

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO FRANCHI RUIZ
WELLINGTON BAZARIM VERISSIMO

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UM PAINEL SANDUÍCHE COM NÚCLEO
INERCIAL TIPO HONEYCOMB DE BAMBUSA TULDOIDES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2021

PEDRO FRANCHI RUIZ
WELLINGTON BAZARIM VERISSIMO

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UM PAINEL SANDUÍCHE
COM NÚCLEO INERCIAL TIPO HONEYCOMB DE BAMBUSA TULDOIDES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Bellini
Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Ostapiv

PATO BRANCO
2021

FOLHA DE APROVAÇÃO

Produção e Caracterização Mecânica de um Painel Sanduíche com Núcleo Inercial Tipo Honeycomb de Bambusa Tuldooides

Pedro Franchi Ruiz

Wellington Barazim Verissimo

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 11/05/2021 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Fabiano Ostapiv
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. Dra. Maria Nalu Verona Gomes
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus pela nossa saúde nesse momento de pandemia que vivemos! Agradecemos também aos Profs. Bruno Bellini Medeiros e Fabiano Ostapiv pela paciência e compartilhamento de conhecimentos e experiências.

Não devemos esquecer que nada disso seria possível sem a UTFPR como um todo, disponibilizando recursos materiais e humanos além de equipamentos para nossos estudos.

Agradecimento especial as nossas famílias que sempre nos proveram o necessário para continuarmos nossa caminhada sem esmorecer.

EPÍGRAFE

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças”

Leon C. Megginson

RESUMO

RUIZ, P. F; VERISSIMO, W. B. Produção e Caracterização Mecânica De Um Painel Sanduíche Com Núcleo Inercial Tipo Honeycomb De Bambusa Tuldoides. 2021. 70. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

O bambu é considerado um material sustentável por ser um vegetal renovável e apresentar um baixo índice de resíduos desde o plantio até o fim do seu ciclo de vida. Além desse diferencial, o bambu poder ser aplicado como elemento estrutural devido às suas excelentes propriedades mecânicas específicas, o que confere a esse material a possibilidade de ser utilizado como núcleo em materiais compósitos. O trabalho desenvolvido teve como objetivo a produção e caracterização mecânica do painel sanduíche tipo *honeycomb* com núcleo inercial utilizando bambu da espécie *Bambusa tuldoides*. Com a escolha das normas mais apropriadas para obtenção dos dados foram produzidos lotes de corpos de prova (CP) para os ensaios de compressão conforme norma ASTM C365/365M, flexão ASTM D7249 e cisalhamento ASTM C273. Determinou-se a resistência mecânica para cada tipo de ensaio e foi comparada a influência da resina epóxi e da resina de mamona aplicadas no painel sanduíche. Quanto à resistência à compressão, os CP laminados com resina de mamona resistiram pouco a mais do que os fabricados em resina epóxi, devido à boa tenacidade da resina de mamona. Para resistência à flexão os CP fabricados com resina de mamona foram menos resistentes à flexão comparados com resina epóxi. No ensaio de cisalhamento foi somente possível ensaiar os CP com resina de mamona, pois os com resina epóxi apresentaram falhas durante o início do ensaio.

Palavras-chave: Bambu; Caracterização Mecânica; Painel Sanduíche; Compósito; *Honeycomb*.

ABSTRACT

RUIZ, P. F; VERISSIMO, W. B. Mechanical Characterization and Production of a Sandwich Panel Made with Bambusa Tuldoides Honeycomb Inertial Core. 2021. 70. Course Completion Work (Bachelor of Mechanical Engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Pato Branco, 2021.

Bamboo is a sustainable material because it is a plant and has a low level of residues from planting to the end of its life cycle. In addition to this differential, bamboo can be applied as a structural element due to its excellent specific mechanical properties, which gives this material the possibility of being used as a core in composite materials. The work carried out had as objective the mechanical characterization of the honeycomb sandwich panel with inertial core using bamboo of the *Bambusa tuldoides* species. With the choice of the most appropriate standards for obtaining the data, specimens (PC) were produced for the compression tests according to ASTM C365 / 365M, flexion ASTM D7249 and shear ASTM C273. Mechanical strength was determined for each type of test and the influence of epoxy resin and castor resin applied to the sandwich panel was compared. As for the compressive strength, castor bean PCs resisted little more than those made of epoxy resin, due to the toughness of castor resin. For flexural strength, the PC made with castor resin were less resistant to flexion compared to epoxy resin. In the shear test, it was only possible to test the PCs with castor resin, as those with epoxy resin showed flaws during the beginning of the test.

Keywords: Bamboo; Mechanical Characterization; Sandwich Panel; Composites; Honeycomb.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Relação de materiais e suas resistências mecânicas	20
Figura 2 - Exemplo de funcionamento de um painel sanduíche.....	21
Figura 3 - Esforços presentes em um painel sanduíche engastado.....	21
Figura 4 - Exemplos de ângulos de camadas de fibras.....	22
Figura 5 - Separação de tamanho de favos entre macro, micro e nano.....	24
Figura 6 - Exemplos de Núcleos <i>Honeycomb</i>	25
Figura 7 - Estrutura de um colmo de Bambu.....	26
Figura 8 - Conicidade e estruturas do Bambu	27
Figura 9 - Exemplos de diversos materiais e seus módulos de Elasticidade	28
Figura 10 - Fluxograma da sequência de fabricação dos corpos de prova	31
Figura 11 - Exemplo de montagem do corpo de prova	33
Figura 12 - Corte e preparação do bambu: a) corte do bambu com 40 mm de diâmetro b) preparação para armazenamento	33
Figura 13 - Lixamento da camada externa do bambu: a) lixamento da casca externa dos colmos b) colmos com 40 mm de diâmetro prontos	34
Figura 14 – Aplicação de resina no bambu para colagem do núcleo: a) aplicando camada de resina b) gabaritos para produção do núcleo <i>honeycomb</i>	34
Figura 15 - Núcleo preparado dentro do gabarito.....	35
Figura 16 - Base do <i>honeycomb</i> sendo lixada a fim de garantir planicidade e rugosidade.....	35
Figura 17 - Núcleo <i>honeycomb</i> de bambu finalizado	36
Figura 18 - Materiais usados para laminação das faces	36
Figura 19 - Medição e corte da fibra.....	37
Figura 20 - Fibra preparada no tamanho certo para uso	37
Figura 21 - Pesagem da fibra	38
Figura 22 - Preparação da Resina Epóxi	39
Figura 23 - Preparação da Resina de Mamona.....	39
Figura 24 - Aplicação de cera desmoldante	40
Figura 25 - Aplicação de Desmoldante PVA verde	40
Figura 26 - Preparação de uma base de vidro para laminação das faces	41
Figura 27 - Colagem do núcleo em uma face – FLEXÃO MAMONA	42
Figura 28 - Colagem da última face – FLEXÃO MAMONA	42

Figura 29 - Colagem do núcleo em uma face - FLEXÃO EPÓXI	43
Figura 30 - Colagem da última face - FLEXÃO EPÓXI	43
Figura 31 - Faces preparadas para colagem no núcleo – COMPRESSÃO: a) face resina epóxi b) face resina de mamona	44
Figura 32 - Faces coladas nos núcleos – COMPRESSÃO: a) corpo de prova com resina de mamona b) corpo de prova com resina epóxi.....	44
Figura 33 - Faces prontas para serem coladas – CISCALHAMENTO: a) face com resina epóxi b) face com resina de mamona.....	45
Figura 34 - Face sendo colada à chapa de aço - EPÓXI	45
Figura 35 - Colagem do núcleo - EPÓXI	46
Figura 36 - Aparência final do corpo de prova de cisalhamento.....	46
Figura 37- Exemplo de ensaio de compressão	47
Figura 38 - Corpos de prova para ensaio de compressão: a) corpo de prova com resina epóxi b) corpo de prova com resina de mamona.....	48
Figura 39 - Exemplo de ensaio de flexão de 4 pontos	49
Figura 40 - Posicionamento dos pontos de apoio e de carga no teste de flexão	49
Figura 41 - Posicionamento do corpo de prova no ensaio de Flexão.....	51
Figura 42 - Corpos de prova usados no ensaio de flexão: a) corpo de prova com resina epóxi b) corpo de prova com resina epóxi	51
Figura 43 - Exemplo de ensaio de cisalhamento: a) corpo parafusado b) corpo preso por pino	52
Figura 44 - Corpos de prova usados no ensaio de Cisalhamento.....	54
Figura 45 - Posicionamento do corpo de prova no ensaio de cisalhamento	54
Figura 46 - Gráfico Força x Movimento da Máquina, ensaio de compressão	56
Figura 47 - Corpos de prova de compressão com núcleo rachado	57
Figura 48 - Gráfico Força por Deformação - FLEXÃO	59
Figura 49 - Falha por Descolamento	59
Figura 50 - Falha por Enrugamento	60
Figura 51 - Gráfico de Força por Deformação Específica - CISCALHAMENTO	61
Figura 52 - Relatório do ensaio de Compressão	68
Figura 53 - Relatório de ensaio de Flexão	69
Figura 54 - Relatório de ensaio de Cisalhamento	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova.....	32
Tabela 2 - Resultados Finais – COMPRESSÃO.....	55
Tabela 3 - Resultados Finais – FLEXÃO.....	58
Tabela 4 - Resultados Finais – CISALHAMENTO.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	-	Área da seção transversal
ALMACO-		Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CB	-	Colmos de Bambu
CP	-	Corpo de prova
Dmax	-	Diâmetro máximo
Dmin	-	Diâmetro mínimo
E	-	Módulo de Young
g	-	Gramas
GPa	-	Gigapascal
H	-	Comprimento na Conicidade
kJ	-	Quilojoule
kg	-	Quilograma
kN	-	Quilonewton
kgf	-	Quilograma-força
min	-	Minuto
MPa	-	Megapascal
N	-	Newton
nm	-	Nanômetro
PP	-	Polipropileno
PVA	-	Acetato de Polivinila
UTFPR	-	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
um	-	Micrômetro
un	-	Unidade
γ	-	Conicidade
ρ	-	Densidade
σ	-	Resistência a compressão do núcleo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo Principal	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 JUSTIFICATIVA	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 COMPÓSITOS	19
2.2 PAINEL SANDUÍCHE	20
2.3 FACE	21
2.4 RESINAS	23
2.5 NÚCLEO <i>HONEYCOMB</i>	24
2.6 BAMBU	26
2.7 <i>HONEYCOMB</i> DE BAMBU	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 FABRICAÇÃO DO NÚCLEO <i>HONEYCOMB</i>	31
3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	32
3.3 LAMINAÇÃO DAS FACES	36
3.4 MONTAGEM DO PAINEL SANDUÍCHE	41
3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO	47
3.4 ENSAIO DE FLEXÃO	48
3.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO	55
4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO	58
4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO	60
5 CONCLUSÃO	63

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
REFERÊNCIAS.....	65
ANEXO A – RELATÓRIOS DE ENSAIO	68

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que o mercado de compósitos movimentou em 2015, 66,61 bilhões dólares e tem projeção de movimentar 113 bilhões de dólares em 2022. Os setores da construção civil e transporte são os que mais consomem (particularmente compósitos de fibra de vidro), e o consumo tem uma tendência a aumentar, uma vez que existe uma pressão dos órgãos ambientais para a redução das emissões de carbono, o que favorece as estruturas que usam compósitos, pois são mais leves e levam a uma economia no consumo de combustível durante o transporte (MAZUMDAR, 2018).

Dentre os tipos de compósitos utilizados, os painéis do tipo sanduíche apresentam grande importância, pois apresentaram alta razão entre resistência e massa, além de possuírem boa resistência a fadiga e alta capacidade de manter sua integridade superficial mesmo sob deformação. A eficiência estrutural desses materiais é devido a sua geometria ser composta de duas placas feitas de material resistente intercaladas por um núcleo inercial geralmente de baixa densidade (GOMES, 2008).

O aumento do consumo leva ao aumento na quantidade de resíduos gerados pela indústria de compósitos, conseqüentemente um dos maiores desafios nesse sentido é a reciclagem dos compósitos. Uma das soluções para minimizar essa questão é o uso de materiais sustentáveis naturais ou de fácil reciclagem (JENSEN e SKELTON, 2018).

Uma matéria prima pouco explorada no Brasil e com inúmeras vantagens que podem ser utilizadas para a produção de diversos produtos é o bambu, matéria prima sustentável, por ser renovável, bom sequestrador de gás carbônico, possui crescimento acelerado comparado com outras culturas, boas características mecânicas, não necessita de grandes áreas horizontais para cultivo, resistente a intemperismo e pragas, e pode ser facilmente incorporado na natureza ao final do seu ciclo de vida (GHAVAMI, 2017).

Para o trabalho em questão foi escolhido como objeto de estudo a espécie *Bambusa tuldoides*, que segundo Ostapiv, et al (2018) é uma espécie facilmente encontrada e cultivada em qualquer região do Brasil. A sua aplicação foi como núcleo inercial em um compósito sanduíche do tipo *honeycomb*, onde as faces são de compósito de matriz polimérica de epóxi reforçado com fibra de vidro.

Para obtenção das propriedades mecânicas foi necessário ensaiar corpos de provas, utilizando as normas. Para o ensaio de flexão utiliza-se a norma ASTM D7249, para a compressão a norma ASTM C365 e para cisalhamento a norma ASTM C273.

Com uma medição precisa das propriedades que envolvem o painel sanduíche de “Colmos de Bambu” (CB) abre-se espaço para a utilização deste em projetos que procuram uma alta resistência específica. Portanto, são esperados resultados que indiquem o uso dos painéis CB como material adequado para uso nos setores da construção civil e transportes.

1.2 OBJETIVOS

Com base no exposto, para a elaboração do presente trabalho, foram estabelecidos os objetivos, divididos em geral e específicos, conforme descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo Principal

Produzir e caracterizar mecânicamente um compósito sanduíche com núcleo inercial do tipo *honeycomb* de colmos de bambu, utilizando como espécie de bambu o *Bambusa tuldoides*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Desenvolver um método de produção de um núcleo do tipo *honeycomb* utilizando colmos de bambu;
- b) Produzir painéis sanduíches para serem usados como corpos de prova, utilizando faces de fibra de vidro e núcleo *honeycomb* de bambu, variando a utilização de resinas entre epóxi e de mamona;
- c) Realizar ensaios mecânicos para a obtenção das resistências à flexão, à compressão e ao cisalhamento do compósito sanduíche;
- d) Comparar os dados obtidos nos ensaios para ambas as resinas e verificar qual apresenta o melhor desempenho.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os materiais compósitos oferecem um grande potencial de utilização em diferentes áreas, como aeronáutica, automotiva, naval e na construção civil. Entretanto os benefícios gerados por esses materiais se entrelaçam com o problema em destinar seus resíduos, que podem causar danos ao meio ambiente se não descartados corretamente. Com a procura de meios alternativos para a produção de um compósito mais sustentável o bambu destaca-se como opção de material para núcleo inercial, pois é biodegradável e sua produção gera danos ambientais mínimos, comparado com as ligas metálicas e polímeros que normalmente são empregados como núcleo. Além disso, segundo Targa (2011) o bambu é um ótimo sequestrador de carbono, armazenando de 40% a 45% de sua biomassa total em CO₂ e gerando três vezes mais oxigênio que uma árvore.

Como o Brasil possui um clima favorável para o cultivo das espécies de bambu este fator torna viável o plantio em território nacional. A sua resistência a intempéries, a pragas e insetos facilita seu cultivo na agricultura familiar.

Visando as excelentes propriedades apresentadas pelo bambu verificou-se a necessidade de estudo da sua utilização em conjunto com outros materiais, gerando assim uma estrutura sanduíche com seu núcleo do tipo *honeycomb* em bambu, suas faces em fibra de vidro e sua matriz sendo resina termofixa epóxi.

Nesse contexto, o bambu, que ainda é uma matéria prima pouco explorada em território nacional, tem alto potencial de crescimento no segmento dos compósitos. As suas aplicações podem atingir uma variada gama de produtos como cascos de embarcações, painéis para trens ou navios, estruturas para transporte terrestre, abrigos militares, engenharia civil entre outros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITOS

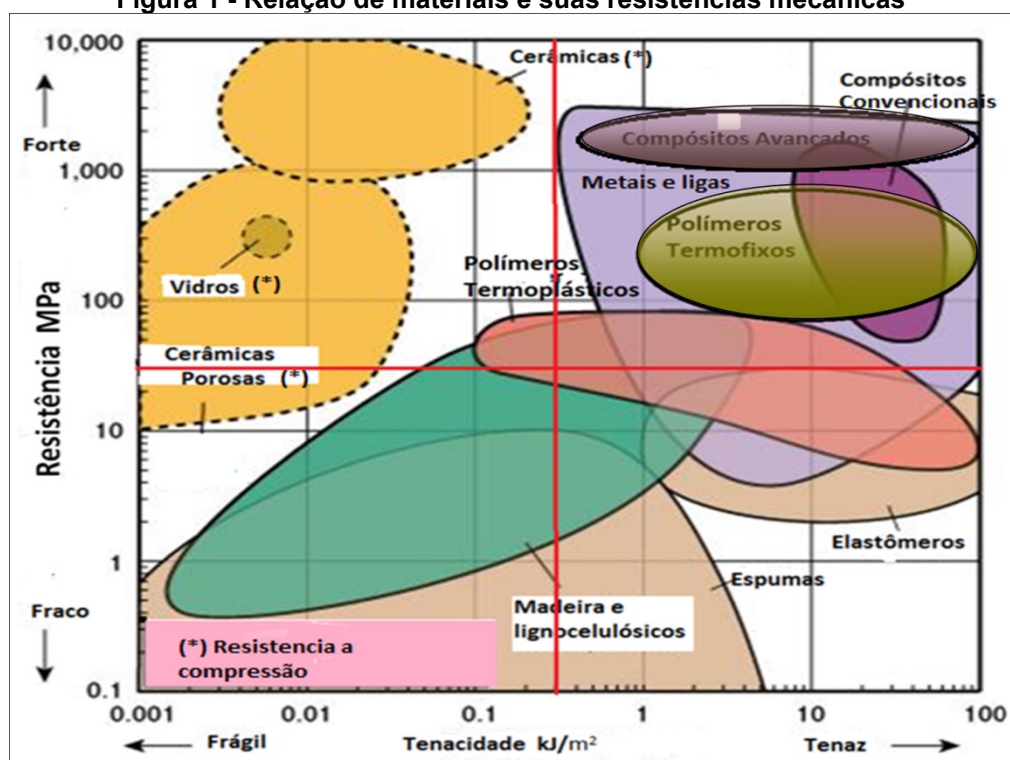
Por definição, os materiais compósitos são materiais que apresentam duas ou mais fases macroscópicas, cujo objetivo é atingir uma combinação entre as propriedades mecânicas das diferentes fases que excedem as propriedades de cada material analisado de forma isolada (CALLISTER, 2012).

Segundo ALMACO (2013) uma das fases seria o reforço que pode ser constituído de filamentos (fibras curtas, médias ou longas), escamas ou partículas. A outra fase presente seria a matriz, que pode ser constituída separadamente por metálica, cerâmica ou polimérica, “sendo que as matrizes poliméricas são as mais utilizadas devido ao baixo custo e a facilidade do processamento” (SOUZA, 2006).

Dentro do seguimento dos compósitos há uma variada gama de materiais a serem utilizados, a maioria desses materiais são sintéticos, mas ainda existe uma variedade de materiais naturais que podem ser empregados como fases no compósito, bons exemplos naturais de reforços são as fibras naturais e para matrizes orgânicas podemos encontrar resinas de bases vegetais.

A Figura 1 apresenta um gráfico de resistências mecânicas à tração e compressão em relação a tenacidade de materiais comumente utilizados. Este gráfico mostra as propriedades de cada grupo de materiais separados e também as propriedades de materiais compósitos, que se localizam numa região de limite de resistência à tração com valores superiores a maioria dos materiais demonstrando que a combinação de materiais leva a um aumento na resistência mecânica.

Figura 1 - Relação de materiais e suas resistências mecânicas



Fonte: ALMACO (2013)

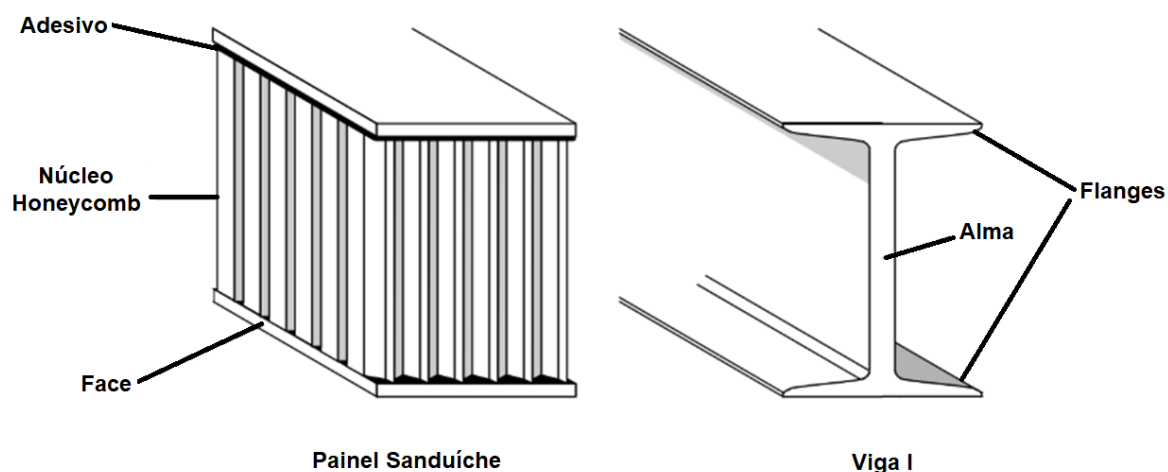
2.2 PAINEL SANDUÍCHE

A construção de um painel sanduíche em um laminado oferece vantagens similares às de uma viga “I” em uma estrutura metálica (Figura 2), mas ao invés de uma alma e dois flanges, a construção em sanduíche faz uso de material de núcleo de baixa densidade, que é faceado por ambos os lados por laminados de fibra, metal ou mesmo de madeira (HEXCEL, 2000).

As faces podem ser comparadas com os flanges da viga, elas carregam as tensões de flexão para qual o feixe está sujeito segundo a Figura 3. Uma face sofre compressão enquanto a outra está em tração, além disso, devem ter espessura suficiente para resistir à flambagem e avarias por impactos localizados. Similar a alma da viga, o *honeycomb* corresponde a “alma” do sanduíche. O núcleo resiste às cargas de cisalhamento, aumentando a rigidez da estrutura e mantendo as faces unidas para produzir um painel uniformemente reforçado. O adesivo que une rigidamente os componentes do sanduíche permite que a estrutura se comporte como uma unidade de alta rigidez a flexão e torção (HEXCEL, 2000).

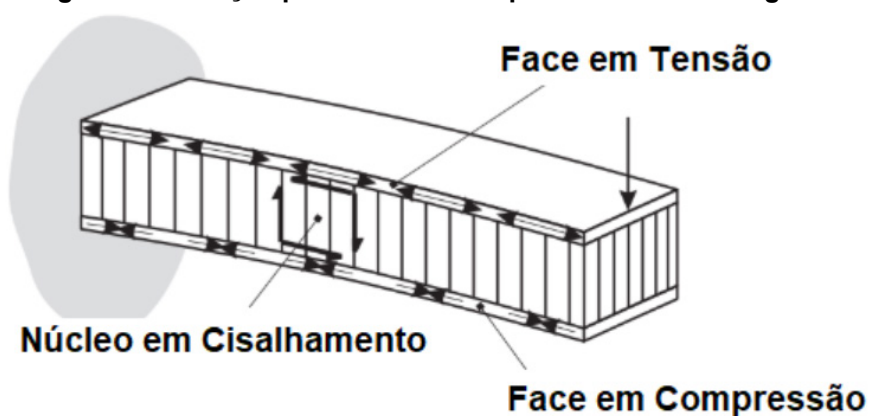
Na maioria das aplicações em painéis sanduíche o projetista está interessado em um núcleo razoavelmente forte e com baixo peso, que permita ao laminado ter a espessura suficiente para aumentar a rigidez sem o aumento excessivo do peso (NASSEH, 2007).

Figura 2 - Exemplo de funcionamento de um painel sanduíche



Fonte: Adaptado de HexCel (2000)

Figura 3 - Esforços presentes em um painel sanduíche engastado



Fonte: Adaptado de HexCel (2000)

2.3 FACE

As faces (camadas finas e rígidas) de um compósito do tipo sanduíche podem ser encontradas com diferentes tipos de materiais, entre eles os mais comuns nos painéis sanduíches são: fibra de vidro, fibra de carbono, fibra de aramida, alumínio e laminados de madeira.

As fibras constituem uma parte do reforço do compósito, tendo a missão de suportar os esforços provenientes da matriz. Pode-se encontrar as fibras em três formas: fibra contínua, não contínua ou picada.

A fabricação das fibras gera uma característica interessante para os tecidos, a orientação e gramatura das fibras podem ser alteradas, mudando o comportamento mecânico do tecido em diferentes direções, dessa forma, a escolha do posicionamento dos tecidos é uma parte importante do projeto.

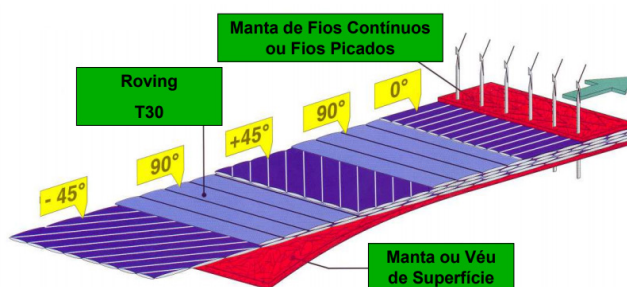
Quando as fibras estão na forma de mantas e fios, elas apresentam reforços apenas na dimensão longitudinal do fio, na direção em que estão dispostas, já os tecidos ortogonais possibilitam reforços em duas direções e fibras picadas produzem reforços aleatórios, já que sua disposição não tem padrão. Pode-se então classificar os arranjos por unidirecional, bidirecional, tri-axial ou aleatório. A Figura 4 demonstra alguns ângulos para os arranjos das camadas de fibra. As propriedades mecânicas vão depender dos arranjos utilizados para as fibras, portanto a orientação destas deve ser escolhida de acordo com os esforços que atuam no componente que se deseja fabricar. Outra característica que influencia no resultado final é o comprimento das fibras, que caracteriza a rigidez do compósito. Isto é devido a rigidez do laminado depender diretamente da magnitude das tensões que a matriz consegue transmitir para as fibras (CALLISTER, 2012).

Dentre as fibras existentes a fibra de vidro é a mais comum de ser utilizada, presente tanto na forma picada quanto contínua, a qual possui diversas aplicações e boas propriedades mecânicas associadas a um baixo custo (NASSEH, 2007).

Figura 4 - Exemplos de ângulos de camadas de fibras
Características que definem um Tecido



3. Ângulo de cada camada



Fonte: Owens Corning (2019)

2.4 RESINAS

As resinas fazem parte da fase do compósito conhecida como matriz que é uma fase contínua responsável pela transmissão de tensão entre os reforços do material. Sua composição pode ser polimérica, metálica ou cerâmica, sendo a polimérica mais presente na indústria devido ao seu baixo custo e a sua facilidade de processamento. A função principal da matriz é envolver a fibra permitindo que os esforços presentes na peça sejam transmitidos com eficácia. Podemos classificar as matrizes poliméricas como termofixas (termorrígidas) e termoplásticas, sendo as termoplásticas associadas a reversibilidade de seu processo, pois seu estado sólido à temperatura ambiente pode ser alterado elevando-se a temperatura e amolecendo ou mesmo fundindo o material (NASSEH, 2007).

No entanto as matrizes termofixas são amplamente empregadas nas indústrias, isso se deve ao fato da grande disponibilidade de estudos da sua aplicabilidade e de que sua cadeia produtiva já está bem consolidada.

Dentre as termofixas Lucato (1991) observou que as epoxídicas (resinas epóxi) possuem diversas vantagens para o desenvolvimento de projetos, tais como:

- Possibilitam aplicações estruturais de alto desempenho;
- Apresentam alto módulo de elasticidade e compressão;
- A sua cura pode ser à temperatura ambiente;
- Possuem baixa viscosidade, facilitando a moldagem;
- Evita tensões residuais, pois há pouca contração (SOUZA, 2006).

As resinas epóxi são uma classe de resinas termofixas com grande variedade de aplicações o que dá extrema versatilidade de utilização em diferentes técnicas e processos. Essas resinas podem ser usadas como resinas de laminação, adesivo, selantes, tintas, vernizes e muitas outras aplicações, devido a suas enormes possibilidades e suas vantagens sobre os outros tipos de resinas elas são encontradas hoje em diversas variedades de aplicações na área industrial, comercial, militar e até mesmo na construção de barcos.

Sua conversão em uma resina termofixa ocorre através do processo de polimerização pela adição de um endurecedor, que uma vez adicionado, inicia uma reação irreversível de ligação entre as moléculas.

Fora a habilidade de aderir a um grande número de materiais, é de suma importância para o laminado que a matriz de resina seja capaz de aderir a todas as

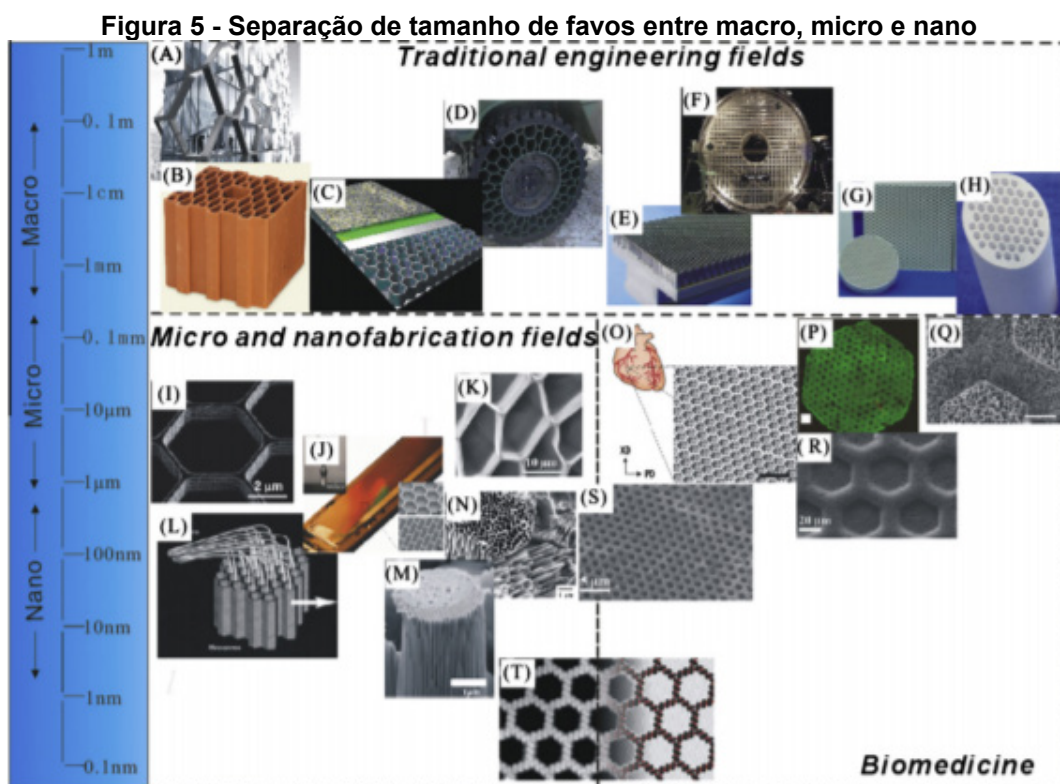
fibras e transmitir as tensões através do laminado. “Neste aspecto nenhum outro sistema supera a resina epóxi” (NASSEH, 2007).

Em relação a propriedades mecânicas elas podem ser formuladas para ter um valor de alongamento acima de 6%. Segundo Nasseh (2007) em determinadas aplicações é possível se obter alongamento acima de 8%. Esse fator faz com que a matriz da resina epóxi seja capaz de transmitir às fibras todas as solicitações e provavelmente sentir qualquer tipo de fratura somente após o rompimento das fibras.

2.5 NÚCLEO *HONEYCOMB*

Núcleos tipo *honeycomb* ou favo de mel são estruturas celulares que foram criadas se inspirando em estruturas naturais, o favo de mel hexagonal é a estrutura celular mais comum e é fabricado usando diversos materiais e processos (ZHANG, et al, 2015).

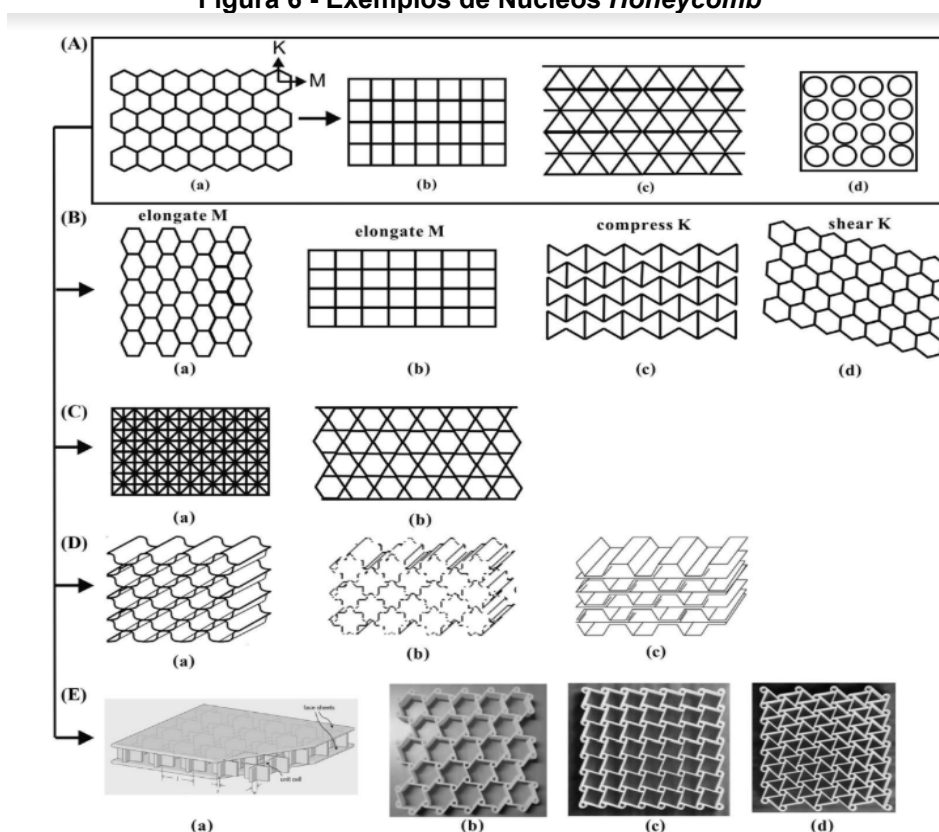
A célula em formato de favo pode ser classificada de acordo com seu tamanho macro, micro e nano.



Fonte: Zhang, et al (2015)

Para uma utilização prática foram criadas novas formas ao *honeycomb*, como apresenta a Figura, dentro delas as mais comuns são as quadradas, as triangulares e as auxéticas (formas auxéticas apresentam um coeficiente de Poisson negativo, sendo assim expandem-se transversalmente quando esticadas e afinam quando comprimidas de forma axial) (FCT, 2018).

Figura 6 - Exemplos de Núcleos *Honeycomb*



Fonte: HexCel (2000)

Os *honeycomb* permitem diminuir a densidade aparente do material, absorver energia e resistir ao impacto. Os favos podem ainda ser preenchidos com espumas poliméricas, o que aumenta a tensão de escoamento, a energia absorvida, assim como a resistência ao impacto (ZHANG, et al, 2015).

O que se espera de um núcleo inercial é que tenha a habilidade de fazer uma boa colagem com a resina de laminação ou adesivo, possua uma boa resistência a fadiga, resista à corrosão e às intempéries oferecidas pelo ambiente, tenha resistência a fungos e água e, o mais importante, não deve absorver ou reter umidade (NASSEH, 2007).

Núcleos *honeycomb* podem ser construídos de papel impregnado com resina, fibra de vidro, carbono, fibras de aramida, polipropileno, policarbonato,

alumínio e de bases vegetais. Materiais de núcleos tipo *honeycomb* possuem grande capacidade de resistência à compressão e cisalhamento, sendo essas suas principais características.

Para fabricação do núcleo *honeycomb* recomenda-se o uso de vácuo, de modo que seja garantida a perfeita adesão do *honeycomb* nas duas faces do laminado. A não adesão do *honeycomb* pode gerar defeitos no laminado (NASSEH, 2007).

2.6 BAMBU

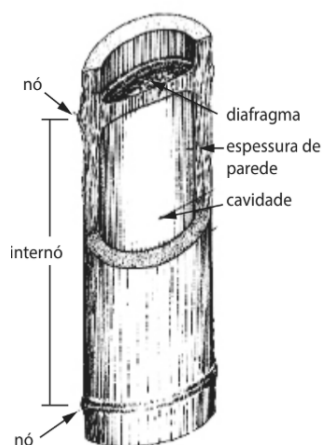
O bambu é uma gramínea arborescente gigante, pertence à família *Gramineae* (*Poaceae*) e a subfamília *Bambusoideae*, podem ser divididos em dois grupos, os bambus herbáceos, parecidos com arbustos, e os bambus lenhosos parecidos com árvores.

No Brasil podemos encontrar aproximadamente 130 espécies de bambus, as mais comuns de serem encontradas em abundância são a *Bambusa tuldoides* chamada popularmente de taquara e *Bambusa vulgaris* conhecida como bambu brasileiro (TARGA, 2011).

Para se utilizar o bambu como um material de engenharia é importante conhecer algumas de suas características conforme a Figura 7:

- Distância internodal (internó);
- Diâmetro externo;
- Espessura de parede.

Figura 7 - Estrutura de um colmo de Bambu



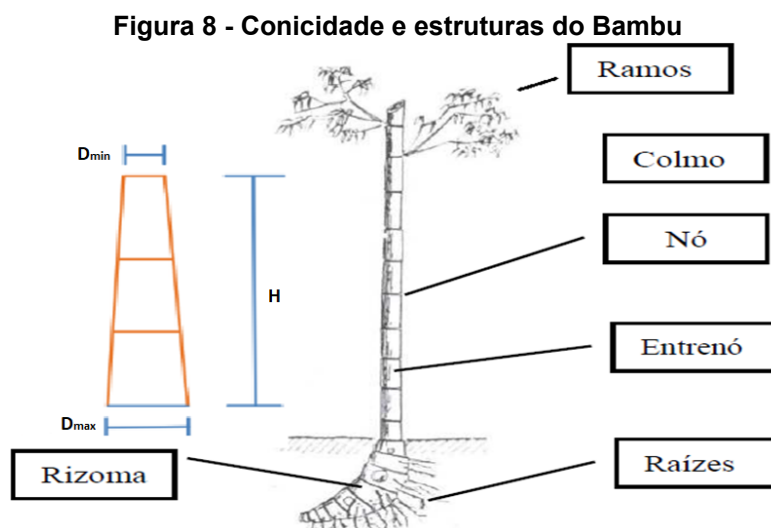
Fonte: Ghavami, Barbosa e Moreira (2017)

Deve-se lembrar que todas as características são diferentes de acordo com:

- A espécie do bambu;
- Fatores ambientais, como qualidade do solo, temperatura e umidade relativa, insolação, espaçamento entre touceiras, etc;
- Manejo do Bambuzal;
- Posição ao longo do colmo;
- Idade de colheita.

Em geral a vara de bambu possui um formato cônico entre a base e o topo. Na Figura 8, trata-se da conicidade do bambu, que pode ser calculada através da equação 1, seu resultado será dado em %.

$$Y = \frac{100. (D_{max} - D_{min})}{H(\%)} \quad (1)$$



Fonte: Adaptado de Ghavami, Barbosa e Moreira (2017)

O bambu é um material vegetal, portanto as dimensões do colmo nem sempre são perfeitas e possuem pouco padrão. Nota-se também uma variação entre a espessura de parede em bambus de mesma espécie. Essas variações são acentuadas quando a colheita é feita em bambuzais que possuam pouco ou nenhum

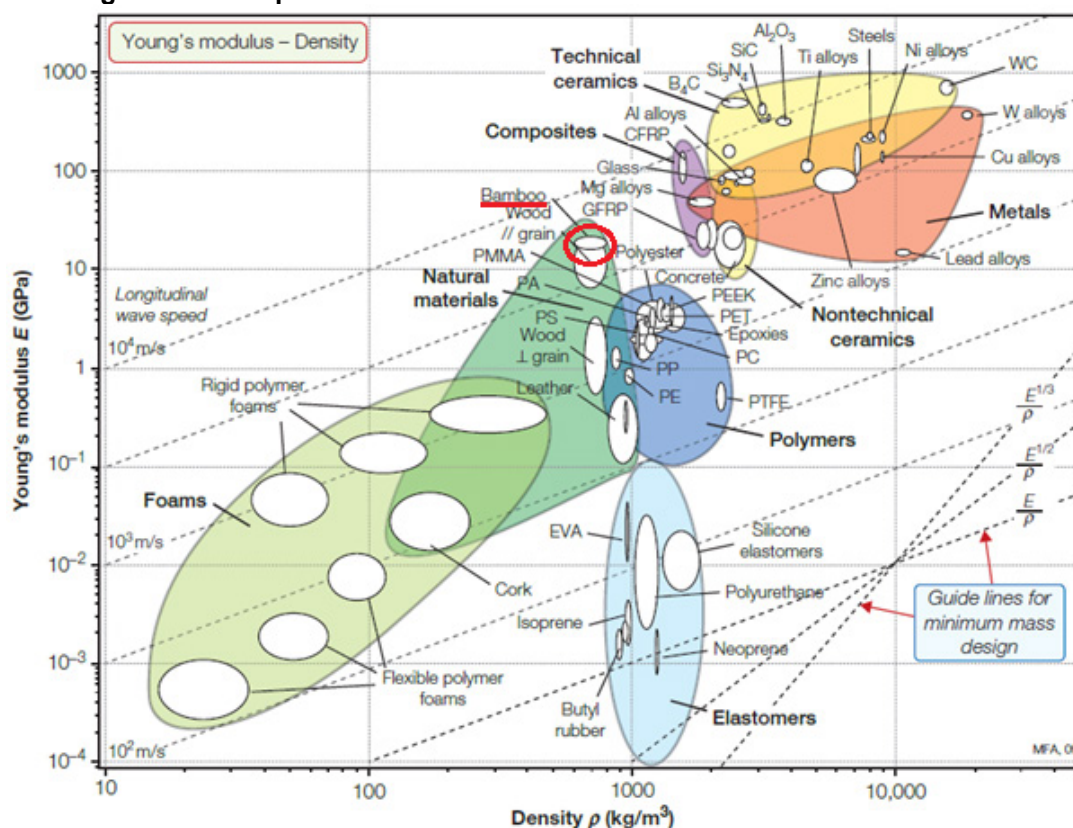
manejo. Um bambuzal com um manejo adequado conduz a uma maior uniformidade dos bambus.

Em comparação com os principais tipos de madeiras os bambus são superiores a todos eles, pois seus valores de resistência à tração e seu módulo elástico se sobressaem. Mesmo sabendo que a densidade do bambu é superior a quase todos os tipos de madeiras, suas propriedades específicas são superiores também.

Para efeito de comparação entre materiais diversos na Figura 9, onde se está plotado o módulo de Young pela densidade de diversos materiais e classes, podemos localizar bambu em termos de módulo de elasticidade e densidade, juntamente com outros grupos de materiais. Na Figura 9 observa-se que entre os materiais naturais o bambu é o que possui uma das densidades mais altas e também um dos maiores módulos de elasticidade.

Nascimento, et al (2002), diz que o *Bambusa tuldoides* apresenta valores para a resistência à compressão paralela às fibras variando de 65,8 a 88,2 MPa, e para a resistência ao cisalhamento de 11,5 a 15,8 MPa.

Figura 9 - Exemplos de diversos materiais e seus módulos de Elasticidade



Fonte: ASHBY (2011)

2.7 HONEYCOMB DE BAMBU

Segundo Oliveira, et al (2020) a geometria circular do bambu tem potencial para ser usada como material de núcleo para estruturas em painel sanduíche de forma a se obter um compósito de alta resistência. Isso pode ser feito com a correta seleção dos materiais que compõem as faces e núcleos, já que a ligação face-núcleo é considerada um fator crítico no desempenho mecânico dos painéis sanduíche. Cen, et al (2017) diz que esse fator crítico é devido a adesão entre as seções individuais do núcleo com as partes estruturalmente mais fracas do sanduíche.

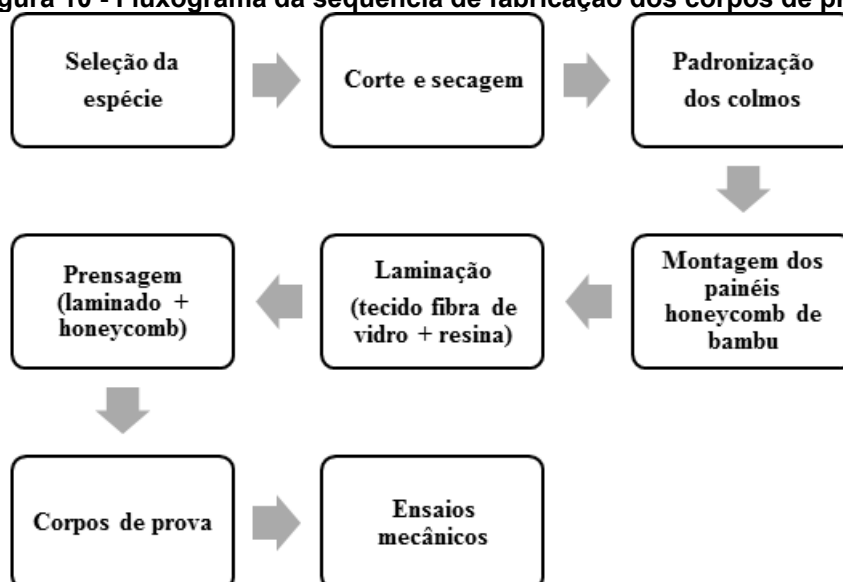
Além disso, dois tipos de ligação são comumente usados nessa situação: mecânica e adesiva, com a adesiva apresentando um uso mais amplo devido ao baixo valor de concentrações de estresse, redução efetiva de peso e distribuição de carga uniforme (CALIK, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 FABRICAÇÃO DO NÚCLEO *HONEYCOMB*

Na figura 10 é apresentado um fluxograma com a sequência de processos realizados para a fabricação dos corpos de prova para ensaio de flexão, ensaio de compressão e ensaio cisalhamento, que vão desde a etapa de seleção das espécies, sendo um dos fatores mais importantes no processo de produção, até os resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

Figura 10 - Fluxograma da sequência de fabricação dos corpos de prova



Fonte: Autoria Própria (2019)

Os núcleos dos painéis foram produzidos a partir da espécie *Bambusa tuldoides*, esta espécie é abundante em todo o território nacional e pôde ser colhida dentro da UTFPR do campus de Pato Branco, além disso, já existem trabalhos desenvolvidos sobre suas propriedades mecânicas. Os colmos foram cortados com idade aproximada de 1,5 anos.

A secagem foi feita de forma natural durante dois meses, neste período o bambu esteve armazenado em pé dentro de um galpão. Deve-se manter os bambus em local arejado e principalmente protegê-los da incidência de raios solares, pois isto resulta em rachaduras no bambu.

O corte do bambu maduro é feito na espessura que se deseja para o projeto, descartando a região dos nós, os nós são concentradores de tensão e as propriedades mecânicas nessa região possuem grande variação.

A padronização dos colmos ocorreu inicialmente com a triagem, separando-os pelas condições iniciais do bambu e posteriormente pela variação do diâmetro. O corte foi realizado numa serra-fita disponibilizada no laboratório de Engenharia Civil da UTFPR, seguindo um comprimento padronizado que facilitaria a montagem dos painéis, para tal, a espessura do núcleo adotada para os ensaios de cisalhamento e compressão foi de 20 mm; e espessura de 42 mm para o ensaio de flexão. As espessuras dos colmos foram padronizadas de acordo com seus diâmetros, então se o colmo apresentava 45 mm de diâmetro ele foi cortado com 45 mm de altura.

3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os materiais adesivos utilizados neste trabalho foram: resina sintética termofixa estrutural epóxi e resina poliuretana derivada do óleo de mamona, que segundo Santos, Godinho e Pereira (2017) também é termofixa. Cada face possui aproximadamente 0,4 mm de espessura, resultado da união de 2 camadas de tecido de fibra de vidro, essa espessura foi escolhida pois acompanha a tendência de placas *honeycomb* comerciais (ONEBOND, 2021).

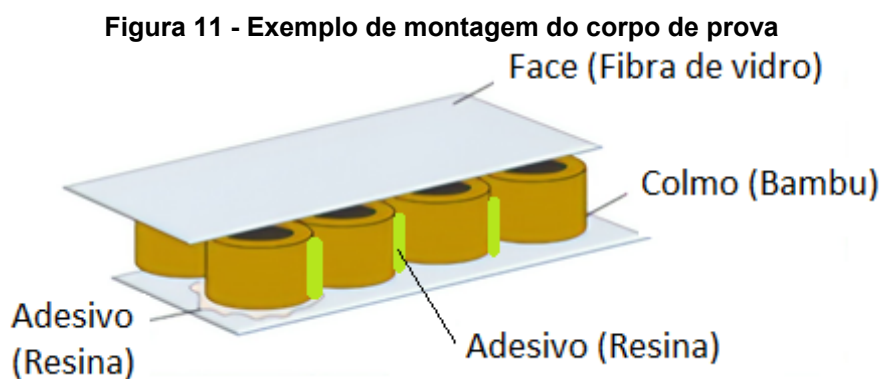
Foram fabricados ao todo 18 corpos de prova que seguem dimensões adaptadas dentro das limitações de suas respectivas normas vigentes, essas dimensões estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova

Ensaio	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Corpos com resina de mamona (quantidade)	Corpos com resina epóxi (quantidade)
Flexão	88	575	3	3
Compressão	75	75	3	3
Cisalhamento	75	180	3	3

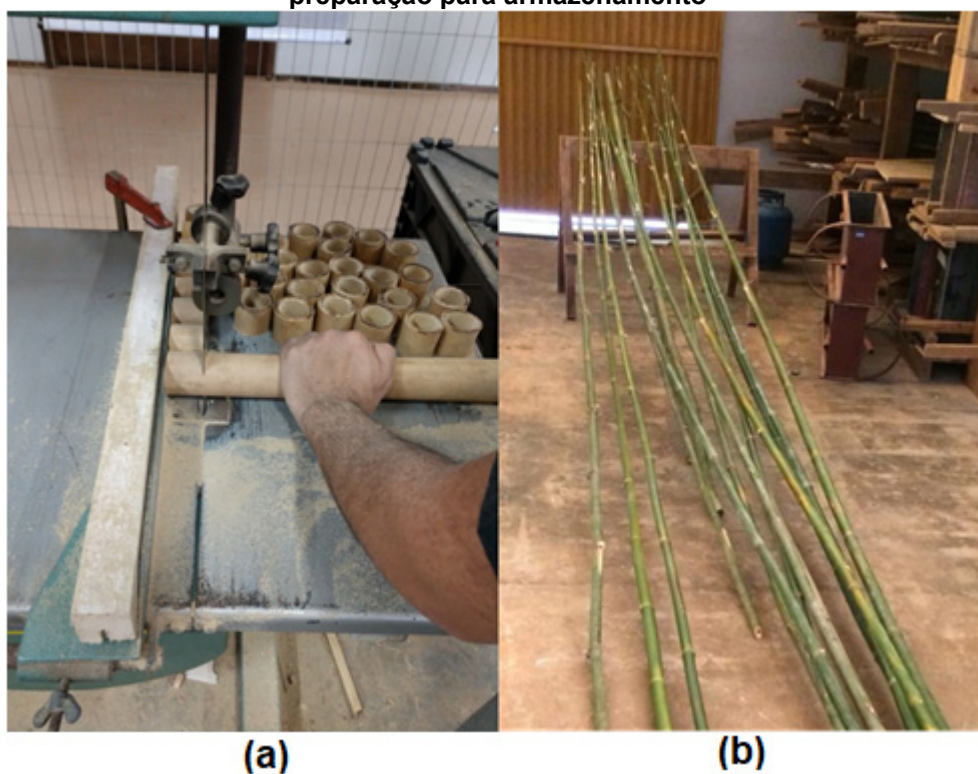
Fonte: Autoria Própria (2020)

A figura 11 apresenta de maneira esquemática os corpos de provas fabricados neste trabalho.



Fonte: Autoria Própria (2019)

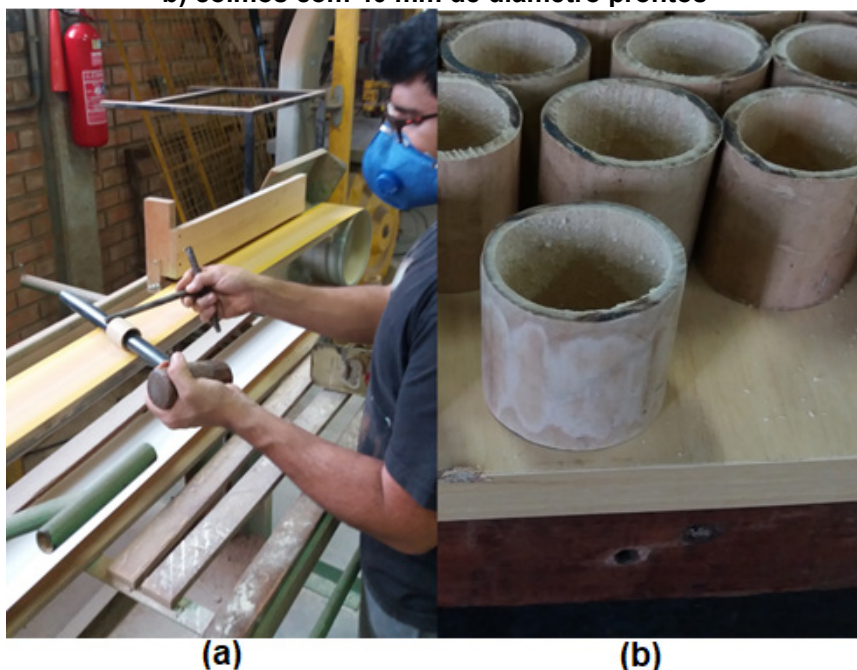
Figura 12 - Corte e preparação do bambu: a) corte do bambu com 40 mm de diâmetro b) preparação para armazenamento



Fonte: Autoria Própria (2019)

Após o corte e seleção dos colmos como mostra a figura 12 foi feito o lixamento dos mesmos da maneira apresentada na figura 13, eliminando irregularidades presentes em sua casca e gerando porosidade que irá auxiliar na aderência entre os colmos e a resina.

Figura 13 - Lixamento da camada externa do bambu: a) lixamento da casca externa dos colmos b) colmos com 40 mm de diâmetro prontos



Fonte: Autoria Própria (2019)

Após a preparação dos colmos iniciou-se a colagem dos mesmos, o núcleo é montado antes de sua laminação nas faces, como vemos na imagem 14 cada colmo é unido aos outros utilizando a resina. Então foram colocados em gabaritos fabricados de madeira para que mantenham-se próximos e alinhados durante a cura, para que o *honeycomb* tome forma com medidas padrão para os corpos de prova. Pode-se ver o núcleo preparado dentro dos gabaritos na imagem 15. O processo de cura total de ambas as resinas durou 48 horas.

Figura 14 – Aplicação de resina no bambu para colagem do núcleo: a) aplicando camada de resina b) gabaritos para produção do núcleo *honeycomb*



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 15 - Núcleo preparado dentro do gabarito



Fonte: Autoria Própria (2019)

Após a colagem dos colmos e montagem do *honeycomb* deve-se lixar as bases para que tenham planicidade e porosidade para que garanta uma forte aderência às faces de fibra de vidro, este processo está demonstrado na figura 16.

Figura 16 - Base do *honeycomb* sendo lixada a fim de garantir planicidade e rugosidade



Fonte: Autoria Própria (2019)

A Figura 17 demonstra o núcleo *honeycomb* finalizado e pronto para ser utilizado como núcleo inercial nos corpos de prova.

Figura 17 - Núcleo honeycomb de bambu finalizado



Fonte: Autoria Própria (2019)

3.3 LAMINAÇÃO DAS FACES

Os materiais utilizados para a laminação das faces de fibra de vidro são apresentados na Figura 18. Utilizou-se tecido de fibra de vidro com trama biaxial (0 e 90 graus) de gramatura 200 g/m². Para o desmolde foi usado cera Tecglaze N em conjunto com o desmoldante PVA Verde. Para a matriz do compósito temos dois lotes separados, um utilizando resina Redelease Epóxi 2001 com endurecedor Redelease Epóxi 3154 e outro lote com resina (a base de poliuretano vegetal) de mamona Imperveg AGT 1315 mais as ferramentas para medição, corte da fibra e manuseio das resinas.

Figura 18 - Materiais usados para laminação das faces



Fonte: Autoria Própria (2019)

A fibra foi cortada com dimensões maiores do que as necessárias para os corpos de prova, pois é necessário que haja rebarba para ser removida para dar um acabamento final. Antes da laminação iniciou-se a pesagem de toda a fibra que foi usada. O processo de medição e preparação da fibra está presente nas figuras de 19 a 21.

Figura 19 - Medição e corte da fibra



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 20 - Fibra preparada no tamanho certo para uso



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 21 - Pesagem da fibra

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Preparamos uma mistura para cada resina apresentadas nas figuras 22 e 23, sua quantidade é baseada no peso total da fibra de vidro que obteve-se anteriormente, o peso em fibra é feito igualmente em resina adicionando-se 10% do resultado para compensar perdas que podem ocorrer durante a aplicação na laminação, ou seja se eu fizer o corte da fibra e seu peso total for 200 gramas deve-se preparar um total de 220 gramas de resina. O peso apresentado na figura 21 não é o peso utilizado para cálculo da quantidade de resina que foi utilizada.

Figura 22 - Preparação da Resina Epóxi



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 23 - Preparação da Resina de Mamona



Fonte: Autoria Própria (2019)

Após a pesagem da quantidade adequada de cada resina foi feita a preparação da superfície para a laminação das faces apresentada nas figuras 24 e 25, com a temperatura ambiente se aproximando de 28 °C, foram aplicadas três camadas de cera de carnaúba com o intervalo de 10 minutos para que ocorresse melhor aderência sobre o vidro, em seguida ocorreu a aplicação de duas camadas de desmoldante PVA verde no intervalo de 15 minutos, com finalidade de garantir o desmolde das faces.

Figura 24 - Aplicação de cera desmoldante



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 25 - Aplicação de Desmoldante PVA verde



Fonte: Autoria Própria (2019)

Após a preparação adequada da superfície de laminação, foi adicionada uma camada de resina sobre a superfície como indica a figura 26 e em seguida

foram aplicadas duas camadas de tecido de fibra de vidro, para que a resina seja absorvida por igual pelo tecido garantindo uma face homogênea. Como processo fundamental da laminação das faces deve-se aguardar um total de 72 horas para que ocorra a completa polimerização da resina.

Figura 26 - Preparação de uma base de vidro para laminação das faces



Fonte: Aatoria Própria (2019)

3.4 MONTAGEM DO PAINEL SANDUÍCHE

Com as faces devidamente laminadas e a resina completamente curada, ocorreu então a desmoldagem das mesmas, descolando-as da superfície de vidro com cuidado e em seguida se iniciou a montagem dos painéis sanduíche.

Para a sua montagem foi feita a colagem do núcleo de bambu na face laminada inferior e na sequência a face superior, depositando uma fina camada de resina nas faces para garantir que sua união não precise do auxílio de prensa mecânica. Por fim os painéis são padronizados conforme respectivas normas.

As Figuras de 27 a 32 demonstram os passos da montagem do painel sanduíche dos corpos de prova para os ensaios de Flexão e Compressão que são regidos pelas normas ASTM D7249 e ASTM C365/365M respectivamente.

Figura 27 - Colagem do núcleo em uma face – FLEXÃO MAMONA



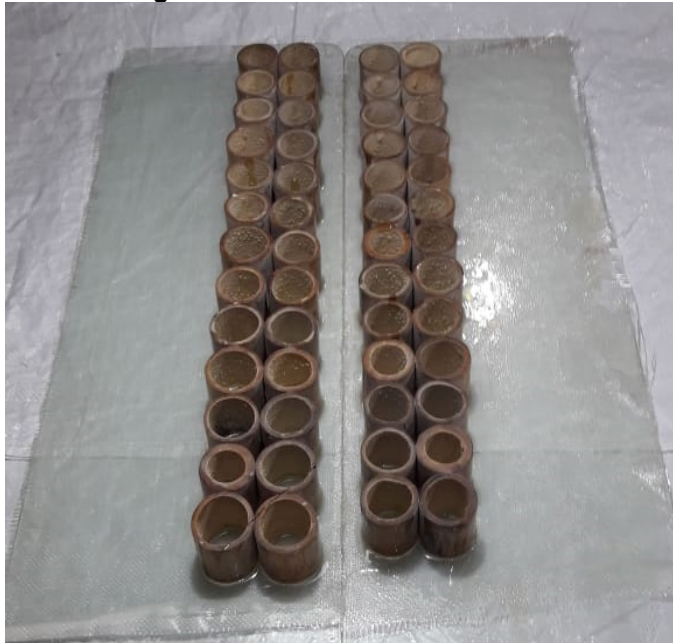
Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 28 - Colagem da última face – FLEXÃO MAMONA



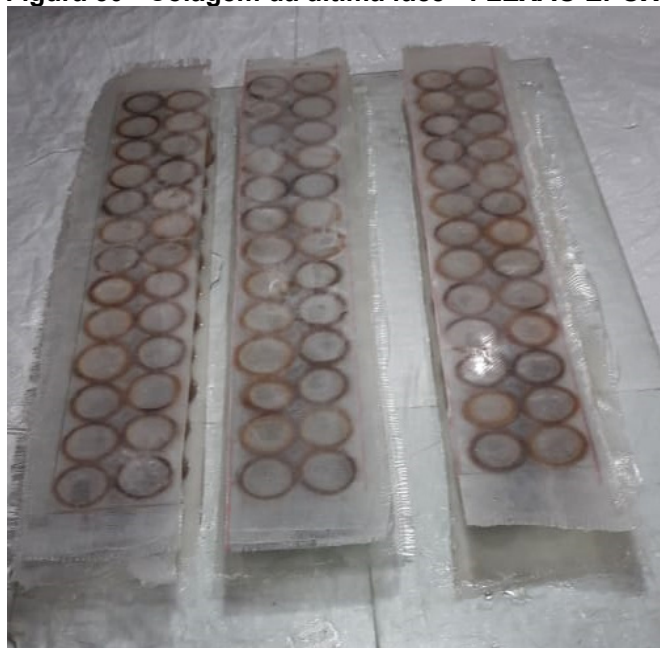
Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 29 - Colagem do núcleo em uma face - FLEXÃO EPÓXI



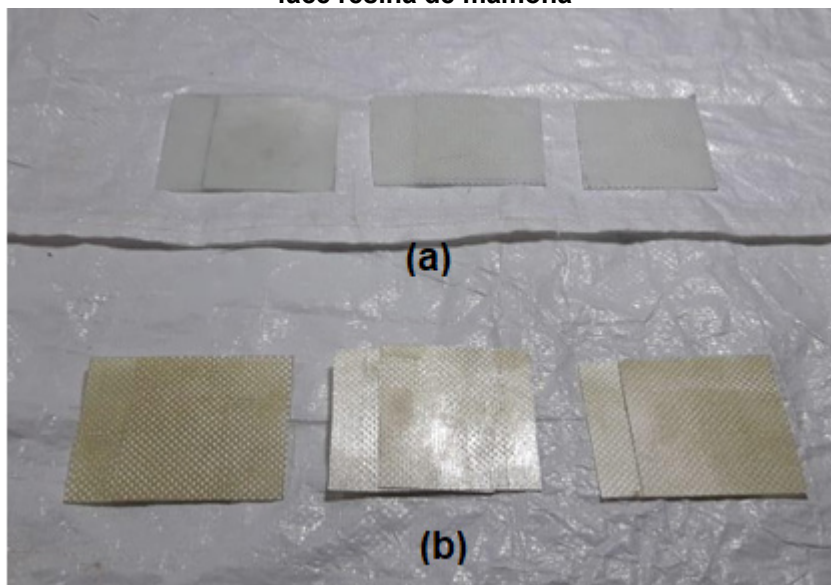
Fonte: Aatoria Própria (2019)

Figura 30 - Colagem da última face - FLEXÃO EPÓXI



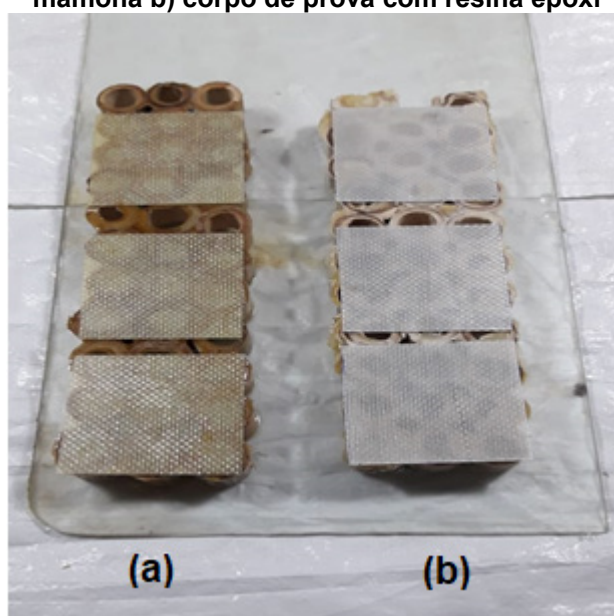
Fonte: Aatoria Própria (2019)

Figura 31 - Faces preparadas para colagem no núcleo – COMPRESSÃO: a) face resina epóxi b) face resina de mamona



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 32 - Faces coladas nos núcleos – COMPRESSÃO: a) corpo de prova com resina de mamona b) corpo de prova com resina epóxi



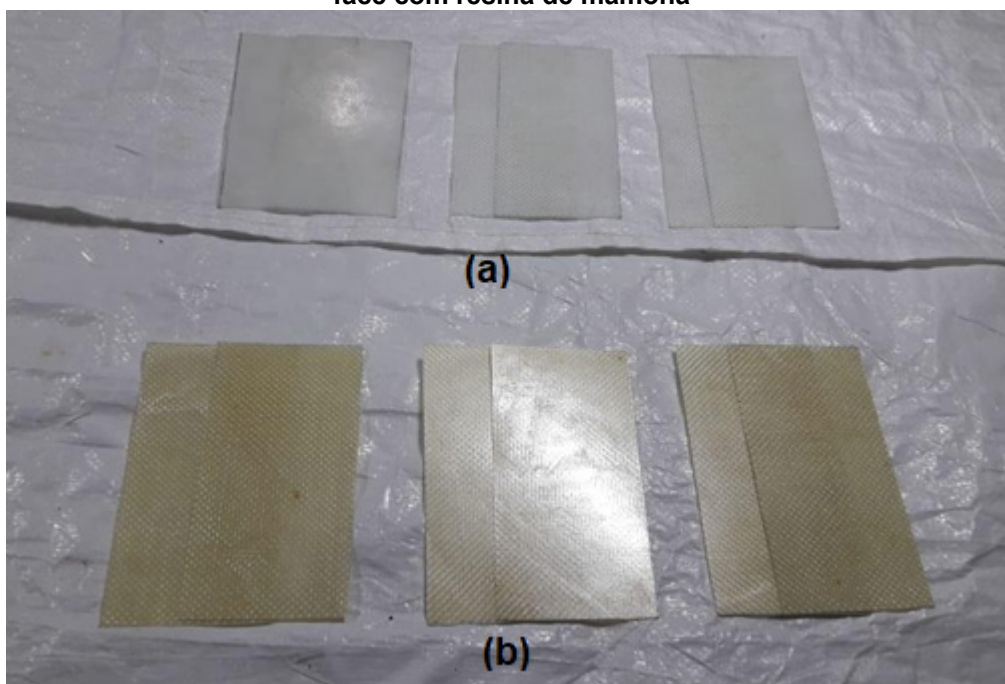
Fonte: Autoria Própria (2019)

Para a montagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento seguimos a norma ASTM C273, para utilizar a máquina de forma correta, se fez necessária adição de chapas de aço ASTM 1020, com abas permitindo que a pinça

da máquina tracione o corpo de prova. As abas são necessárias para seguir o padrão de encaixe dos corpos de prova na máquina conforme exigência da norma.

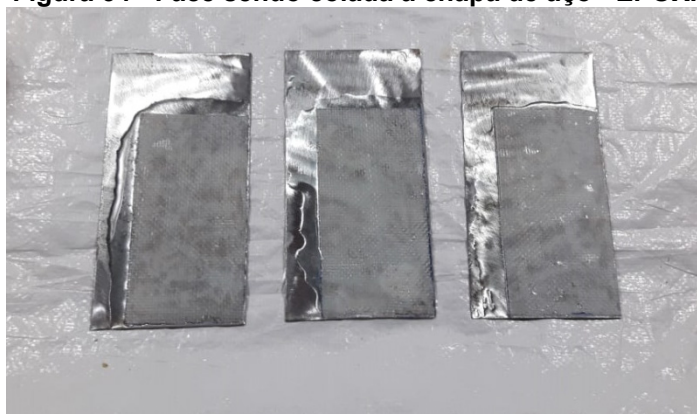
Conforme a Figura 33 estas placas servem de base às faces de fibra de vidro. As imagens de 34 a 36 demonstram os passos seguidos para a montagem destes corpos de prova.

Figura 33 - Faces prontas para serem coladas – CISCALHAMENTO: a) face com resina epóxi b) face com resina de mamona



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 34 - Face sendo colada à chapa de aço - EPÓXI



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 35 - Colagem do núcleo - EPÓXI



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 36 - Aparência final do corpo de prova de cisalhamento



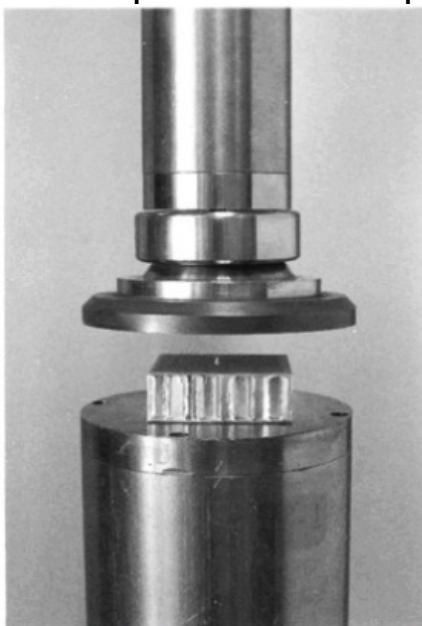
Fonte: Autoria Própria (2019)

3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão seguiu a norma ASTM C365/365M.

A figura 37 demonstra o posicionamento no ensaio apresentado pela norma.

Figura 37- Exemplo de ensaio de compressão



Fonte: ASTM C365/365M (2016)

A equação 2 a seguir foi usada para determinar a resistência à compressão do compósito.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Onde:

σ = Resistência a compressão do compósito, em MPa;

P = Carga máxima aplicada, em N;

A = Área da seção transversal, em mm².

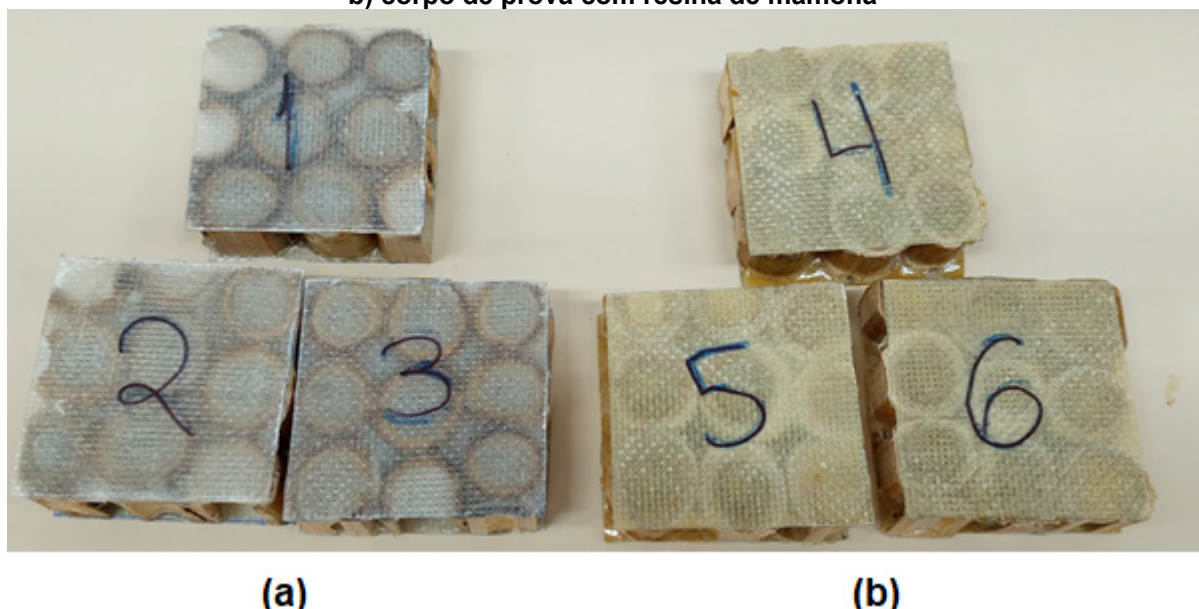
O ensaio de compressão foi realizado em uma Máquina Universal EMIC de capacidade de 300 kN com uma velocidade de aplicação de carga de 0,5 mm/min.

O corpo de prova foi colocado centralizado junto à cabeça móvel da máquina de ensaios. Após o ensaio sua resistência à compressão foi calculada através da equação 2 apresentada no item 3.5.

Para isso deve-se calcular também a área média transversal do corpo de prova, já que o bambu possui uma forma que não é perfeitamente circular e cada colmo se diferencia um pouco um do outro. Para isso foram medidos diâmetros internos e externos dos colmos durante a fase de padronização descrita no item 3.2 e feita uma média entre esses valores, assim chegamos então à média de 12,37 mm de Raio externo e 8,80 de raio interno.

A imagem 38 mostra os corpos de prova utilizados no ensaio antes de serem testados.

Figura 38 - Corpos de prova para ensaio de compressão: a) corpo de prova com resina epóxi b) corpo de prova com resina de mamona



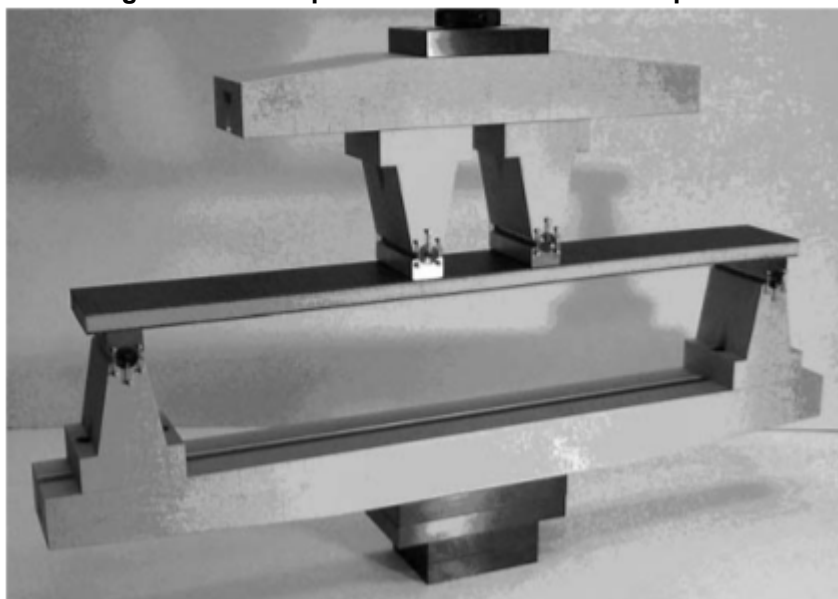
Fonte: Autoria Própria (2020)

3.4 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio de flexão em quatro pontos foi efetuado para obter os resultados de flexão dos 6 corpos de provas fabricados conforme descrito anteriormente, seguindo a Norma ASTM D7249.

Na figura 39 é apresentado um exemplo de ensaio de flexão de 4 pontos que está presente na norma, enquanto a figura 40 apresenta as dimensões de posicionamento que devem ser medidas durante o ensaio.

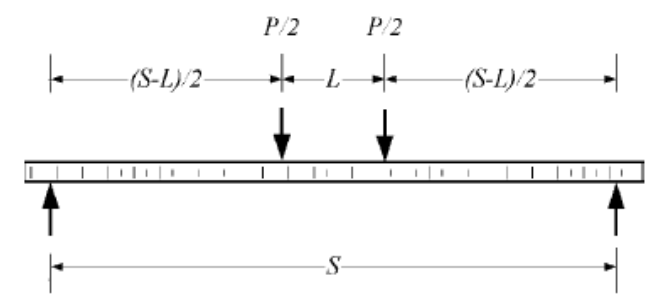
Figura 39 - Exemplo de ensaio de flexão de 4 pontos



Fonte: ASTM D7249 (2014)

As equações 3 e 4 são usadas para a determinação da resistência à flexão estão apresentadas seguir.

Figura 40 - Posicionamento dos pontos de apoio e de carga no teste de flexão



Configuration		Support Span (<i>S</i>)	Load Span (<i>L</i>)
Standard	4-Point	560 mm [22.0 in.]	100 mm [4.0 in.]
Non-Standard	3-Point (Mid-span)	<i>S</i>	0.0
	4-Point (Quarter-Span)	<i>S</i>	<i>S</i> /2
	4-Point (Third-Span)	<i>S</i>	<i>S</i> /3

Fonte: ASTM D7249 (2014)

$$F_1^u = \frac{P_{max}(S - L)}{2(d + c)bt_1} = \frac{P_{max}S(1 - \frac{L}{S})}{4(d - \frac{t_1}{2} - \frac{t_2}{2})bt_1} \quad (3)$$

$$F_2^u = \frac{P_{max}(S - L)}{2(d + c)bt_2} = \frac{P_{max}S(1 - \frac{L}{S})}{4(d - \frac{t_1}{2} - \frac{t_2}{2})bt_2} \quad (4)$$

Onde:

F_1^u = Resistência da face 1, em MPa;

F_2^u = Resistência da face 2, em MPa;

P_{max} = Carga máxima aplicada antes da falha, em N;

t_1 = Espessura nominal da face 1, em mm;

t_2 = Espessura nominal da face 2, em mm;

d = Espessura total medida do painel, em mm;

c = Espessura calculada do núcleo, em mm (para corpos de prova com espessuras de face iguais, $c = d - 2t$; para corpos de prova com espessuras de face diferentes, $c = d - t_1 - t_2$);

b = Largura do corpo de prova, em mm;

S = Distância entre os pontos de apoio, em mm;

L = Distância entre os pontos de aplicação de carga, em mm.

O ensaio de flexão de 4 apoios foi realizado em uma máquina universal EMIC de capacidade de 300 KN com uma velocidade de aplicação de carga de 1,5 mm/min.

Os corpos foram dispostos com apoios espaçados em 487,5 mm, o aplicador de carga estava espaçado em 188 mm entre seus dois pontos de aplicação, assim como demonstra a Figura 41. Apoios e os pontos de aplicação de carga não podiam ser movidos, já que as peças da máquina para este fim estavam danificadas. Felizmente o posicionamento foi satisfatório para a realização do ensaio.

Figura 41 - Posicionamento do corpo de prova no ensaio de Flexão



Fonte: Autoria Própria (2020)

A imagem 42 mostra os corpos de prova utilizados no ensaio antes de serem testados.

Figura 42 - Corpos de prova usados no ensaio de flexão: a) corpo de prova com resina epóxi b) corpo de prova com resina epóxi



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria (2020)

3.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO

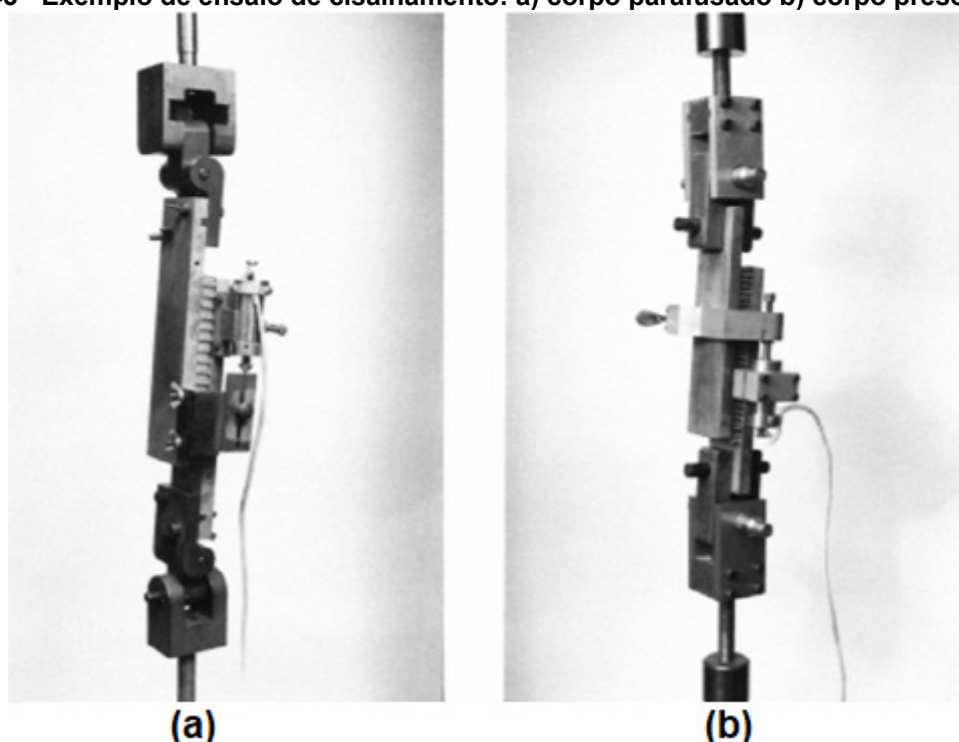
O ensaio de cisalhamento seguiu a norma ASTM C273.

Para o corpo de prova a norma exige que ele possua ao menos 50 mm de largura, como o corpo usado tem 75 mm de largura então ele está dentro do padrão exigido.

A norma exige que a velocidade de aplicação de carga resulte em uma falha do corpo de prova após 3 minutos e antes de 6 minutos de teste. Além disso também é apresentada a velocidade recomendada para a aplicação da carga de 0,5 mm/min, que foi a velocidade utilizada nos testes.

A figura 43 mostra a forma ideal de fixação do corpo de prova no equipamento durante o ensaio de cisalhamento.

Figura 43 - Exemplo de ensaio de cisalhamento: a) corpo parafusado b) corpo preso por pino



Fonte: ASTM C273 (2000)

A equação 5 foi usada para determinar a resistência ao cisalhamento.

$$\tau = \frac{P}{Lb} \quad (5)$$

Onde:

τ = Resistência ao cisalhamento, em MPa;

P = Carga máxima aplicada ao corpo de prova, em N;

L = Comprimento do corpo de prova, em mm;

b = Largura do corpo de prova, em mm.

A equação 6 foi usada para determinar o módulo de elasticidade.

$$G = \frac{St}{Lb} \quad (6)$$

Onde:

G = Módulo de cisalhamento, em MPa;

S = $\Delta P/\Delta u$, inclinação inicial da curva de carga-deformação, em N/mm;

u = deslocamento da célula de carga;

t = Espessura do núcleo, em mm;

O ensaio de cisalhamento foi realizado em uma Máquina Universal EMIC de capacidade de 300 KN com uma velocidade de aplicação de carga de 0,5 mm/min.

A Figura 44 apresenta os corpos de provas preparados para serem postos na máquina de tração para a realização do ensaio. Um dos corpos feito de resina epóxi apresentou defeitos antes de o teste ser iniciado e foi descartado de antemão.

Figura 44 - Corpos de prova usados no ensaio de Cisalhamento



Fonte: Autoria Própria (2020)

A figura 45 apresenta o posicionamento do corpo de prova na máquina de tração.

Figura 45 - Posicionamento do corpo de prova no ensaio de cisalhamento



Fonte: Autoria Própria (2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados experimentalmente dos ensaios de caracterização mecânica do painel sanduíche com núcleo inercial tipo *honeycomb* de bambu da espécie *Bambusa tuldooides*.

4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Para o ensaio de compressão, foram testadas 6 amostras, sendo 3 amostras fabricadas com resina epóxi e 3 amostras fabricadas com resina de mamona.

Na Tabela 2 vemos os valores de carga máxima que cada corpo de prova conseguiu suportar e através deste valor foram calculadas as resistências últimas de compressão que também estão expostas na tabela. Com estes valores calcula-se a média e o desvio padrão cujos valores são respectivamente 62,9 MPa e $\pm 2,6$ MPa.

Tabela 2 - Resultados Finais – COMPRESSÃO

Resinas	Corpo de Prova	Carga Aplicada (N)	Resistência (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)
Epóxi	Corpo 1	132102,3	60,5	
Epóxi	Corpo 2	137895,9	63,1	$\pm 2,12$
Epóxi	Corpo 3	143519,6	65,7	
Mamona	Corpo 4	142510,7	65,3	
Mamona	Corpo 5	139154,5	63,7	$\pm 2,54$
Mamona	Corpo 6	129545,3	59,3	

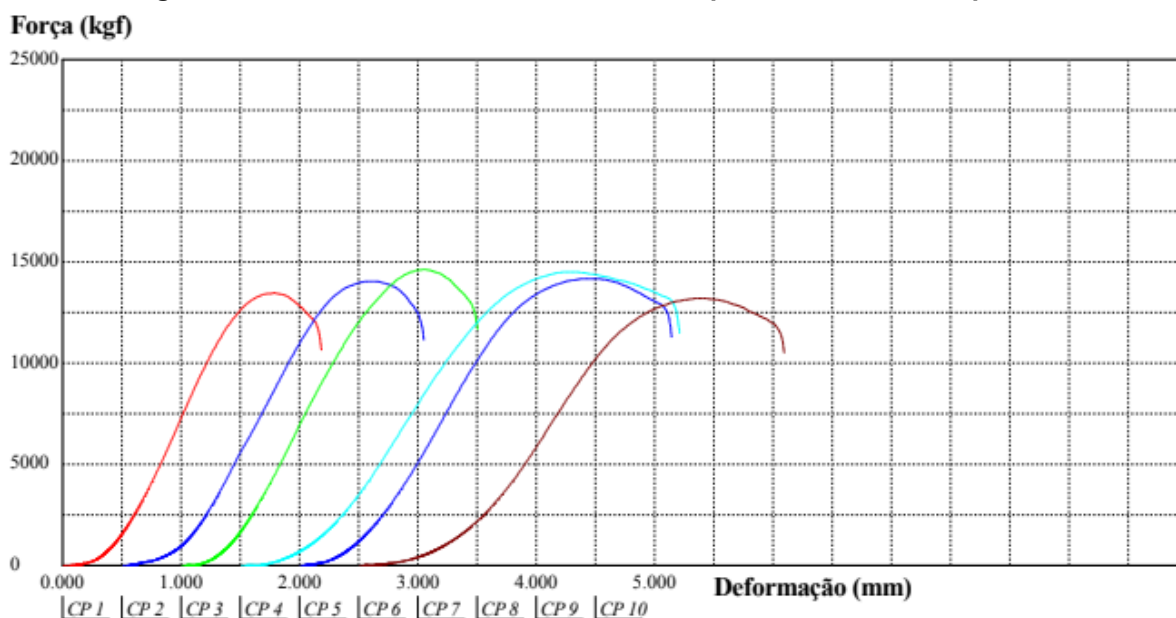
Fonte: Autoria Própria (2021)

Podemos observar através da Figura 46 que os corpos de prova 4, 5 e 6, que foram feitos com resina de mamona, puderam se deformar mais antes de sua falha crítica, apresentando maior tenacidade em comparação aos feitos com resina epóxi.

Porém essa diferença na deformação não ocorre com a resistência mecânica em si, em uma situação de apenas cargas compressivas pode-se usar a resina de mamona no lugar da epóxi, pois o valor médio de resistência a compressão dos corpos de prova de resina epóxi é de 63,1 MPa e comparando com

o valor de 62,7 MPa dos corpos de prova com resina de mamona vemos uma diferença de apenas 0,7%.

Figura 46 - Gráfico Força x Movimento da Máquina, ensaio de compressão



Fonte: Autoria Própria (2020)

Segundo Nascimento, et al (2002) os valores de resistência a compressão do *Bambusa tuldoides* variam entre 65,8 e 88,2 MPa, portanto há uma diferença de 5% entre o resultado encontrado e o mínimo esperado da espécie. Essa diferença se deu à provável colheita prematura do bambu.

Além disso, os métodos de fabricação dos corpos de prova foram bem executados gerando resultados com um desvio padrão que representa 4,1% da resistência à compressão, podemos entender através deste resultado que conseguiu-se uma área plana para distribuir uniformemente a carga em todos os corpos de prova.

Figura 47 - Corpos de prova de compressão com núcleo rachado



Fonte: Aatoria Própria (2020)

Observando a Figura 47 acima verificou-se que foi gerada uma das falhas características do ensaio de compressão, que é o rompimento externo do núcleo, não pudemos caracterizar o rompimento interno e nem esmagamento pois se trata de um compósito e não é possível a visualização de outras falhas. Observa-se o rompimento externo dos colmos no sentido longitudinal independente da resina utilizada, esse rompimento se deve à carga compressiva sendo distribuída de forma unidirecional entre os feixes de fibra presentes no bambu.

Os corpos de prova apresentaram boas resistências mecânicas quando comparamos com outros tipos de compósitos com fibras naturais como a cortiça, inclusive se compararmos sua resistência a compressão a de alguns metais, como o *honeycomb* de alumínio A5500-H19 apresentado por Rao, et al (2012) que possui 2,5 MPa de resistência à compressão. Assim podemos ver que o bambu tem grandes capacidades para se tornar um material de alto desempenho no futuro, já que não fica atrás em relação a suas resistências.

4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO

Para o ensaio de flexão, foram testadas 6 amostras, sendo 3 amostras fabricadas com resina epóxi e 3 amostras fabricadas com resina de mamona.

Conforme a Tabela 3 obteve-se um valor médio de 121,9MPa para a resistência à flexão para os corpos de prova de resina epóxi e 35,9 MPa para os corpos em resina de mamona.

Tabela 3 - Resultados Finais – FLEXÃO

Resinas	Corpo de Prova	Carga Aplicada (N)	Resistência (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)
Epóxi	Corpo 1	2876,8	137,9	
Epóxi	Corpo 2	1828	87,8	±29,61
Epóxi	Corpo 3	2906,8	140,2	
Mamona	Corpo 4	679,2	31,9	
Mamona	Corpo 5	1088,7	50,7	±13,26
Mamona	Corpo 6	529,4	25,1	

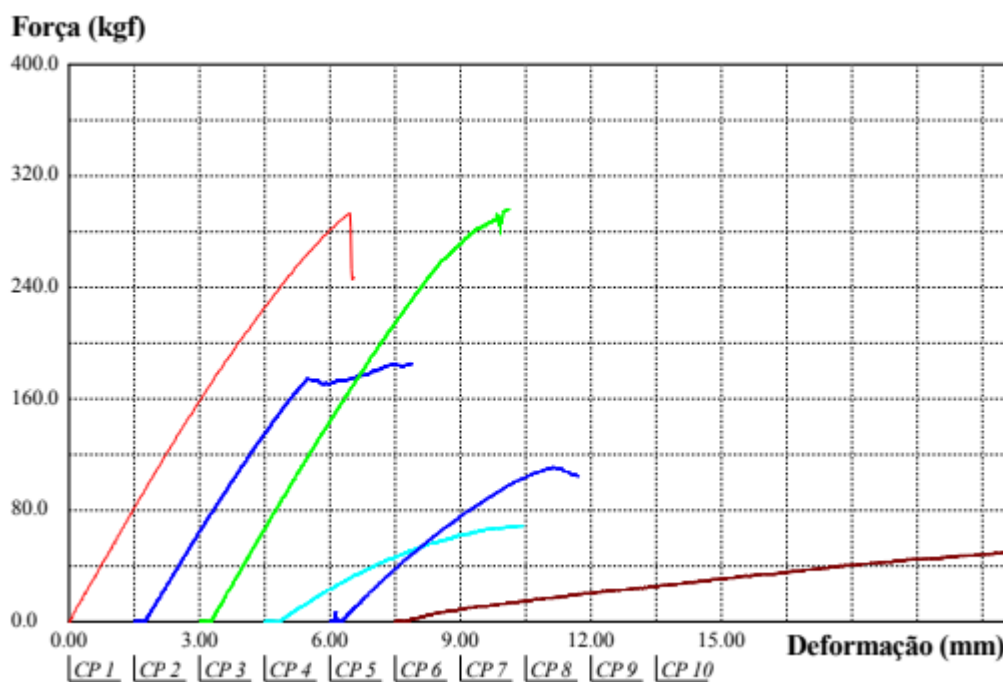
Fonte: Autoria Própria (2021)

Comparando os valores médios de resistência a flexão dos corpos de prova feitos de resina epóxi e os feitos com resina de mamona encontramos uma diferença de 70,5%, portanto em uma situação de cargas fletoras o recomendado é que se use a resina epóxi para fabricação do compósito.

Com a imagem 48 podemos ver que os corpos de prova fabricados com resina epóxi apresentam uma maior resistência à flexão junto com uma baixa deformação, já os corpos de resina de mamona têm uma resistência menor, porém uma alta capacidade de se deformar antes de falhar criticamente.

Isso era esperado como explicam Loth e Förster (2018) a falha que ocorre no teste de flexão é apenas na face, pois diferente de um compósito sanduíche feito de espuma (poliuretano) ou madeira maciça o núcleo feito de bambu quase nunca se quebra. Ou seja, como o bambu não irá falhar nesse caso então a resistência irá depender da fibra de vidro em união com a matriz polimérica, devido a isso vemos essa diferença entre os corpos produzidos com resina epóxi e os produzidos com mamona.

Figura 48 - Gráfico Força por Deformação - FLEXÃO



Fonte: Autoria Própria (2020)

As falhas características apresentadas nos corpos de prova foram de descolamento da interface entre face-núcleo e na maioria por enrugamento das faces.

A Figura 49 demonstra um dos tipos de falha característica, a falha por descolamento.

Figura 49 - Falha por Descolamento



Fonte: Autoria Própria (2020)

O descolamento é indicado por uma coloração “esbranquiçada”, assim possibilitando a visualização da falha entre face e núcleo. Este tipo de falha está relacionado a problemas na aderência entre o colmo e a face.

Apenas o corpo de prova de número 1 apresentou essa situação, os demais corpos de prova representados pela figura 50 e demonstraram o outro tipo de falha característico.

Figura 50 - Falha por Enrugamento



Fonte: Aatoria Própria (2020)

A falha por enrugamento está ligada a delaminação e descolamento da face superior que está em constante compressão durante o ensaio de 4 pontos, enquanto a parte inferior que está em tração resiste aos esforços atuantes.

4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO

Para o ensaio de cisalhamento, foram testadas 6 amostras, sendo 3 amostras fabricadas com resina epóxi e 3 amostras fabricadas com resina de mamona.

Para os cálculos foi usado o mesmo método apresentado no item 4.1, pois os corpos de prova para cisalhamento foram fabricados em conjunto aos de compressão, assim o padrão de colmos se manteve o mesmo. Dessa forma se obteve a Tabela 4 de resultados e um valor médio de 30,29 MPa para a resistência

ao cisalhamento. Através das deformações de cada corpo de prova se obteve o valor médio de 7,03 GPa para o módulo de cisalhamento.

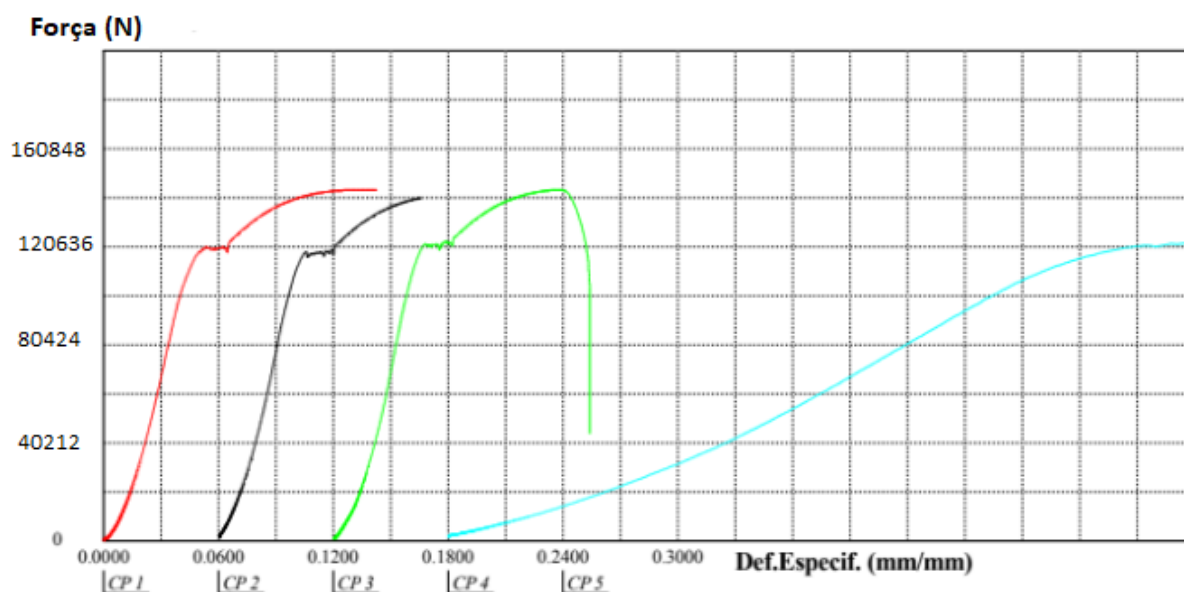
Tabela 4 - Resultados Finais – CISALHAMENTO

Resinas	Corpo de Prova	Carga Aplicada (N)	Resistência (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)
Mamona	Corpo 1	144208,3	30,54	
Mamona	Corpo 2	140762,2	29,81	±0,41
Mamona	Corpo 3	144148,3	30,53	
Epóxi	Corpo 4	-	-	
Epóxi	Corpo 5	-	-	
Epóxi	Corpo 6	-	-	

Fonte: Autoria Própria (2021)

A Figura 51 apresenta o gráfico obtido no ensaio. Os corpos de prova 1, 2 e 3 foram feitos com resina de mamona e foram os corpos que puderam ser ensaiados de forma correta.

Figura 51 - Gráfico de Força por Deformação Específica - CISALHAMENTO



Fonte: Autoria Própria (2020)

Durante a realização do ensaio os outros dois corpos de prova de resina epóxi apresentaram descolamento entre a face de fibra de vidro e a lâmina de aço logo no início do teste, então seguindo indicação da norma também foram descartados.

Estes três corpos apresentaram defeito devido à adesão defeituosa entre a face de fibra de vidro e a lâmina de aço, isso pode ter ocorrido devido a baixa porosidade superficial presente na chapa de aço.

Os corpos de prova de mamona apresentaram uma das falhas características deste ensaio, que foi o descolamento total entre face de fibra de vidro e núcleo. Algo que já era de esperar visto que a ligação feita pela resina entre a fibra de vidro e o bambu é o elo mais fraco neste tipo de painel sanduíche.

Segundo Dias, et al (2016), um painel sanduiche fabricado em um compensado naval apresenta 35,00 MPa de resistência ao cisalhamento, o que resulta em uma diferença percentual de 13% em comparação aos ensaios realizados no painel sanduiche de bambu, esse que após os testes obteve 30,29 MPa de resistência a esse mesmo modo de falha.

Essa comparação é plausível devido a semelhança entre a composição do núcleo dos painéis, uma vez que ambos os materiais são de origem vegetal e apresentam uma semelhança em suas propriedades por serem materiais anisotrópicos ASHBY (2011).

5 CONCLUSÃO

O método de padronização dos colmos gerou bons resultados, com um tamanho padrão de colmos em união com os gabaritos usados foi possível fabricar um núcleo *honeycomb* de bambu com uma estrutura padronizada, apresentando uma boa aparência e boa rigidez.

Foram feitos painéis sanduíches variando a resina utilizada, com o núcleo *honeycomb* e as faces de fibra de vidro previamente prontas se fez possível a montagem dos painéis sanduíches de forma que fossem satisfeitas as dimensões recomendadas pelas normas vigentes.

Os corpos de prova usados no ensaio de compressão apresentaram pouca variação entre si em relação a suas resistências, houve uma diferença de 0,6% entre a maior resistência encontrada para os corpos feitos de resina epóxi e os feitos de resina de mamona. A resistência a compressão média apresentada neste ensaio foi de 62,9 MPa e seu desvio padrão de $\pm 2,6$ MPa.

No ensaio de flexão os resultados apresentaram mais variação do que o esperado, aqui inclusive deve-se comparar os resultados de mamona separadamente dos resultados dos corpos de resina epóxi. Houve uma diferença de 70% entre a resistência a flexão média dos corpos de resina epóxi e os de mamona, sendo que os de mamona resistiram menos que os de epóxi, apesar de poderem se deformar muito mais antes de falhar sua baixa resistência a flexão pode se tornar um problema dependendo da aplicação.

Quanto ao ensaio de cisalhamento foram obtidos valores apenas para os corpos de prova feitos com resina de mamona, pois os de resina epóxi apresentaram falha durante o ensaio. Devido a exigências da norma foi necessário fazer uma adaptação dos corpos de prova, laminando uma chapa de aço em conjunto com a face de fibra de vidro, a chapa de aço apresentou menos porosidade do que o esperado e isso prejudicou a adesão entre ela e a fibra de vidro nos corpos de prova feitos com resina epóxi, isto inviabilizou os ensaios. Para os corpos feitos com resina de mamona se obteve o valor de 30,29 MPa para a resistência ao cisalhamento e 7,03 GPa para o módulo de elasticidade em cisalhamento.

No caso da resina se o compósito for ser aplicado em uma situação onde o esforço exigido será o de compressão ou de cisalhamento então pode-se usar a

resina de mamona, no entanto se for ser colocado em situação de flexão deve-se usar a resina epóxi estrutural, pois a de mamona irá se deformar com pouco esforço e apesar de sua grande capacidade de deformar isso não é vantajoso.

Apesar disso a resina de mamona se mostrou uma boa alternativa pelos resultados apresentados e pelo seu maior grau de sustentabilidade comparada com a resina epóxi.

Destaca-se a importância de desenvolver pesquisas de um material não-convencional como o bambu, com alta abundância no território nacional e que apresenta um bom comportamento mecânico quando solicitado a esforços tanto estáticos quanto dinâmicos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à versatilidade de aplicações do bambu esta matéria prima deve ser estudada além do que foi desenvolvido neste trabalho, como proposta de novas linhas de pesquisa sugere-se estudos na área térmica e acústica, já que o bambu é um bom absorvedor de vibrações ele pode se tornar um bom isolante acústico e também considerando que o bambu quando aplicado em um painel sanduíche cria regiões preenchidas com ar, assim acredita-se que poderia se torna um bom isolante térmico. Além disso, os ensaios de cisalhamento poderiam ser refeitos afim de se obter valores para o compósito feito com resina epóxi.

REFERÊNCIAS

ALMACO. Livro Compósitos 5 : Alto Desempenho. Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos, 2013.

ASHBY, M. F. Materials Selection in Mechanical Design. 4^a Ed. 2011, 640p.

ASTM C273/C273M-19 Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, Available in: www.astm.org

ASTM C365 / C365M-16, Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, Available in: www.astm.org

ASTM D7249 / D7249M-18, Standard Test Method for Face sheet Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, Available in: www.astm.org

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia dos materiais. 7ed. Rio de Janeiro: GenLtc, 2012, Cap 16.

DIAS, C. G B. T.; SANTOS, E. J. S.; BRITO, R. S.; OLIVEIRA, V. C. C.; TAKETA, V. M. Y. R.; Análise Mecânica de Estruturas Sanduíche com Diferentes Núcleos. 22o Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, 2016.

FCT NOVA. Estruturas Auxéticas. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade NOVA de Lisboa, 2018. Disponível em: <https://www.fctfablab.fct.unl.pt/projetos/estruturas-auxeticas>. Acesso em: 28/04/21

FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. Tecnologias e materiais alternativos de construção. Campinas: Ed. da UNICAMP, 2003. 319 p.

GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P.; MOREIRA, L. E. Bambu como Material de Engenharia. In book: Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Conforto Ambiental, Durabilidade e Pós-Ocupação. Porto Alegre: ANTAC, 2017. p.305-348.

GOMES, Mauricio Neves. Tratamento térmico pré e pós-cura de diferentes compósitos: análise térmica, resistência à flexão e grau de conversão. 2008.

Dissertação (Mestrado em Odontologia) — Programa de Pós-Graduação em Odontologia, Universidade de São Paulo, 2008.

HEXCEL. Honeycomb sandwich design technology. Publication No. AGU 075b, HexcelCo., Ltd., Duxford (UK), 2000.

JENSEN, J.; SKELTON, K. Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.L], v. 97, p. 165-176, dez. 2018.

LUCATO, D. Contribuição ao projeto e validação do trem de pouso, tipo Wittman, em lâmina ortotrópica transversa de material compósito vidro e epóxi, para aeronaves enquadradas no F.A.R. PART-23. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Brasil. 1991.

MAZUMDAR, S. Composites manufacturing's 2018 stateoftheindustry report. *Composites Manufacturing Magazine*, 2018. Disponível em: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2018/01/2018-composites-manufacturing-state-of-the-industry-report/>. Acesso em: 18 ago. 2019.

NASCIMENTO, A. M.; STACHERA, S. F.; XAVIER, L. M.; Determinação de algumas propriedades físicas e mecânicas do Bambusa tuldoides (Munro). In: Congresso Ibero-americano de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Florestais, Curitiba, PR, 2002.

NASSEH, Jorge. Barcos: Métodos Avançados de Construção em Compósitos. Rio de Janeiro - RJ: Sem Editora, 2007.

ONEBOUND. China Cheap Honeycomb Panel. Disponível em: <https://www.onebond.net/>. Acesso em: 28/04/21

OSTAPIV, F. et al. Estudos iniciais para ensaios e construção de cúpulas geodésicas usando colmos de bambu. *MIX Sustentável*, v. 4, n. 1, p. 108–116, 2018.

RAO, K. K.; RAO, K. J.; SARWADE, A. G.; CHANDRA, M. S.; Strength Analysis on Honeycomb Sandwich Panels of different Materials. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2012.

SOUZA, E. B. Resistência ao cisalhamento do compósito laminado reforçado com tecido de fibras de vidro/epóxi.(Abril de 2006).

TARGA, Gabriel Norcia e. Compósito reforçado por laminado de bambu com matriz de poliuretano e epóxi: desenvolvimento, produção e caracterização mecânica. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2011.

VASATA, Ana Claudia Dal Pra. Análise das propriedades estáticas e dinâmicas das espécies de Bambu bambusa tuldoides e Phyllostachys aurea. 2020. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

ZHANG, Q. et al. Bio inspired engineering of honeycomb structure – Using nature to inspire human innovation, v. 74, Pasadena, 2015. 10p.

