováveis, biodegradáveis, recicláveis e representar em uma nova fonte de renda para população rural, além de trazerem economia de energia por meio da redução de peso dos componentes. A substituição das fibras sintéticas por fibras vegetais é uma possibilidade bastante interessante por se tratar da substituição de um recurso não renovável por um recurso renovável. (SATYANARAYANA *et al.* 2007).

Considerando a estrutura interna, as fibras vegetais podem ser consideradas como materiais compósitos naturais (JOHN e THOMAS, 2008), compostos principalmente por celulose, lignina e hemicelulose. Uma fibra individual (denominada de fibra técnica) é constituída por feixes de fibras celulares ou fibro-células alinhadas ao longo do eixo principal da fibra técnica (OLIVEIRA, 2010). Geralmente, cada fibro-célula é composta por uma parede celular constituída por quatro paredes cilíndricas também alinhadas no sentido longitudinal que são mantidas juntas por lignina. Assim, a parede celular é composta por uma parede primária, três paredes secundárias e o lúmen.

2.1.1 Fibra de sisal

O sisal (*Agave sisalana*), família Agavaceae é uma planta utilizada para fins comerciais. O *Agave sisalana* é cultivado em regiões semiáridas. No Brasil, os principais produtores são os estados da Bahia e Paraíba, especialmente a Bahia, onde está localizado o

maior polo produtor e industrial do sisal no mundo, que são as cidades de Valente e Conceição do Coité (CORREIA, 2011).

Derivados de fibras naturais, como a fibra de sisal, têm como principais produtos os fios biodegradáveis utilizados em artesanato, no enfardamento de forragens e cordas de várias utilidades, inclusive navais. O sisal também é utilizado na produção de estofados, pasta para indústria de celulose, produção de tequila, tapetes decorativos, remédios, biofertilizante, ração animal e adubo orgânico. As fibras naturais já estão sendo utilizadas em algumas aplicações como substitutas das fibras sintéticas, devido ao seu apelo ecológico (JOSHI *et al.* 2004).

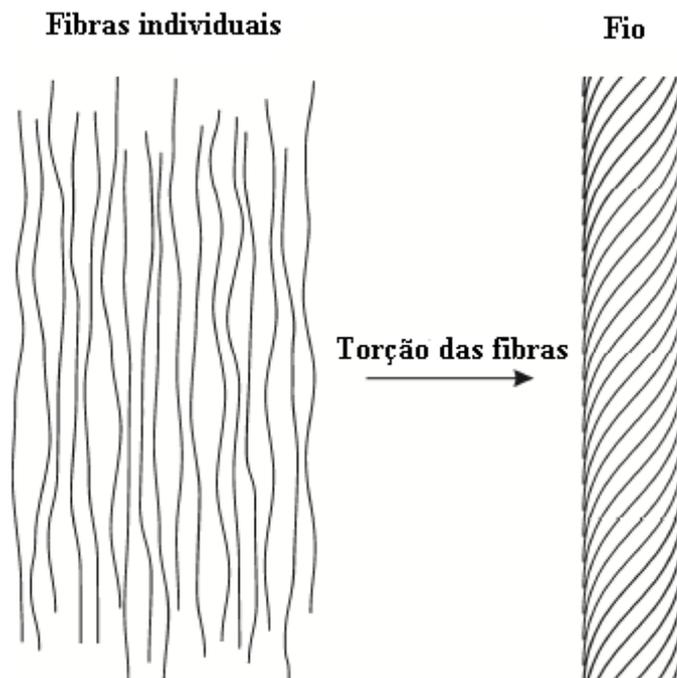
O sisal é uma importante fibra cultivada no Brasil, sendo bastante utilizado em cordoaria e artesanato, mas que pode ter seu valor agregado quando utilizado como reforço de compósitos poliméricos (ANGRIZANI *et al.* 2006). O sisal é uma fibra ligno-celulósica de baixa densidade comparada à fibra de vidro, atóxica, não causa irritabilidade à pele do trabalhador (KIM e SEO, 2006) e que apresenta boas propriedades mecânicas dentre as fibras vegetais. Entre outras vantagens do sisal pode-se citar a facilidade de modificação superficial, sua abundância no Brasil, sendo a Bahia responsável por 80% da produção, facilidade de cultivo, é um material biodegradável que provem de fonte renovável, além de apresentar boas propriedades como isolante térmico e acústico (FROLLINI *et al.* 2004; CERCHIARO, 2010; COSIBRA, 2011). Estes fatores, aliados à alta tenacidade, à resistência à abrasão e ao baixo custo, fazem do sisal uma das fibras vegetais mais estudadas (CARVALHO e CAVALCANTI, 2006).

Silva *et al.* (2008) realizaram ensaio de tração em fibra de sisal com diferentes comprimento, com o objetivo de avaliar o comprimento da fibra no resultados mecânicos. A área da seção transversal foi medida por microscopia eletrônica de varredura, com o intuito de diminuir o erro, pois as fibras vegetais não possuem uma seção transversal bem definida. Os autores obtiveram resultados de modulo de elasticidade em torno de 18 GPa, e observaram que o comprimento da fibra não influencia nesse resultado, já a deformação especifica na ruptura diminui de 5,2% para 2,6%, quando o comprimento foi aumentado de 10 mm para 40 mm. Em relação à resistência, os resultados ficaram em torno de 347 a 577 MPa, segundo os autores três fatores podem justificar a variabilidade dos resultados, sendo eles: i) as condições e parâmetros do teste, ii) as características naturais da fibra de sisal e iii) as áreas da seção transversal.

2.2 Fios

Os fios de sisal são também conhecidos comercialmente como barbantes ou cordões. As fibras têxteis alinhadas podem ser mantidas unidas por torção resultando num material mais compacto conhecido como fio (CARVALHO, 2005) (Figura 1). Segundo Ma *et al.* (2014), as características da torção dos fios alteram as propriedades mecânicas finais dos fios e são especificadas pela quantidade de torções dadas pela fibra por unidade de comprimento (tpm). Fios pouco torcidos resultam num material maleável enquanto os fios produzidos com muitas voltas por unidade de comprimento resultam num material de maior resistência mecânica, sendo que muitas voltas por metro podem gerar a diminuição dessa resistência. A torção garante a união mecânica e o trabalho conjunto das fibras, entretanto exerce pouca influência sobre o custo dos fios, pois a redução de produtividade em fios com maior número de voltas por comprimento é compensada pela alteração na velocidade das máquinas.

Figura 1 – Demonstração da torção das fibras na produção do fio de fibras vegetais.



Fonte: RASK *et al.* 2011.

Geralmente os fios são descritos através do diâmetro médio, admitindo-se um formato circular da seção, sendo esta simplificação adequada para os processos adotados em diversas operações de tecelagem. A especificação técnica e comercial de fios têxteis é a relação entre o comprimento de fio por unidade de massa, denominada titulação. A unidade de titulação pode ainda ser a expressão de uma relação com um padrão de referência. Existem quatro sistemas principais para expressar a titulação: o denier, o grupo Tex, o sistema inglês e o Sistema

Internacional (SI). A relação entre o custo e a titulação dos fios é inversa: quanto mais fino, maior a titulação, e maior o custo do fio por unidade de massa (CARVALHO, 2005).

Ma *et al.* (2014) investigaram se o número de voltas por metro em fios de sisal, influencia no resultado mecânico. Para isso foram estudados quatro tipos diferentes de torções (20, 60, 90 e 150 voltas por metro), essas configurações foram comparadas com as fibras não torcidas. Através da máquina de enrolamento filamental os fios de sisal unidirecional foram pré-impregnados, em resina fenólica. Os compósitos foram feitos por prensagem a quente (faixa de pressão: 0,3 - 40 MPa, faixa de temperatura: 25°C a 300°C) e a temperatura de cura foi de 140°C. Os autores concluíram que, com o aumento do nível de torção da fibra, a resistência à tração de fios de sisal não impregnados aumentou e, em seguida, começou a diminuir quando o nível de torção crítico (90 tpm) foi alcançado. No entanto, as propriedades mecânicas dos fios de sisal impregnados de resina diminuiu com o aumento do nível de torção da fibra. Tanto as propriedades de tração e flexão dos compósitos reforçados com fios de sisal diminuíram com o aumento do nível de torção da fibra, os autores justificam esse comportamento, pelas dificuldades que a resina encontrou para impregnar nos fios, pois quanto maior a torção dos fios, maior é essa dificuldade de impregnação, o que leva a uma interface fibra-matriz pobres e maior ângulo entre a fibra de sisal e do eixo do fio.

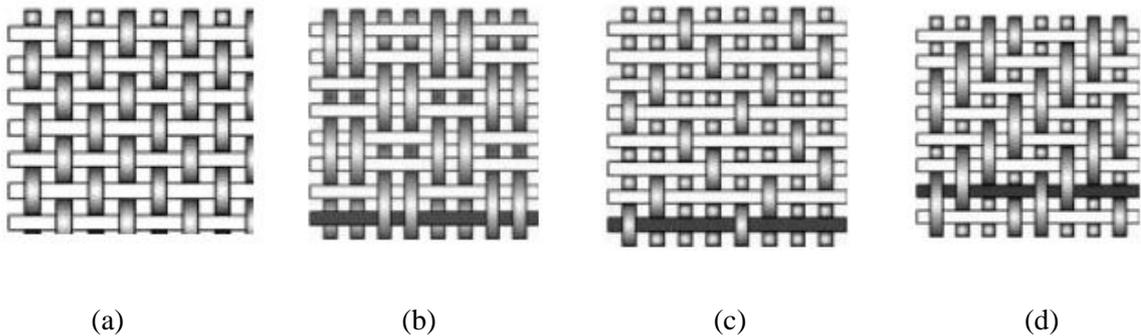
2.3 Arranjo dos Tecidos

A distribuição das fibras na matriz impõe grande influência nas propriedades dos compósitos, principalmente quando se deseja obter compósitos com finalidade estrutural (CARVALHO, 2005). As fibras contínuas podem ser reproduzidas em várias formas geométricas e, quando entrelaçadas, as opções de tecidos técnicos são diversas. O arranjo das fibras depende do ângulo entre os fios transversais e os fios longitudinais, do espaçamento entre os arranjos, do número de fibras para cada fio e da razão do número de fios em cada direção, (HULL e CLYNE, 1996). São três principais arranjos de tecidos, sendo eles os tecidos tramados, os tecidos trançados e os tecidos tricotados.

Os tecidos tramados utilizam arranjos de fios distribuídos em duas direções ortogonais. Esta configuração envolve arranjos de fibras unidas por forças de contato e pelo intertravamento obtido nos diversos métodos de confecção. Os tecidos tramados são os mais comuns em compósitos com matrizes poliméricas e são formados pela intercalação de fios em duas direções, no qual os fios longitudinais são conhecidos como o urdume, e os fios transversais são os fios que compõem a trama (CARVALHO, 2005). As propriedades

mecânicas do tecido tramado são controladas principalmente por parâmetros como o arranjo do tecido, natureza, dimensões e torção do fio e o espaçamento entre os fios ou, seja, a densidade do tecido. Entre os diversos tipos de tecidos tramados encontram-se frequentemente o tipo simples, o cesto, o cetim e sarja, sendo o simples o mais comum. A Figura 2 apresenta os diferentes tipos de tecidos tramados.

Figura 2 - Tipos de arranjos encontrados para tecidos tramados: a) Simples, b) Cesto, c) Cetim e d) Sarja.



Fonte: JOHN e THOMAS 2008.

Os tecidos unidirecionais utilizam arranjos de fios em uma única direção, mantidos unidos na direção longitudinal por uma quantidade menor de fios transversais (CARVALHO, 2005) e são utilizados em aplicações estruturais, principalmente quando as tensões aplicadas são conhecidas, onde é conveniente alinhar os fios na direção das tensões garantindo, assim, otimização das propriedades das fibras. Neste arranjo, os fios da trama são contornados ao redor do urdume numa forma sigmoidal, ou seja, uma vez por baixo e uma vez por cima, alternando assim por diante conforme, Figura 3.

Figura 3 - Esquema do arranjo dos tecidos tramados



Fonte CARVALHO, 2005.

2.4 Caracterização térmica de fibras vegetais

Entender as características de degradação de fibras vegetais durante o aumento de temperatura é essencial para a seleção adequada dos materiais com propriedades aprimoradas em aplicações específicas, tais como na incorporação em matrizes termoplásticas que geralmente envolvem temperaturas de processamento bastante elevadas. A estabilidade

térmica pode ser considerada como a habilidade de um material manter suas propriedades físicas e mecânicas como resistência, dureza e elasticidade numa determinada temperatura (DEEPA *et al.* 2011).

Utiliza-se a análise termogravimétrica (TG) para medir a variação da perda de massa de um material em função de temperatura num ambiente inerte ou na presença de ar, oxigênio ou hidrogênio e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para medir a diferença de energia fornecida ou retirada das amostra em relação á uma referência durante o processo de decomposição.

Estudos anteriores mostram que a degradação da biomassa pode ser dividida em quatro fases distintas, sendo elas; a evaporação de umidade, a decomposição da hemicelulose, a decomposição da celulose e finalmente a decomposição da lignina (YANG *et al.* 2007; ORNAGHI JR. *et al.* 2014; BENÍTEZ-GUERRERO *et al.* 2014). Cada um destes principais constituintes apresenta um comportamento térmico distinto. A hemicelulose começa se decompor facilmente, em temperaturas mais baixas, com maior perda de massa entre as temperaturas de 220°C e 315°C. A temperatura em que ocorre a maior taxa de perda de massa é de 268°C e, mesmo em temperaturas de 900°C, a hemicelulose apresenta uma massa residual de 20%. Segundo Yang *et al.* (2007) a decomposição em baixas temperaturas está relacionada à estrutura amorfa da hemicelulose, sendo rica em ramificações que são facilmente removidas da cadeia principal. Deepa *et al.* (2011) atribuíram a baixa estabilidade térmica da hemicelulose à presença de grupo acetil. Quando submetido ao calor, a hemicelulose se decompõe num processo exotérmico que, segundo Yang *et al.* (2007), é provavelmente devido ao processo de carbonização, confirmada pela maior presença de resíduos em temperaturas acima de 900°C.

Já a celulose começa a se decompor em temperaturas um pouco mais elevadas, na faixa de 315-400°C. Em temperaturas acima de 400°C, a celulose tinha se degradado quase completamente, apresentando resíduo sólido em torno de 6,5% na temperatura de 900°C (YANG *et al.* 2007, POLETTTO *et al.* 2012; BENÍTEZ-GUERRERO *et al.* 2014).

A celulose é um polímero composto por cadeias longas de glicose sem ramificações, e possui uma estrutura forte e em boa ordem. Estes fatores contribuem para sua alta estabilidade térmica. Diferente da hemicelulose e lignina, a celulose se decompõe num processo endotérmico. Segundo Yang *et al.* (2007) e Yao *et al.* (2008) a decomposição endotérmica é atribuída às reações de desvolatilização rápida, resultando em poucos resíduos sólidos depois de ser submetida a temperaturas acima de 600°C. Segundo Martin *et al.* (2010) e Martins e Joeques (2003) um quarto pico pode aparecer no gráfico da DTG numa temperatura de

aproximadamente 500°C, sendo relacionado à degradação oxidativa dos resíduos carbonizados da celulose.

Entre os três constituintes, a lignina é o constituinte que se decompõe com mais dificuldade. A decomposição da lignina ocorre mais lentamente desde 100°C até 900°C com uma taxa de perda de massa de 0,14 wt%/°C. Após completar o processo de degradação, a lignina apresenta 45,7% de resíduos sólidos. Acredita-se que o processo lento de degradação é atribuído pelas grandes quantidades de anéis aromáticos dentro da estrutura molecular da lignina, que possui várias ramificações e diversas ligações químicas que se rompem ao longo de uma faixa de temperatura ampla. Semelhante a hemicelulose, a lignina se decompõe num processo exotérmico devido novamente ao processo de carbonização resultando em maiores quantidades de resíduo sólido numa temperatura de 900°C (YANG *et al.* 2007; BENÍTEZ-GUERRERO *et al.* 2014)

2.5 Caracterização Estrutural

A absorção no infravermelho permite identificar os grupos funcionais, os tipos de ligações presentes, a conformação e estrutura das macro moléculas do material e, assim, as mudanças provocadas pelos tratamentos bem como identificar as possíveis reações formadas entre os reagentes e os grupos funcionais presentes na superfície das fibras (CANEVAROLO, 2007). A região de radiação no infravermelho é a faixa do espectro eletromagnético com comprimentos de onda (λ) entre 0,78 – 400 μm ; sendo esta subdividida em três partes: infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho afastado. A faixa de maior interesse, onde a maior parte dos espectrofotômetros de infravermelho opera, é o infravermelho médio, isto é, com comprimentos de onda entre 2,5 - 50 μm (ou número de onda entre 4000 - 200 cm^{-1}).

O espectrômetro por transformada de Fourier (FTIR) possui uma fonte de radiação infravermelha, um interferômetro de Michelson, um compartimento de amostra e um detector de radiação infravermelha. O interferômetro de Michelson é composto por um divisor de feixes, um espelho fixo e um espelho móvel. A fonte Infra Vermelho (IR) emite a radiação contínua e quando incidir no divisor de feixes, cada radiação com determinados comprimentos de onda é submetido aos fenômenos de interferência. Obtém-se um interferograma completo quando o espelho móvel realizar o deslocamento total que corresponde a uma varredura espectral. O FTIR recebe o interferograma e utiliza o computador para efetuar a operação transformada de Fourier para obter o espectro IR,

mostrando o perfil espectral de intensidade versus número de ondas. Ao deslocar o espelho móvel, a intensidade de um determinado comprimento de onda é afetada pela ocorrência dos fenômenos de interferência construtiva e destrutiva do interferômetro. Assim, é sempre necessário obter um espectro natural de referência (sem amostra), para fornecer informações do aparelho e do ambiente, pois o espectro do feixe único da amostra irá conter todas as informações da amostra mais as informações da referência. É então necessário calcular a razão entre o espectro da amostra e a referência para obter o espectro IR da amostra em (%T) ou absorvância *versus* número de ondas (CANEVAROLO, 2007).

A interpretação de espectros das moléculas simples pode ser feita pela atribuição das frequências vibracionais fundamentais com as vibrações normais da molécula, através da análise das coordenadas normais. Os três principais componentes de fibras vegetais (celulose, hemicelulose e lignina) são provavelmente compostos de alcenos, ésteres, aromáticos, cetonas e álcoois com diferentes grupos funcionais contendo oxigênio como os grupos OH⁻ encontradas na região (3400 - 3200 cm⁻¹), um grupo carbonila (C=O) na região (1765 - 1715cm⁻¹), C-O-O na região 1270cm⁻¹ e C-O-(H) na região 1050cm⁻¹ (CANEVAROLO, 2007). Segundo Yang *et al.* (2007) a celulose apresenta maior presença de absorções de OH e C-O, enquanto a hemicelulose apresenta mais compostos C=O. Já a lignina parece ser rica em compostos contendo metoxi-O-CH₃, C-O-C e C = C na região 1830 - 730cm⁻¹.

O método da difração por raios -X (DRX) pode fornecer informações sobre as fases (amorfa, semicristalina ou cristalina) presentes na amostra e sobre a estrutura de materiais cristalinos. Este ensaio utiliza o espalhamento coerente de raios X pelas estruturas organizadas (cristais) do material em estudo. Quando os raios incidem sobre o cristal, ocorre a penetração do raio por dentro da rede cristalina. Os raios X interagem com os elétrons da rede cristalina e são difratados. O ângulo de difração relacionado à radiação eletromagnética nos planos cristalinos da amostra segue a Lei de Bragg (CANEVAROLO, 2007).

A celulose é um polímero de alto grau de polimerização. Sua existência na forma agregada de grandes cadeias é o que forma as microfibrilas. Assim, semelhante aos polímeros sintéticos, a cristalinidade depende da ordem destas longas cadeias poliméricas, ou seja, as microfibrilas. Quanto mais ordenadas estiverem as microfibrilas da celulose, maior a cristalinidade. Logo, a celulose pode apresentar regiões altamente ordenadas, e podem apresentar regiões amorfas quando desordenadas e, em teoria, quanto maior o índice de cristalinidade, maior é a estabilidade térmica do material. A hemicelulose é um polímero amorfo, por apresentar grandes quantidades de ramificações. A lignina é uma macromolécula

com características amorfas, devido à sua estrutura aromática e grandes quantidades de ramificações (POLETTO *et al.* 2011; POLETTO *et al.* 2012).

2.6 Massa específica

São escassas as técnicas disponíveis para o ensaio e estudo sobre as medições em fibras vegetais. No caso da fibra vegetal, material higroscópico, a massa específica depende do grau de umidade da amostra. Como a madeira, a fibra vegetal possui lúmen e poros, o que gera dificuldades práticas associadas à determinação do volume correspondente ao conteúdo da massa da fibra, tanto na fibra seca quanto na úmida.

Como as fibras lignocelulósicas são materiais porosos e de composição variada, a massa específica deve também levar em consideração os poros, microfissuras e o lúmen (RAZERA, 2006). Utiliza-se a picnometria a gás hélio por ser um gás inerte e por ter um tamanho molecular pequeno, permitindo sua penetração em poros com dimensões de escala macro, além de utilizar purgas previamente às medições para remover impurezas e umidade. Assim, a densidade obtida é considerada como densidade real, ou seja, a densidade da substância lenhosa desde que as moléculas do gás hélio possam penetrar na amostra (OLIVEIRA, 2010). Quando a medição da densidade é efetuada não descontando os poros e/ou o lúmen, considera-se a densidade obtida como a densidade aparente.

2.7 Resina Poliéster

Entre as resinas poliméricas, as resinas termorrígidas são as mais utilizadas no processamento de compósitos poliméricos. Isto acontece por possuírem um fácil processamento, uma boa molhabilidade dos reforços, e apresentarem boas propriedades, além de estarem disponíveis em uma ampla variedade de grades a um custo relativamente baixo. Os poliésteres estão entre os mais versáteis polímeros sintéticos conhecidos, pois podem ser encontrados comercialmente como fibras, plásticos, filmes e resinas (GARAY, 2010).

As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. O tipo de ácido influencia as propriedades finais da resina e, com isso, poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas podem ser produzidos (Tabela 2). Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja,

contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada (SILVA, 2010).

Tabela 2 - Diferentes tipos de resinas poliéster.

| Tipos | Comentários |
|-------------------|--|
| Ortoftálica | Resina mais comum, de menor custo, para uso básico, grande potencial de se adequar às variadas situações onde não é necessária uma grande resistência a umidade. |
| Tereftálica | Possui resistência física um pouco superior à ortoftálica, porém baixa resistência à UV. |
| Isoftálica | Oferece altas características mecânicas, químicas e térmicas. |
| Isoftálica c/ NPG | O NPG melhora a resistência à hidrólise. |
| Bisfenólica | Possui as melhores características químicas e térmicas. |

Fonte: CALLISTER, 2002.

As resinas de poliéster são utilizadas na fabricação de peças moldadas, com ou sem fibra de vidro, tais como: piscinas, barcos, banheiras, tanques, telhas, botões, bijuterias, assentos sanitários, móveis para jardim, mármore sintético, etc. Elas fazem parte de uma família de resinas sintéticas, que são obtidas com uma grande variedade de matérias primas como base. O processo de cura da resina poliéster é iniciado pela adição de uma pequena porção de catalisador, como um peróxido orgânico ou um composto alifático. A cura pode se dar tanto em temperatura ambiente, quanto em temperatura elevada e com ou sem aplicação de pressão (OLIVEIRA, 2012).

Os poliésteres insaturados são bastante utilizados em conjunção com fibras de vidro para obter um polímero reforçado que apresente excelentes propriedades mecânicas como a resistência à tração e ao impacto. Para peças industriais, menos solicitadas fisicamente, empregam-se sisal ou algodão como reforço (SANTOS, 2007).

2.8 Compósitos com fibras de sisal e poliéster

Segundo a ALMACO (2012), compósitos são sinônimos de produtos feitos sob medida. Decidir pela utilização de um compósito é ter à disposição a possibilidade de resolver os problemas de engenharia com um produto feito sob medida, isto é, um produto fabricado na medida certa e exata de sua necessidade.

Muitos desses compósitos são formados por duas fases, uma é denominada matriz, que é contínua e envolve a segunda fase denominada reforço, ou fase dispersa. Esses compósitos

são formados através de moldes ou num processo de fabricação para dar forma ao produto acabado.

A matriz pode ser um material polimérico, cerâmico ou metálico. Em relação aos compósitos poliméricos de matriz termorrígida, a resina poliéster é comumente empregada por proporcionar ao compósito melhora na tenacidade, facilidade de manipulação e moldagem, e custo baixo. Dentre os vários tipos de resina poliéster, destaca-se a ortoftálica por seu custo atrativo (NAIR *et al.* 2001) e variedade de aplicações (EL-TAYEB *et al.* 2007).

O reforço também pode ser composto de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos, podendo ser de formato particulado ou fibroso. Os componentes do reforço podem ser aleatoriamente arranjados, ou organizados em algum tipo de padrão. As fibras podem ser contínuas, longas ou curtas. Industrialmente, as fibras mais tradicionais são as sintéticas, onde se destaca a fibra de vidro por suas propriedades químicas, mecânicas e térmicas, e pela sua viabilidade econômica em relação a outras fibras artificiais (MOUZAKIS *et al.* 2008; SOUTIS, 2005).

Os materiais compósitos estão sendo empregados cada vez mais em substituição aos materiais tradicionais, cujas características individuais não atendem às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. Outra característica marcante dos compósitos é sua versatilidade quanto ao largo espectro de propriedades físicas, químicas e mecânicas que podem ser obtidas pela combinação de diferentes tipos de matriz e pelas várias opções de reforços (SMITH *et al.* 1996; CAPRINO *et al.* 2007; IDICULA *et al.* 2006).

Carvalho e Cavalcanti (2006) investigaram o desempenho mecânico de compósito poliéster insaturado/ tecidos híbridos sisal-vidro em função do teor de fibra e direção do teste. Foram confeccionados três tecidos híbridos (com 30, 40 e 50% em peso de vidro) com fios de sisal no urdume e fibras de vidro na trama. Os compósitos foram moldados por compressão à temperatura ambiente com os tecidos alinhados e os resultados indicam que houve um aumento nas propriedades mecânicas de tração de todos os compósitos com o aumento do teor de fibras. Para os compósitos reforçados por tecidos com baixo teor de fibra de vidro, as propriedades tenderam a ser mais elevadas quando os testes foram conduzidos na direção do sisal, enquanto que, para os tecidos com elevado teor de vidro, o oposto foi observado. Estes comportamentos foram associados ao teor de fibra de vidro na direção do teste e ao diâmetro das fibras de sisal. Em baixos teores de fibra, o sisal agiria como inclusão ou defeito, prejudicando as propriedades mecânicas; em elevados teores as propriedades do vidro suplantariam os defeitos provocados pelo sisal.

A incorporação de fibras vegetais, que possuem alto módulo de elasticidade, como reforço, em termofixos, tem como objetivo principal melhorar as propriedades mecânicas dos polímeros, tais como resistência mecânica, módulo de elasticidade e resistência ao impacto (CANEVAROLO, 2007). A adição de fibras com o objetivo de aumentar o desempenho mecânico dos polímeros pode dar origem a um novo material, que poderia substituir o polímero puro em aplicações onde o mesmo não resistiria ou sofreria uma falha prematura. Estas melhorias proporcionadas pelas fibras aos polímeros levam à classificação destes materiais reforçados como materiais de engenharia.

Enquanto que as fibras orientadas aleatoriamente resultam em compósitos com propriedades quase isotrópicas, as fibras alinhadas e longas geralmente apresentam um melhor conjunto de propriedades na direção do carregamento (RAZERA, 2006; KIRAN *et al.* 2007 e THOMAS, 2011). Para compósitos reforçados com fibras existe um modelo numérico (Equação 1), baseado na regra de misturas (AGARWAL *et al.* 2006), que relaciona as propriedades mecânicas dos materiais constituintes (módulo de elasticidade) e a fração volumétrica de cada fase. A regra das misturas é utilizada como estimativa do módulo de elasticidade do compósito bem como também é possível estimar a resistência. A regra das misturas é válida para pequenas deformações dentro da região elástica (HULL e CLYNE, 1996; THOMAS, 2011).

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (1)$$

Onde E_c = Módulo de Elasticidade do Compósito; E_f = Módulo de Elasticidade da fibra; E_m = Módulo de Elasticidade da Matriz; V_f = Fração Volumétrica da Fibra e V_m = Fração Volumétrica da Matriz.

As propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras unidirecionais são anisotrópicas e, assim, dependem do sentido em que são carregados (CALLISTER, 2002). No carregamento axial na direção paralela ao alinhamento das fibras, as tensões e as deformações progressivas levam as fibras e a matriz à ruptura.

2.9 Estruturas Sanduíches

Os materiais de reforço e as resinas são muito utilizados na forma de compósitos laminados sólidos embora sejam prejudicados pelo peso excessivo. Apesar das diversas vantagens que os laminados de fibra exibem sobre outros materiais, a resistência à flexão não

é um dos pontos mais fortes dos plásticos reforçados devido ao baixo módulo de elasticidade que possuem.

Apesar do uso de materiais de alto módulo de elasticidade, como as fibras de carbono, e sofisticados métodos de produção fornecer maior rigidez, os laminados sólidos em fibras têm rigidez inferior quando comparados com outros materiais. Existem várias formas em que a rigidez de um painel de fibra pode ser melhorada, como a utilização de cavernas e longarinas para reduzir a área livre do painel sem apoio, mas o melhor método para aumento da rigidez de um painel de fibra é a construção em sanduíche (NASSEH, 2011).

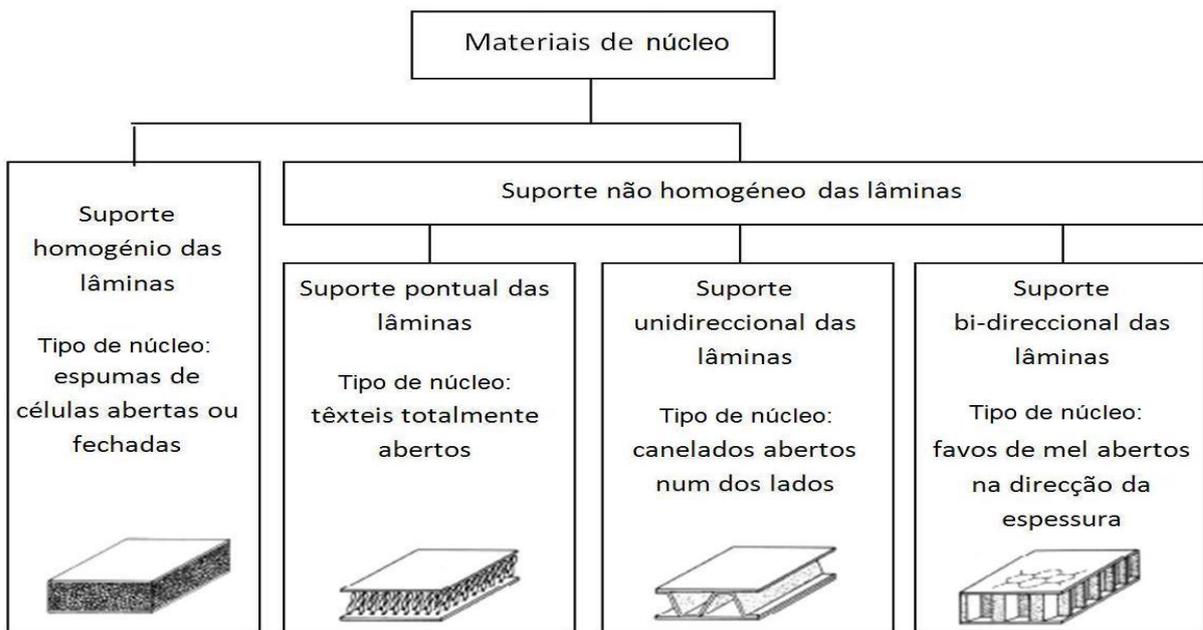
A base da teoria dos princípios da construção tipo sanduíche foi desenvolvida no século passado, com o desenvolvimento da teoria da “viga I”. Naquela época, descobriu-se que uma viga podia ficar mais rígida e mais leve com a eliminação de algum material supérfluo, deixando dois flanges horizontais separados por uma alma vertical que os mantinha ligados rigidamente. Essa descoberta foi a queda de uma barreira no desenvolvimento de vários tipos de estrutura e muitas aplicações da engenharia moderna são baseadas nesse princípio (NASSEH, 2011).

As estruturas sanduíches consistem de duas faces de um laminado de alta resistência e um núcleo de baixa densidade. A função das faces na estrutura é suportar os momentos de flexão no painel, resistindo aos esforços de tração e compressão desenvolvidos nas camadas opostas quando o painel está sob carregamento transversal. Além de resistir às tensões de tração e compressão, as faces devem ter espessura suficiente para resistir à flambagem e avarias por impactos localizados. Para as faces suportarem os esforços já mencionados, elas devem ser mantidas na sua posição original em relação ao eixo neutro do painel e uma não deve se mover em relação à outra. Este é, na verdade, o trabalho realizado pelo material de núcleo, que deverá prover rigidez à compressão e, também, resistência ao cisalhamento (ALMEIDA, 2009).

Se o material tiver resistência baixa à compressão, as faces poderão se aproximar umas das outras quando uma estrutura estiver em flexão. Se a tensão de cisalhamento do material núcleo for insuficiente, as faces poderão escorregar uma contra a outra e a estrutura não trabalhará como um todo, e a integridade global da estrutura dependerá somente da resistência individual de duas faces muito finas. Na maioria das aplicações em sanduíche o construtor está interessado em um núcleo razoavelmente forte e de baixo peso, que permita ao laminado ter a espessura suficiente para aumentar a rigidez sem o aumento excessivo de peso (NASSEH, 2011).

Existe uma grande quantidade de núcleos disponíveis no mercado, variando desde a madeira balsa, compensado tipo naval, uma variedade de materiais de espuma sintética e colmeias tipo favo de mel (Figura 4). Cada material de núcleo sanduíche possui vantagens e desvantagens que só podem ser avaliadas de acordo com a aplicação. Para cada tipo de estrutura ou material sanduíche existe um determinado número de opções disponíveis no mercado que podem variar significativamente de um para outro ou ser essencialmente o mesmo produto feito por fabricantes diferentes (ALMEIDA, 2009).

Figura 4 - Materiais de núcleos homogêneos e estruturados.



Fonte: ALMEIDA, 2009.

De acordo com a densidade do material, o valor entre os tipos de núcleo podem variar consideravelmente, por exemplo, a diferença entre um núcleo do tipo espuma de PVC para um de PET, pode variar de 35 % à 80%, já entre o PET e a madeira balsa, essa diferença fica em torno de 7% à 10% . Portanto, dependendo da aplicação do sanduíche, a escolha do núcleo pode influenciar consideravelmente nos custos da produção.

Mamalis *et al.* 2005 investigaram os diferentes modos de colapso de vários tipos de compósitos sanduíches durante o ensaio de compressão longitudinal. Foram desenvolvidos 8 tipos de estruturas sanduíches sendo quatro tipos de núcleo do tipo espuma (mais especificamente espuma polymethacryline (PMI), espuma de poliuretano e dois de espuma PVC variando a densidade) e tecido de fibra de vidro (variando entre quatro e cinco camadas) com resina acrílica nas faces. Foram observados três tipos de colapso, sendo a primeira,

flambagem e falha por cisalhamento do núcleo, a segunda, delaminação das faces e flambagem das mesmas em direções opostas e, a última, esmagamento final do compósito sanduíche. Dentre os três modos de falha o mais eficiente em relação a acidentes por absorção de energia é o modo de esmagamento final, por ser caracterizado pela ocorrência de vários micro colapso dos materiais constituintes, o que contribui para a dissipação de energia, médias mais elevadas de carga de esmagamento e um carregamento à compressão mais uniforme.

Almeida (2009) analisou o comportamento mecânico de estruturas sanduíche, utilizando lâminas de polímero reforçado com fibras de vidro com dois materiais diferentes de núcleo (espuma rígida de poliuretano e favos de mel de polipropileno), e com e sem reforços das faces laterais em lâminas reforçadas com fibras de vidro, também foi analisado o comportamento do núcleo sem os reforços. Os resultados mostraram que os painéis não reforçados com núcleo em favos de mel de polipropileno têm uma rigidez maior que as estruturas sanduíches com núcleo de espuma de poliuretano. A introdução dos reforços laterais aumentou consideravelmente a rigidez dos sanduíches. Por fim, foi realizado um estudo numérico, em que foram desenvolvidos modelos de elementos finitos tridimensionais, validados com os resultados experimentais, onde foi possível simular o comportamento mecânico dos painéis sanduíches desenvolvidos.

Garay *et al.* (2011) avaliaram as de diferentes estruturas sanduíches usadas na construção naval, para isso, foram testados três tipos de materiais de núcleo (espuma de PVC e de PET, e madeira balsa) com diferentes combinações de faces constituídas de tecidos ou mantas de fibra de vidro. Os compósitos foram moldados por compressão usando como matriz uma resina éster-vinílica. Os materiais foram submetidos a ensaios de flexão, compressão e dureza Shore-D. Entre os materiais analisados, a melhor combinação de resultados foi alcançada com o uso da madeira balsa e do tecido. Já entre os núcleos sintéticos, os núcleos de PVC com tecidos e com um maior teor de fibra obtiveram um melhor desempenho.

Rao *et al.* (2011) observaram que os compósitos reforçados com fibras naturais têm ganhado grande importância na substituição de compósitos convencionais. Assim, buscando uma nova forma de agregar valor ao material, foram feitos núcleo do tipo favo de mel para estruturas sanduíches, a partir de compósitos reforçados com fibras naturais, com os quais foram realizados ensaios de cisalhamento do núcleo com a intenção de avaliar a utilização do material como núcleo para sanduíches. Os resultados obtidos nos ensaio de compressão e flexão mostraram que os núcleos suportaram uma deformação de 80%, mostrando que o

material pode ser utilizado para diversas finalidades, por também possuírem boas propriedades na absorção de ruídos.

Di Bella *et al.* (2012) desenvolveram uma estrutura sanduiche com fibra de vidro e poliéster, com aplicação para o setor marítimo, utilizando moldagem manual. Para a caracterização mecânica, foram feitos ensaios de flexão em três pontos, torção, compressão transversal e longitudinal. Através da sequência de empilhamento utilizado, foi possível melhorar o comportamento mecânico da estrutura sanduiche e, durante o ensaio de flexão, ficou evidente o aparecimento de pequenas trincas nas faces. Para resolver este problema, os autores sugerem a utilização de um bonder na interface núcleo/face, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e reduzir o aparecimento de microfissuras.

Kabir *et al.* (2012) analisaram o comportamento mecânico de estruturas sanduíches reforçadas com tecido de cânhamo. Primeiro, os autores buscaram o melhor tratamento para as fibras com o objetivo de aumentar a interação fibra/matriz, utilizando tratamentos alcalinos, silano e acetilação antes de misturar as fibras à resina. Os autores descobriram que o melhor tratamento foi o alcalino, pois melhorou a resistência mecânica das fibras de cânhamo. Para fazer o núcleo, foram cortadas fibras de cânhamo com comprimento de 3 – 6 mm e em seguida, foi adicionada a resina por laminação manual, com as lâminas dos sanduíches sendo feitas com tecido de cânhamo. Os autores concluíram que o tratamento dado a fibra com o objetivo de melhorar a ligação com a matriz influenciou nos tipos de ruptura obtidos no ensaio de flexão, como cisalhamento do núcleo, delaminação entre as lâminas e o núcleo, e ruptura das faces, seguida por rompimento do núcleo. Os menores resultados mecânicos foram do tratamento com acetilação e os autores suspeitam que o tratamento deixou as fibras quebradiças, enfraquecendo a estrutura. Os autores concluíram que as propriedades mecânicas de compósitos com fibra vegetal são altamente influenciadas pelas condições da superfície e que um tratamento adequado às fibras pode gerar um aumento na resistência mecânica em cerca de 30%.

Stocchi *et al.* (2014) desenvolveram um núcleo do tipo favo de mel que consiste em uma matriz éster vinílico e tecido de juta. Foram fabricados dois núcleos, sendo um com células de 6 mm e outro com 10 mm, utilizando a moldagem por compressão. O ensaio de compressão transversal mostrou que os núcleos produzidos não apresentam o comportamento clássico dos favos de mel comercializados, ou seja, a falha por instabilidade das paredes celulares devidos à deformação. Para os núcleos de juta o dano é progressivo devido ao mecanismo de falha típico de compósitos com fibra, como o arrancamento (pull-out) e ruptura das fibras. Segundo os autores, esse comportamento se deve pela maior espessura das paredes

em relação ao tamanho das células, o que inibe a deformação. Os núcleos de juta e éster vinílico apresentaram resistência à compressão elevadas quando comparadas com os núcleos disponíveis comercialmente, sendo $\sigma_c = 15,5$ MPa para o núcleo com célula de 6mm e $\sigma_c = 13,5$ MPa para o núcleo com célula de 10mm. Por outro lado, apesar dos núcleos apresentarem densidades elevadas, como $\rho = 290$ kg/m³ para 6mm e $\rho = 157$ kg/m³ para 10mm, as resistências à compressão específicas de $\sigma_{cs} = 0,085$ MPa/kg para 6 mm e $\sigma_{cs} = 0,05$ MPa/kg para 10 mm, são semelhantes aos núcleos disponíveis comercialmente, ou seja, o núcleo de juta tem potencial para ser uma alternativa aos núcleos comercializados em aplicações específicas.

2.10 Conformação dos compósitos

Atualmente, a indústria dos materiais compósitos enfrenta diversos desafios, onde as regulamentações ambientais, cada vez mais, exigentes limitam a exposição dos trabalhadores a compostos orgânicos voláteis, o que contribui para um decréscimo da competitividade de muitas tecnologias existentes, tais como, a laminagem manual (hand lay-up) e spray-up, processos que produzem peças em molde aberto e, tipicamente, utilizam o estireno como solvente reativo, em percentagens entre 30% a 45%, para reduzir a viscosidade da resina e ainda para interligar as moléculas de poliéster na cura, transformando, dessa maneira, a resina de líquido em sólido. Deste modo, este reagente exige que haja uma boa ventilação e equipamento de proteção adequado para os trabalhadores durante o processo de fabricação (HAMMAMI, 2001; YUEXIN, 2008).

Cerchiaro (2010) desenvolveu um tecido com fibras de sisal para reforçar uma matriz termofixa de poliéster utilizando o método de laminação manual, comparando seu comportamento com compósitos de fibras de vidro. Com intuito de aumentar a proporção de fibras no compósito, diminuir a presença de vazios e manter uma espessura uniforme, desenvolveu-se um tecido unidirecional com um tear de pente, utilizando mechas (fios) de 15 fibras de sisal na trama e linhas de algodão no urdume. Os compósitos foram laminados manualmente com duas camadas de resina poliéster e duas de tecidos de fibra deitadas variando a orientação dos tecidos em sentidos perpendiculares [0/90] para obter compósitos multidirecionais, em duas laminas orientadas em direção paralela ao carregamento axial [0/0] para obter compósitos unidirecionais e finalmente duas laminas perpendiculares [90/90]. Avaliou-se o comportamento mecânico à tração e à flexão no qual se obteve melhor desempenho com as duas laminas direcionadas paralelamente ao carregamento axial [0/0] que

apresentou uma resistência à tração de 25,05 MPa e módulo de elasticidade de 2,71 GPa. Os compósitos reforçados com fibras de vidro apresentaram uma resistência seis vezes maior que os compósitos reforçados com fibras de sisal alinhadas paralelamente ao carregamento [0/0].

Vieira (2008) desenvolveu e avaliou métodos de confecção de mantas híbridas de fibras curtas de vidro e sisal visando a indústria automotiva, foram moldados por compressão compósitos de resina poliéster reforçados por mantas (25% em volume) de fibra de vidro/sisal, híbridas e isoladas. O trabalho foi dividido em rotas de ensaios onde inicialmente utilizou-se apenas a fibra de sisal. Nas demais rotas variou-se o teor de fibra de vidro incorporada (0, 25, 50, 75 e 100% e seu complemento em sisal) até a escolha de uma composição. Os resultados indicaram um comprimento ideal de fibra de 3 cm, e que os compósitos com teor de 50% de fibra de vidro demonstraram propriedades mecânicas superiores às dos compósitos reforçados apenas com sisal puro, porém com menor custo e massa específica que os compósitos contendo 100% de fibra de vidro.

Ramesh *et al.* (2013a) analisaram a incorporação de fibras vegetais (sisal e juta) em compósitos reforçados com fibra de vidro. Através do método de laminação manual foram produzidos compósitos híbridos vidro/sisal ou juta com a montagem da placa consistindo na utilização de três camadas de tecido de fibra de vidro intercaladas por duas camadas de sisal ou juta (cortadas com de comprimento) previamente secas por 3 a 5 horas, sendo todas as camadas impregnadas com resina epóxi e a espessura final das placas igual a 5 mm. Em relação ao ensaio de tração, os compósitos híbridos sisal/fibra de vidro apresentaram os melhores resultados, já em relação ao ensaio de flexão, o compósito juta/fibra de vidro mostrou um melhor desempenho. Os autores concluíram que apesar dos compósitos híbridos apresentarem resultados menores aos compósitos reforçados com fibras de vidro, eles podem ser uma alternativa em aplicações que não necessitem de elevados esforços.

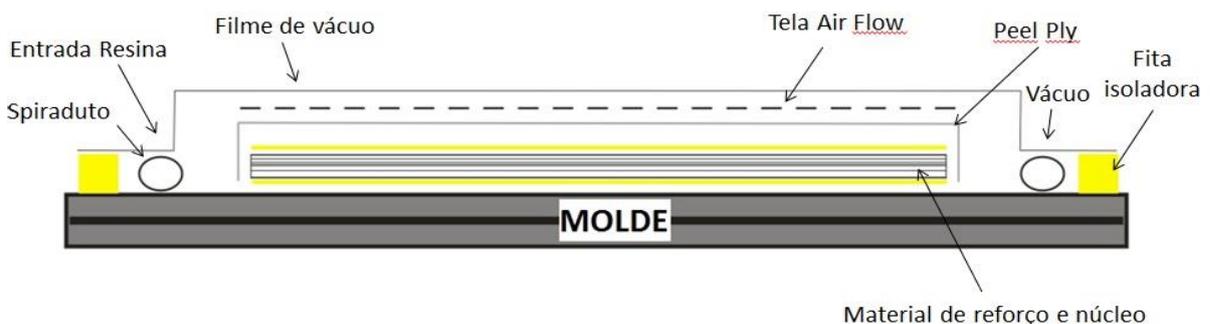
Ramesh *et al.* (2013b) também investigaram o comportamento dos compósitos híbridos sisal/fibra de vidro, juta/fibra de vidro e sisal/juta/fibra de vidro. Foi utilizada a laminação manual e os compósitos híbridos foram produzidos utilizando cinco camadas, sempre intercalando fibra de vidro e fibra vegetal (sisal e juta com 30mm de comprimento) e, no caso do compósito híbrido sisal/juta/fibra de vidro, as camadas dois e quatro eram preenchidas com sisal e juta, respectivamente. A análise do comportamento mecânico desses materiais mostrou que os compósitos sisal/fibra de vidro obtiveram o melhor comportamento ao impacto, o compósito com juta/ sisal apresentou o melhor resultado de resistência a tração

com 229,5 MPa e o compósito sisal/juta/fibra de vidro apresentou o melhor comportamento a flexão, com um deslocamento de 14,2 mm e carregamento de 3 kN.

O rápido crescimento da indústria dos compósitos e o esforço contínuo para produzir componentes rígidos, leves e de rápida produção promoveu o uso de técnicas de prensagem para consolidar e formar materiais com excelentes propriedades mecânicas. Um dos principais entraves à inserção dos compósitos no mercado é o elevado custo que está associado a algumas tecnologias de fabricação destes materiais, tal como, o processamento em Autoclave. Em resposta a estes desafios têm-se destacado processos de moldagem líquida de compósitos, tais como, a Moldagem por Transferência de Resina (RTM) e a Infusão a Vácuo (IV). Contudo, apesar da sua popularidade, o processo de RTM continua a exigir grandes investimentos, uma vez que utiliza moldes muito pesados e complexos com capacidade de suportar a pressão de injeção em peças de grandes dimensões, o que conduz a elevados custos de produção. A IV promove a obtenção de um laminado robusto, de elevada qualidade e com uma reduzida quantidade de imperfeições. Como em qualquer outro processo de fabricação de compósitos, o planeamento do seu desenvolvimento e os cuidados durante a manufatura são fatores críticos para o sucesso do processo (GOVIGNON e BICKERTON, 2008).

O processo de Infusão a Vácuo (IV) é uma técnica recente de injeção de resina sob pressão, em molde fechado, para a produção de compósitos, com elevado potencial na fabricação de peças com forma simples, em pequenas séries e com baixos custos de produção. Esta técnica é simples e fácil de executar e consiste nas seguintes etapas de processamento (Figura 5): (a) acomodação do material de reforço no interior do molde, (b) posicionamento das telas de *peel ply* e *airflow* para facilitar o fluxo de resina, (c) introdução da resina no interior do molde, (d) cura da resina e (e) abertura do molde e desmoldagem da peça. (LOPES, 2009; RIJSWIJK e TEUWEN, 2009)

Figura 5 - Esquema do processo de infusão a vácuo utilizado na fabricação das amostras.



Fonte: O autor, 2014.

O processo de laminação por infusão a vácuo, também é um processo usado nos últimos anos para laminação de peças com alto grau de qualidade. O processo é semelhante ao da laminação a vácuo, com a diferença que, neste caso, todo o material é colocado seco dentro do envelope plástico ou em uma bolsa de vácuo, depois a resina é transferida para dentro das camadas de fibra pela ação diferencial de pressão interna e externa. No final, qualquer excesso de resina que entra no interior do laminado é conduzido até um recipiente intermediário, colocado entre o laminado e a bomba de vácuo, sendo posteriormente retirado após a finalização da infusão. Como resultado, é apenas introduzida uma quantidade mínima de resina, o que origina uma redução de peso do compósito, um aumento da rigidez e uma maximização das propriedades da fibra e da resina (LOPES, 2009; NASSEH, 2011).

O ideal no processo de IV é que o fluxo de resina deve assegurar que a resina injetada alcance todo o laminado fibroso antes do início da cura ou da chegada ao orifício de saída. No processo RTM, o orifício de saída é, normalmente, aberto para a atmosfera, o pré-formado é mantido à pressão atmosférica e a resina é injetada para o interior dos moldes. Esta pressão de injeção necessita de uma adequada estabilidade do molde recorrendo ao auxílio de ferramentas rígidas. Contudo, o elevado custo das ferramentas e do equipamento limita a adequação deste processo para componentes de maiores dimensões. Contrariamente, no processo de IV o orifício exterior está conectado a uma bomba de vácuo.

Esta bomba suga o ar do interior, originando uma pressão negativa que conduz a resina para o interior do laminado. Esta pressão negativa permite, ainda, que a metade superior do molde seja feita de um material flexível, por exemplo, um saco de plástico, reduzindo os custos de investimento neste processo e não impondo nenhuma limitação no tamanho das peças.

Em suma, o processo de IV é uma das tecnologias preferenciais para a produção de estruturas com grandes dimensões, em pequena escala, onde o vácuo é a única força de condução para impregnar a cavidade do molde do compósito. Este processo apresenta inúmeras vantagens em comparação com outras tecnologias semelhantes, nomeadamente, um elevado conteúdo de fibra, na ordem de 60% a 70% do seu peso, contra a grande maioria dos processos em molde aberto, com percentagens na ordem dos 45%, e ainda baixa porosidade, inferior a 1%, promovendo uma maior resistência aos componentes, comparativamente aos que são produzidos em molde aberto, no caso de terem a mesma espessura. (LOPES, 2009)

Este processo é utilizado para fabricar compósitos de largas dimensões, particularmente na indústria aeroespacial, automóvel e naval. O vácuo é utilizado por duas razões, em primeiro lugar destina-se a compactar o reforço e em segundo conduz a resina

termofixa desde o reservatório até à cavidade do molde para encher os espaços vazios entre as fibras e as telas que ajudam no fluxo de resina. O sistema de resina é usualmente desenhado, para que o tempo de cura seja ligeiramente maior que o tempo de enchimento do molde para assegurar o enchimento completo do molde. O design do molde é também um fator crítico para o alcance do enchimento completo do molde, eliminando os espaços livres de nível macro e microscópico, que representam lugares secos na peça (YENILMEZ e SENAN, 2009).

Gu *et al.* (2014) produziram um compósito com tecido de rami e resina epóxi através da infusão a vácuo. Para aumentar o teor de fibras no compósito, foi realizada uma compactação do tecido de rami seco antes do processo de IV. Foram realizadas duas formas de compactação, uma delas através de ciclos de compactação com o auxílio do vácuo e a outra utilizando compactação com variação de temperatura. Foram realizados ensaio de tração, flexão e cisalhamento interlaminar para caracterização do material. Os autores chegaram à conclusão de que a compressão a quente pode aumentar significativamente o teor de fibra (em torno de 10%) e as propriedades mecânicas do compósito (houve aumento entre 18% e 41% nas propriedades de tração e flexão), porém quando utilizadas altas temperaturas (cerca de 120°C e 140°C) e pressões de compactação, as propriedades mecânicas diminuem devido a danos causados as fibras.

2.11 Vantagens e desvantagens da infusão a vácuo

O processo de infusão a vácuo oferece um grande número de benefícios face às tradicionais tecnologias existentes. As peças produzidas por infusão a vácuo caracterizam-se por uma excelente razão fibra/resina, elevada qualidade superficial, rapidez de processamento e facilidade de preparação e manuseamento dos materiais. Como já referido, o grande impulso do desenvolvimento desta tecnologia foi a eliminação/redução da emissão de compostos orgânicos voláteis como o estireno para o meio ambiente, surgindo como uma alternativa às tradicionais tecnologias como laminação manual e laminação à projeção de resina. Além da redução das emissões de poluentes, este processo integra vários benefícios, nomeadamente, uma elevada qualidade de consistência dos produtos e estabilidade dimensional, o que permitiu que fosse adotado para a indústria de materiais compósitos avançados (YENILMEZ e SOZER, 2009; BELINGARDI e PAOLINO, 2008).

As propriedades mecânicas dos laminados sofreram alterações significativas com a substituição de processos de moldes abertos pela técnica de infusão de resina, esta vantagem caracteriza-se por uma redução da espessura dos componentes em toda a sua expansão, até cerca de 30% em algumas aplicações. Porém, além destas vantagens, esta tecnologia permite

ainda estimar a distribuição de espessura no produto final e alterar a configuração do fabricado e dos canais de entrada para que obtenha a espessura desejada nas diferentes áreas de seção. Adicionalmente, por meio de simulações ao nível computacional, o tempo de enchimento do molde pode também ser calculado e, conseqüentemente, o tempo de cura da resina pode ser otimizado para reduzir o tempo total de fabricação do componente e diminuir os custos de produção (WOLFE e WEINER, 2007; YENILMEZ e SENAN, 2008).

Como qualquer outro processo de fabricação de laminados, o processo de infusão a vácuo também apresenta alguns inconvenientes. Apesar de se caracterizar como um processo simples e de fácil processamento, este processo requer a definição de um design específico e detalhado em cada produto diferente, com o principal objetivo de reduzir o tempo de produção, sem a criação de vazios no interior de componente, que representam pontos fracos e contribuem para a fragilidade do laminado. Por outro lado, a velocidade do processo representa um parâmetro importante a se considerar, porque determina o tempo de fabricação das peças e influencia o seu custo de produção.

Este fator que depende, substancialmente, da viscosidade da resina injetada, da distância percorrida pela resina ao longo de todo o laminado, da permeabilidade do meio e ainda do valor de vácuo introduzido no molde (NASSEH, 2011).

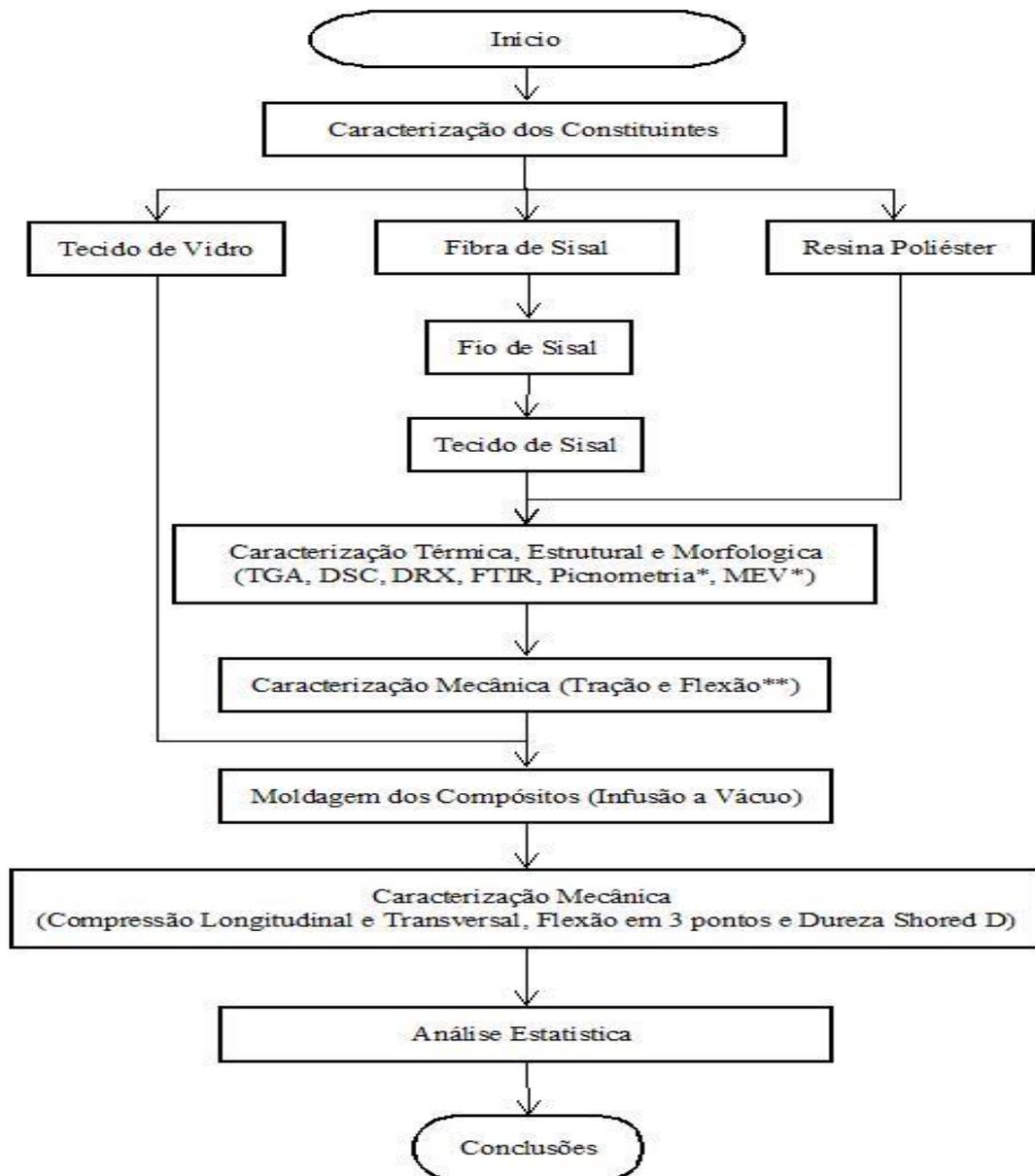
O processo apresenta ainda uma limitação no tamanho das peças, sendo mais viável a sua aplicação em componentes com grandes dimensões e sem formas complexas promovendo assim um baixo investimento e uma excelente rentabilidade. Geralmente, o IV não apresenta quaisquer limitações de geometria, podendo ser fabricadas estruturas tridimensionais e partes ocas. No entanto, a existência de demasiados detalhes na geometria das peças pode originar problemas como arestas vivas que dificultam o fluxo de resina e ainda variações significativas de espessura. A sua taxa de produção é reduzida devido à preparação minuciosa que é necessária para este processo. Para além destes parâmetros, este processo não permite a produção de peças com moldes em dois lados do componente, devido à existência de um molde flexível (saco de vácuo) de um dos lados. Por fim, uma característica muito importante e talvez o parâmetro mais crítico deste processo, é a existência de fugas durante a infusão, que resulta na entrada de ar para o interior do molde originando espaços vazios no componente após a cura, que constituem os principais pontos de fratura. Os vazios são indesejáveis nos materiais compósitos devido aos seus efeitos sobre as propriedades mecânicas, propriedades dielétricas e acabamento superficial. Estas fugas podem, no entanto, ser prevenidas antes da infusão através da utilização de um detector ultra sónico que permite identificar possíveis zonas onde existem fugas de ar. (AFENDI *et al.* 2005)

Em suma, podemos inferir que a escolha de um processo de fabricação de laminados não é simples, nem imediata, cada peça exige uma análise detalhada das suas características, nomeadamente, do seu design, dos materiais utilizados, da espessura pretendida e da sua aplicação no mercado. Após a análise da estrutura da peça é necessário escolher o processo mais adequado, mais favorável e mais vantajoso para a sua produção, uma vez que, não é possível produzir todas as peças com o mesmo processo de fabrico, devido a limitações do design ou da aplicação da peça que comprometem a sua produção (LOPES, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as atividades desenvolvidas (Figura 6) bem como os materiais e métodos utilizados para alcançar os objetivos desta pesquisa. Para que o novo material possa vir a ser desenvolvido, uma compreensão completa entre o comportamento macroscópico e a relação entre microestrutura dos constituintes e as macropropriedades dos compósitos é necessária.

Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos realizados na caracterização dos materiais.



*Apenas as fibras de Sisal

**Apenas a Resina Poliéster

Fonte: O autor, 2014.

3.1 Reforços – Fibras, Fios e Tecidos de sisal (*Agave sisalana*)

As fibras de sisal utilizadas na pesquisa foram provenientes da Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira (APAEB), uma cooperativa de produtores de sisal localizada no município de Valente - BA há 244 km de Salvador. As fibras de sisal não sofreram qualquer tratamento químico, foram apenas lavadas e penteadas, caracterizando-as como “*In natura*” (Figura 7). Foi necessária a caracterização física, térmica e estrutural, através de ensaios de tração, picnometria a gás hélio, TGA, DSC, DRX e FTIR.

Figura 7 - Fibra de sisal In natura.



Fonte: O autor, 2013.

O fio de sisal com título 700m/kg (Fio 700) foi fornecido pela Hamilton Rios Indústria Comércio e Exportação Ltda, não sofrendo qualquer tratamento químico podendo ser considerado “*In natura*” (Figura 8). Para utilização do fio foi necessária sua caracterização mecânica através do ensaio de tração.

Figura 8 - Fio de sisal (700 m/kg) para desenvolvimento dos tecidos.



Fonte: O autor, 2013.

Foram elaborados dois modelos de tecido de sisal em tear manual (Figura 9a), ambos tramados, mas um do tipo Simples (TSI) onde cada fio de sisal está orientado a 0° (trama) e passa alternadamente por baixo e por cima de cada linha de algodão orientada a 90° (urdume)

e o outro do tipo Sarja (TSA) (Figura 9b) onde um fio de sisal a 0° é tecido por baixo e por cima de uma ou duas fibras a 90° de uma forma regular e repetida. Foi utilizada linha de algodão no urdume, com a intenção de manter os fios de sisal alinhados e Fio 700 de sisal na trama. Dessa forma, foi possível desenvolver tecidos com larguras variadas e o espaçamento entre as linha no urdume foi de 5 mm. O tecido é caracterizado como unidirecional porque os fios de sisal estão alinhados em apenas uma direção. O objetivo desse tecido é obter uma maior quantidade de sisal por m^2 , tendo sido produzidos 18 metros de tecido de sisal.

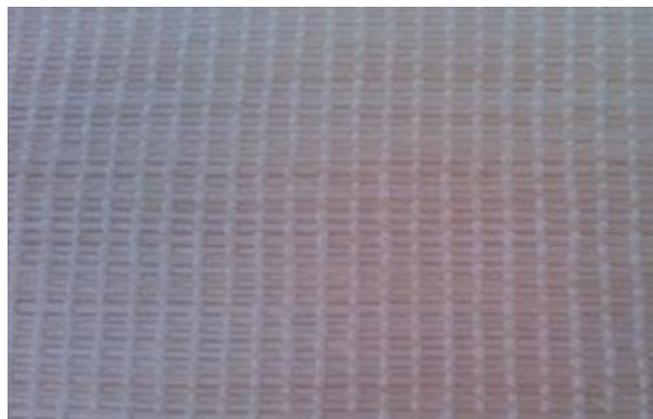
Figura 9 - a) Desenvolvimentos dos tecidos de sisal Simples em tear manual. b) Tecido de sisal Tramado Sarja (direita).



Fonte: O autor, 2013.

Também foi utilizado o tecido desenvolvido por Cerchiaro (2010) que, neste trabalho será chamado de TC, feito no mesmo tear manual O tramado é do tipo Simples com espaçamento entre as linhas de algodão no urdume de 5 mm, porém são utilizadas mechas de 15 fibras de sisal na trama (Figura 10), a gramatura do tecido foi de 162 g/cm^2 O objetivo é avaliar qual dos tecidos se comportou como reforço, melhorando as propriedades mecânicas da matriz poliéster.

Figura 10 - Tecido de sisal desenvolvido por Cerchiaro (2010).



Fonte: O autor, 2013.

Os resultados do ensaio de tração obtidos para o tecido TC são apresentados na Tabela 3, onde podem ser observados resultados de deformação e módulo de elasticidade com uma variação relativamente alta.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração obtidos para o tecido de sisal.

| N = 6 | Força máxima (N) | Resistência (MPa) | Deformação Específica (%) | E (GPa) |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------|
| Média | 744,1 | 145,0 | 3,9 | 6,2 |
| Desvio Padrão | ±102,6 | ±20,0 | ±1,2 | ±1,3 |
| Coef. Variação (%) | 15 | 16 | 38 | 21 |

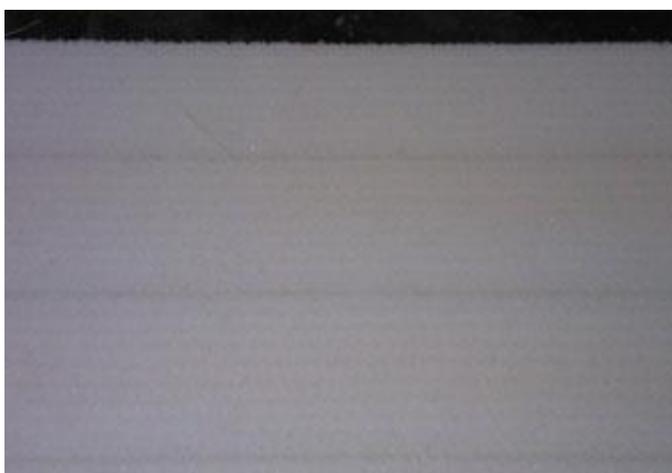
E = Módulo de elasticidade

Fonte: CERCHIARO, 2010.

3.2 Núcleo

Para dar coerência à utilização de fibras vegetais como reforço do compósito sanduíche, foi utilizado um núcleo espuma de Polietileno Tereftalato - PET (Figura 11), devido ao baixo custo do material em relação aos outros tipos de núcleo. O núcleo de PET possui 12 mm de espessura, densidade 80 kg/m^3 e não apresenta ranhura.

Figura 11 - Núcleo espuma de PET para utilização no compósito sanduíche.

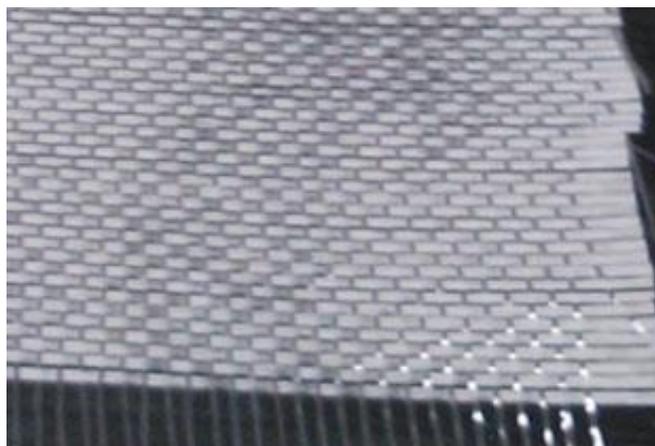


Fonte: O autor, 2013.

3.3 Tecido de Fibra Vidro

Com o intuito de observar se as fibras vegetais podem ser um substituto às fibras de vidro, foi utilizado um tecido unidirecional de fibra de vidro com gramatura de 330 g/cm^2 (Figura 12), com características próximas aos tecidos elaborados com fios de sisal.

Figura 12 - Tecido unidirecional de fibra de vidro para reforço do sanduíche.



Fonte: O autor, 2013.

3.4 Matriz - Resina Termofixa Insaturada de Poliéster

Foi utilizada uma resina poliéster ortoftálica insaturada, pré-acelerada e de baixa viscosidade, fornecida pela ELEKEIROZ Ltda, com nome comercial UCEFLEX UC 5530-M com características fornecidas pelo fabricante conforme Tabela 4. Utilizou-se o butanox M 50 como catalisador.

Tabela 4 - Propriedades da resina poliéster insaturada.

| Propriedades | Resultados | Unidades |
|--------------------|-------------|-------------------|
| Viscosidade (25°C) | 70 - 90 | cP |
| Gel Time (25°C) | 6 - 7 | Minutos |
| Teor de Estireno | 50 máximo | % |
| Densidade (25°C) | 1,07 - 1,13 | g/cm ³ |
| Índice de Acidez | 30 máximo | mgKOH/g |

Fonte: ELEKEIROZ Ltda.

A caracterização térmica, física e estrutural dos constituintes (sisal e poliéster) foi realizada no Instituto de Química e de Geofísica da Universidade Federal da Bahia.

3.5. Caracterização dos constituintes (sisal e resina poliéster)

A picnometria a gás hélio foi realizada na fibra de sisal e no fio de sisal, a densidade obtida foi utilizada para configuração do método de ensaio de tração do material vegetal. Foi utilizado um Ultrapycnomter 1000, marca Quanta Chrome (Figura 13) para medir seis repetições com erro de 0,018% em amostras devidamente secas.

Figura 13 - Equipamento utilizado para a picnometria a gás Hélio.



Fonte: O autor, 2013.

Para a análise termogravimétrica, foi utilizado o equipamento Marca Shimadzu, Modelo TGA-50 (Figura 14), entre 25°C a 600°C, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, sob fluxo de nitrogênio de 20 mL/min. O procedimento foi realizado na fibra de sisal e na resina poliéster.

Figura 14 - Equipamento utilizado para análise Termogravimétrica dos constituintes.



Fonte: O autor, 2013.

Para a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), os principais eventos térmicos serão avaliados utilizando um Calorímetro Marca Seiko, Modelo EXSTAR DSC-6220

(Figura 15), entre 25°C e 1000°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min sob fluxo de nitrogênio de 20 mL/min. O procedimento foi realizado na fibra de sisal e na resina poliéster.

Figura 15 - Equipamento utilizado para análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos constituintes.



Fonte: O autor, 2013.

Para a Difractometria de raios X (DRX), o equipamento utilizado será o Shimadzu, Modelo XRD-6000, com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,548 \text{ \AA}$), tensão de 30kV, e corrente de 20 mA variando o ângulo (2θ) de 0 à 80°, utilizando amostras devidamente secas e anteriormente trituradas até formar um pó. O índice de cristalinidade pode ser calculado utilizando o método empírico de Segal (Equação 2) (SEAGAL *et al.* 1959 *apud* MARTIN *et al.* 2009) a partir da intensidade do pico máximo do plano cristalográfico (002) atribuído pelo cristal polimorfo da celulose I correspondendo ao ângulo de Bragg $2\theta = 23^\circ$ e a intensidade onde o pico da região cristalina encontra-se no mínimo que corresponde um ângulo de Braag de aproximadamente $2\theta = 16^\circ$.

$$I_c = (I_{002} - I_{am})/I_{002} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde I_c = Índice de cristalinidade; I_{002} = pico máximo cristalográfico; I_{am} = pico máximo amorfo.

As imagens geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) têm alta profundidade de foco, são tridimensionais e permitem a caracterização e estudo de estruturas superficiais e sub-superficiais de amostras com dimensões relativamente grandes, serão utilizadas imagens geradas das amostras recobertas por uma fina camada de ouro num metalizador, por um microscópio eletrônico de varredura, Marca Shimadzu, Modelo SS-550.

A distancia de trabalho variou entre 12 mm e 17 mm, e o detector utilizado foi do tipo SE. O procedimento foi realizado nas estruturas sanduíches para observar a interação entre matriz e reforço.

Para o Espectrômetro por Transformada de Fourier (FTIR), as amostras foram trituradas em pó (tamanho partícula < 2µm) para reduzir o espalhamento da radiação de infravermelho e serão misturadas em pastilhas com KBr (CANEVAROLO, 2007). Os espectros serão obtidos usando um espectrômetro Marca BOMEM, modelo ABB BOMEM MB SERIES, na região de 500cm⁻¹ a 4000cm⁻¹ com 32 varreduras. O FTIR foi realizado na fibra de sisal e no poliéster, o procedimento ocorreu na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

3.6 Ensaios mecânicos em Fibras, Fios, Tecidos e Matriz.

Os ensaios mecânicos das fibras, fios, tecido e matriz poliéster foram realizados numa máquina de ensaio universal da EMIC, modelo DL 2000.

3.6.1 Fibras vegetais

O ensaio de tração para a fibra técnica de sisal demandou novas variáveis operacionais para atender a características inerentes da fibra técnica de sisal. As variáveis que foram adaptadas tiveram o objetivo de preservar a fibra pressionada pelas garras, durante a execução do ensaio. Para o ensaio foi utilizada a norma ASTM D3822-07, por estar relacionada às fibras têxteis, pela facilidade na montagem do ensaio conforme a terminologia, significância e uso, precisão do ensaio, cuidados na amostragem, na preparação da amostra e relatório. Para o experimento, cinquenta amostras procedentes de único lote de coleta de fibras foram escolhidas aleatoriamente e ensaiadas.

Primeiramente as fibras foram cortadas no comprimento de 60mm, depois as fibras são pesadas individualmente em uma balança de precisão com quatro casas decimais e, em seguida, as fibras vão para estufa durante 24h a 80°C para retirar toda a umidade (CARVALHO, 2005). Foi observado que a umidade tem grande influência no comportamento mecânico de fibras vegetais (CALDAS *et al.* 2013), dessa forma optou-se por utilizar as fibras sempre secas. Através da Equação 3, abaixo, é possível obter o teor de umidade das fibras de sisal.

$$Mc = \frac{m_2 - m_1}{m_1} . 100 \quad (3)$$

Onde M_c = teor de umidade; m_1 = massa da amostra seca e m_2 = massa da amostra na umidade de equilíbrio numa determinada umidade relativa.

Passado o tempo de secagem, as fibras são novamente pesadas, a massa seca será utilizada para obter a área por meio da Equação 4.

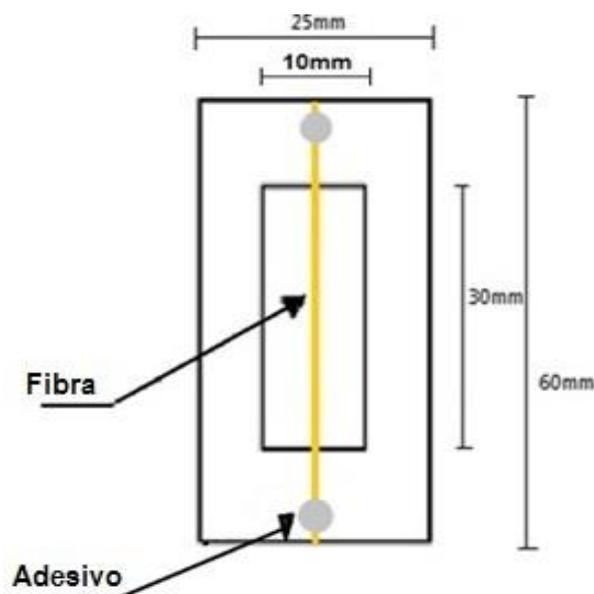
$$A_m = \frac{m}{\rho_r \cdot L} \quad (4)$$

Onde A_m = área da seção transversal; m = massa seca da fibra; ρ_r = densidade real e L = comprimento da fibra.

A densidade será obtida por picnometria a gás hélio. Como a fibra não tem sua forma regular, a mesma foi considerada como uma seção genérica, dessa forma a inclusão dos dados é feita através da área de cada amostra. A obtenção da área por picnometria a gás hélio busca avaliar a resistência da parte lenhosa da fibra, desconsiderando os vazios.

Os experimentos foram realizados com célula de carga modelo SV, com capacidade de 500 N, comprimento base de 30 mm e velocidade de ensaio de 3 mm/min, à temperatura ambiente. A fibra é afixada com adesivo de cura rápida, no suporte de papel vazado, conforme mostra a Figura 15 e, para evitar o escorregamento do corpo de prova e a concentração de tensões na garra, utilizou-se fita crepe nas extremidades. Os ensaios de tração são iniciados após 24h.

Figura 16 - Dimensões dos corpos de prova com fibra de sisal.

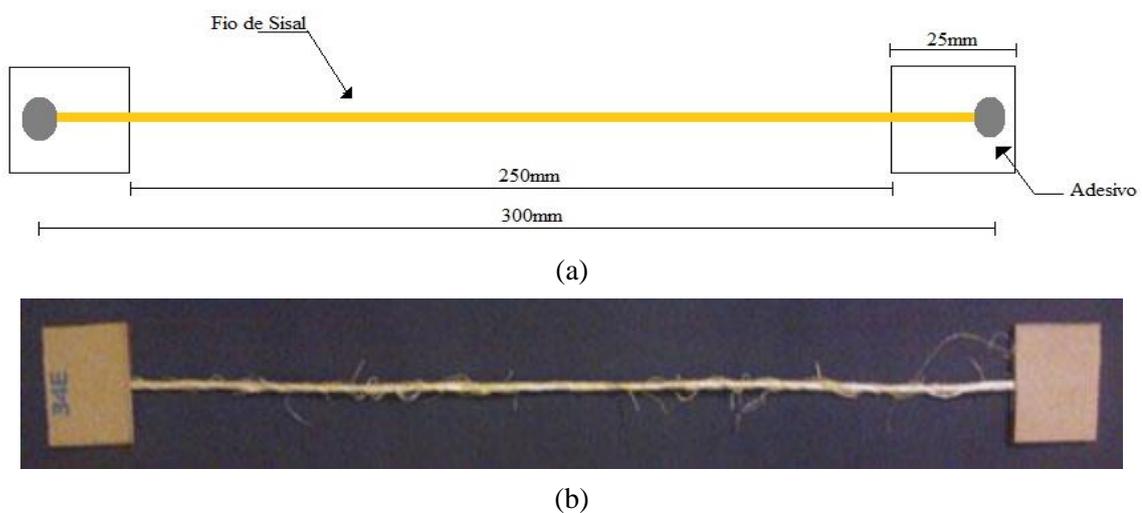


Fonte: O autor, 2012.

3.6.2 Fio de Sisal

O ensaio de tração do fio de sisal seguiu os parâmetros na norma ASTM D2256-10. Primeiramente os corpos de prova foram cortados no comprimento de 300 mm, as amostras foram pesadas em balança de precisão de quatro casas decimais e, em seguida foram colocadas na estufa a 80°C por 24h, quando são retirados e pesados individualmente, seguindo o mesmo processo das fibras para obtenção da área. Para preparação dos corpos de prova, o fio foi afixado com adesivo de cura rápida, e nas suas extremidades foram colocadas lixas nº 100 para evitar o escorregamento do corpo de prova e a concentração de tensões na garra (Figura 17a e 17b). Os ensaios de tração são iniciados após 24h, a célula de carga utilizada foi o modelo Z com capacidade de 5 kN, por questão de segurança utilizou-se um limite de força de 4,5 kN, o comprimento base utilizado para configuração do ensaio foi de 250 mm e a velocidade de ensaio foi de 40 mm/min. Vinte corpos de prova foram feitos para o ensaio de tração do fio de sisal.

Figura 17 - a) dimensões do corpo de prova com fio de sisal. b) imagem final do corpo de prova.



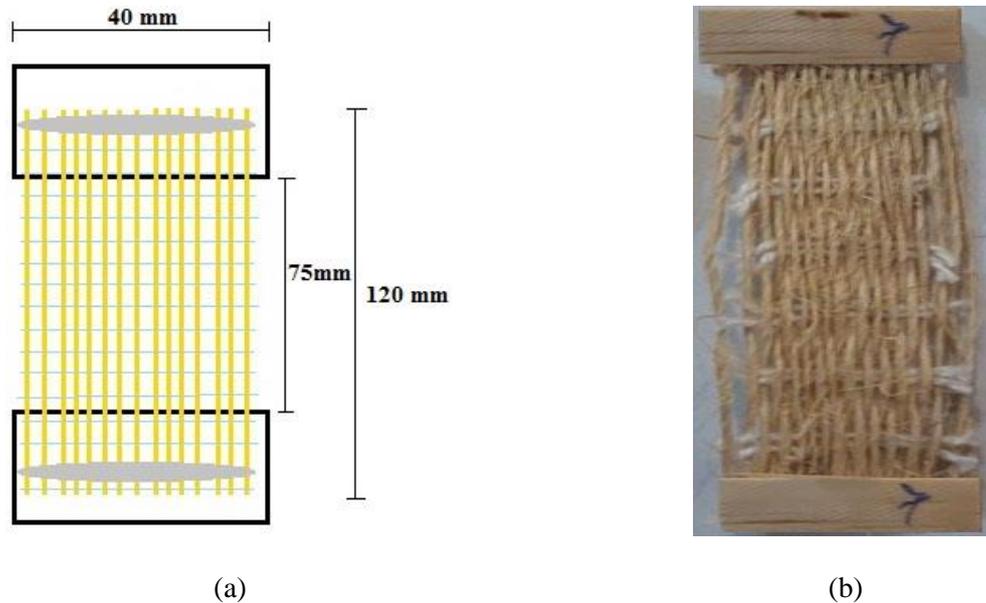
Fonte: O autor, 2013.

3.6.3 Tecido de Sisal

Para o ensaio de tração do tecido de sisal foram utilizados os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM D5035. Os corpos de prova foram cortados com as dimensões da norma (Figura 18), o tecido vai para estufa durante 24h a 80°C e, após esse período, o tecido é afixado com adesivo de cura rápida, e nas suas extremidades foi utilizada palitos de madeira para evitar o escorregamento do corpo de prova e a concentração de tensões na garra. Os ensaios de tração são iniciados, após 24h. O ensaio foi realizado com célula de carga modelo

Z, com capacidade de 5 kN, utilizando-se um limite de força de 4,5 kN, comprimento base de 75 mm e velocidade de ensaio de 40 mm/min, à temperatura ambiente. Vinte corpos de prova foram feitos para o ensaio de tração dos tecidos de sisal.

Figura 18 - Dimensões dos corpos de prova com tecido de sisal (a) e imagem final do corpo de prova (b).



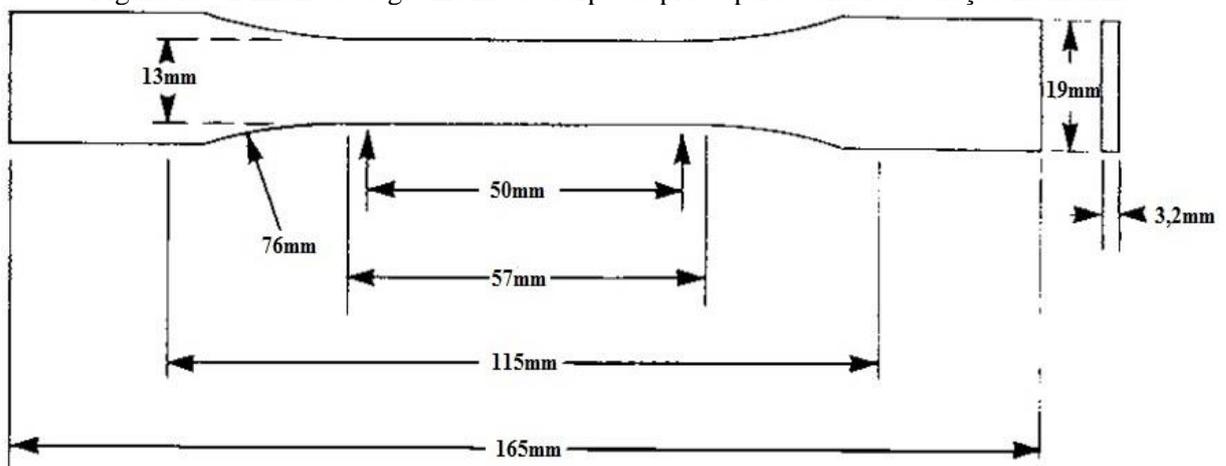
Fonte: O autor, 2013.

3.6.4 Matriz Poliéster

Para o ensaio de tração, utilizou-se a norma ASTM D638, que prevê todas as definições e condições necessárias para o ensaio. Os corpos de prova de matriz poliéster foram feitos em molde de silicone.

As dimensões utilizadas para o ensaio de tração seguem os parâmetros da norma (Figura 19).

Figura 19 - Dimensões e geometria do corpo de prova para o ensaio de tração na matriz.



Fonte: ASTM D 638

O ensaio foi realizado com célula de carga modelo Z, com capacidade de 2 toneladas, utilizando-se um limite de força de 18kN, comprimento base de 115 mm e velocidade de ensaio de 3 mm/min, à temperatura ambiente. Nove corpos de prova foram ensaiados (Figura 20).

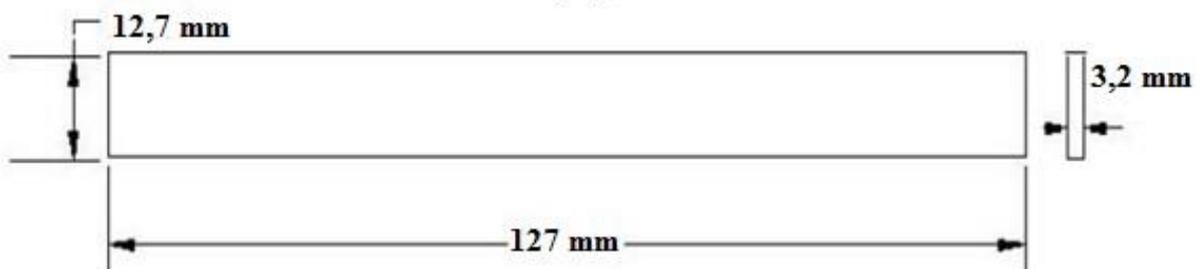
Figura 20 - Corpos de prova de resina poliéster para ensaio de tração.



Fonte: O autor, 2014.

O ensaio de flexão da resina poliéster foi realizado conforme a norma ASTM D790-10, com célula de carga modelo Z, com capacidade de 2 toneladas, utilizando-se um limite de força de 18kN. A velocidade de ensaio foi de 2 mm/min, a razão entre a distância entre os apoios foi de 32 mm. As dimensões e geometria do corpo de prova utilizado são apresentadas na Figura 21.

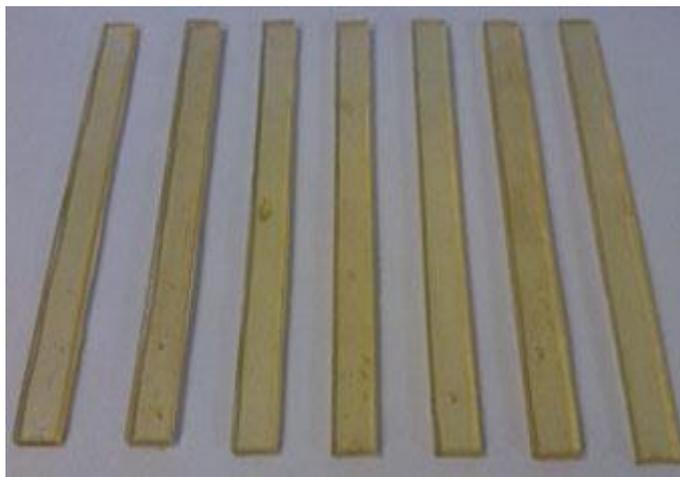
Figura 21 - Dimensões e geometria do corpo de prova para o ensaio de flexão na matriz.



Fonte: SILVA, 2003

Um mínimo de sete corpos de prova (Figura 22) foi ensaiado. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente (25°C).

Figura 22 - Corpos de prova de resina poliéster para ensaio de flexão.

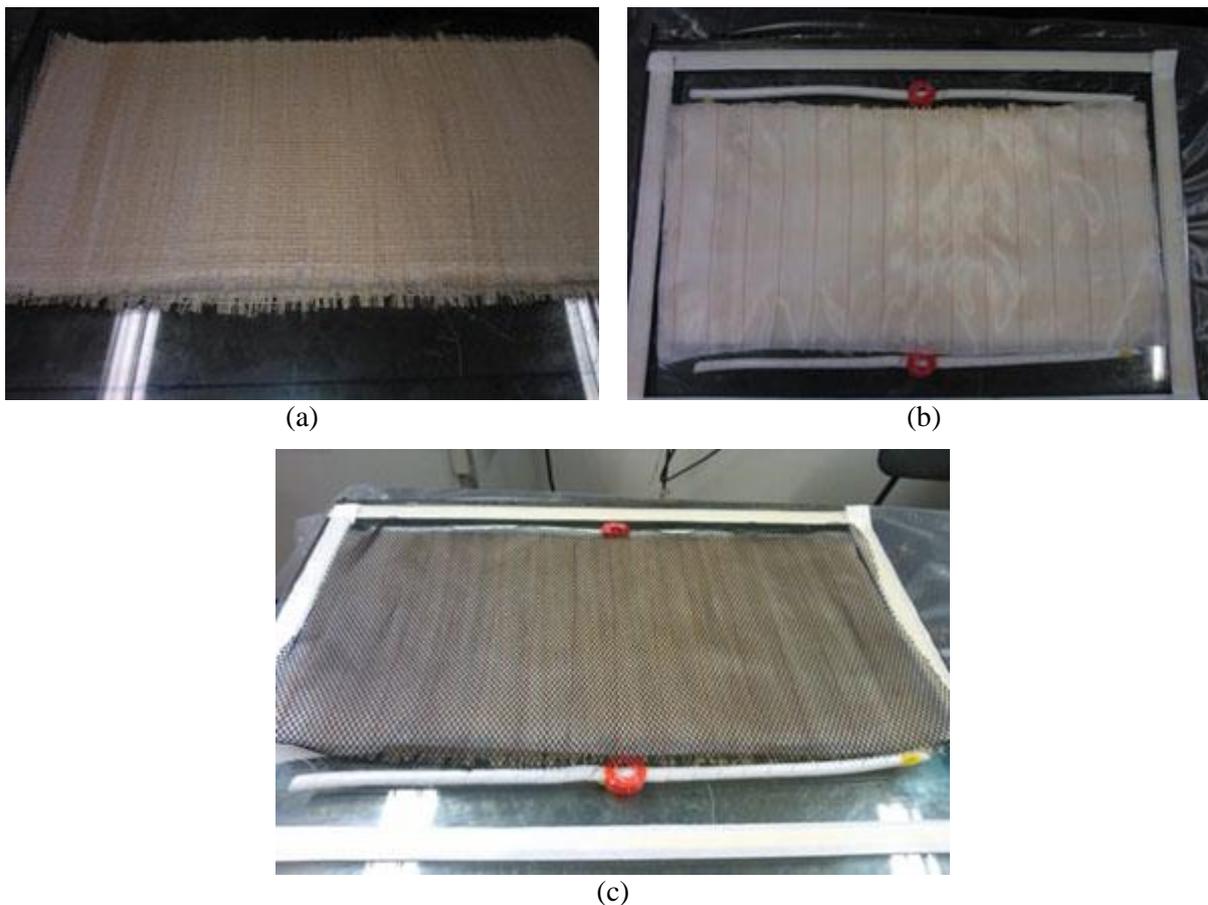


Fonte: O autor, 2014.

3.7 Moldagem dos compósitos por infusão a vácuo (IV).

Para a moldagem do compósito, a primeira etapa consistiu em passar o desmoldante PVA no molde de vidro, com objetivo de obter placas planas com dimensões 400x300 mm. Para tal, foi utilizada uma placa de vidro com 200 mm de espessura nas dimensões 600x600 mm. Enquanto aguardava a secagem do desmoldante, era aplicada a fita de isolamento que é responsável por evitar a entrada de ar no processo. Após a secagem do desmoldante, foi colocado o tecido de sisal seco (estufa 80°C/24h), uma camada de núcleo de PET e outra camada de tecido (Figura 23a). Logo após, são colocadas mangueiras espiraladas em dois pontos do processo, na entrada de resina e na saída de vácuo, ambas com o intuito de manter o fluxo de resina uniforme por todo o compósito. Em seguida eram colocadas uma tela de *peel ply* (material fino e poroso que não adere à resina, para facilitar a desmoldagem da peça após o processamento) (Figura 23b) e uma tela *air flow*, um material de alta permeabilidade que aumenta a velocidade do fluxo de resina através da superfície e, simultaneamente, permite o fluxo na direção transversal do sanduíche (Figura 23c).

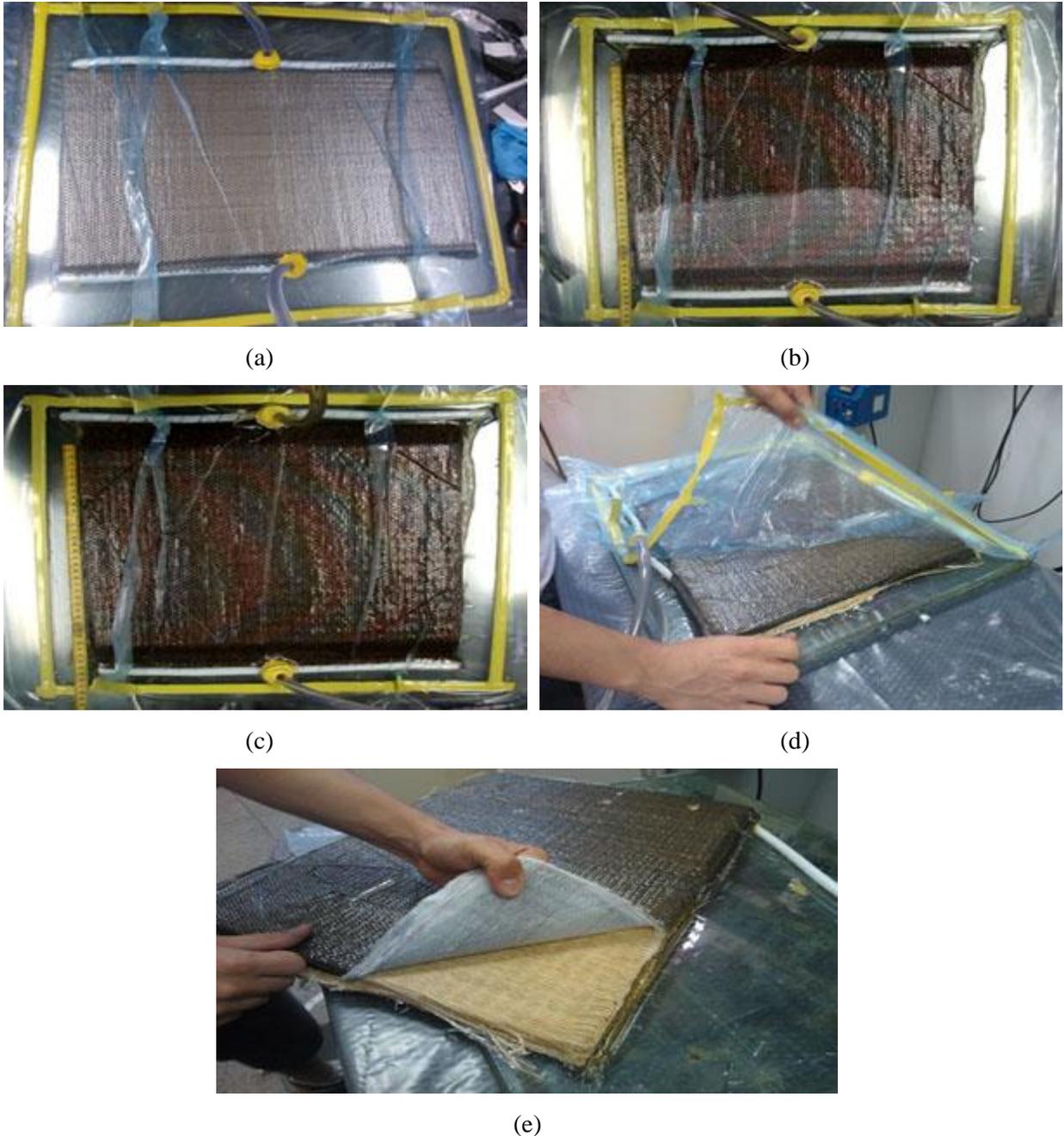
Figura 23–a) Posicionamento do reforço e do núcleo no molde. b) Tela *peelply* posicionada em cima do reforço. c) Posicionamento da tela *airflow* no sanduíche.



Fonte: O autor, 2013.

Por último são adicionadas a tela de vácuo, que é colada na fita isoladora, e as mangueiras para entrada de resina e saída de vácuo (Figura 24a). O vácuo é aplicado para verificar se não há entrada de ar no sistema. Para isso, a mangueira da entrada de resina é obstruída com um alicate de pressão e, em seguida, é feito o mesmo com a mangueira responsável pelo vácuo. O sistema deve ficar sem alterações por 10 minutos. Depois de testado e ajustada qualquer imperfeição no processo, a resina é catalisada com 1% de BUTANOX M 50, a pressão de vácuo é, então, ajustada entre -0,1 e -0,05 bar. Iniciado o processo, é possível acompanhar todo o fluxo de resina (Figura 24b). E, depois que a placa está completamente impregnada pela resina (Figura 24c), deve ser interrompida a alimentação de resina e aguardada uma hora pra a cura do material, importante salientar que o vácuo deve ser mantido durante esse tempo. Passado o tempo de uma hora, o vácuo é desligado, a tela de vácuo é retirada (Figura 24d), a placa é desmoldada e são retiradas a tela *airflow* e o *peelply* simultaneamente (Figura 24e). A placa, então, passa por uma pós cura de 80°C por uma hora e meia, para eliminar o forte odor de estireno.

Figura 24 - a) Colagem da tela de vácuo e posicionamento das mangueiras de resina e vácuo. b) Acompanhamento do fluxo de resina no compósito. c) Impregnação completa da resina no compósito. d) Retira da tela de vácuo depois de decorrido uma hora. e) Retirada das telas *peelply* e *airflow* simultaneamente.



Fonte: O autor, 2013.

3.8 Caracterização das estruturas sanduíches

Os ensaios de compressão e flexão foram realizados em uma máquina universal de ensaios hidráulica do Laboratório de Polímeros (LAPOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, de marca INSTRON 3382, com uma capacidade de 100 kN.

Para analisar se o tecido de sisal pode vir a substituir o tecido de fibra de vidro, os compósitos sanduíches moldados tiveram diferentes configurações. Na Tabela 5, é possível observar as seis estruturas sanduíches produzidas e as comparações entre as amostras foram feitas de acordo com as gramaturas dos tecidos. Assim, a estrutura sanduíche com duas camadas do Tecido de Sisal de Cerchiaro (PET2TC), foi comparada com uma camada de tecido de fibra de vidro (PET1TV), a estrutura com uma camada do Tecido de Sisal Simples (PET1TSI) foi comparada com duas camadas de Tecido de fibra de vidro (PET2TV) e a estrutura sanduíche com uma camada do Tecido de Sisal Sarja (PET1TSA), foi comparada com três camadas de tecido de fibra de vidro (PET3TV).

Tabela 5 - Nomenclatura das amostras produzidas.

| Amostras | Tecido | Gramatura total (g/cm²) | Faces |
|-----------------|-----------------|---|--------------|
| PET2TC | Sisal Cerchiaro | 324 | 2 tecidos |
| PET1TSI | Sisal Simples | 650 | 1 tecido |
| PET1TSA | Sisal Sarja | 1095 | 1 tecido |
| PET1TV | Vidro | 330 | 1 tecido |
| PET2TV | Vidro | 660 | 2 tecidos |
| PET3TV | Vidro | 990 | 3 tecidos |

Fonte: O autor, 2014.

3.8.1 Determinação da fração volumétrica do reforço nas faces (%V_f).

Para determinar a fração volumétrica do reforço nas lâminas (%V_f) nas estruturas sanduíches foi utilizada a Equação 5 (LEVY NETO e PARDINI, 2006) com uma modificação, pois para cálculo do %V_f desconsiderou-se o núcleo de PET utilizado.

$$\%V_f = \frac{\left(\frac{m_f}{\rho_f}\right)}{V_{compósito}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Onde m_f = massa total de reforço (m), ρ_f = densidade do reforço (g/m³) e $V_{compósito}$ = volume total do compósito desconsiderando o núcleo (m³).

3.8.2 Ensaio de Dureza Shore D

Neste ensaio, um pequeno indentador é forçado contra a superfície do material a ser testado e a análise consiste em medir a profundidade ou área deixada pelo indentador sobre o material. Esta profundidade ou tamanho da endentação resultante é medida e então relacionada a um número de dureza; quanto mais macio o material, mais larga ou mais profunda é a endentação, e menor o número de dureza. Entre as precauções que devem ser tomadas para a realização do ensaio, é importante que a superfície do material esteja limpa e lisa, e que o aparelho esteja na posição vertical e perpendicular a superfície. Foram realizadas trinta medições em cada tipo de amostra segundo a norma ASTM D2240 no Durômetro Shore D da WOLTEST, modelo SD300 (Figura 25).

Figura 25 - Equipamento utilizado para o ensaio de dureza Shore D.



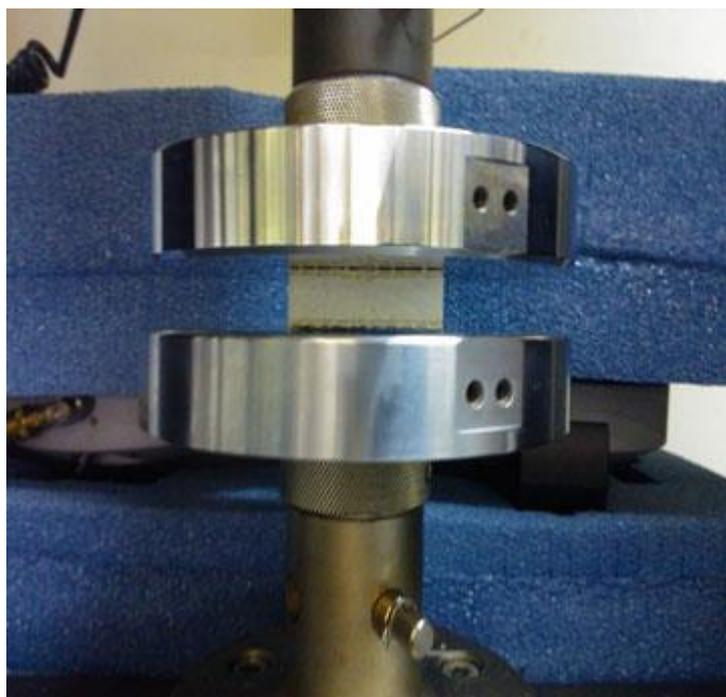
Fonte: O autor, 2013.

3.8.3 Ensaio de Compressão Transversal

No ensaio de compressão perpendicular ao plano das placas, pretende-se caracterizar o comportamento à compressão dos compósitos constituídos por espuma de PET no núcleo. Em particular, pretende-se avaliar a resistência à compressão na referida direção e a rigidez em compressão transversal. A força de compressão foi aplicada até a ruptura na direção perpendicular às faces que constituem o compósito sanduíche. Este ensaio tem uma especial importância na avaliação do comportamento da zona dos apoios dos compósitos sanduíches quando submetidos a carregamentos de flexão, uma vez que o material, nesta zona, fica sujeito à compressão na direção transversal ao plano das lâminas.

Os ensaios de compressão foram realizados de acordo com a norma ASTM C365-11 referente à determinação das propriedades em compressão de núcleos de compósitos sanduíches. A norma recomenda a utilização de um número mínimo de cinco corpos de prova de seção quadrada, no caso de núcleos contínuos, a área mínima deve ser de 625 mm². O ensaio foi realizado com a velocidade de 1 mm/min (Figura 26).

Figura 26 - Corpo de prova posicionado para ensaio de compressão transversal.



Fonte: O autor, 2013.

3.8.4 Ensaio de Compressão Longitudinal

No ensaio de compressão longitudinal pretende-se caracterizar o comportamento à compressão na direção paralela às lâminas do sanduíche constituído por espuma de PET no núcleo. Em particular, pretende-se avaliar a resistência à compressão no plano e a rigidez à compressão na referida direção.

A força de compressão foi aplicada até à ruptura na direção paralela às lâminas que constituem o compósito sanduíche. Este, ao ser carregado na direção paralela às lâminas, fica sujeito à instabilidade por flambagem, exceto se a espessura destas lâminas for tal que o esmagamento das mesmas ocorra antes da instabilidade. Este ensaio torna-se, assim, importante na avaliação do comportamento do painel quando as lâminas são sujeitas à compressão, como acontece quando um corpo de prova é sujeito à flexão nas lâminas inferiores para momentos negativos na zona dos apoios e nas lâminas superiores para

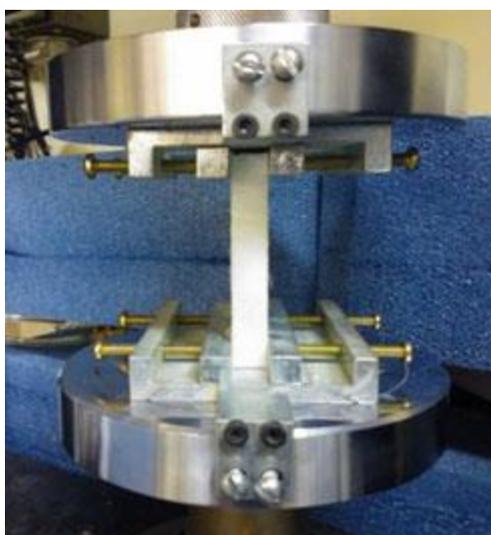
momentos positivos na zona de meio vão. O modo de ruptura das lâminas em compressão traduz-se no seu enrugamento, podendo o material de núcleo acompanhar esta deformação ondulada. Após o ensaio, os resultados encontrados serão utilizados para calcular a resistência à compressão longitudinal através da Equação 6.

$$\sigma = P_{max}/[w(2t_{fs})] \quad (6)$$

Onde σ = Resistência à compressão longitudinal (MPa); P_{max} = Força máxima (N); w = largura do copo de prova (mm); t_{fs} = Espessura de uma única face (mm).

Os ensaios de compressão longitudinal foram realizados de acordo com a norma ASTM C364-07 referente à determinação das propriedades em compressão na direção paralela às lâminas do painel sanduíche. A norma recomenda a utilização de corpos de prova de seção transversal retangular com uma largura superior a 50 mm. A dimensão do corpo de prova, paralela à aplicação da carga, deve ser menor que oito vezes a espessura total do compósito. O ensaio foi realizado com a velocidade de 1 mm/min (Figura 27).

Figura 27 - Corpo de prova posicionado para ensaio de compressão longitudinal.



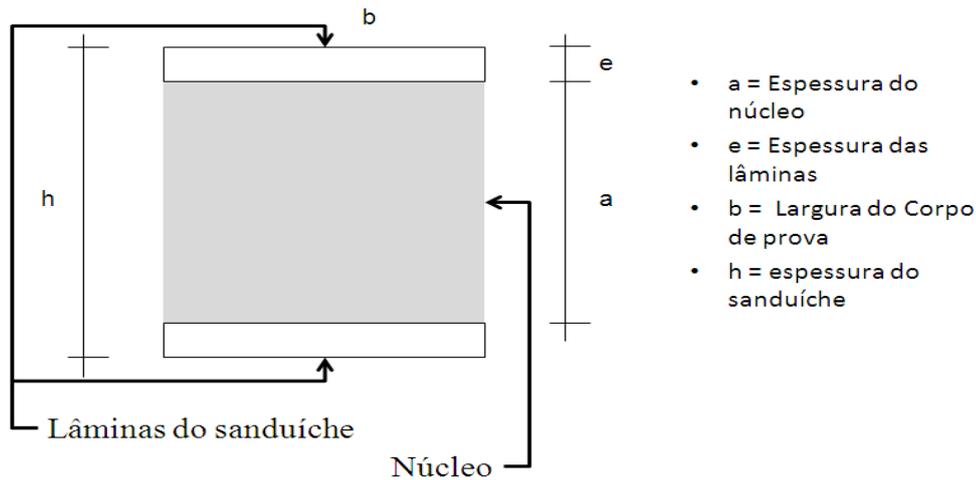
Fonte: O autor, 2013.

3.8.5 Ensaio de Flexão em 3 pontos

O ensaio de flexão em 3 pontos nas estruturas sanduíches foi realizado de acordo com a norma ASTM C393-11. Pretende-se conhecer o comportamento dos compósitos em uso e à ruptura, os seus modos de ruptura mais frequentes e as respectivas cargas de colapso.

Pretende-se também estimar os valores das constantes elásticas mais relevantes para o dimensionamento dos painéis. Após o ensaio, através dos resultados obtidos, será calculado o momento de inércia seções transversais de geometria retangular através da Equação 7, sendo as variáveis utilizadas expressas na Figura 28.

Figura 28 – Esquema da estrutura sanduíche para o calculo da inércia das lâminas.



Fonte: O autor, 2014.

$$I = \left[\frac{be^3}{12} + be \left(\frac{h}{2} - \frac{e}{2} \right)^2 \right] \cdot 2$$

Sendo $h = a + 2e$, então:

$$I = \frac{be}{2} \left[\frac{e^2}{3} + (a + e)^2 \right] \quad (7)$$

Onde I = Momento de Inércia; b = largura do corpo de prova; e = espessura das lâminas; h = espessura do sanduíche e a = espessura do núcleo.

Para o calculo da inércia vale ressaltar que a contribuição do núcleo está sendo desprezada.

Também será calculada a rigidez do material à flexão (Equação 8), que é a resistência de um corpo duro à deformação por uma força aplicada.

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (8)$$

Onde K = Rigidez à Flexão (N/mm); P = Força aplicada (N); Δ = Deslocamento central (mm).

Após o cálculo de inércia e rigidez, propõe um esquema de ensaio à flexão estática de três pontos para a determinação do Módulo de Elasticidade Longitudinal da peça através da Equação 9.

$$E = \frac{L^3}{48.I} . K \quad (9)$$

Onde E = Módulo de Elasticidade (MPa); L = Comprimento do vão (mm); I = Inércia; K = Rigidez (N/mm).

A resistência ao cisalhamento do núcleo (Equação 10) (ASTM C393) também é um resultado importante que pode ser obtido através do ensaio de flexão em estruturas sanduíches.

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d + c)b} \quad (10)$$

Onde F_s = resistência ao cisalhamento do núcleo (MPa); P_{max} = força máxima (N); d = espessura do sanduíche (mm); c = espessura do núcleo (mm) e b = largura do sanduíche (mm).

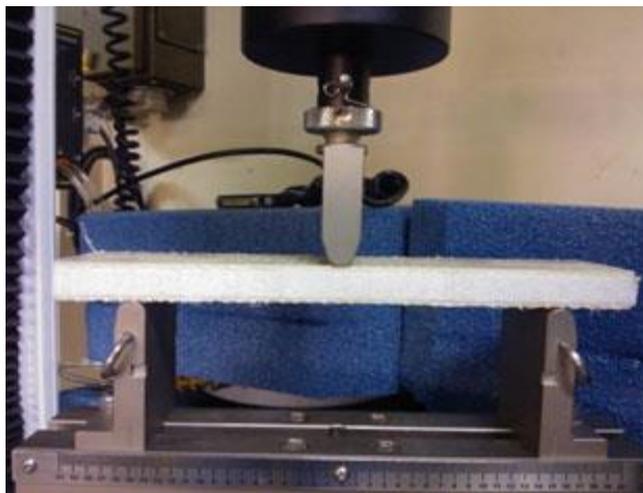
E por último à Resistência das faces da estrutura sanduíche (Equação 11) (ASTM C393) .

$$\sigma = \frac{P_{max}S}{2t(d + C)b} \quad (11)$$

Onde σ = resistência das faces (MPa); t = espessura de uma única face (mm); d = espessura do sanduíche (mm); c = espessura do núcleo (mm) e S = distância entre os apoios (mm).

As dimensões do corpo de prova para ensaio de flexão foram 50x200mm (largura x comprimento). Cinco corpos de prova foram ensaiados para cada amostra, a velocidade de ensaio foi de 3 mm/min e a distância entre os apoios foi de 150 mm (Figura 29).

Figura 29 - Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão.



Fonte: O autor, 2013.

3.8.6 Análises Estatísticas dos resultados

O método estatístico utilizado para tratar os resultados foi o Teste t, por ser apropriado para comparar dois conjuntos de dados quantitativos, em termos de seus valores médios. Desta forma foi avaliado se as amostras possuem diferenças significativas ou não. O Teste t foi aplicado pelo Sistema para Análises Estatísticas (SAEG).

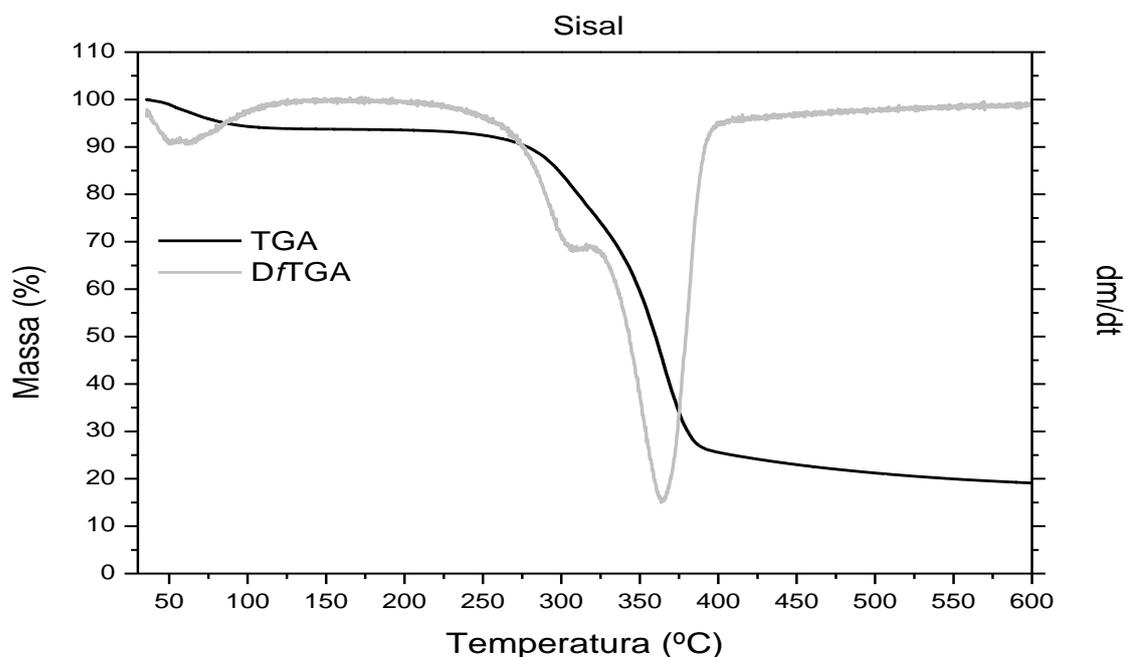
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados, neste capítulo, os resultados dos ensaios realizados nas estruturas sanduíches, sendo inicialmente discutidos os resultados da análise dos constituintes (sisal e poliéster). O objetivo é mostrar que os materiais utilizados estão em acordo com a literatura apresentada. Em seguida serão discutidos os resultados dos ensaios mecânicos dos constituintes e finalizando com os resultados mecânicos das estruturas sanduíches.

4.1 Caracterização dos constituintes – Sisal e Poliéster

Na Figura 30 são apresentadas as curvas termogravimétricas (TGA/DTGA) da fibra de sisal e observa-se, que ocorreu cerca de 6% de perda de massa na faixa de temperatura de 25°C a 225°C, atribuída à perda da água presente nas fibras. A degradação da fibra de sisal inicia-se em aproximadamente 275°C e continua rapidamente com o aumento da temperatura, apresentando perda de massa de 71% até cerca de 400°C. Devido à lenta taxa de decomposição dos resíduos, a perda de massa a partir de 400°C até cerca de 550°C é apenas cerca de 4%, e a 550°C o teor de cinzas é de aproximadamente 19% devido à condensação dos componentes da lignina e de sua aromatização em atmosfera de nitrogênio a altas temperaturas, além da presença do conteúdo de cinzas na fibra (MARTIN *et al.* 2009).

Figura 30 - Curvas de TGA e DTGA sobrepostas da fibra de sisal.

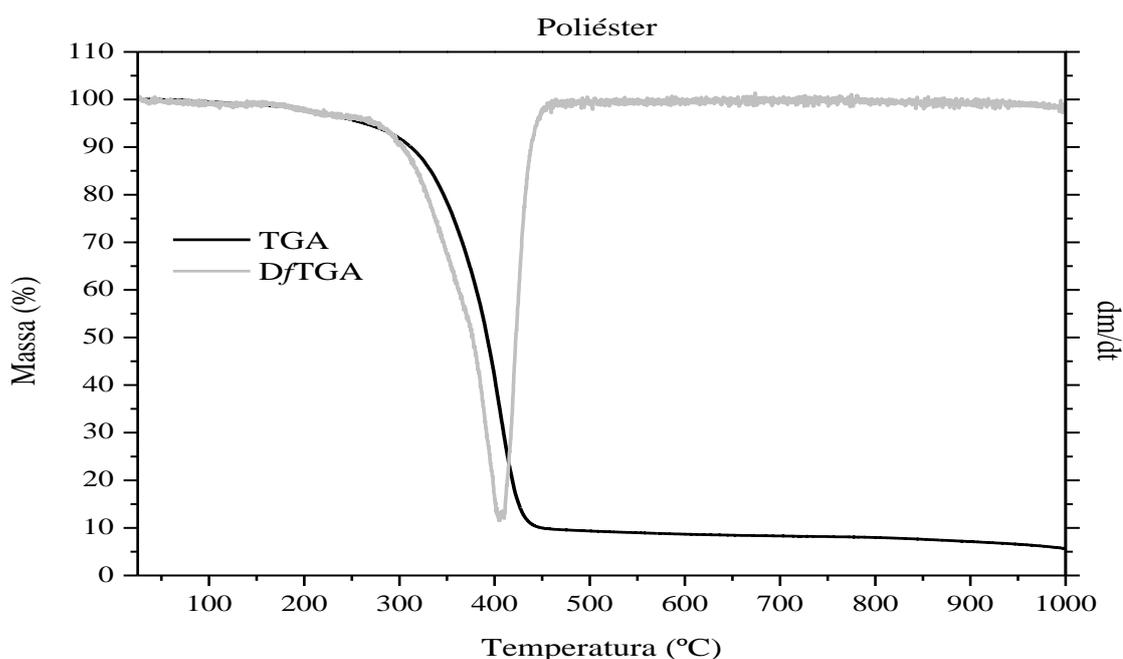


Fonte: O autor, 2013.

A curva DTGA (Figura 30), apresentou dois picos distintos com máximos em cerca de 307°C e 363°C, indicando que ocorrem duas etapas na degradação térmica da fibra. O primeiro pico é atribuído à decomposição de componentes da hemicelulose, e observa-se que na faixa de temperatura de 240°C a 320°C ocorre degradação lenta com perda de massa de 28%. A degradação da celulose ocorre em temperaturas mais altas em relação à hemicelulose e também com taxas mais rápida de decomposição. O principal pico inicia-se em 325°C e finaliza em cerca de 385°C sendo que seu máximo ocorre na temperatura de 363°C (MARTIN *et al.* 2009).

Na Figura 31 é apresentada a curva termogravimétrica (TGA/DTGA) da matriz poliéster pura, onde foi observada uma perda de massa de 5% na faixa de temperatura de 80 a 280°C. A matriz poliéster começa a se degradar por volta de 325°C sendo associado a uma grande perda de massa de 88% até cerca de 450°C. A partir de 475°C a perda de massa ocorre lentamente (cerca de 7%) até 575°C. A curva da DTGA mostra um pico de alta intensidade, relacionado a uma grande perda de massa a 400°C. Esse pico bem definido é típico de resinas poliméricas puras o que também está associada a uma pequena perda de resíduos a altas temperaturas. Em polímeros puros, este pico DTGA está relacionado com o mecanismo principal de decomposição térmica de degradação das cadeias macromoleculares ou mesmo despolimerização (BEVITORI *et al.* 2011).

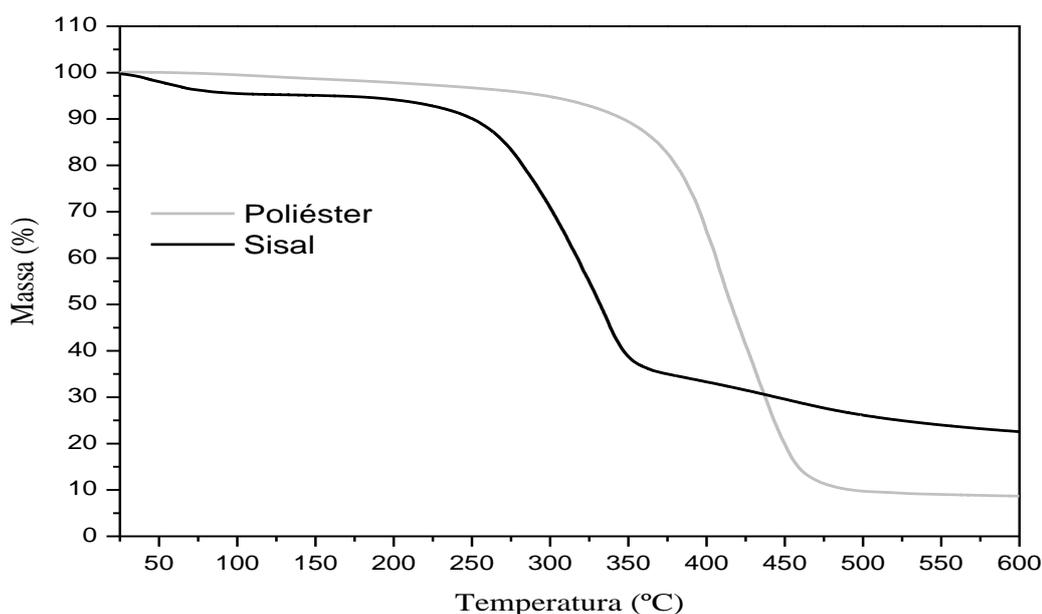
Figura 31 - Curvas de TGA e DTGA sobrepostas da resina poliéster.



Fonte: O autor, 2013.

Na Figura 32 pode-se observar a perda inicial de umidade do sisal é maior que o poliéster, a fibra de sisal começa a perder massa rapidamente a uma temperatura menor que a resina poliéster por volta dos 250°C já a resina começa o processo de degradação em 300°C. Apesar da maior estabilidade térmica da resina, as fibras de sisal apresentaram bons resultados, ou seja, numa aplicação que exija uma temperatura de processamento de até 240°C, às fibras irão apresentar boa estabilidade térmica, juntamente com a matriz poliéster.

Figura 32 - Curvas TG sobrepostas da fibra de sisal e resina poliéster.

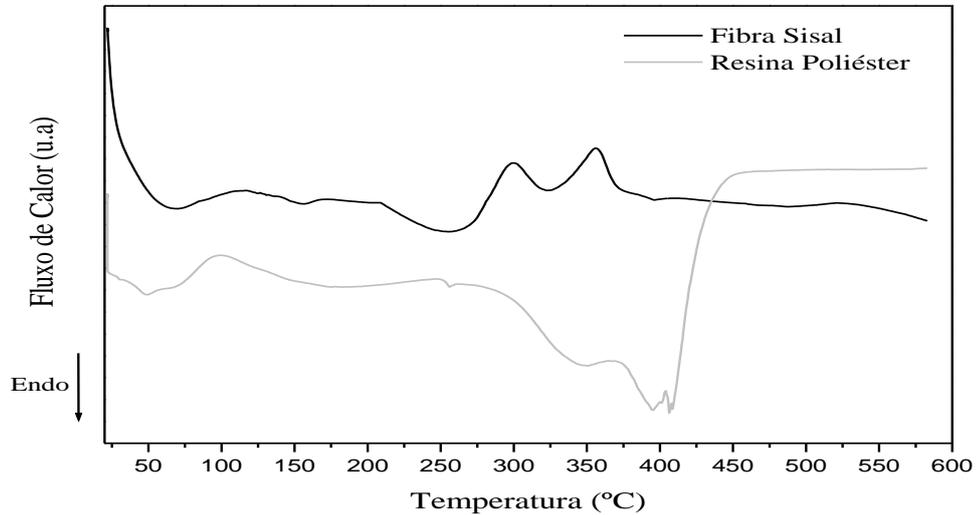


Fonte: O autor, 2013.

Na Figura 33 é apresentada uma curva de DSC representativa da fibra de sisal, onde observam-se três eventos, referentes aos três maiores constituintes da fibra (celulose, hemicelulose e lignina). O primeiro evento endotérmico observado na faixa de 25°C à 100°C, com máximo em 65°C atribuída à evaporação da umidade presente nas amostras. O pico exotérmico observado na curva térmica da fibra de sisal iniciando em 265°C, com máximo em 300°C é devido à degradação da fração de hemicelulose. E um pequeno pico endotérmico iniciando em 310°C com mínimo em 325°C é atribuída à degradação da celulose, que é o constituinte predominante da fibra (MARTIN, 2001 e MARTINS, 2001, YANG *et al.* 2007, MURUGAN *et al.* 2008, MARTIN *et al.* 2009), o último pico exotérmico iniciando em 340°C com máximo em 355°C é referente a lignina e segundo a literatura (YANG *et al.* 2007) é atribuído a carbonização. A curva DSC alusiva à resina poliéster apresenta um pico endotérmico na faixa de 30°C a 80°C com máximo em 48° referente a umidade, foi observado um evento exotérmico na faixa de 80°C à 125°C, esse evento não é característico de resina

poliéster ortoftálica e pode ser atribuído ao catalizador BUTANOX M 50. O último evento observado foi endotérmico e referente à degradação do material na faixa de 286°C à 454°C com máximo em 408°C.

Figura 33 - Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) da fibra de sisal e resina poliéster.



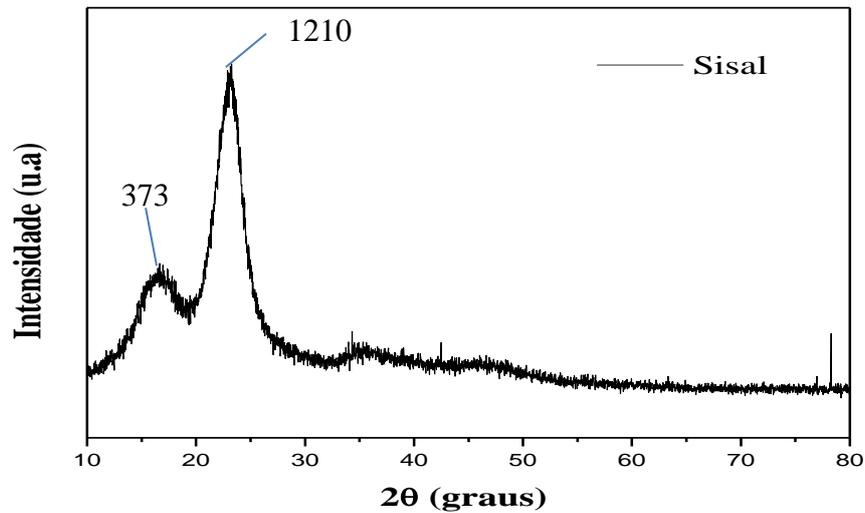
Fonte: O autor, 2013.

O difratograma de raios X do sisal apresentou caráter parcialmente amorfo (Figura 34), onde I_{002} é a intensidade máxima do plano de difração 002 ($2\theta = 23,26^\circ$) cuja reflexão é atribuída à região cristalina da celulose e I_{am} é a intensidade de difração a $2\theta = 16,7^\circ$, atribuída a região amorfa da lignina e hemicelulose (MARTIN *et al.* 2009). O índice de cristalinidade calculado pela equação 2 foi de 69,2%, esse resultado corresponde aos valores encontrados na literatura (FERREIRA *et al.* 2003; MEGIATTO JR, 2006 e OLIVEIRA *et al.* 2009). Segundo Santos (2007) a maior cristalinidade caracteriza um melhor comportamento mecânico nas fibras e conseqüentemente nos compósitos.

$$I_c = (1210 - 373)/1210.100$$

$$I_c = 69,2\%$$

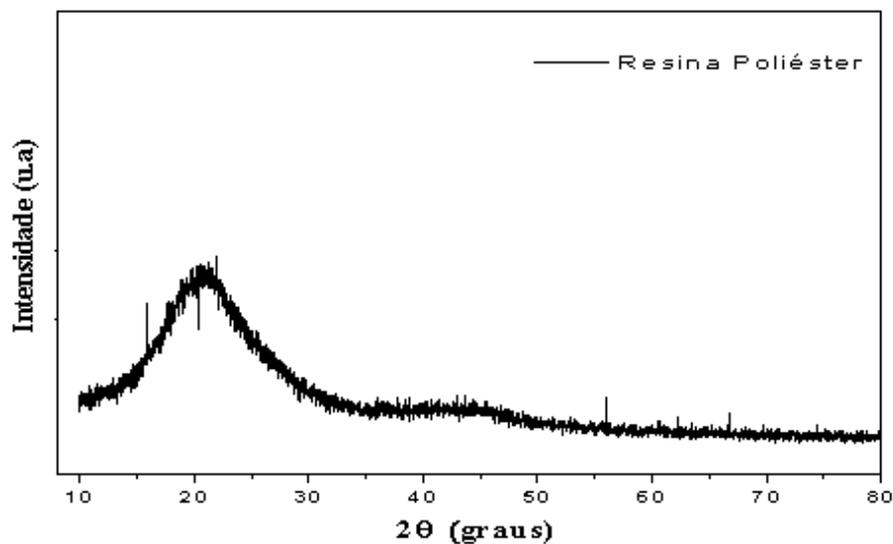
Figura 34 - Difratoograma de raios X da fibra de sisal.



Fonte: O autor, 2013.

O difratoograma de raios-x da resina poliéster (Figura 35) apresentado na mesma escala do difratoograma do sisal, mostrou comportamento amorfo, com a presença de halos, o que é característico de resina poliéster ortoftálica.

Figura 35 - Difratoograma de raios X da resina poliéster.



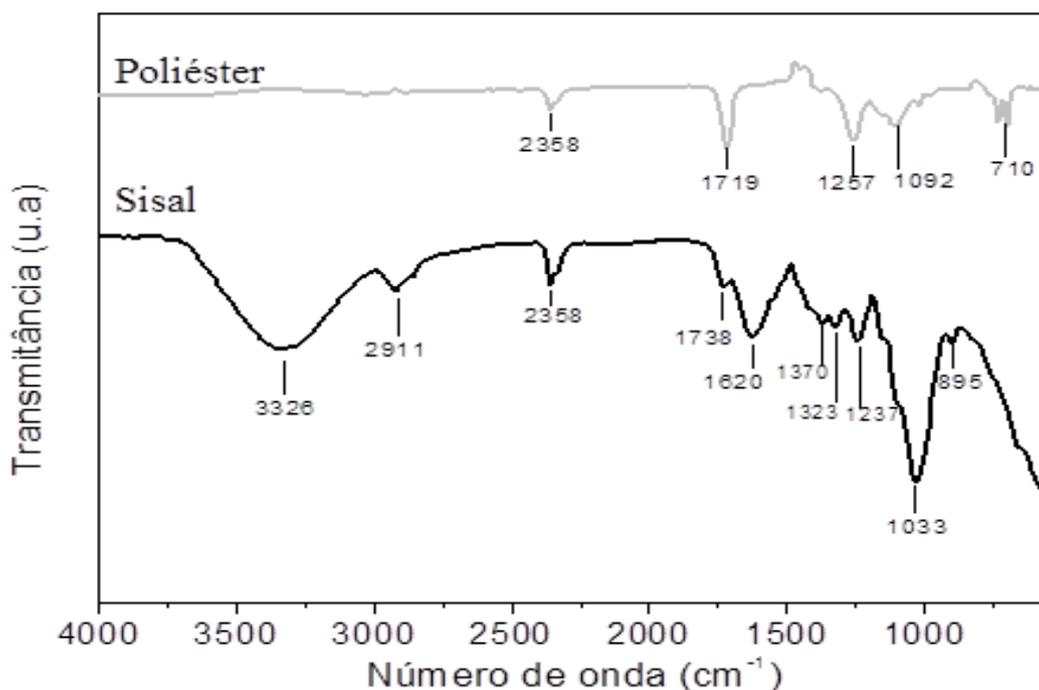
Fonte: O autor, 2013.

Os espectros FTIR da fibra do sisal e do poliéster são apresentados na Figura 36. Podem ser observadas bandas de absorção para os grupos químicos característicos da composição das fibras lignocelulósicas (celulose, hemicelulose e lignina). Os espectros revelou um pico largo e intenso em 3326 cm^{-1} , característico dos grupos hidroxila presentes

nas estruturas de celulose, água e lignina. O pico a 2911 cm^{-1} são bandas características da vibração de alongamento C-H presente nos componentes de celulose e hemicelulose. A 1738 cm^{-1} observa-se uma banda corresponde ao grupo carbonila (C = O) presente na hemicelulose (YANG *et al.* 2007; BRÍGIDA *et al.* 2010; REDDY *et al.* 2009).

A banda 1620 cm^{-1} são ligações C=C, incluindo os anéis aromáticos da lignina. Entre 1323 e 1370 cm^{-1} o pico de absorção refere-se aos grupos CH e CO dos anéis aromáticos em polissacáridos. A banda em 1237 cm^{-1} é em relação à (CO) vibração de éteres e grupos fenólicos atribuídos à presença de cera sobre a superfície da fibra. O pico de absorção em 1033 cm^{-1} está relacionada com o (CO) e (OH) estiramentos que pertencem ao polissacarídeo na celulose. Finalmente, o pico observado em 895 cm^{-1} é atribuído à presença de H (aromático) presente na lignina (ROMANZINI *et al.* 2012; ROSA *et al.* 2011; YANG *et al.* 2007).

Figura 36 - Espectros de FTIR da fibra de sisal e da matriz poliéster.

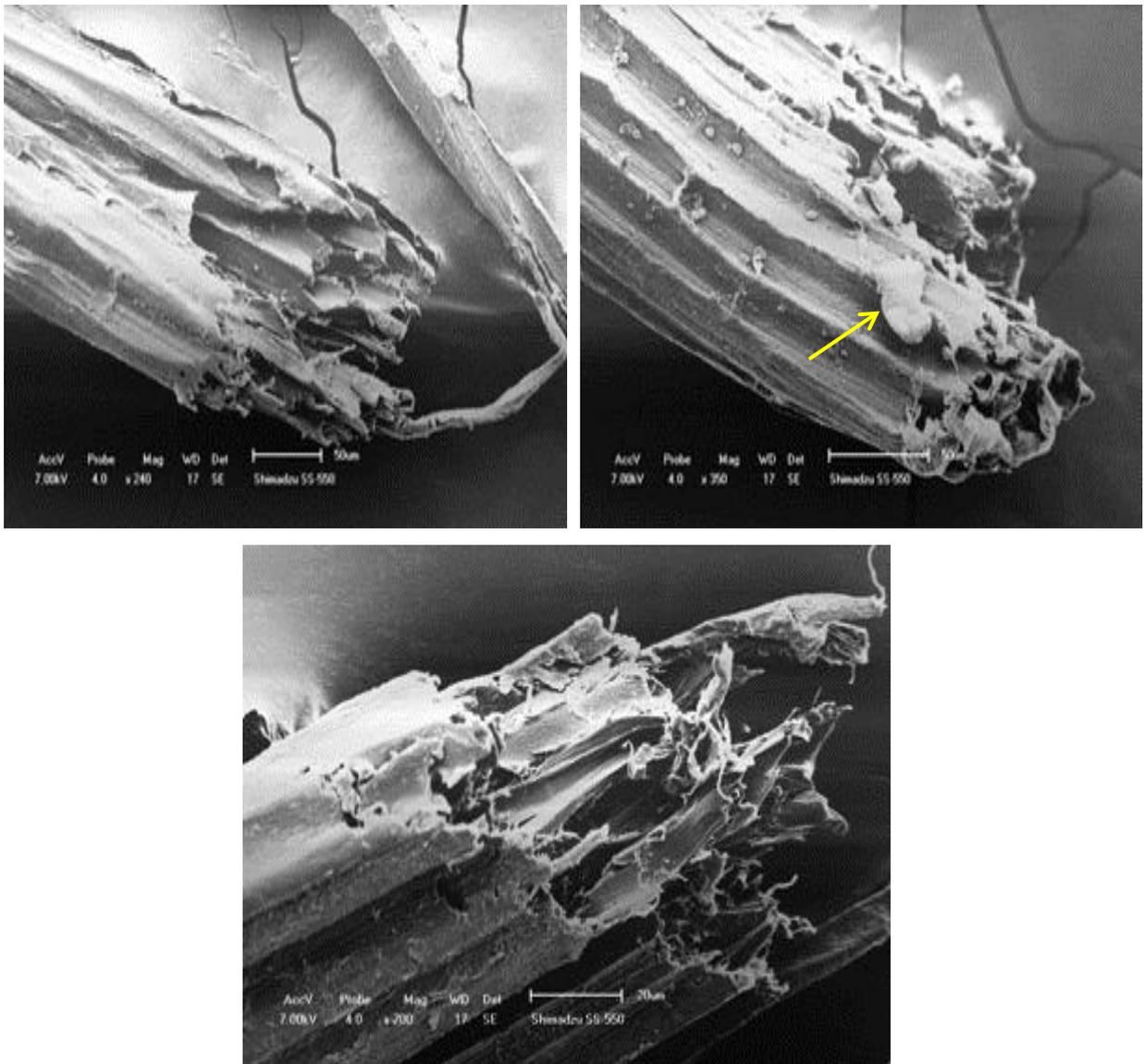


Fonte: O autor, 2013.

Já em relação ao poliéster, a banda a 2358 cm^{-1} é atribuída ao estiramento simétrico de CH. O estiramento C=O (carbonila) de grupos ácidos carboxílicos é atribuído a banda 1719 cm^{-1} , já em 1257 cm^{-1} o evento atribuído é o estiramento do grupo C-O e deformação do grupo O-H. As bandas 1092 cm^{-1} e 710 cm^{-1} , são atribuídas a vibrações de dois hidrogênios aromáticos adjacentes em compostos p-substituídos (ASSIS, 2012).

Através da micrografia da Figura 37, pode-se observar que as fibras de sisal são formadas por um aglomerado de micro fibrilas. Observa-se também que a superfície da fibra é ligeiramente rugosa e não uniforme o que pode facilitar o ancoramento mecânico da resina, portanto a adesão fibra/matriz. Diferentemente das fibras sintéticas, essas fibras apresentam uma grande diversidade na forma geométrica da seção transversal, lembrando também que o diâmetro das fibras de sisal não é uniforme ao longo do comprimento das fibras. Como as fibras não passaram por nenhum tratamento químico, fica claro nas imagens a presença de impurezas em sua superfície.

Figura 37–Micrografias das fibras de sisal.



Fonte: O autor, 2013.

A massa específica real da fibra de sisal obtida por picnometria de gás hélio apresentou resultado de $1,41 \text{ g/cm}^3$, valor próximo ao encontrado por Ku *et al.* (2011) de $1,5$

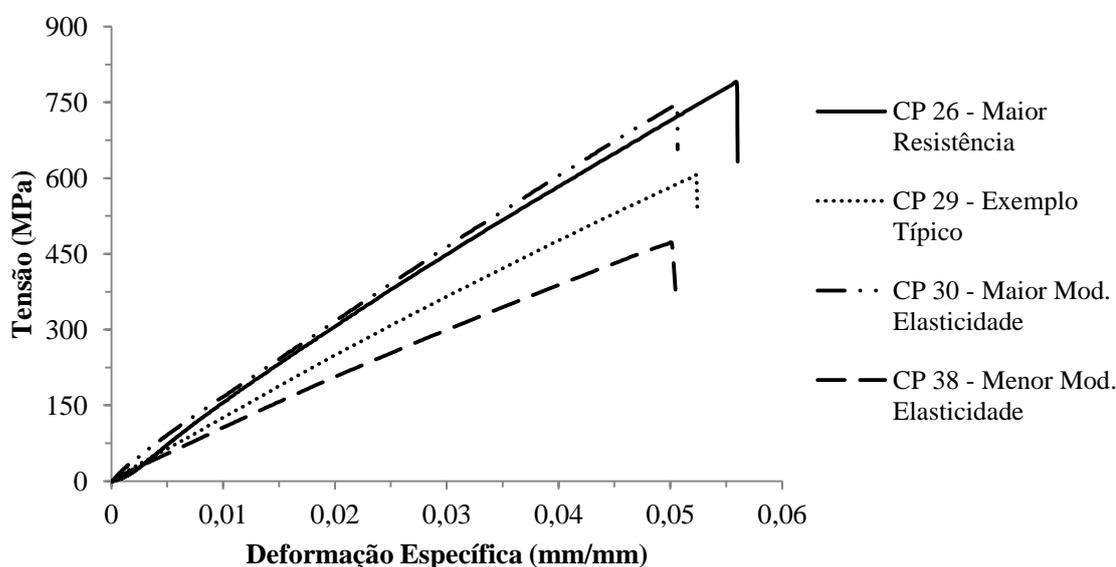
g/cm^3 . A determinação da área média das fibras vegetais a partir da massa específica real evita processos de estimativa por aproximação das seções transversais das fibras a círculos e medidas de supostos diâmetros.

4.1.1 Ensaio de tração em fibras de sisal

Inicialmente foram ensaiadas à tração as fibras de sisal, sendo que o tecido foi confeccionado com as mesmas fibras. A caracterização mecânica das fibras foi realizada em cinquenta amostras de fibras de sisal.

O módulo de elasticidade à tração foi calculado com valores de tensão-deformação situados entre o 20% e 80% do trecho linear inicial, período elástico, das curvas de ensaio. Na Figura 38 pode-se observar a variabilidade das curvas obtidas nos ensaios, a fibra de sisal apresentou comportamento de material frágil com deformação elástica, obtendo um aumento crescente da tensão e deformação até o ponto de ruptura, ou seja, comportamento característico de fibras vegetais como licuri (OLIVEIRA, 2010), banana (CALDAS *et al.* 2013) e curauá (TOMCZAK *et al.* 2007).

Figura 38 - Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nas fibras de sisal.



Fonte: O autor, 2013.

A Tabela 6 apresenta os resultados médios, desvios padrões e coeficiente de variação obtidos das variáveis: área, força máxima, resistência e módulo de elasticidade à tração. Dos 50 corpos de prova ensaiados, foram consideradas válidas 40 amostras.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de tração na fibra de sisal.

| N= 40 | Área (mm ²) | Força máxima (N) | Resistência (MPa) | E (GPa) |
|--------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|---------|
| Média | 23,6 x 10 ⁻³ | 14,1 | 606,4 | 15,6 |
| Desvio. Padrão | ±6,1 x 10 ⁻³ | ±3,7 | ±90,7 | ±1,9 |
| Coef. Variação (%) | 25,8 | 26,2 | 14,9 | 12,3 |

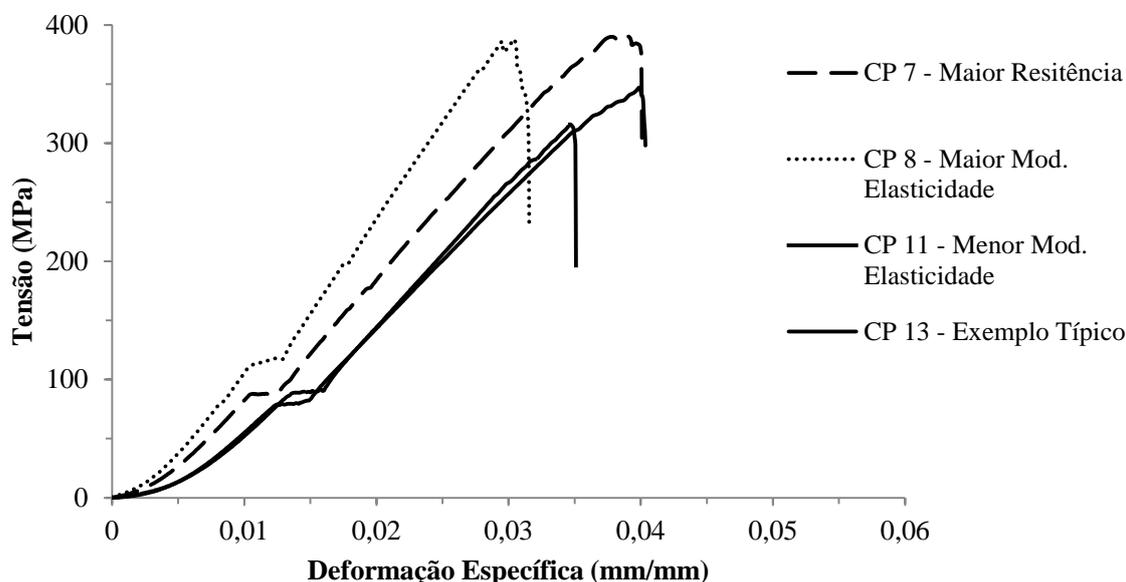
Fonte: O autor, 2013.

As fibras tiveram um comportamento variado tanto nos parâmetros quanto na geometria das curvas tensão-deformação. Os mesmos desvios das propriedades na tensão axial podem ser observados no trabalho de Carvalho (2005), Silva *et al.* (2008) e Cerchiaro (2010), onde se supõe a hipótese da heterogeneidade química e física das fibras naturais e as variações de sessão ao longo das fibras têxteis, sendo que a sessão maior encontra-se mais próxima ao tronco da planta e, por isso, mais antiga e com paredes celulares mais robustas. Além disso, as regiões produtoras do sisal não são as mesmas, sem esquecer que no desfibramento das fibras, estas podem sofrer pré-estiramentos diferentes que modificam seu desempenho. A resistência à tração média encontrada foi de 606,4 MPa, com um coeficiente de variação de 14,9%, considerado baixo por se tratar de fibras naturais. Foram obtidos valores superiores do que os encontrados por Cerchiaro (2010) de 301 MPa e Silva *et al.* (2008) 385 MPa, e valores próximos a Aquino (2003) de 635 MPa e Martin (2009) de 671 MPa. Vale ressaltar que alguns trabalhos como Silva *et al.* (2008) utilizaram o diâmetro equivalente para obtenção dos resultados de tração em fibras vegetais, essa metodologia gera uma grande variabilidade nos resultados, no caso de Silva *et al.* (2008) essa variabilidade ficou em 25%.

4.1.2 Ensaio de Tração nos Fios de Sisal.

Os ensaios de tração realizados em 20 corpos de prova, sendo considerados válidos 15 exemplares de fios de sisal apresentaram um comportamento mais uniforme quando comparados aos ensaios em fibras isoladas. Na Figura 39, são apresentados quatro exemplares: o de maior resistência, o de maior e menor módulo de elasticidade e um quarto exemplar selecionado como típico do conjunto por apresentar resultados resistência, deformação específica e módulo de elasticidade (E) mais próximo das respectivas médias. Neste ensaio, avaliou-se a área dos fios pela massa específica, semelhante às determinações realizadas para as fibras de sisal.

Figura 39 - Curva tensão x deformação específica do ensaio de tração em fios de sisal.



Fonte: O autor, 2013.

As curvas de tensão – deformação dos fios de sisal apresentaram um comportamento que pode ser dividido em duas fases, sendo uma inicial, de acomodação das fibras (por volta de 60 e 120 MPa), com um ganho constante de rigidez do fio, e uma segunda fase, com o comportamento próximo à linearidade da curva tensão versus deformação. Depois de alcançar a as tensões máximas é observado um aspecto de pós-ruptura descontínua que pode ser atribuído a não homogeneidade das tensões entre as fibras constituintes do fio, ocasionando a ruptura das fibras mais tensionadas.

Na Tabela 7 são apresentadas as estatísticas descritivas das medidas de área, força máxima, resistência e módulo de elasticidade (E) dos fios ensaiados.

Tabela 7 - Resultado do ensaio de tração no fio de sisal.

| N= 15 | Área (mm ²) | Força máxima (N) | Resistência (MPa) | E (GPa) |
|--------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|
| Média | 65,9 x 10 ⁻² | 243,5 | 361,8 | 13,1 |
| Desvio. Padrão | ±11,1 x 10 ⁻² | ±41,2 | ±22,1 | ±1,5 |
| Coef. Variação (%) | 16,9 | 16,9 | 6,1 | 11,4 |

Fonte: O autor, 2013.

O resultado de resistência obtido no ensaio de tração de 361,8 MPa foi superior ao obtidos por MA *et al.* (2011) que obteve valores entre 131,13 MPa e 207,48 MPa, para os

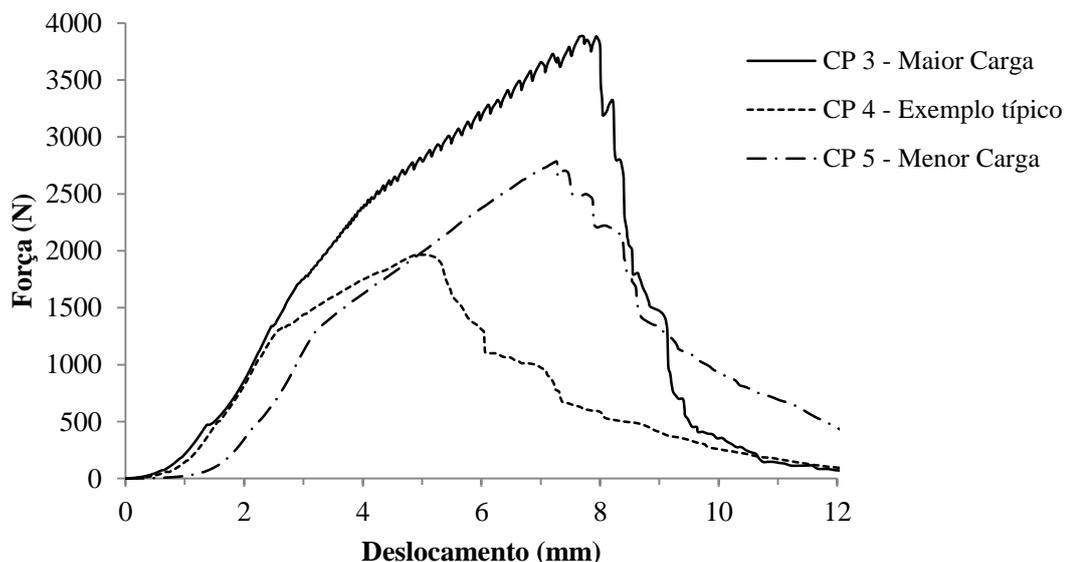
resultados de módulo de elasticidade os autores encontraram valores superiores entre 19,45 GPa e 20,39 GPa., a diferença dos resultados pode ser atribuída às torções dos fios utilizadas por MA *et al.* (2011) e os utilizados neste trabalho.

Na comparação com as fibras, pode-se observar que os fios de sisal apresentam uma redução dos valores médios do comportamento mecânico que pode ser justificado pelo fato dos fios serem fibras torcidas e com o aumento da carga no ensaio de tração ocorre um aumento do atrito entre as fibras, o que ocasiona o aumento na complexidade das tensões e a ruptura. Também foi observada uma menor variabilidade nos dados obtidos o que, segundo Carvalho (2005), pode ser explicado pelas redistribuições de tensões e deformações entre fibras adjacentes dos fios, pois para o autor, nos fios além das fibras serem tracionadas também são fletidas.

4.1.3 Ensaio de tração dos tecidos de sisal.

Os ensaios de tração em tecido sarja (TSA) foram realizados em 20 corpos de prova, sendo considerados válidos 10 corpos de prova, o comportamento das curvas força x deslocamento dos tecidos (Figura 40) apresentaram uma falta de linearidade no comportamento elástico, os corpos de prova escolhidos para caracterizar toda a amostra, apresentaram um comportamento similar, pode-se observar que próximo à força máxima apresentam uma oscilação, esse comportamento pode ser justificado pela ruptura de fibras individuais e dos fios que compõe o tecido.

Figura 40 - Curva força x deslocamento do ensaio de tração no Tecido Sisal Sarja.



Fonte: O autor, 2013.

Esse comportamento do tecido sarja se deve a pequenas variações de diâmetro, constituição e microestrutura dos fios individuais, resultando na variação das forças máximas que podem ser suportadas pelo tecido. Na Tabela 8 são apresentados os resultados do ensaio de tração do tecido de sisal sarja, sendo observada uma alta variabilidade dos resultados, principalmente em relação à força máxima.

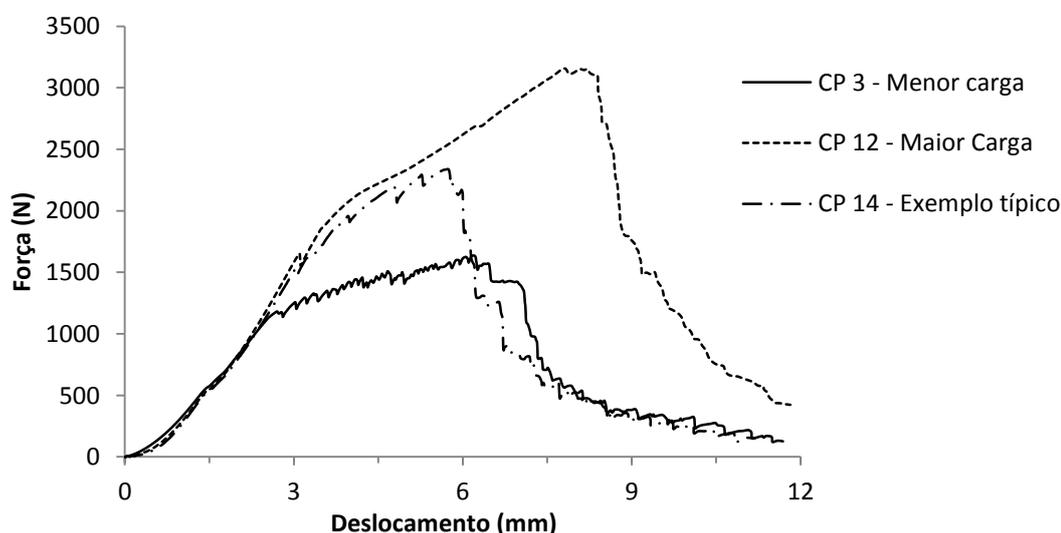
Tabela 8- Resultados do ensaio de tração obtidos para o tecido de sisal sarja.

| N=10 | Força máxima (N) | Deslocamento (mm) |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Média | 2558,4 | 12,0 |
| Desvio Padrão | ±735,6 | ±1,7 |
| Coef. Variação (%) | 28,8 | 14,3 |

Fonte: O autor, 2013.

Os ensaios de tração em tecido simples (TSI) foram realizados em 20 corpos de prova, sendo considerados válidos 14 corpos de prova. O comportamento das curvas força x deslocamento dos tecidos (Figura 41) apresentaram um comportamento semelhante ao do tecido sarja.

Figura 41 - Curvas força x deslocamento do ensaio de tração no tecido de sisal Simples (TSI).



Fonte: O autor, 2013.

A Tabela 9 apresenta os resultados do ensaio de tração no Tecido Simples, dessa forma é notada a diferença para os resultados do Tecido Sarja. No tecido simples foram obtidos resultados menores de força máxima e deslocamento, porém, vale ressaltar a diminuição na variabilidade dos resultados em relação ao Tecido Sarja.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de tração obtidos para o tecido de sisal simples.

| N=14 | Força máxima (N) | Deslocamento (mm) |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| Média | 2276,4 | 11,3 |
| Desvio Padrão | ±463,0 | ±1,0 |
| Coef. Variação (%) | 20,9 | 9,2 |

Fonte: O autor, 2013.

O Teste t foi utilizado para comparar as médias do resultado entre os tecidos TSA e TSI. Na Tabela 10 são apresentadas as médias da variável força máxima e o resultado do Teste t. Ao comparar os resultados de força máxima dos tecidos não ficou comprovada diferença significativa entre os resultados, ou seja, apesar do TSA possuir uma gramatura 1095g/cm^2 seus resultados foram próximos aos obtidos por TSI que possuir gramatura de 650g/cm^2 . O fato de não ser encontrada diferença significativa pode ser explicada pelo formato sigmoidal dos tecido, no caso do TSI os fios ficam melhor alinhados durante o ensaio de tração, isso gera um melhor desempenho durante o ensaio e também o maior aproveitamento dos corpos de prova.

Tabela 10 - Teste "t" para a variável, força máxima, para o ensaio de tração dos tecidos de sisal Simples e Sarja.

| Variável | Médias | | Teste "t" | Probabilidade(%) |
|------------------|---------------|------------|------------------|-------------------------|
| | TSA | TSI | | |
| Força máxima (N) | 2558,4 | 2276,1 | 0,74 | 24,1ns |

ns - não significativo

Fonte: O autor, 2014.

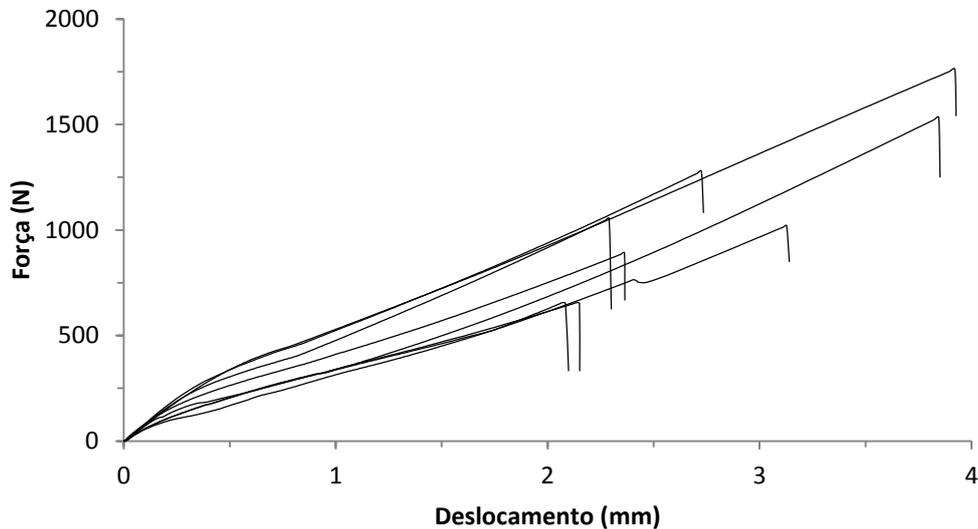
4.1.4 Ensaio de Tração da Resina Poliéster

Os ensaios de tração destes polímeros usados como matriz têm como objetivo caracterizar o material que posteriormente vai fazer parte do compósito. Os valores assim obtidos intervêm nos cálculos do módulo de elasticidade teórico e sua validação com os resultados dos ensaios.

Foram confeccionados corpos de prova com a resina UCEFLEX UC 5530-M catalisada com MEK ao 1% em peso da resina a temperatura ambiente (25°C).

As curvas tensão x deformação obtidas nos ensaios de tração (Figura 42) mostram que a matriz de poliéster apresenta um comportamento frágil quando ensaiada em tração, sem capacidade de absorver energia após o trincamento da matriz.

Figura 42 - Curvas força x deslocamento no ensaio de tração da matriz poliéster.



Fonte; O autor, 2014.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados de força máxima, resistência e módulo de elasticidade (E) da matriz poliéster. Apesar do comportamento bastante similar entre as curvas, variabilidade encontrada foi muito alta por se tratar de um material sintético.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração em matriz poliéster.

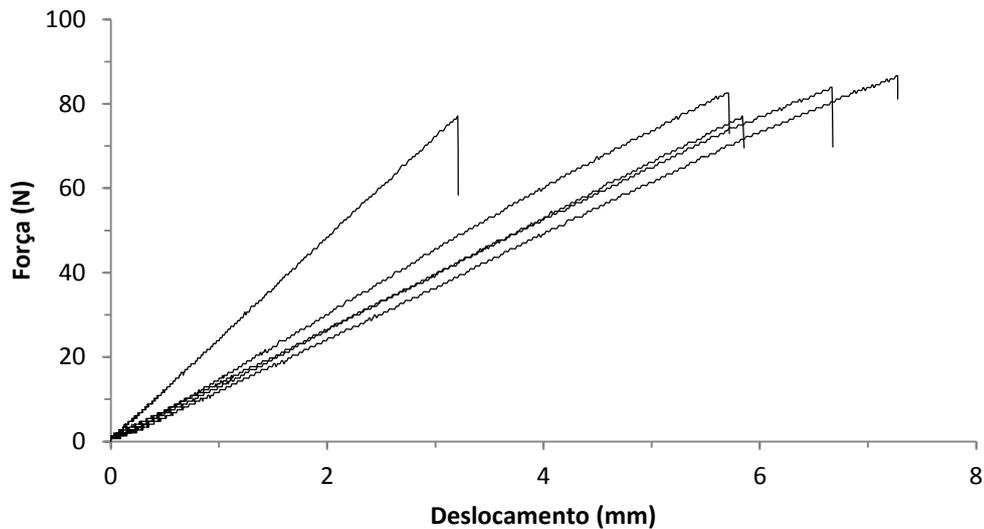
| N= 6 | Força máxima (N) | Resistência (MPa) | E (GPa) |
|--------------------|------------------|-------------------|---------|
| Média | 1276,8 | 32,0 | 1,9 |
| Desvio. Padrão | ±311 | ±8,3 | ±0,4 |
| Coef. Variação (%) | 24,4 | 25,9 | 22,9 |

Fonte: O autor, 2014.

4.1.5 Ensaio Flexão Resina Poliéster

Nas curvas tensão versus deformação para o ensaio de flexão (Figura 43), foi observado um comportamento linear durante todo o carregamento, e uma ruptura brusca característica de material frágil.

Figura 43 – Curvas força x deslocamento na flexão da matriz poliéster.



Fonte: O autor, 2014.

São apresentados na Tabela 12 os resultados do ensaio de tração na matriz poliéster, pode ser observada uma uniformidade dos resultados pelo baixo coeficiente de variação encontrado, os resultados estão condizentes com os fornecidos pela ELEKEIROZ Ltda.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de flexão em matriz poliéster.

| N= 5 | Resistência (MPa) | Força máxima. (N) | E (GPa) |
|--------------------|-------------------|-------------------|---------|
| Média | 60,2 | 81,4 | 2,1 |
| Desvio Padrão | ±3,1 | ±4,4 | ±0,2 |
| Coef. Variação (%) | 5,2 | 5,4 | 9,8 |

Fonte: O autor, 2014.

4.2 Ensaio mecânicos nas estruturas sanduíches.

Nesta etapa serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos (Dureza Shore, Compressão Transversal e Longitudinal e Flexão em 3 pontos) das estruturas sanduíche, bem como a análise e significado desses resultados. Antes de apresentar os resultados mecânicos, serão apresentadas as micrografias das estruturas sanduíches, estas imagens são de grande relevância para compreender os resultados e comportamentos das estruturas sanduíches durante os ensaios.

A análise dos resultados mecânicos foi feita comparando uma estrutura reforçada com tecido de sisal com uma estrutura reforçada com tecido de fibra de vidro, sempre obedecendo ao critério da gramatura (g/cm^2) das amostras, também foram feitas comparação entre as

estruturas reforçadas com tecido de sisal e entre as estruturas reforçadas com tecido de fibra de vidro.

A configuração das estruturas sanduíches produzidas, bem como a espessura final e a fração volumétrica ($\%V_f$) são apresentadas na Tabela 13. Foi observado que as estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal obtiveram $\%V_f$ abaixo das estruturas reforçadas com fibra de vidro, a diferença varia entre 12,8% a 39,5%, a influência desses valores foram observadas nos ensaios mecânicos.

Tabela 13 - Nomenclatura e especificações das estruturas sanduíches desenvolvidas.

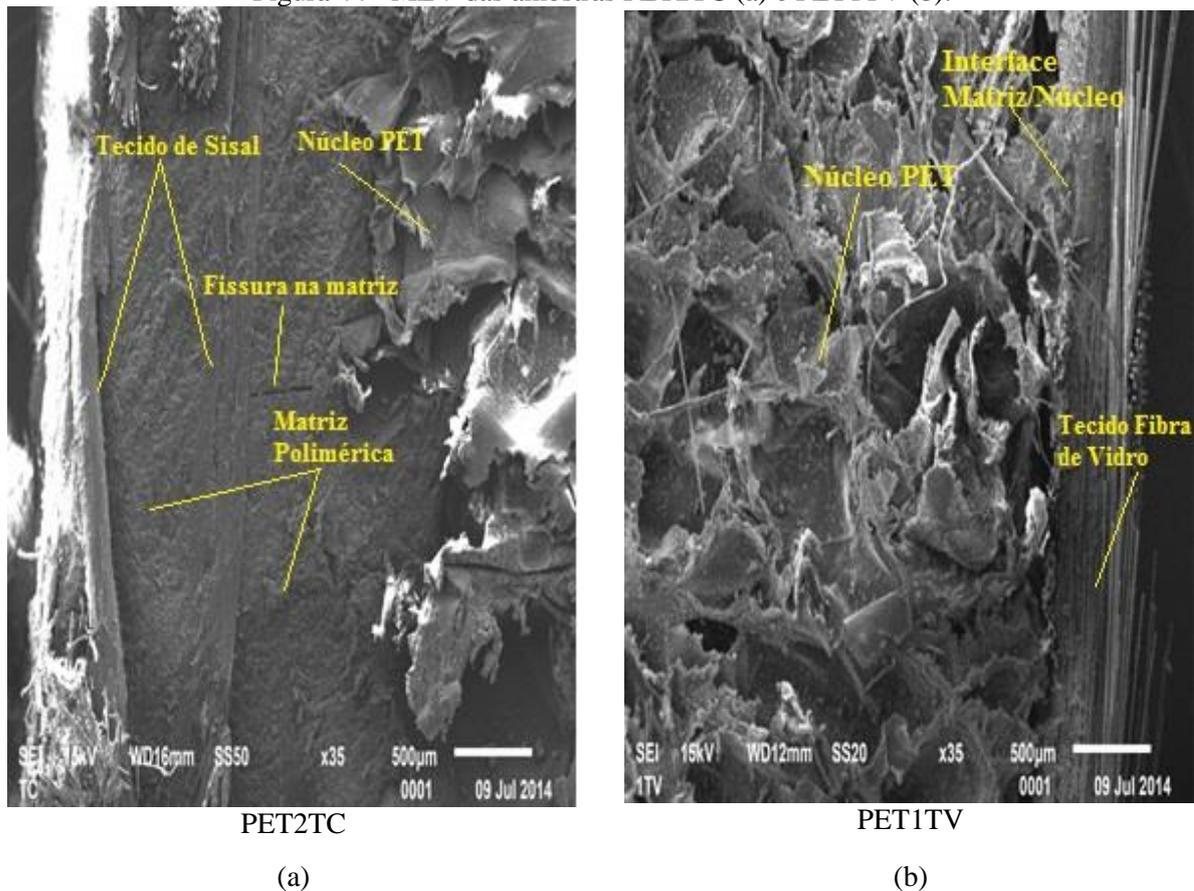
| Amostras | Tecido | Gramatura total (g/cm ²) | Faces | Espessura do sanduíche (mm) | Espessura das faces (mm) | $\%V_f$ das faces |
|----------|-----------------|--------------------------------------|-----------|-----------------------------|--------------------------|-------------------|
| PET2TC | Sisal Cerchiaro | 324 | 2 tecidos | 15 | 3 | 23 |
| PET1TSI | Sisal Simples | 650 | 1 tecido | 15 | 3 | 34 |
| PET1TSA | Sisal Sarja | 1095 | 1 tecido | 17 | 5 | 27 |
| PET1TV | Vidro | 330 | 1 tecido | 13 | 1 | 38 |
| PET2TV | Vidro | 660 | 2 tecidos | 13,2 | 1,2 | 39 |
| PET3TV | Vidro | 990 | 3 tecidos | 13,5 | 1,5 | 41 |

Fonte: O autor, 2014.

4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura das estruturas sanduíches

No MEV da amostra PET2TC (Figura 44a) as duas camadas de tecido de sisal ficam intercaladas pela matriz polimérica. A imagem apresentada é do corpo de prova após o ensaio de flexão, onde foi constatada uma fissura na matriz que, devido ao tecido de sisal, não se propaga até a superfície, ou seja, fibras de sisal, mesmo após a ruptura, ainda manteve os corpos de prova coesos. Na Figura 44b fica evidente a diferença da amostra PET1TV, pois a resina impregnou de maneira mais eficaz os tecidos de fibra de vidro. Em relação ao $\%V_f$ das amostras, no caso do PET2TC a espessura das lâminas é superior às da amostra PET1TV, há um acúmulo de matriz polimérica entre os tecidos e entre tecido e núcleo, esse comportamento pode justificar o maior $\%V_f$ da estrutura sanduíche reforçada com tecido de sisal.

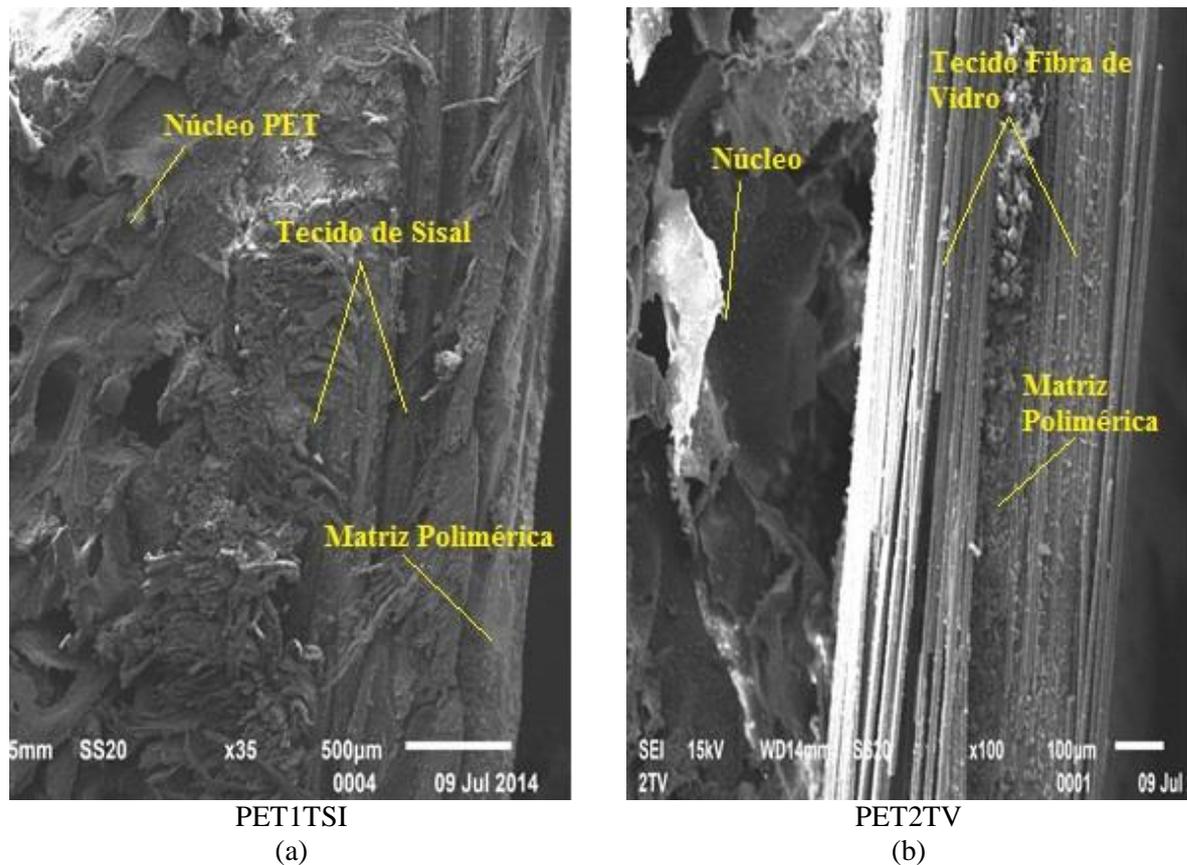
Figura 44 - MEV das amostras PET2TC (a) e PET1TV (b).



Fonte: O autor, 2014.

No MEV da amostra PET1TSI (Figura 45a) fica evidente a dificuldade que a matriz tem de impregnar o tecido, pois como foi visto na literatura, quanto maior a torção dos fios, mais difícil é a impregnação da resina (MA *et al.* 2014), já impregnação do núcleo pela matriz foi melhor em comparação à amostra PET2TV (Figura 45b), onde pode ser visto uma grande quantidade de espaço vazios entre o núcleo o tecido, que deveriam estar ocupados pela matriz. As duas camadas de tecido de fibra de vidro é claramente vista na imagem da amostra PET2TV, a interação da matriz no tecido de fibra de vidro é maior do que no tecido de sisal, isso se deve ao fato do tecido unidirecional de fibra de vidro ser composto por feixes de fibras e também pelo fato de se tratar de um material sintético.

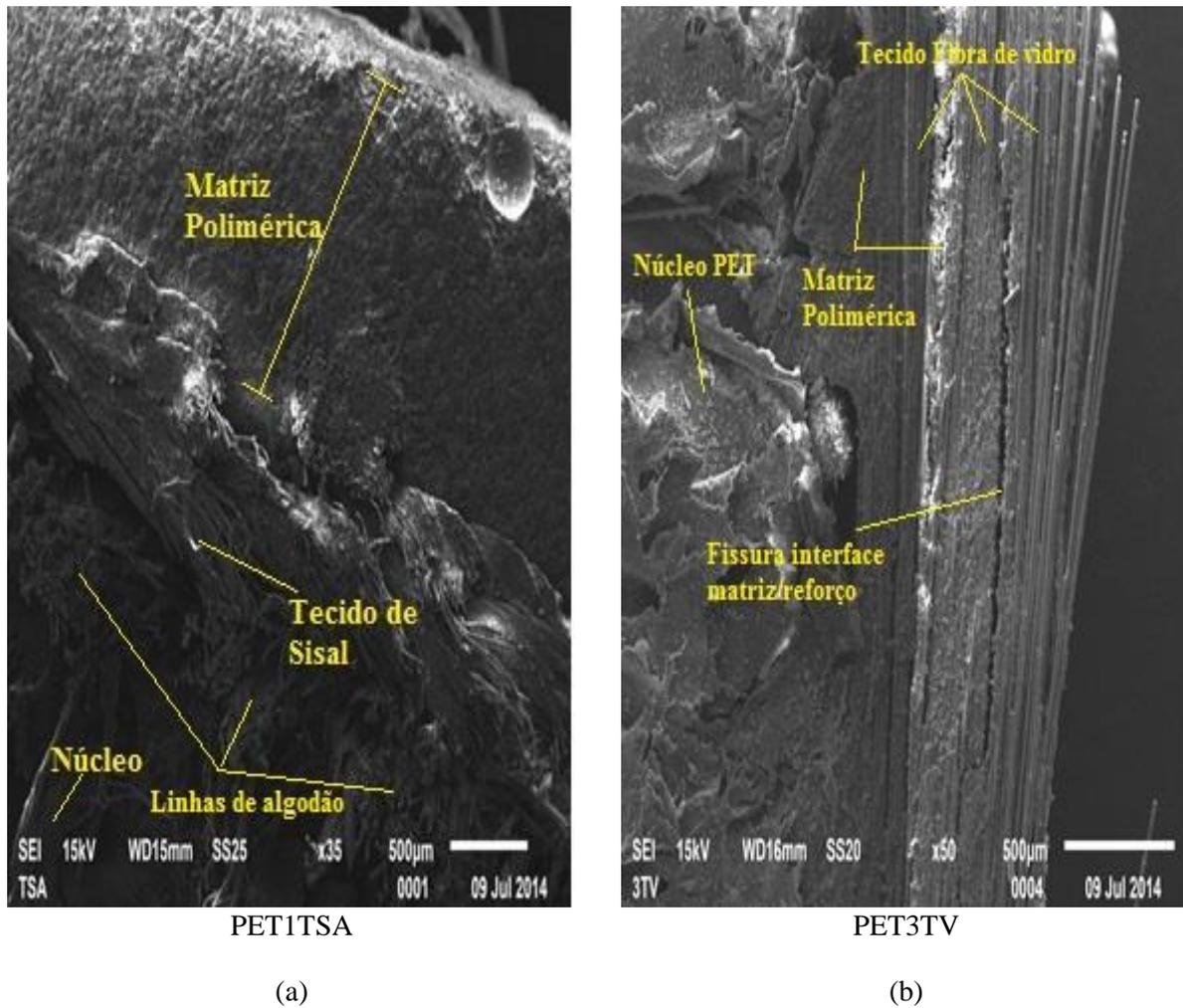
Figura 45 - MEV das amostras PET1TSI (a) e PET2TV (b).



Fonte: O autor, 2014.

No MEV da amostra PET1TSA (Figura 46a) a impregnação da matriz no tecido foi ainda mais difícil, dessa forma houve um acúmulo de resina na parte superior da estrutura, esse acúmulo de resina na superfície pode ter influência no ensaio de dureza, além de contribuir para o aumento da espessura das lâminas, além dos fios de sisal torcidos, também são observadas na imagem as linhas de algodão utilizadas no urdume para manter os fios de sisal alinhados. Na amostra PET3TV (Figura 46b) ocorre uma fissura na interface matriz/reforço, proveniente do ensaio de flexão. Apesar de a configuração apresentar três camadas de tecido, a resina conseguiu impregnar entre os tecidos. Fica constatado que a resina, diferente de outras amostras, preencheu alguns espaços vazios do núcleo aumentando, assim, a interação núcleo e lâmina.

Figura 46 - MEV das amostras PET1TSA (a) e PET3TV (b).



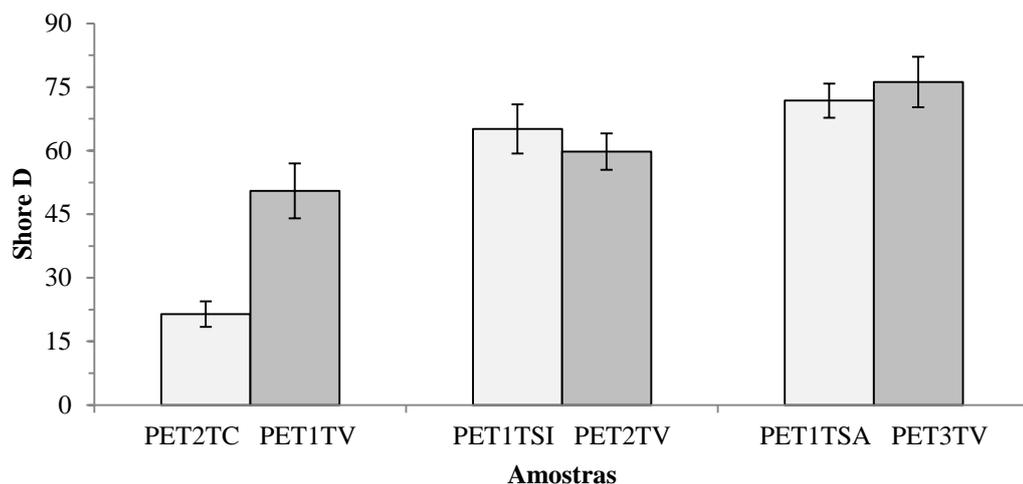
Fonte: O autor, 2014.

4.2.2 Dureza Shore D

Na Figura 47 são apresentados os resultados de dureza Shore D para todas as amostras. Em relação as amostras PET2TC e PET1TV, é observado que a estrutura sanduiche com reforço sintético apresenta o melhor resultado com uma diferença de 57,6% para a estrutura sanduiche com reforço vegetal. Já em relação às amostras PET1TSA e PET2TV a diferença dos resultados ficou em 8,1%, nessa configuração a estrutura sanduiche reforçada com sisal apresenta uma maior dureza com 65,1 Shore D. No caso das amostras PET1TSA e PET3TV, os resultados também foram próximos, a diferença ficou em 5,8%, sendo que nesta comparação, a estrutura sanduíche reforçada com tecido sintético apresenta melhor resultado com 76,2 Shore D. Em relação às amostras com tecido de sisal, o melhor resultado ficou por conta da amostra PET1TSA, vale ressaltar, porém, que como foi observado no MEV dessa

amostra, houve um acúmulo de resina na superfície da estrutura sanduíche, ou seja, o ensaio de dureza pode não ter levado em consideração o tecido de sisal como reforço, e sim, apenas a matriz poliéster. Já na comparação entre as estruturas sanduíches reforçadas com tecidos de fibra de vidro, pode-se observar um aumento crescente, conforme é adicionado mais camadas de tecido, dessa forma, o melhor resultado foi obtido pelo PET3TV. No caso das amostras reforçadas com tecido de sisal a fração volumétrica contribuiu pra o aumento da dureza. Garay *et al.*(2011) para uma estrutura sanduíche com uma única camada de tecido de vidro nas faces, obteve 60 Shore D de dureza, valor esse superior ao encontrado nesse trabalho, quando utilizado duas camadas de tecido de fibra de vidro, porém, com núcleo de PVC os autores encontraram o valor de 59 Shore D, ou seja, praticamente o mesmo obtido pela estrutura PET2TV, que também possui duas camadas de tecido, só que o núcleo é de PET.

Figura 47 - Resultados de dureza Shore D dos compósitos sanduíches.



Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 14, em relação às estruturas sanduíches com reforço sintético ficou evidenciado um aumento da dureza conforme aumentam o número de camadas de tecido nas faces. Em relação às estruturas com reforço vegetal o melhor resultado foi o da estrutura reforçada com o tecido de maior gramatura, nesse caso o PET1TSA. A espessura das faces também tem ligação direta com a dureza do material tanto nas estruturas com reforço sintético quanto do reforço vegetal. A amostra PET2TC obteve resultados de dureza inferior em relação às outras amostras. A amostra que obteve o melhor resultado foi o PET3TV com 76,2 Shore D, seguido pelo PET1TSA com 71,8 Shore D. A maior variabilidade dos resultados foram das amostras PET2TC com 14,1%, valor aceitável por se tratar de fibras vegetais, e o PET1TV com 12,8%.

Tabela 14 - Resultado de dureza Shore D dos diferentes sanduíches.

| Amostras → | PET2TC | PET1TSI | PET1TSA | PET1TV | PET2TV | PET3TV |
|--------------------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Média | 21,4 | 65,1 | 71,8 | 50,5 | 59,8 | 76,2 |
| Desvio Padrão | 3,0 | 5,8 | 4,1 | 6,5 | 4,3 | 5,9 |
| Coef. Variação (%) | 14,1 | 8,9 | 5,6 | 12,8 | 7,2 | 7,8 |

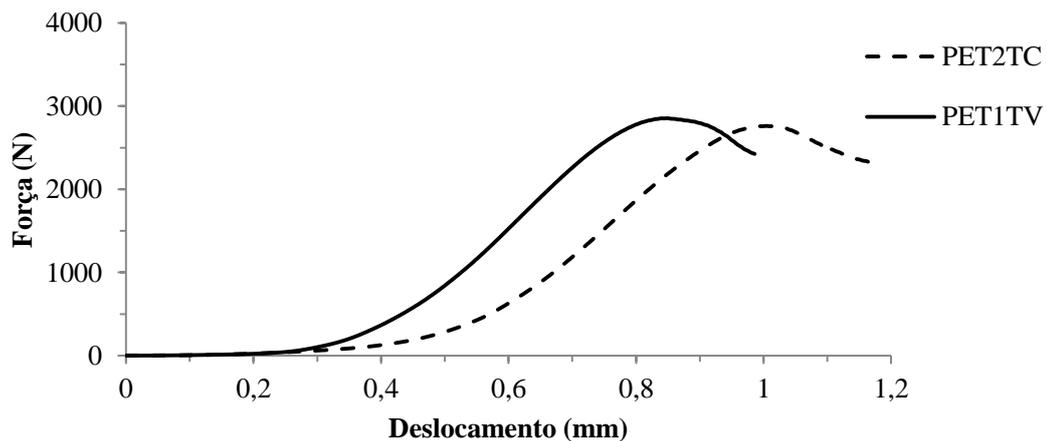
Fonte: O autor, 2014.

O aumento da dureza em materiais compósitos é uma propriedade normalmente procurada, pois diminui o desgaste e o dano por riscos e similares.

4.2.3 Compressão Transversal.

Em todos os corpos de prova, a ruptura ocorreu por compressão do material do núcleo. A Figura 48 apresenta as curvas força x deslocamento das amostras PET2TC e PET1TV. Pode ser observado que os materiais apresentam o comportamento inicial devido ao aumento de carga lento, em seguida uma linearidade até atingir o carregamento máximo, logo depois ocorre uma pequena deformação plástica e a diminuição da carga. Vale salientar que as faces não sofreram qualquer alteração, não sendo observado qualquer tipo de trincas em suas superfícies.

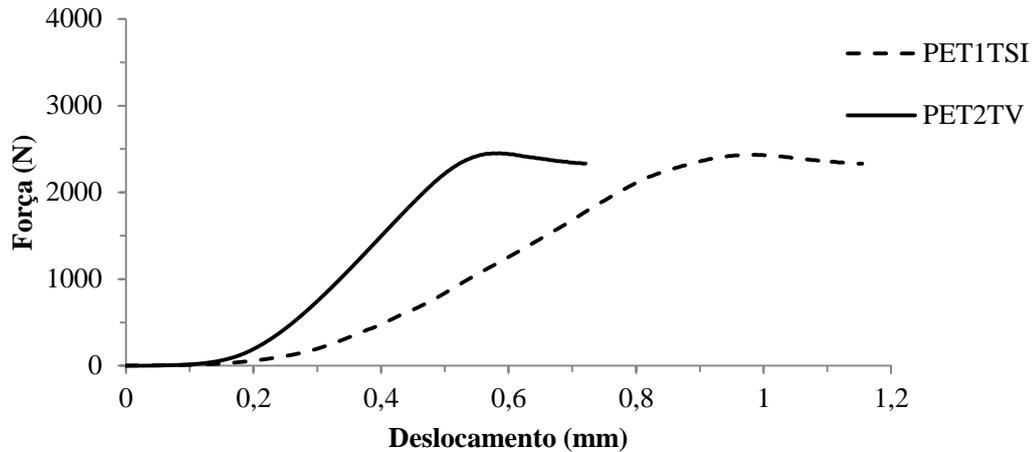
Figura 48 - Curvas força x deslocamento das amostras PET2TC e PET1TV para ensaio de compressão transversal.



Fonte: O autor, 2014.

O comportamento das curvas entre as amostras PET1TSI e PET2TV é similar (Figura 49), porém o PET1TSI apresenta maior deslocamento, enquanto o PET2TV apresenta maior linearidade e conseqüentemente, maior rigidez.

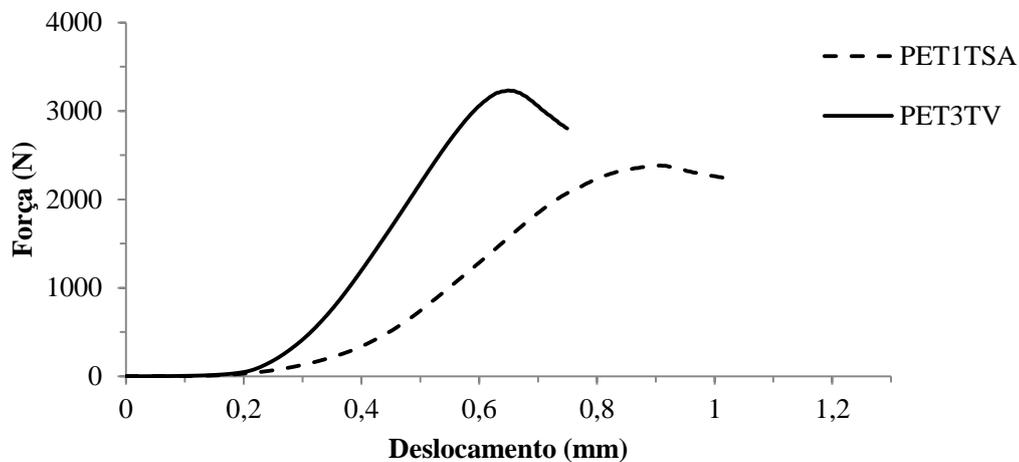
Figura 49 - Curvas força x deslocamento das amostras PET1TSI e PET2TV para ensaio de compressão transversal.



Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 50 foi notada uma linearidade mais evidente na curva da amostra PET3TV, já a amostra PET1TSA apresenta um maior deslocamento e uma maior deformação plástica ao alcançar o carregamento máximo.

Figura 50 - Curvas força x deslocamento das amostras PET1TSA e PET3TV para ensaio de compressão transversal.

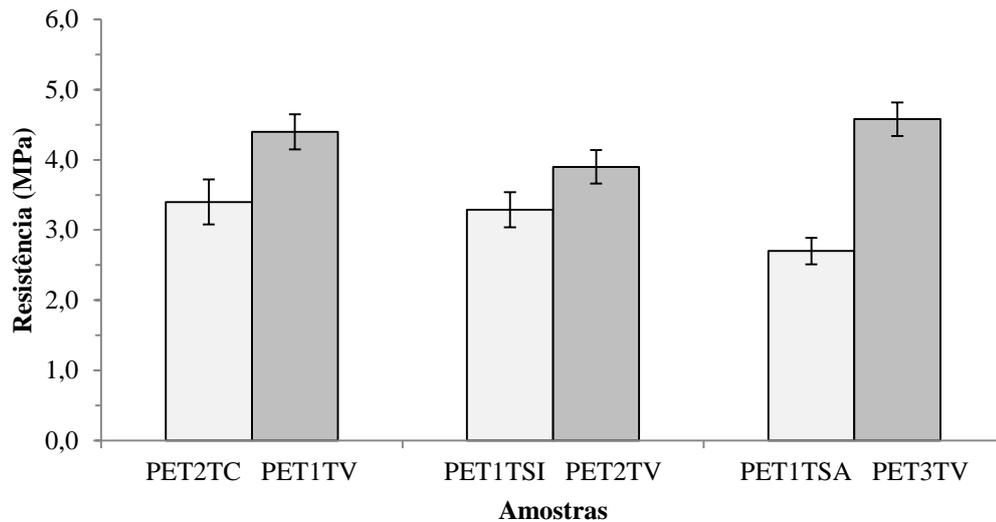


Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 51 são apresentados os resultados de resistência das estruturas sanduíches. Entre a resistência do PET1TV e do PET2TC foi encontrada uma diferença de 22,7%. Esse melhor comportamento da estrutura sanduiche com tecido de fibra de vidro pode ser atribuído à maior fração volumétrica. Analisando as amostras PET1TSI e PET2TV foi encontrada uma diferença de 15,4% entre os resultados, mais uma vez o maior % V_f das estruturas sanduiche reforçadas com tecido de fibra de vidro contribuiu para obtenção do melhor resultado, porém o PET1TSI mostrou-se competitivo nesta comparação. Já em relação às amostras PET1TSA e PET3TV a diferença aumentou para 41,3%. Em relação às estruturas reforçadas com tecido de

fibra de vidro, o melhor resultado foi obtido pelo PET3TV, os resultados obtidos para essas estruturas foi superior aos obtidos por GARAY *et al.* (2011) que utilizou núcleo de PVC e moldagem por compressão em molde de aço inox, isto mostra que a conformação por infusão à vácuo, contribuiu para obtenção de estruturas sanduíches com melhores resultados mecânicos.

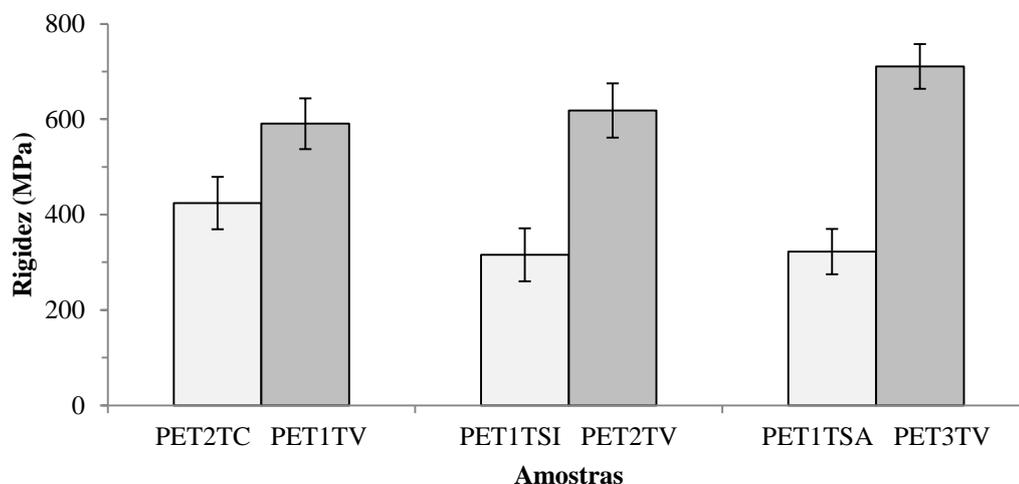
Figura 51 - Resultados de resistência no ensaio de compressão transversal dos compósitos sanduíches.



Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 52 são apresentados os resultados de rigidez das estruturas sanduíches, ficou evidente que as estruturas reforçadas com tecido de fibra de vidro obtiveram melhores resultados em relação às estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal. Em relação as amostras PET2TC e PET1TV a diferença entre os resultados de rigidez ficou em 28,15%, a diferença aumenta entre as amostras PET1TSI e PET2TV alcançando 48,9% e aumenta ainda mais entre as amostras PET1TSA e PET3TV atingindo uma diferença dos resultados de rigidez de 54,6%. Em relação às estruturas reforçadas com tecido sintético, observou-se um aumento nos resultados de rigidez obedecendo ao critério do aumento do número de camadas e da fração volumétrica, ou seja, conforme o número de camadas aumenta é possível obter melhores resultados de rigidez, porém essa diferença não se mostrou significativa. Já em relação às estruturas reforçadas com tecido de sisal, não foi possível observar um critério entre as amostras, pois a amostra PET2TC que possui o menor $\%V_f$ (23%), foi a que apresentou o melhor resultado com 424,3 MPa, já as estruturas PET1TSI e PET1TSA obtiveram resultados muito próximos, sem diferença significativa.

Figura 52-Resultados de rigidez no ensaio de compressão transversal dos compósitos sanduíches.



Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 15 é apresentada a análise estatística dos resultados obtidos no ensaio de compressão transversal. Em relação às amostras PET2TC e PET1TV, a análise apresentou diferença altamente significativa tanto para a resistência quanto para a rigidez, sendo o melhor comportamento apresentado pela amostra PET1TV. Comparando-se as amostras PET1TSI e PET2TV, em relação à resistência não houve diferença significativa entre as amostras, já em relação à rigidez a diferença encontrada é altamente significativa, tendo a amostra PET2TV obtido quase o dobro do resultado encontrado na amostra PET1TSI. As amostras PET1TSA e PET3TV também apresentaram diferenças altamente significativas, tendo mais uma vez as estruturas reforçadas com tecido sintético apresentado o melhor desempenho.

Tabela 15 - Teste "t" para as variáveis resistência e rigidez das diferentes estruturas sanduíches na compressão transversal.

| Variáveis | Médias | | Teste "t" | Probabilidade (%) |
|-------------------|-------------|-------------|-----------|-------------------|
| | PET2TC | PET1TV | | |
| Resistência (MPa) | 3,4 ±0,32 | 4,4±0,25 | 5,9 | 0,20** |
| Rigidez (N/mm) | 424,3 ±55,1 | 590,6 ±53,3 | 5,6 | 0,24** |
| | PET1TSI | PET2TV | | |
| Resistência (MPa) | 3,3 ±0,25 | 3,9 ±0,24 | 2,9 | 21,3 ns |
| Rigidez (N/mm) | 315,9 ±55,6 | 618,3 ±57,1 | 6,5 | 0,14** |
| | PET1TSA | PET3TV | | |
| Resistência (MPa) | 2,7 ±0,19 | 4,6 ±0,24 | 21,7 | 0** |
| Rigidez (N/mm) | 322,4 ±47,6 | 710,5 ±46,8 | 9,5 | 0,03** |

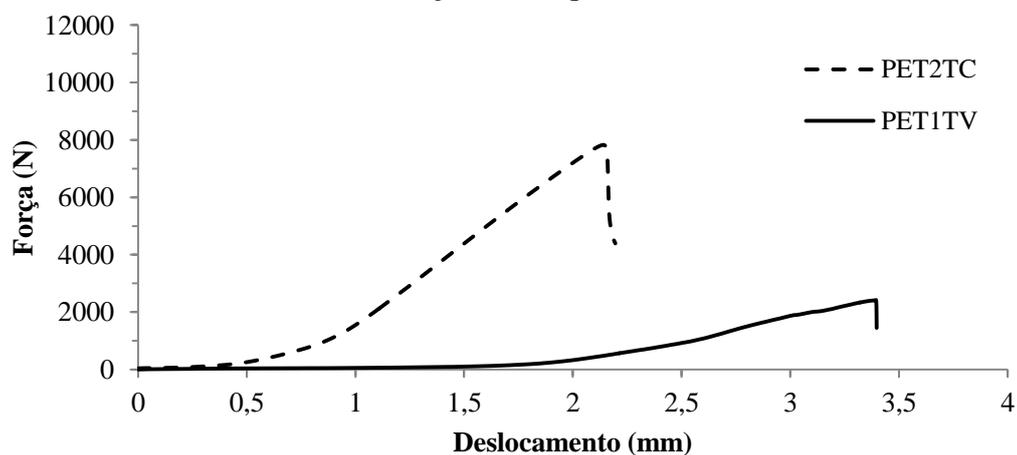
**p≤ 1%. ns - não significativo

Fonte: O autor, 2014.

4.2.4 Compressão Longitudinal

Em relação às curvas força x deslocamento dos corpos de prova PET2TC e PET1TV apresentadas na Figura 53, foi observado um aumento de carga lento, podendo ser confundido com acomodação das garras, porém, isso ocorre, pois o aumento de carga é lento, sendo que só é possível observar uma diferença no comportamento da curva por volta dos 500 N, isto se tratando do PET2TC. Já em relação ao PET1TV, esse comportamento da curva, buscando uma linearidade, ocorre por volta de 190 N. A linearidade da curva na amostra PET2TC ficou mais evidente do que na amostra PET1TV devido à diferença dos resultados, pois, como a amostra PET2TC suporta uma carga maior, a linearidade da curva da amostra PET1TV não ficou evidenciada.

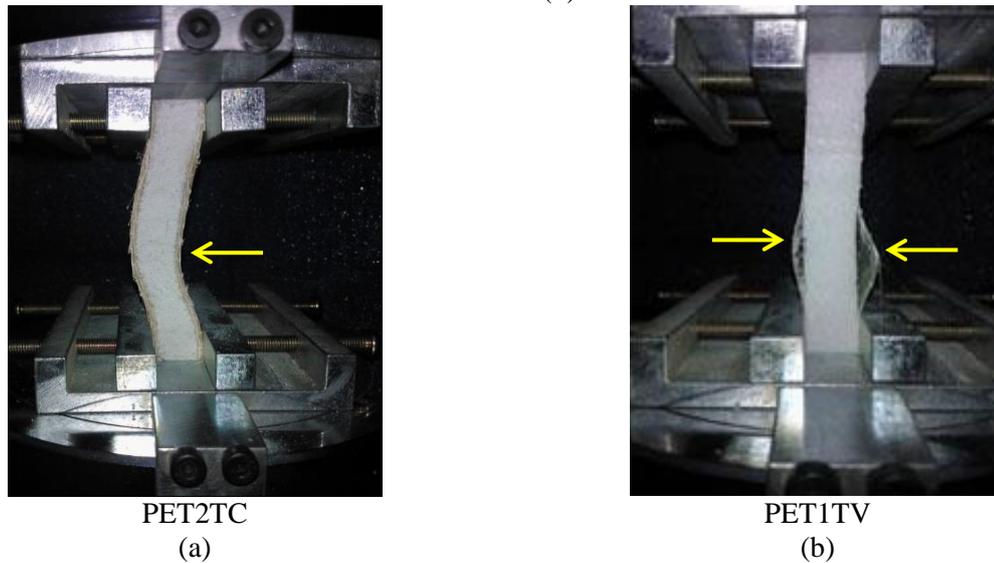
Figura 53 - Curvas força x deslocamento das amostras PET2TC e PET1TV para ensaio de compressão longitudinal.



Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 54 é mostrado o comportamento das amostras PET2TC e PET1TV ao ensaio de compressão longitudinal. Foram observados dois comportamentos, no caso do PET2TC (Figura 54a) é observada uma deformação por flambagem das lâminas do sanduíche, porém, sem a ruptura do núcleo, já na estrutura sanduíche PET1TV (Figura 54b) ocorre uma flambagem das faces superior e inferior e como consequência a delaminação das faces. Essa delaminação sugere uma fraca interação entre as faces e o núcleo de PET, o que por consequência resulta numa baixa resistência a compressão longitudinal.

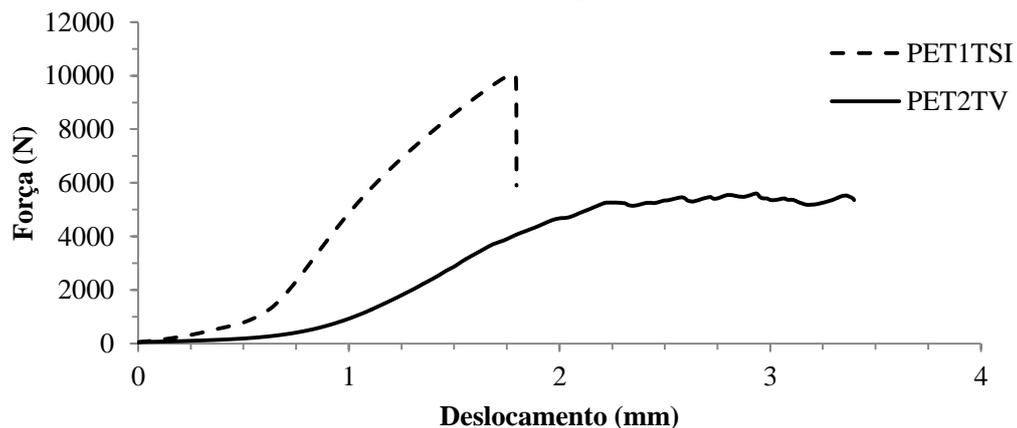
Figura 54 - Corpos de prova após o ensaio de compressão longitudinal para as amostras PET2TC (a) e PET1TV (b).



Fonte: O autor, 2014.

As curvas das amostras PET1TSI e PET2TV (Figura 55) apresentaram comportamentos completamente diferentes. Na amostra PET1TSI, a curva começa a apresentar linearidade por volta dos 850 N, alcançando seu máximo em 1 kN, em seguida a ruptura é característica de material frágil. A curva da amostra PET2TV não possui linearidade, e também não foi constatado um pico característico ao atingir a força máxima, o comportamento da curva na amostra PET2TV é justificado na Figura 56.

Figura 55 - Curvas força x deslocamento das amostras PET1TSI e PET2TV para ensaio de compressão longitudinal.

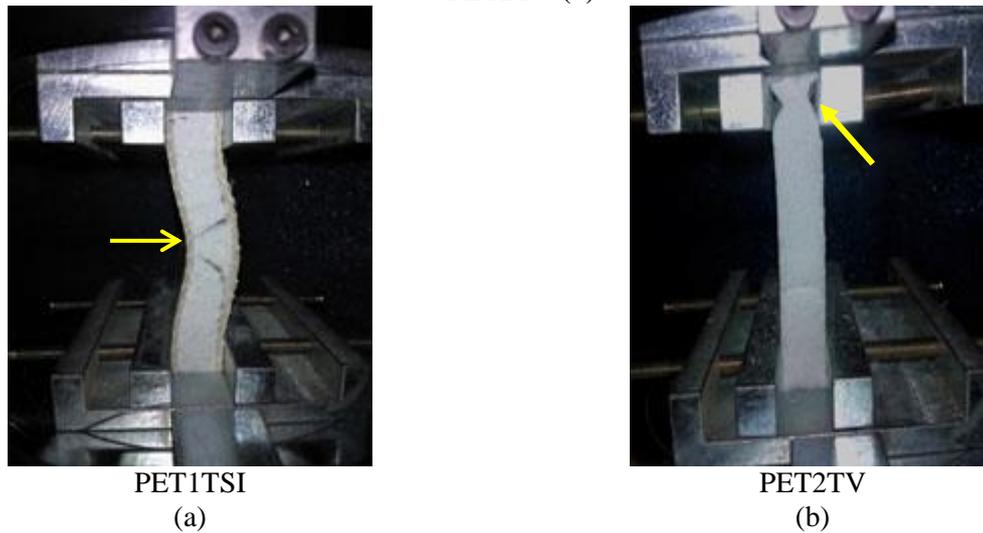


Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 56 são apresentados os comportamentos das amostras PET1TSI e PET2TV. Na amostra PET1TSI (Figura 56a) houve uma deformação por flambagem das lâminas do sanduíche, seguido da ruptura do núcleo, enquanto que no PET2TV (Figura 56b) ocorre um

comportamento bastante distinto das demais amostras, que é o esmagamento por compressão da zona superior da estrutura sanduíche, esse comportamento foi notado em todos os corpos de prova dessa amostra, como o material não sofreu flambagem, nem rompeu por cisalhamento do núcleo, sua ruptura não foi detectada no gráfico força x deslocamento.

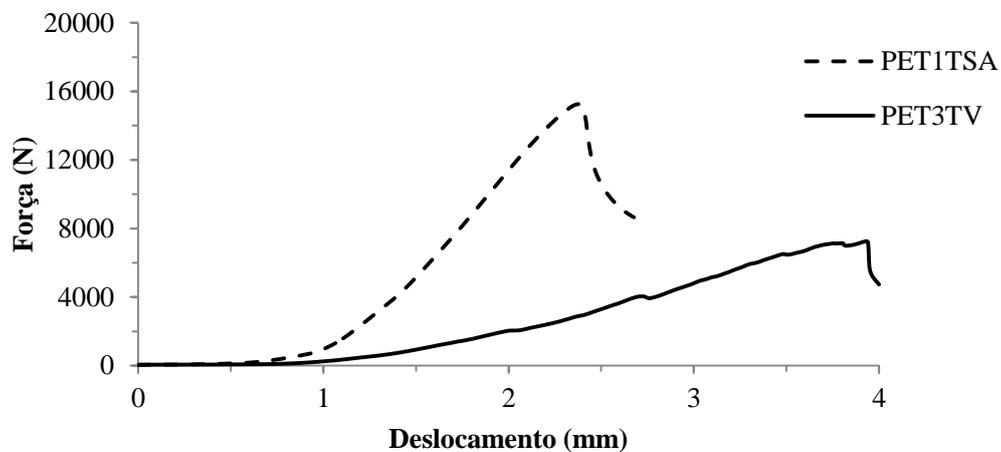
Figura 56 - Corpos de prova após o ensaio de compressão longitudinal para as amostras PET1TSI (a) e PET2TV (b).



Fonte: O autor 2014.

Na Figura 57 são apresentadas as curvas força x deslocamento das amostras PET1TSA e PET3TV, pode observar que o PET1TSA apresenta uma linearidade bem definida em relação ao PET3TV, que apesar de suportar uma carga inferior, apresenta um maior deslocamento.

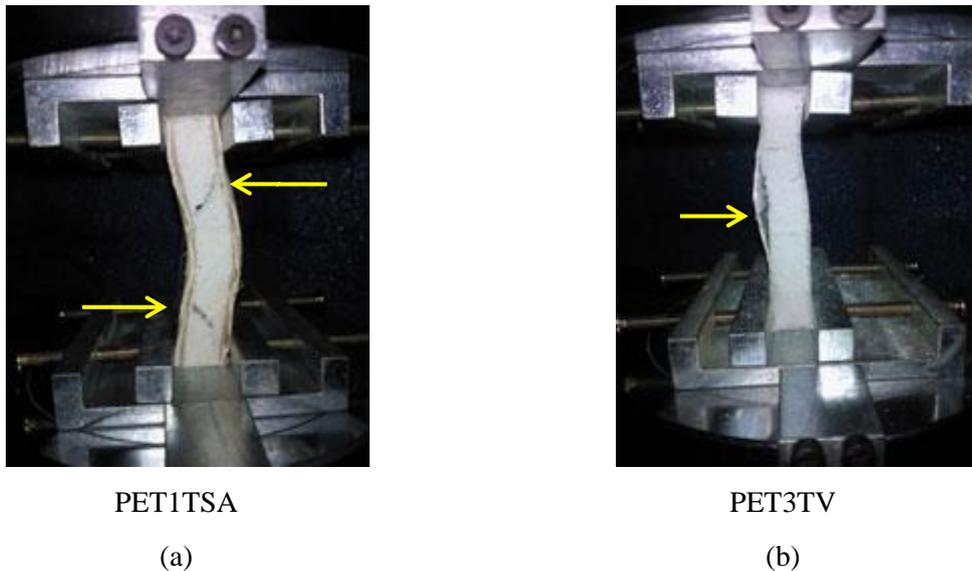
Figura 57 - Curvas força x deslocamento das amostras PET1TSA e PET3TV para ensaio de compressão longitudinal.



Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 58 a análise é feita pra as amostras PET1TSA e PET3TV, o comportamento apresentado pela amostra PET1TSA (Figura 58a) é bem similar ao apresentado pelo PET1TSI anteriormente, ocorre uma flambagem das lâminas do sanduíche seguido do trincamento da face superior e a ruptura do núcleo por cisalhamento. Já na amostra PET3TV (Figura 58b) quando o corpo de prova começa a deformar por flambagem, ocorre a delaminação da face inferior e a ruptura do núcleo.

Figura 58 - Corpos de prova após o ensaio de compressão longitudinal para as amostras PET1TSA (a) e PET3TV (b).

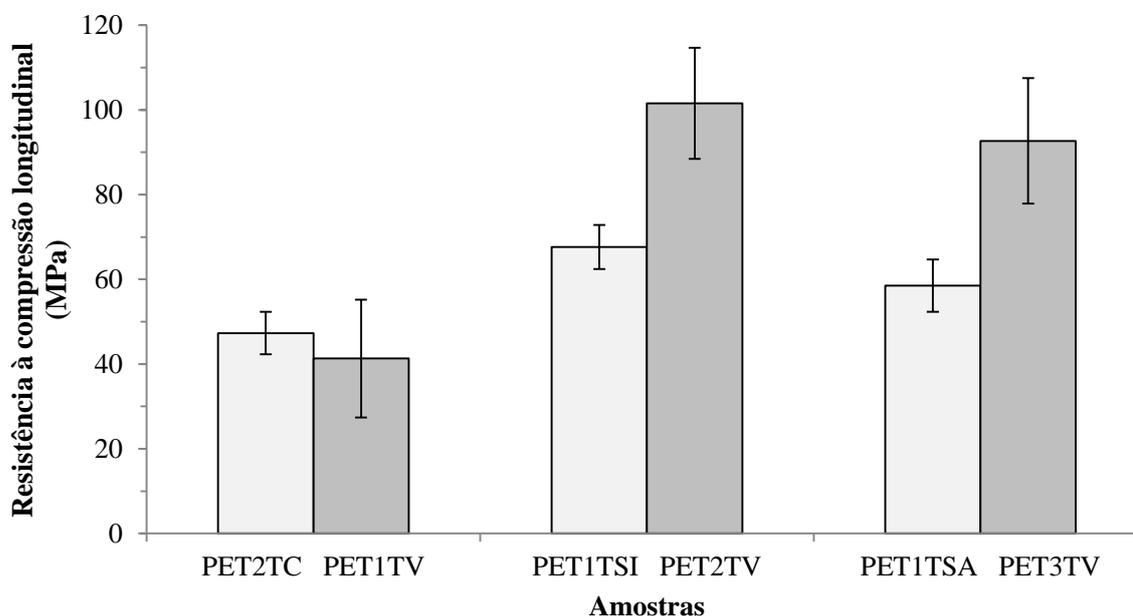


Fonte: O autor, 2014.

São apresentados na Figura 59 os resultados de resistência à compressão longitudinal das estruturas sanduíches. Entre as amostras PET2TC e PET1TV fica constatado o melhor comportamento da estrutura sanduiche com tecido de sisal, como também menores dispersões dos dados em comparação às estruturas sanduiches reforçada com tecido de fibra de vidro, a diferença entre os resultados ficou em 12,7%. Apesar de possuir uma menor dispersão dos dados às amostras de PET1TSI obtiveram resultados inferiores às amostras de PET2TV, com uma diferença de 33,4%. O melhor resultado de resistência das amostras de PET2TV pode se justificar pela menor espessura das faces em relação às amostras PET1TSI, e a diferença entre as espessuras das lâminas chega a 60%. Mais uma vez as estruturas sanduíches com reforço sintético (PET3TV) foram superiores aos com reforço vegetal (PET1TSA). Apesar de ter demonstrado um melhor interface núcleo/ face, onde não foi observado delaminação em nenhuma das amostras, as estruturas com tecido de sisal sofrem com a espessura das faces que por serem bastante superiores, acabam influenciando diretamente no calculo dos resultados. A diferença entre o resultado do PET1TSA e PET3TV ficou em 36,9%.

Realizando uma comparação entre os resultados de resistência à compressão longitudinal das estruturas sanduíches reforçada com tecido de sisal, vê-se que o melhor resultado foi alcançado pela amostra PET1TSA, que também apresenta a maior fração volumétrica de reforço nas lâminas, com 34%. Já em relação às estruturas sanduíches reforçadas com tecido de fibra de vidro, o melhor resultado foi da amostra PET2TV, apesar das amostras possuírem % V_f próximas, o resultado da amostra PET1TV ficou abaixo das demais, quando poucas camadas de fibra de vidro são utilizadas na face do compósito sanduíche, o maior responsável pela resistência é o núcleo. O resultado obtido pelo PET1TV foi inferior ao encontrado por Garay *et al.* (2011), os autores encontraram uma resistência à compressão longitudinal de 103,7 MPa, porém, não são apresentadas as espessuras do sanduíche, o que poderia caracterizar esse alto valor encontrado. Quando utilizado o núcleo de PVC, os autores obtêm para as estruturas com dois e três tecidos de fibra de vidro, 126,1 MPa e 152,1 MPa, respectivamente. Os valores de fração volumétrica e espessura dos sanduíches são variáveis importantes para a análise e interpretação dos resultados mecânicos, mas os autores não apresentam essas informações.

Figura 59 – Resultados de resistência a compressão longitudinal dos compósitos sanduíches.



Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 16 é apresentada análise estatística dos resultados de resistência à compressão longitudinal, comparando os resultados das amostras PET2TC e PET1TV não foi encontrada diferença significativa, apesar da amostra PET2TC ter obtido um melhor resultado. Em relação às outras amostras, as estruturas com reforço sintético (PET2TV e

PET3TV) obtiveram melhores resultados que às estruturas com reforço vegetal (PET1TSI e PET1TSA) apresentando diferenças altamente significativas.

Tabela 16 - Teste t para a resistência à compressão longitudinal das estruturas sanduíches.

| Variável | Médias | | Teste "t" | Prob.(%) |
|---|-----------|-------------|-----------|----------|
| | PET2TC | PET1TV | | |
| Resistência à compressão Longitudinal (MPa) | 47,3 ±5,0 | 41,3 ±13,9 | 0,98 | 19,06 ns |
| | PET1TSI | PET2TV | | |
| Resistência à compressão Longitudinal (MPa) | 67,6 ±5,2 | 101,5 ±13,1 | 6,30 | 0,16** |
| | PET1TSA | PET3TV | | |
| Resistência à compressão Longitudinal (MPa) | 58,5 ±6,2 | 92,7 ±14,8 | 5,79 | 0,22** |

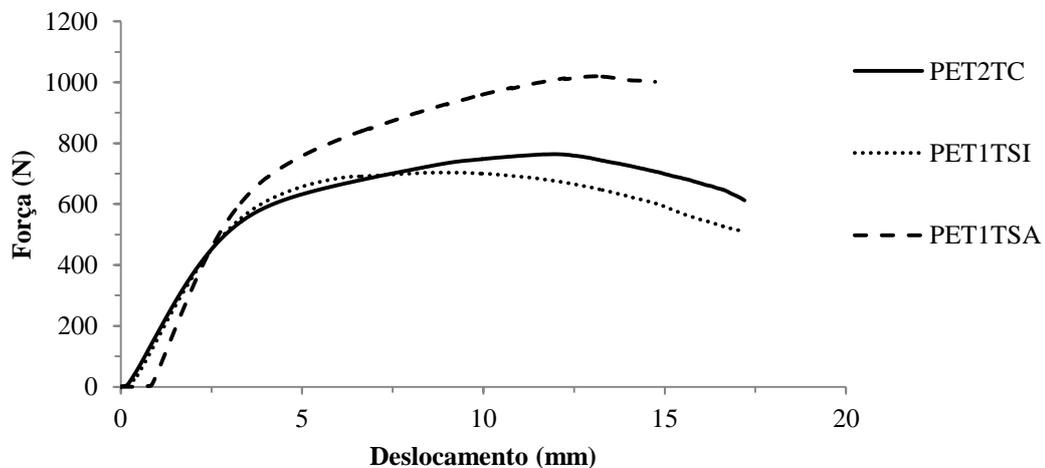
**p≤1%. ns - não significativo

Fonte: O autor, 2014.

4.2.5 Ensaio de Flexão 3 pontos

No ensaio de flexão, as curvas referentes aos testes com estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal (PET2TC, PET1TSI e PET1TSA) tiveram comportamentos similares, as curvas apresentaram duas etapas, a primeira até uma deformação de 2,5 mm corresponde a um comportamento elástico, e a segunda etapa é apresentada um comportamento plástico, onde foi observado um elevado deslocamento (Figura 60).

Figura 60 - Curvas força x deslocamento na flexão para os diferentes sanduíches reforçados com tecido de sisal.



Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados de força e rigidez das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal. Entre as amostras PET2TC e PET1TSI, os resultados tanto de força quanto de rigidez são bem próximos, com diferença de 2,7% e 6% respectivamente. O fato das duas amostras possuírem a mesma espessura das lâminas (3 mm) justifica esses resultados próximos. Já a amostra PET1TSA possui resultados bem superiores devido a espessura da lâmina (5 mm) ser 40% superior às outras amostras, logo o material apresenta uma maior rigidez, e também uma maior carga é necessária para flexioná-lo. A força máxima obtida pela estrutura PET1TSA é superior ao compósito híbrido desenvolvido por Ramesh *et al.* (2013a), sendo que os autores utilizaram 5 camada de reforço (3 de fibra de vidro e 2 de sisal) e obtiveram carga de 1,02 kN.

Tabela 17 - Resultados de força máxima e rigidez das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal.

| Amostras | Variáveis | | | |
|----------|------------------|---------------|----------------|---------------|
| | Força Máxima (N) | | Rigidez (N/mm) | |
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| PET2TC | 641 | ±141 | 177,6 | ±9,4 |
| PET1TSI | 658,9 | ±76,3 | 189 | ±10,3 |
| PET1TSA | 1024,3 | ±47,2 | 260,4 | ±28,5 |

Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados de inércia, módulo de elasticidade e $\%V_f$ das amostras PET2TC, PET1TSI e PET1TSA. Os valores de inércia encontrados são diretamente ligados à geometria do material, como as amostras PET2TC e PET1TSI possuem as mesmas dimensões, seus resultados são iguais, já a amostra PET1TSA possui dimensões diferentes e, conseqüentemente, resultados diferentes. Através dos resultados de inércia e outras variáveis presentes na Equação 8, é calculado o módulo de elasticidade dos materiais, sendo este influenciado diretamente pelo $\%V_f$ obtido. De acordo com a Tabela 18, a mostra com o maior módulo de elasticidade foi o PET1TSI, que conseqüentemente apresenta a maior $\%V_f$. Apesar de ter apresentado menor $\%V_f$ a amostra PET2TC apresentou resultados próximos, o que pode ser justificado pelo fato do tecido ter as fibras de sisal melhor alinhadas e um melhor acabamento, pois suas fibras de sisal passam por uma pré-seleção antes de se tornarem tecido.

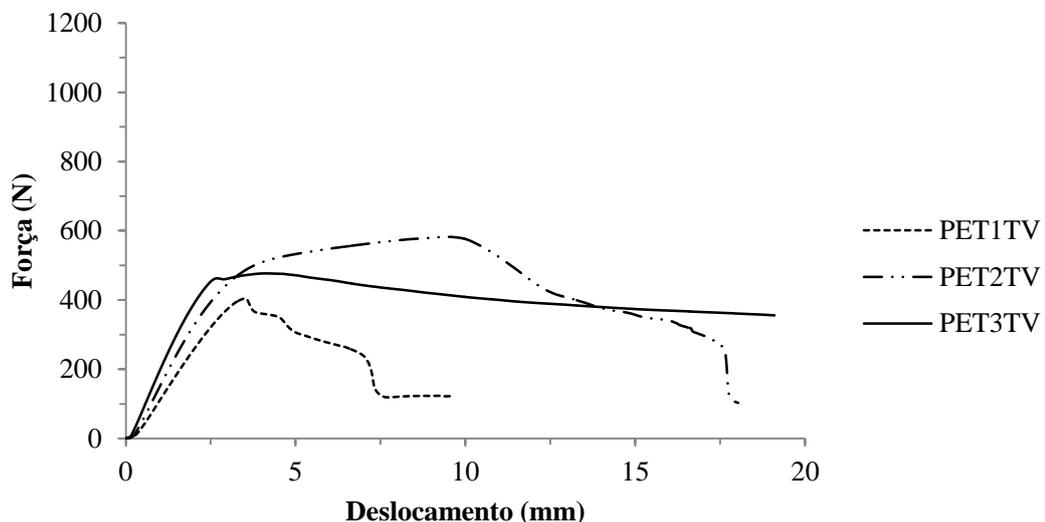
Tabela 18 – Resultados de inércia, módulo de elasticidade e %V_f das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal.

| Amostras | Variáveis | | | %V _f |
|----------|----------------------------|------------------------------|---------------|-----------------|
| | Inércia (mm ⁴) | Módulo de Elasticidade (GPa) | | |
| | Média | Média | Desvio Padrão | |
| PET2TC | 6862,5 | 1,8 | ±0,09 | 23 |
| PET1TSI | 6862,5 | 1,9 | ±0,11 | 34 |
| PET1TSA | 13270,8 | 1,4 | ±0,15 | 27 |

Fonte: O autor, 2014.

Em relação às curvas do ensaio de flexão para às amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro (Figura 61), nota-se que cada amostra apresenta um comportamento diferente, no caso da amostra PET2TV, as deformações permanentes ficaram evidenciadas, a amostra PET3TV apresentou uma linearidade bem definida, alcançando uma carga máxima de 476 N, já a amostra PET1TV apresentou uma linearidade inicial, atingindo uma carga máxima de 392 N, porém, logo em seguida ocorre uma perda de carga acentuada devido à ruptura do corpo de prova.

Figura 61 - Curvas força x deslocamento na flexão para os diferentes sanduíches reforçados com tecido de fibra de vidro.



Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 19, observa-se que quanto maior o número de camadas de tecido de fibra de vidro, maior é a carga máxima suportada pela estrutura, o mesmo critério pode ser observado para analisar a rigidez da estrutura, ou seja, o aumento do reforço ocasiona um aumento da carga suportada pela estrutura, essa conclusão também foi observada por Garay *et al.* (2011).

Tabela 19 - Resultados de força máxima e rigidez das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de fibra de vidro.

| Amostras | Variáveis | | | |
|----------|------------------|---------------|----------------|---------------|
| | Força Máxima (N) | | Rigidez (N/mm) | |
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| PET1TV | 378 | ±76,6 | 143,3 | ±2,2 |
| PET2TV | 561,3 | ±32,5 | 170,7 | ±5,5 |
| PET3TV | 1024,3 | ±47,2 | 205,6 | ±4,6 |

Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 20, os resultados de inércia aumentam conforme é aumentada a espessura das faces, já em relação ao módulo de elasticidade, às amostras obtiveram resultados próximos, com diferença máxima de 7,8%.

Tabela 20 - Resultados de inércia, módulo de elasticidade e % V_f das estruturas sanduíches reforçadas com tecido de fibra de vidro.

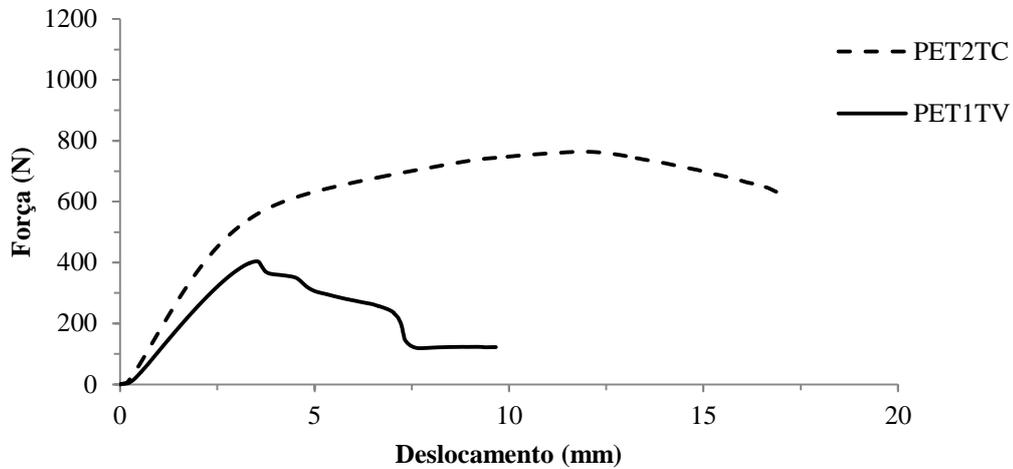
| Amostras | Variáveis | | | |
|----------|----------------------------|------------------------------|--------|---------|
| | Inércia (mm ⁴) | Módulo de Elasticidade (GPa) | | % V_f |
| | | Média | Média | |
| PET1TV | 1954,2 | 5,1 | ±0,008 | 38 |
| PET2TV | 2383,2 | 5,0 | ±0,16 | 39 |
| PET3TV | 3051,6 | 4,7 | ±0,11 | 41 |

Fonte: O autor, 2014.

A seguir são feitas comparações entre as estruturas reforçadas com sisal e com fibra de vidro, salientando que as comparações são feitas de acordo com a gramatura dos tecidos.

As amostras PET2TC e PET1TV (Figura 62) apresentaram curvas bem distintas, sendo que, a estrutura reforçada com tecido de sisal apresenta um maior deslocamento e um comportamento plástico maior. A amostra PET1TV apresenta um comportamento elástico inicial e ao alcançar a força máxima, ocorre uma queda do carregamento, que pode ser justificado pela delaminação ocorrida durante o ensaio.

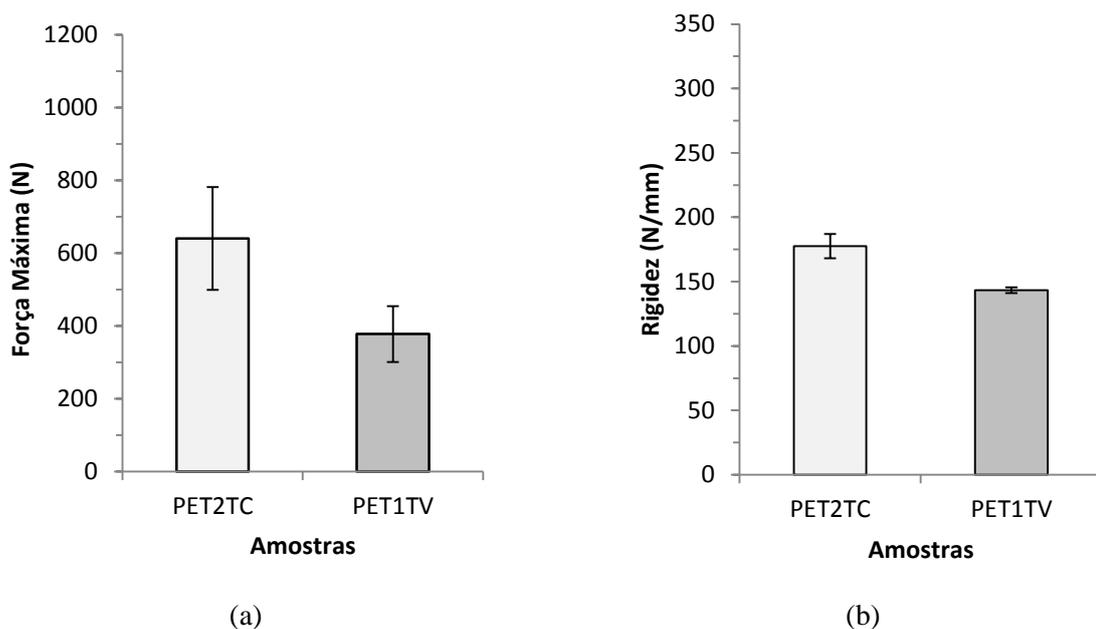
Figura 62 - Curvas força x deslocamento na flexão para as amostras PET2TC e PET1TV.



Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 63 são apresentados os resultados das variáveis força e rigidez, a diferença da força máxima das amostras PET2TC e PET1TV é de 41%, já em relação à rigidez essa diferença reduz para 19,3%, a amostra reforçada com tecido de sisal apresentou o melhor resultado, isso se deve pela maior espessura (15 mm) em relação à amostra PET1TV (13 mm), também fica evidente a maior dispersão dos resultados das estruturas sanduíches reforçadas com sisal, que se caracteriza pela heterogeneidade natural das fibras vegetais.

Figura 63 - Resultados força máxima (a) e rigidez (b) das amostras PET2TC e PET1TV para o ensaio de flexão.



Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 21 são apresentados os resultados de inércia, módulo de elasticidade e % V_f das amostras PET2TC e PET1TV, como já foi explicada a inércia independe do material e sim da geometria, dessa forma os resultados são diferentes para as amostras PET2TC e PET1TV, já o módulo de elasticidade sofre influência da % V_f , ou seja, quanto maior o % V_f maior o módulo de elasticidade, por isso o maior resultado de módulo de elasticidade para a amostra PET1TV.

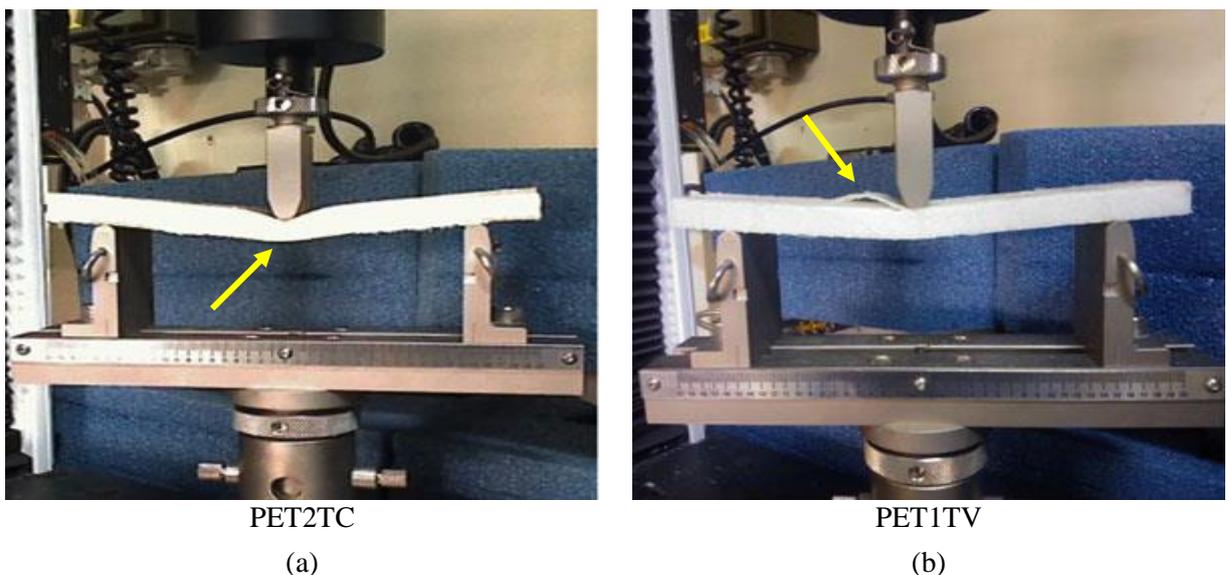
Tabela 21 - Resultados de inércia, módulo de elasticidade e % V_f das estruturas sanduíches PET2TC e PET1TV.

| N = 5 | Inercia (mm ⁴) | Módulo de Elasticidade (GPa) | | % V_f |
|--------|----------------------------|------------------------------|---------------|---------|
| | Média | Média | Desvio Padrão | |
| PET2TC | 6862,5 | 1,8 | ±0,09 | 23 |
| PET1TV | 1954,2 | 5,1 | ±0,08 | 38 |

Fonte: O autor, 2014.

Podem-se constatar dois tipos de eventos ocorridos no ensaio de flexão. Em relação à amostra PET2TC (Figura 64a) ocorre um afundamento da face superior e o aparecimento de trincas, a superfície do material deforma bastante antes da flexão, ou seja, há uma absorção de energia grande por parte da face superior que não é transmitida para a face inferior, onde não foi detectado qualquer defeito. Na amostra PET1TV (Figura 64b), antes de o material flexionar, ocorre o descolamento da face superior e com isso a finalização do ensaio, esse evento ocorreu com os corpos de prova dessa amostra.

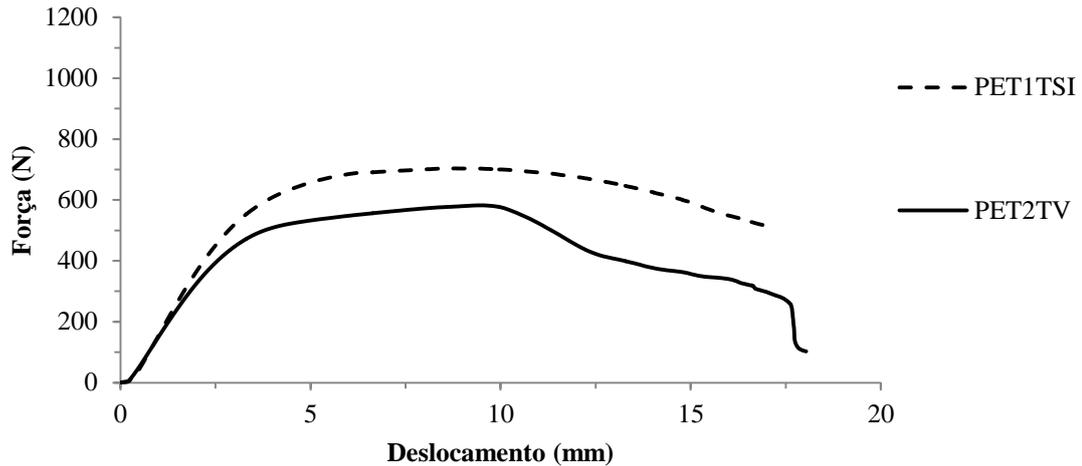
Figura 64 - Análises dos comportamentos à flexão mais típicos das amostras PET2TC e PET1TV.



Fonte: O autor, 2014.

As curvas das amostras PET1TSI e PET2TV (Figura 65) apresentaram um comportamento bastante similar inicialmente, por volta dos 3 mm começam a ocorrer as deformações permanentes, após chegar à força máxima a curva da amostra PET1TSI começa a cair lentamente, já na amostra PET2TV há uma queda mais acentuada, nota-se um evento ocorrendo quando o deslocamento atinge 10 mm.

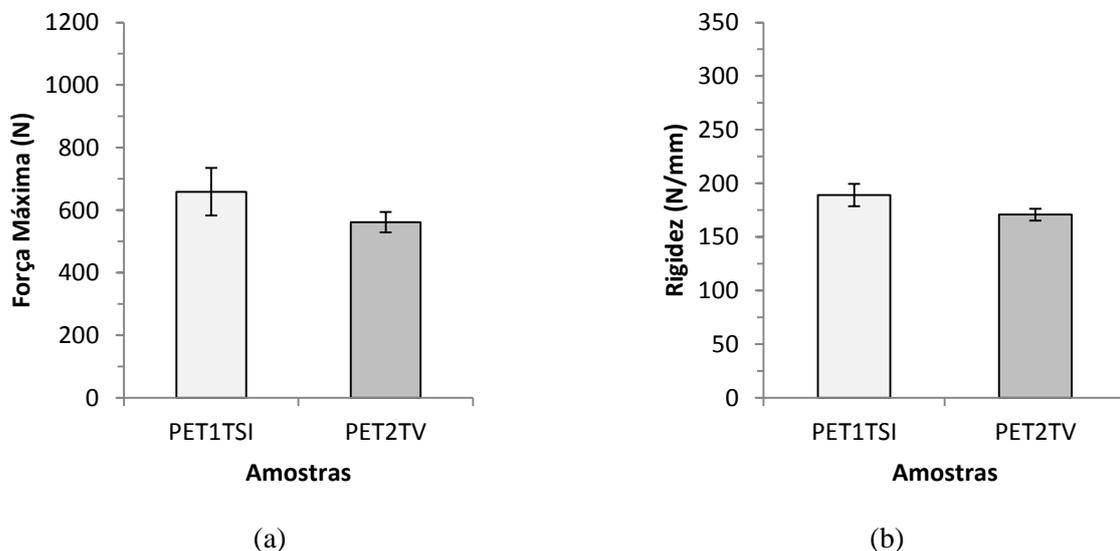
Figura 65 - Curvas força x deslocamento na flexão para as amostras PET1TSI e PET2TV.



Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 66 são apresentados os resultados de força e rigidez das amostras PET1TSI e PET2TV. Apesar de pequena diferença, a amostra PET1TSI apresentou o melhor resultado. Em relação aos resultados de força máxima, foi encontrada uma diferença de 14,8% entre as amostras PET1TSI e PET2TV, já em relação à rigidez a diferença fica em 9,7%, mais uma vez a diferença das espessuras das amostras teve impacto nos resultados.

Figura 66 - Resultados força máxima (a) e rigidez (b) das amostras PET1TSI e PET2TV para o ensaio de Flexão.



Fonte: O autor, 2014.

Em relação à Tabela 22, a amostra PET2TV apresentou o maior módulo de elasticidade com 5,0 GPa, em relação à amostra PET1TSI o módulo de elasticidade obtido foi de 1,9GPa, o que pode ser justificado pelo % V_f de 39% obtido pela amostra PET2TV.

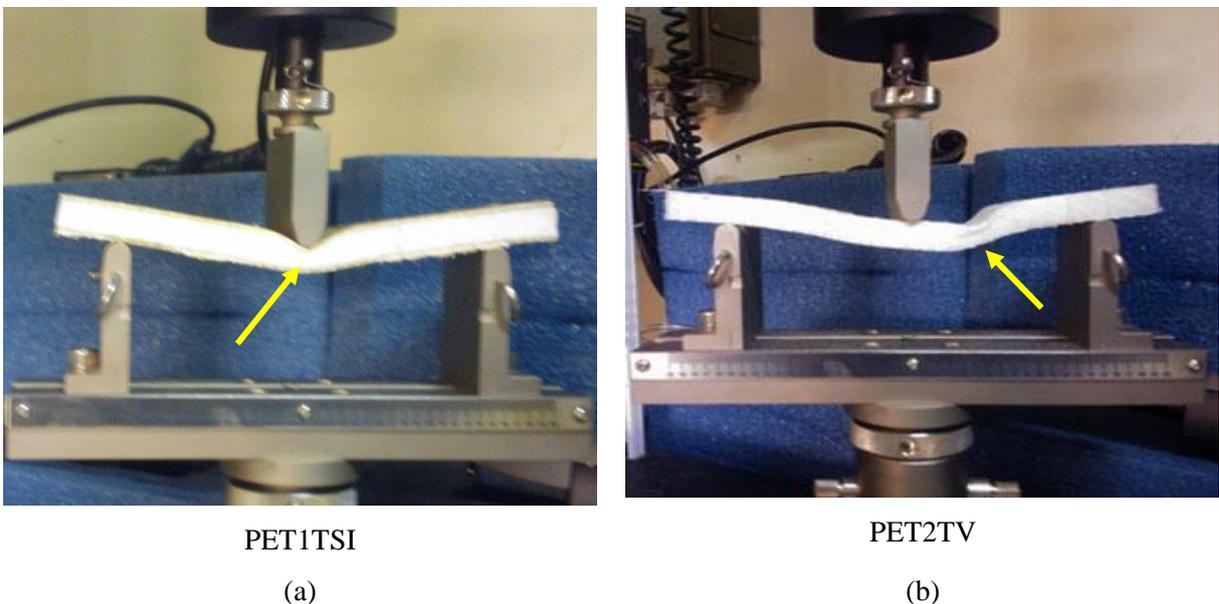
Tabela 22 - Resultados de inércia, módulo de elasticidade e % V_f das estruturas sanduíches PET1TSI e PET2TV.

| N = 5 | Inércia (mm ⁴) | Módulo de Elasticidade (GPa) | | % V_f |
|---------|----------------------------|------------------------------|---------------|---------|
| | Média | Média | Desvio Padrão | |
| PET1TSI | 6862,5 | 1,9 | ±0,11 | 34 |
| PET2TV | 2383,2 | 5,0 | ±0,16 | 39 |

Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 67a referente ao ensaio de flexão da amostra PET1TSI foi observado um esmagamento local do núcleo devido a uma carga concentrada aplicada na superfície da estrutura, também foi observadas trincas na face superior e inferior. Já na amostra PET2TV, primeiramente ocorre uma flexão da lâmina comprimida, o que ocasionou o rompimento do núcleo, esse evento ocorreu apenas nessa amostra (Figura 67b).

Figura 67 - Análises dos comportamentos à flexão das amostras PET1TSI (a) e PET2TV (b).

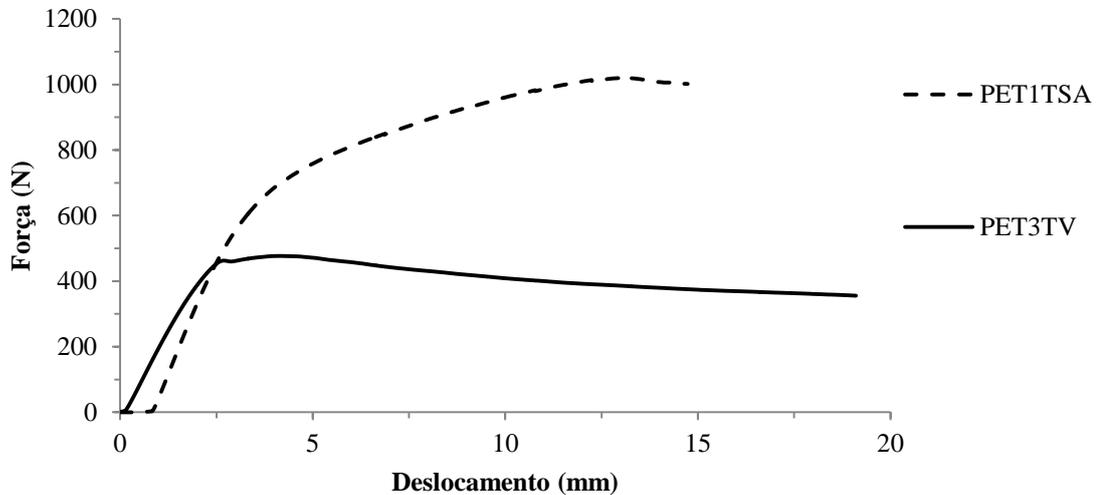


Fonte: O autor, 2014.

As curvas do ensaio de flexão das amostras PET1TSA e PET3TV (Figura 68) mostram uma linearidade inicial em ambas às curvas referentes ao comportamento elástico, em seguida o PET3TV alcança sua força máxima próximo dos 500 N em seguida foi observado um comportamento plástico do material quando a curva perde sua linearidade por

volta de 2,5 mm. Na amostra PET1TSA o aumento da carga é rápido até os 3 mm, em seguida o aumento da força é lento e alcança sua carga máxima (1,02 kN) por volta dos 12,5 mm.

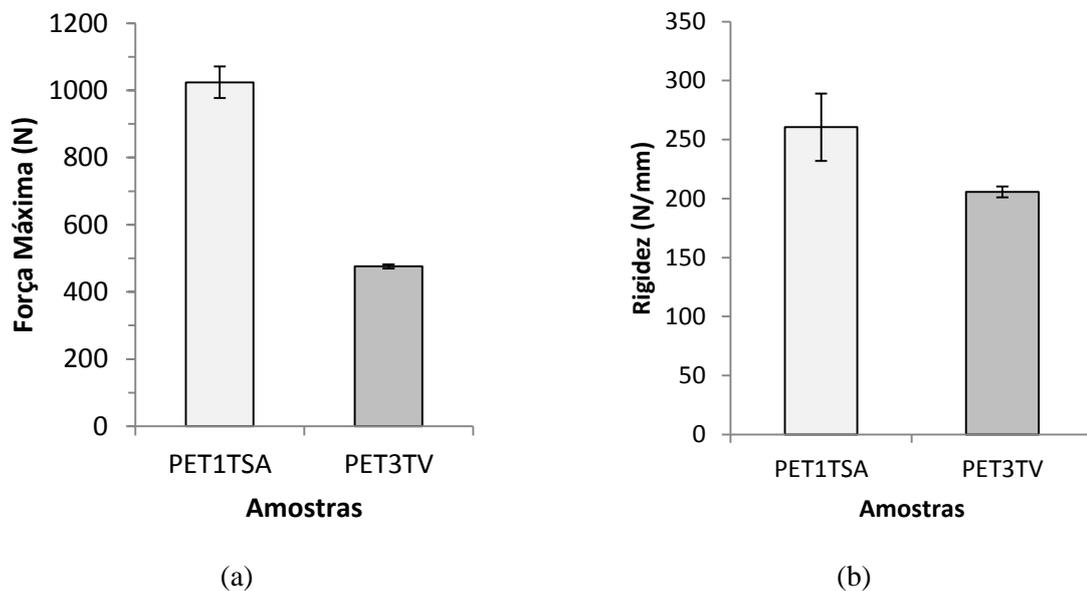
Figura 68 - Curvas força x deslocamento na flexão para as amostras PET1TSA e PET3TV.



Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 69 são apresentados os resultados das estruturas sanduíches PET1TSA e PET3TV. Foram encontradas diferenças de 53,5% e 21% para às variáveis força máxima e rigidez, respectivamente. A maior espessura das lâminas da amostra PET1TSA (5 mm) pode justificar o melhor desempenho dessa amostra em relação ao PET3TV (1,5 mm). Já em relação à rigidez essa diferença é menor, a dispersão dos resultados da amostra PET3TV é baixa, ou seja, a homogeneidade dos resultados é alta.

Figura 69 - Resultados força máxima (a) e rigidez (b) das amostras PET1TSA e PET3TV para o ensaio de flexão.



Fonte: O autor, 2014.

Na Tabela 23, a diferença entre os módulos de elasticidade é bastante elevada, com uma diferença de 70,2%, o que é justificado pela maior fração volumétrica de reforço da amostra PET3TV de 48%.

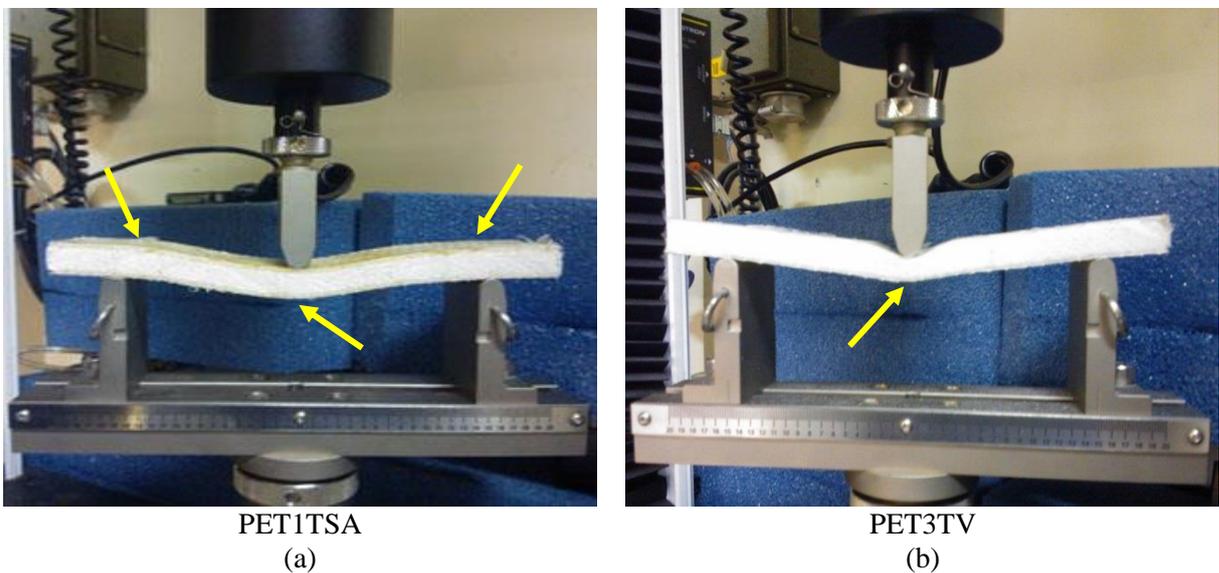
Tabela 23 - Resultados de inércia, módulo de elasticidade e % V_f das estruturas sanduíches PET1TSA e PET3TV.

| N = 5 | Inércia (mm ⁴) | Módulo de Elasticidade (GPa) | | % V_f |
|---------|----------------------------|------------------------------|---------------|---------|
| | Média | Média | Desvio Padrão | |
| PET1TSA | 13270,8 | 1,4 | ±0,15 | 27 |
| PET3TV | 3051,6 | 4,7 | ±0,11 | 41 |

Fonte: O autor, 2014.

No caso do PET1TSA durante o ensaio de flexão, ocorre o aparecimento de trincas na face superior e inferior, nesta amostra a falha não ocorre por rompimento do reforço e sim por flambagem das lâminas (Figura 70a). No PET3TV (Figura 70b) a falha ocorre por esmagamento local do núcleo devido a uma carga concentrada na superfície da estrutura, também ficaram evidentes trincas na face superior.

Figura 70 - Análises dos comportamentos à flexão das amostras PET1TSA (a) e PET3TV (b).



Fonte: O autor, 2014.

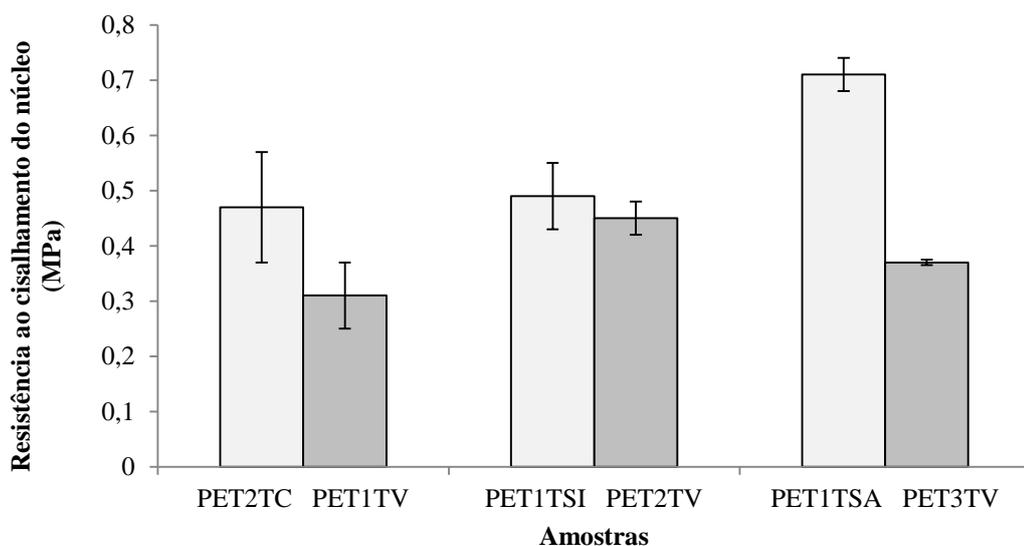
Os eventos observados durante o ensaio de flexão também foram evidenciados por outros autores como Ramesh *et al.* (2013a), Di Bella *et al.* (2012) e Garay *et al.* (2011), com exceção do evento apresentado pela estrutura sanduíche PET2TV, que exibiu comportamento completamente atípico das demais estruturas.

4.2.5.1 Resistência ao cisalhamento do núcleo

Na Figura 71 são apresentados os resultados de resistência ao cisalhamento do núcleo das estruturas sanduíches. Nos os resultados das amostras PET2TC e PET1TV foi encontrada uma diferença de 34%, sendo que o melhor resultado foi obtido pela estrutura reforçada com tecido de sisal. A maior espessura das faces na amostra PET2TC em relação ao PET1TV contribuiu para essa superioridade dos resultados, pois a diferença entre as espessuras é superior a 60%, ou seja, quanto maior a espessura das faces menor é a concentração de tensões no núcleo e consequentemente maior sua resistência. Para às amostras PET1TSI e PET2TV, a diferença entre os resultados de resistência ao cisalhamento do núcleo foi de 8,2%, mais uma vez a estrutura reforçada com tecido de sisal obtém o melhor resultado, 0,49 MPa. Em relação às amostras PET1TSA e PET3TV a diferença fica em 47,9% para os resultados de resistência ao cisalhamento do núcleo. A amostra PET1TSA foi a que obteve a maior espessura das faces (5 mm), a diferença pra espessura do PET3TV (1,5 mm) ficou em 70%, o que influenciou para o melhor resultado de resistência ao cisalhamento do núcleo.

Na Figura 71, dentre as estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal, o melhor resultado de resistência ao cisalhamento do núcleo foi o PET1TSA, já em relação às estruturas sanduíches reforçadas com tecido de fibra de vidro, o melhor resultado foi da amostra PET2TV. Os resultados obtidos pra as estruturas reforçadas com tecido de fibra de vidro, estão de acordo aos obtidos por Garay *et al.* (2011).

Figura 71 – Resultados de resistência ao cisalhamento do núcleo dos compósitos sanduíches.



Fonte: O autor, 2014.

A análise estatística do resultado de resistência ao cisalhamento do núcleo para as amostras PET2TC e PET1TV (Tabela 24) apresentou uma diferença significativa entre as amostras, sendo o melhor resultado 0,47MPa obtido pela amostra PET2TC. Já os resultados das amostras PET1TSI e PET2TV foram bem próximos, a análise estatística não encontrou diferença significativa entre as amostras, como pode ser observado. Entre as amostras PET1TSA e PET3TV, o teste t apresentou uma diferença altamente significativa, sendo que o melhor resultado foi obtido pela amostra PET1TSA com 0,71 MPa.

Tabela 24 - Teste "t" para a variável resistência ao cisalhamento do núcleo (MPa) das Amostras PET2TC e PET1TV.

| Variável | Média | | Teste "t" | Prob.(%) |
|---|------------|-------------|-----------|----------|
| | PET2TC | PET1TV | | |
| Resistência ao cisalhamento do núcleo (MPa) | 0,47 ±0,1 | 0,31 ±0,06 | 2,78 | 2,49* |
| | PET1TSI | PET2TV | | |
| Resistência ao cisalhamento do núcleo (MPa) | 0,49 ±0,06 | 0,45 ±0,03 | 2,08 | 5,3 ns |
| | PET1TSA | PET3TV | | |
| Resistência ao cisalhamento do núcleo (MPa) | 0,71 ±0,03 | 0,37 ±0,005 | 20,66 | 0** |

* p≤5% **p≤1% ns - não significativo.

Fonte: O autor, 2014.

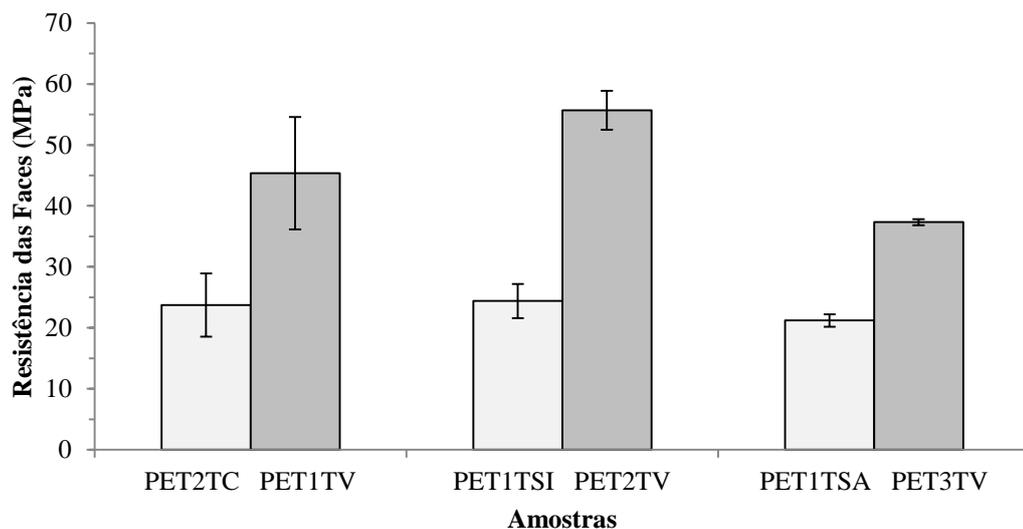
4.2.5.2 Resistência à Flexão das faces

Em relação aos resultados de resistência à flexão das faces nas estruturas sanduíches (Figura 72), pode-se observar que, entre às amostras PET2TC e PET1TV houve uma grande superioridade da estrutura sanduíche reforçada com tecido de fibra de vidro, a diferença entre as amostra ficou em 47,7%. Entre às amostras PET1TSI e PET2TV, os resultados também foram diferentes, a superioridade das estruturas sanduíche com tecido sintético também ficou evidente nesta comparação, a diferença entre os resultados foi de 56,2%. Na comparação entre os resultados das amostras PET1TSA e PET3TV mais uma vez ficou evidente o melhor resultados das estruturas com fibra de vidro, diferença de 43,2%. A superioridade das estruturas reforçadas com tecido de fibra de vidro se deu pela menor espessura das faces, para a resistência das faces, quanto menor a espessura, maior é a resistência, a acomodação dos tecidos de fibra de vidro e a melhor impregnação da resina poliéster em tecidos sintéticos ajudam na obtenção de lâminas finas e resistentes. Com as estruturas reforçadas com tecido de sisal, como foi observado no MEV, as espessuras foram maiores pela dificuldade da resina em

impregnar os tecidos com fios de sisal, dessa forma houve um acúmulo de matriz na superfície, ocasionando numa diferença de espessura que chega a 70% em algumas comparações.

Na comparação entre as estruturas sanduíches reforçada com tecido de sisal, o melhor resultado foi do PET1TSI, seguido do PET2TC e por último o PET1TSA, ou seja, o fato do PET1TSA possuir a maior espessura não garantirá a melhor resistência. Os resultados obtidos pelas estruturas reforçadas com tecido de sisal foram bem próximos aos obtidos por Garay *et al.* (2011), sendo que os autores utilizam tecido de fibra de vidro e a conformação dos compósitos sanduíches se deu por compressão. Em relação às amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro, o maior número de camadas de tecido no PET3TV e conseqüentemente o maior $\%V_f$ não lhe garantiu a melhor resistência, resultado este, obtido pelo PET2TV. Esse comportamento das estruturas também foi observado por Garay *et al.* (2011), onde o melhor resultado foi também obtido pela estrutura sanduíche reforçada com dois tecidos de fibra de vidro.

Figura 72 – Resultados de resistência das faces dos compósitos sanduíches.



Fonte: O autor, 2014.

O teste t dos resultados de resistência à flexão das faces para as amostras são apresentados na Tabela 25. As estruturas sanduíches PET2TC e PET1TV apresentaram uma diferença altamente significativa, sendo que o melhor resultado foi obtido pelo PET1TV com 45,36 MPa. As estruturas PET1TSI e PET2TV também apresentaram uma diferença altamente significativa, mais uma vez a estrutura sanduíche reforçada com tecido sintético obteve o melhor resultado com 55,7 MPa. A resistência à flexão das faces para as amostras

PET1TSA e PET3TV também apresentou diferença altamente significativa de acordo com o teste t, a estrutura sanduíche reforçada com tecido de fibra de vidro mais uma vez apresentou o melhor resultado com 37,34 MPa.

Tabela 25 - Teste "t" para a variável resistência à flexão das faces (MPa) para as amostras PET2TC e PET1TV.

| Variável | Médias | | Teste "t" | Prob.(%) |
|--------------------------------------|------------|------------|-----------|----------|
| | PET2TC | PET1TV | | |
| Resistência à Flexão das faces (MPa) | 23,74 ±5,2 | 45,36 ±9,2 | 4,27 | 0,65** |
| | PET1TSI | PET2TV | | |
| Resistência à Flexão das faces (MPa) | 24,4 ±2,8 | 55,7 ±3,2 | 28,36 | 0** |
| | PET1TSA | PET3TV | | |
| Resistência à Flexão das faces (MPa) | 21,2 ±1,0 | 37,34 ±0,5 | 37,94 | 0** |

**p≤1%

Fonte: O autor, 2014.

5 CONCLUSÃO

Os ensaios mecânicos das estruturas mostraram que o tecido de sisal é uma alternativa viável, na substituição da fibra de vidro no reforço de estruturas sanduíches. Através dos ensaios mecânicos e conformação das estruturas sanduíches, algumas conclusões foram observadas:

- Os tecidos desenvolvidos (Arranjo Simples e Sarja) superaram as limitações presentes no tecido de Cerchiaro (2010), uma vez que podem ser desenvolvidos com tamanhos variados, tanto no comprimento quanto na largura.
- O tecido com arranjo Simples, foi o que apresentou o melhor desempenho como reforço de estruturas sanduíches.
- Através da infusão a vácuo, foi possível obter estruturas reforçadas com tecido de sisal e matriz poliéster, com $%V_f$ acima de 30%. Outra característica obtida pela conformação por IV foi a homogeneidade das placas conformadas, ocasionando numa variabilidade dos resultados mecânicos inferior a 10%.
- Durante os ensaios de flexão e compressão longitudinal, as estruturas com fibra de vidro apresentaram delaminação entre as laminas e o núcleo, esse comportamento pode caracterizar uma interface ruim. No que diz respeito à espessura das lâminas, as estruturas com tecido de sisal apresentaram valores superiores aos encontrados pelas estruturas com fibra de vidro, esse resultado ocasionou numa diminuição do comportamento mecânicos das estruturas reforçadas com sisal, pois a maior espessura se caracterizou pelo acúmulo de resina na superfície da estrutura, relacionada à dificuldade de impregnação dos fios de sisal.
- Os ensaios mecânicos realizados apresentaram resultados que tornam as estruturas sanduíches reforçadas com tecido de sisal uma alternativa na substituição das estruturas sanduíches reforçadas com fibra de vidro. Dentre as estruturas reforçadas com tecido de sisal que apresentou o melhor comportamento mecânico foi o PET1TSI, que utilizou uma camada de tecido com arranjo Simples, já em relação às estruturas reforçadas com tecido de fibra de vidro, o melhor comportamento foi da estrutura reforçada com três camadas de fibra de vidro (PET3TV).

O aumento na utilização de materiais compósitos e de painéis sanduíche que se tem observado nos últimos anos surge associado à necessidade que se tem revelado da busca por elementos estruturais mais leves, resistentes, com rigidez elevada e duráveis. As vantagens

naturais das fibras de sisal, como o impacto ambiental, baixo custo, segurança do trabalhador no manuseio e principalmente o impacto social alinhado ao desempenho mecânico, transformam os tecidos de sisal num material extremamente competitivo no desenvolvimento de estruturas com aplicações específicas.

6 REFERÊNCIAS

AFENDI, M. D.; BANKS, W. M.; KIRKWOOD, D. Bubble free resin for infusion process. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.36, n.6, p.739–746, 2005.

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHEKHARA, K. **Analysis and Performance of Fibre Composites**. Third Edition. Wiley Publications. 2006.

ALMACO - **Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos**. Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/imprensa.cfm?ID=101>>. Acessado em 20 de maio, 2014.

ALMEIDA, Maria Inês Avó. A. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção**. 2009, 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C364/C364M - **Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions**. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C365/C365M – **Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores**. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C393/C393M – **Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure**. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D2240 - **Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness**, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D2256/D2256M - **Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method**, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D3039 –**Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D3822 - **Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers**, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D5035 - **Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)**, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D638 - **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D790 - **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. 2010.

ANGRIZANI, C. A.; VIEIRA, C. A. B.; ZATTERA, A. J.; FREIRE, E.; SANTANA, R. M. C.; AMICO, S. C. Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Novembro, 2006, Foz do Iguaçu, **Anais**. Paraná: 17º CBECiMat, 2006.

AQUINO, R. C. M. P.; MONTEIRO, S. N.; D'ALMEIDA, J. R. M.. Evaluation of the Critical Fiber Length of Piassava (*Attaleafunifera*) Fibers using the Pullout Test. **Journal of Materials Science Letters**, v.22, n.21, p.1495-1497, 2003.

ASSIS, Adriana Helfenberger Coletto. **Avaliação das mudanças ocorridas em fibras de poliéster submetidas a tratamento alcalino e enzimático**. 2012, 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 2012.

BELINGARDI, G.; PAOLINO, D. S. Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates. **International Journal of Impact Engineering**, v.35, n.7, p.609–619, 2008.

BENÍTEZ-GUERRERO, M.; LÓPEZ-BECEIRO, J.; SÁNCHEZ-JIMÉNEZ, P. E.; PASCUAL-COSP, J. Comparison of thermal behavior of natural and hot-washed sisal fibers based on their main components: Cellulose, xylan and lignin. TG-FTIR analysis of volatile products. **Thermochimica Acta**, v.581, p.70–86, 2014.

BEVITORI, A. B.; DA SILVA, I. L. A.; LOPES, F. P. D.; MONTEIRO, S. N. Thermal analysis characterization of ramie fibers with different diameters. In: TMS 2011 Annual Meeting & Exhibition, 2011, San Diego. **Resumos**. California. 2011.

BRÍGIDA, A. I. S.; CALADO, V. M. A.; GONÇALVES, L. R. B.; COELHO, M. A. Z. Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber. **Carbohydrate Polymers**, v.79, n.4, p.832–838, 2010.

CALDAS, B. G. S.; ROCHA FILHO, S.; CARVALHO, R. F. **Methodology for Tensile Tests on Vegetable Fibers**. In: 14th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies, Construction Materials & Technologies for Sustainability, 2013, João Pessoa. **Resumos**. Paraíba: 14th NOCMAT v. 1. p. 108-108, 2013.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002.

CANEVAROLO JR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. Livro. São Paulo: Artlier, 448p. 2007.

CAPRINO, G.; PRISCO, U.; GIORLEO, L. Monotonic and fatigue behaviour of chopped-strand-mat/polyester composites with rigid and flexibilised matrix. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.38, n.2, p.234-243, 2007.

CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W. S. Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.16, n.1, p.33-37, 2006.

CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W. S.; CAVALCANTE, J. M. F. Influência da arquitetura do tecido nas propriedades de compósitos poliéster/tecido de juta. In: 14º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2000, São Pedro. Anais. São Paulo: 14º CBECiMat. p.49101 – 49111, 2000.

CARVALHO, Ricardo Fernandes. **Compósito de fibra de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 2005, 119p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2005.

CERCHIARO, Jorge Ruben. **Comportamento Mecânico de Compósitos com Poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual**. 2010, 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, 2010.

COMPANHIA SISAL DO BRASIL - COSIBRA. Disponível em:
<<http://www.cosibra.com.br/1101.html>>. Acessado em 09 de julho 2012.

CORREIA, Edvaldo Amaro Santos. **Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Fibras Vegetais de Abacaxi e de Sisal**. 2011, 113p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Paraíba, UFPB, João Pessoa, 2011.

DEEPA, A.; ABRAHAM, E.; CHERIAN, B. M.; BISMARCK, A. BLAKER, J. J.; POTHAN, C. L. A; ELAO, A. L.; SOUZA, S. F.; KOTTAISAMY, M. Structure, morphology and thermal characteristics of banana nano fibers obtained by steam explosion. **Bioresource Technology**, v.102, n.2, p.1988-1997, 2011.

DI BELLA, G.; CALABRESE, L.; BORSELLINO, C. Mechanical characterisation of a glass/polyester sandwich structure for marine applications. **Materials & Design**, v.42, p.486–494, 2012.

EL-TAYEB, N. S. M.; YOUSIF, B. F. Evaluation of glass reinforced polyester composite for multi-pass abrasive wear applications. **WEAR**, v.262, n.9-10, p.1140-1151, 2007.

FERREIRA, F. C.; CURVELO, A. A. S.; MATTOSO, L. H. C. Preparation and characterization of benzylated sisal fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v.89, n.11, p.2957-2965, 2003.

FINKLER, M.; SCAPINI, P.; FREIRE, E.; ZATTERA, A.J.; ZENI, M. Compósitos de HDPE com resíduos de fibras têxteis. Parte I: Caracterização Mecânica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v.15, n.3, p.171-175, 2005.

FROLLINI, E.; PAIVA, J. M. F.; TRINDADE, W. G.; RAZERA, I. A. T.; TITA, S. P. **Natural Fibers, Plastics and Composites: Plastics and composites from lignophenols**. Editado por Frederick T Wallenberger; Norman E. Weston, Ed Kluwer Academic Publishers, Section III , p.193-225, 2004.

GARAY, A. C.; SAMPERT, S.; MOREIRA, V.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. **Avaliação de Diferentes Núcleos e Faces em Materiais Compósitos Sanduíche para Aplicações Marítimas**. In: 11º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2011, Campos do Jordão. **Anais**. São Paulo: 11º CBPol, 2011.

GARAY, André Cechin. **Efeito da adição de carbonato de cálcio em compósitos poliméricos moldados por rtm e rtm light**. 2010, 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

GOVIGNON, Q.; BICKERTON, S. Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process. **Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.39, n.9, p.1412-1426, 2008.

GU, Y.; TAN, X.; YANG, Z.; LI, M.; ZHANG, Z. Hot compaction and mechanical properties of ramie fabric/epoxy composite fabricated using vacuum assisted resin infusion molding. **Materials & Design**, v.56, p.852–861, 2014.

HAMMAMI, A. Effect of reinforcement structure on behavior in the vacuum infusion compaction process. **Polymer Composites**, v.22, n.3, p.337-348, 2011.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An introduction to composite materials**, Cambridge Solid State Science Series. ed. Cambridge Press University, Cambridge, 326 p. Second Edition, 344p. 1996.

IDICULA, M.; BOUDENNE, A.; UMADEVI, L.; IBOS, L.; CANDAU, Y.; THOMAS, S. Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. **Composites Science and Technology**, v.66, n.15, p.2719–2725, 2006.

JOHN, M. J.; THOMAS, S.; Biofibers and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v.71, p.343–364, 2008.

JOSHI, S. V.; DRZAL, L. T.; MOHANTY, A. K.; ARORA, S. Are natural fibre composites environmentally superior to glass fibre reinforced composites? **Composites Part A**, v.35, p.371-376, 2004.

KABIR, M. .M.; WANG, H.; LAU, K. T.; CARDONA, F. ARAVINTHAN, T. Mechanical properties of chemically-treated hemp fibre reinforced sandwich composites. **Composites Part B: Engineering**, v.43, n.2, p.159–169, 2012.

KIM, H. J.; SEO, D. W. Effect of water absorption fatigue on mechanical properties of sisal textile-reinforced composites. **International Journal of Fatigue**, v.28, n.10, p.1307–1314, 2006.

KIRAN, C. U.; RAMACHANDRA REDDY, G.; DABADE, B. M.; RAJESHAM, S. Tensile properties of sun hemp, banana and sisal fiber reinforced polyester composites. **Journal of Reinforced Plastic and composites**, v.26, n.10, p.1043-1050. 2007.

KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAIYAKOOP, N.; TRADA, M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites: Part B**, v. 42, p.856–873, 2011.

LADCHUMANANANDASIVAM, R. Apostila - **Ciências dos Polímeros e Engenharia de Fibras I, Capítulo 2**, março, 2002, 39p.

LEÃO, Mirtânia Antunes. **Fibras de licuri: um reforço vegetal alternativo de compósitos poliméricos.** 2008, 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2008.

LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia.** Editora Edgard Blucher Ltda, 2006.

LOPES, Inês Abreu Freire. **Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos. Produção de tampa de bagageira para autocarro.** 2009, 63p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, FEUP, Portugal, 2009.

MA, H.; LI, Y.; LUO, Y. The effect of fiber twist on the mechanical properties natural fiber reinforced composites. In: **18th International Conference on Composite Materials.** 2011.

MA, H.; LI, Y.; WANG, D. Investigations of fiber twist on the mechanical properties of sisal fiber yarns and their composites. **Journal of Reinforced Plastics & Composites**, v.33, n.7, p.687-696, 2014.

MAMALIS, A. G.; MANOLAKOS, D. E.; IOANNIDIS, M. B.; PAPAPOSTOULOU, D. P. On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: experimental. **Composite Structures**, v.71, n.2, p.246–257, 2005.

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

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; SILVA, O. R. R. F.; MATTOSO, L. H. C. Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents. **Thermochimica Acta**, v.506, n.1-2, p.14–19, 2010.

MARTIN, Adriana. Regina. **Caracterização e modificação de fibras de sisal por plasma a frio visando aplicação em compósitos poliméricos.** 2001, 174p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de São Carlos, UFSCAR, 2001.

MARTINS, M. A.; JOEKES, I. Tire rubber-sisal composites: effect of mercerization and acetylation on reinforcement. **Journal of Applied Polymer Science**, v.89, n.9, p.2507-2515, 2003.

MARTINS, Maria Alice. **Fibra de sisal: mercerização, acetilação e aplicação em compósitos de borracha de pneu triturado.** 2001, 163p. Tese (Doutorado em Química) Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2001.

MEGIATTO JUNIOR, Jackson Dirceu. **Fibras de sisal: estudo de propriedades e modificações químicas visando aplicação em compósitos e matriz fenólica.** 2006, 272p. Tese (Doutorado em Ciências (Físico-química)) Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2006.

MOUZAKIS, D. E.; ZOGA, H.; GALIOTIS, C. Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). **Composites Part B: Engineering**, v.39, n.3, p.467-475, 2008.

NAIR, K. C. M.; THOMAS, S.; GROENINCKX, G. Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres. **Composites Science and Technology**, v. 61, n.16, p.2519–2529, 2001.

NASSEH, J. **Manual de Construção de Barcos**. Rio de Janeiro, 4ª edição. 660p. 2011.

OLIVEIRA, Ana Maria Ricl da Silva. **Caracterização da fibra de licuri (*Syagrus coronata* (Martius) Beccari) para aplicações na construção civil**. 2010, 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, 2010.

OLIVEIRA, F. B.; Teixeira, E. M.; TEODORO, K. B. R.; MARCONCINI, J. M.; MATTOSO, L. H. C. Obtenção de nanofibras de celulose a partir de fibras de sisal para atuar como reforço em matrizes biodegradáveis. In: 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2009, Foz do Iguaçu, Paraná. Anais. São Carlos: ABPol, 2009

OLIVEIRA, José Orlando. **Compósito reforçado com sisal para aplicação na moda**. 2012, 65p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2012.

POLETTO, M.; PISTOR, V.; ZENI, M.; ZATTERA, A. J. Crystalline properties and decomposition kinetics of cellulose fibers in wood pulp obtained by two pulping processes. **Polymer Degradation Stability**, v.96, n.4, p.679–685, 2011.

POLETTO, M.; ZATTERA, A. J.; FORTE, M. M. C.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, v.109, p.148–153, 2012.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; HEMACHANDRA REDDY, K. Comparative evaluation on properties of hybrid glass fiber- sisal/jute reinforced epoxy composites. **Procedia Engineering**, v.51, p.745–750, 2013. (a)

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; HEMACHANDRA REDDY, K. Mechanical property evaluation of sisal–jute–glass fiber reinforced polyester composites. **Composites: Part B**, v.48, p.1-9, 2013. (b)

RAMIRES, Elaine Cristina. **Biocompósitos a partir de matrizes poliméricas baseadas em lignina, tanino e glioxal reforçadas com fibras naturais**. 2010, 277p. Tese (Doutorado em Ciências (Físico-química)) Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2010.

RANA, A.K.; MANDAL, A.; BANDYOPADHYAY, S. Short jute fiber reinforced polypropylene composites: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading. **Composites Science and Technology**, v. 63, n.6, p.801-806, 2003.

RAO, S.; JAYARAMAN, K.; BHATTACHARYYA, D. Short fibre reinforced cores and their sandwich panels: Processing and evaluation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.42, n.9, p.1236–1246, 2011.

RASK, Morten; MADSEN, Bo. Twisting of fibres in yarns for natural fibre composites. In: **18th International Conference on Composite Materials**. 2011.

RAZERA, Ilce Aiko Tanaka. **Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica**. 2006, 189p. Tese (Doutorado em Ciências (Físico-química)), Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2006.

REDDY, K. O.; MAHESWARI, C. U.; REDDY, D. J. P.; RAJULU, A. V. Thermal properties of Napier grass fibers. **Materials Letters**, v.63, n.27, p.2390–2392, 2009.

RIJSWIJK, K. E TEUWEN, J. J. E. Textile fibre-reinforced anionic polyamide-6 composites. Part I: The vacuum infusion process. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.40, n.1, p.1-10, 2009.

ROMANZINI, D.; ORNAGHI JUNIOR, H. L.; AMICO, S. C.; ZATTERA, A. J. Preparation and characterization of ramie-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. **Materials Research**, São Carlos, v.15, n.3, p.415-420, 2012

ROSA, I. M.; KENNY, J. M.; MANIRUZZAMAN, M., MONIRUZZAMAN, M., MONTI, M., PUGLIA, D.; SANTULLI, C.; SARASINI, F. Effect of chemical treatments on the mechanical and thermal behaviour of okra (*Abelmoschus esculentus*) fibres. **Composites Science and Technology**, v.71, n. 2, p.246–254, 2011.

SANTOS, Evelise Fonseca dos. **Efeitos de agentes de acoplamento em compósitos de polipropileno com fibras de coco**. 2007, 95p. Dissertação (Mestrado em Química) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

SANTOS, Eylisson André. **Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de matriz de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais**. 2007, 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2007.

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: Applied Science and Manufacturing**, v.38, n.7, p.1694-1709, 2007.

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

SILVA, Humberto Sartori Pompeo. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. 2010, 86p. Dissertação (Mestrado em Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2010.

SMITH, F. C.; MOLONEY, L. D.; MATTHEWS, F. L. Fabrication of woven fibre / polycarbonate repair patches. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 27, n.11, p.1089-1095, 1996.

SOUTIS, C. Fibrereinforced composites in aircraft construction. **Progress in Aerospace Sciences**, v.41, n.2, p.143-151, 2005.

STOCCHI, A.; COLABELLA, L.; CISILINO, A.; ÁLVAREZ, V. Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics. **Materials & Design**, v.55, p.394-403, 2014..

THOMAS, Natasha Ilse Rothbucher. **Compósitos de poliéster reforçados com tecidos de fibras de licuri tratadas para a construção civil**. 2011, 234p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, 2011.

THWE, M. M.; LIAO, K. Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.33, n.1, p.43-52, 2002.

TOMCZAK, Fabio. **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do brasil**. 2010, 150p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2010.

VIEIRA, Cristiane Aurelia Borges. **Avaliação de métodos de fabricação de mantas híbridas de fibras curtas de vidro e sisal em compósitos poliméricos**. 2008, 110p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

WOLFE, A.; WEINER, M. Comparison of mechanical properties of laminates fabricated using vacuum infusion knitted reinforcements. **Composites Research Journal**, v.1, n.4, p.47-52, 2007.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v.86, n.12-13, p.1781-1788, 2007.

YAO, F.; WU, Q.; LEI, Y.; GUO, W.; XU, Y. Thermal decomposition kinetics of natural fibers: activation energy with dynamic thermogravimetric analysis. **Polymer Degradation Stability**, v.93, n.1, p.90-98, 2008.

YENILMEZ, B.; SENAN, M. Variation of the part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process. **Composites Science and Technology**, v.69, n.11-12, p.1710-1719, 2009.

YENILMEZ, B.; SOZER, E. M. Compaction of e-glass fabrics preforms in the vacuum infusion process. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.40, n.4, p.499-510, 2009.

YUEXIN, D.; ZHAOYUAN, T.; YAN, Z.; JING, S. Compression responses of preform in vacuum infusion process. **Chinese Journal of Aeronautics**, v.21, n.4, p.370-377, 2008.