



**Natália Victoria dos Santos**

**Desenvolvimento e  
Caracterização de Compósitos  
Verdes para Habitações  
Sociais**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso  
Coorientador: Glauco José de Oliveira Rodrigues

Rio de Janeiro  
Julho de 2021



**Natália Victoria dos Santos**

**Desenvolvimento e Caracterização de  
Compósitos Verdes para Habitações  
Sociais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Daniel Carlos Taissum Cardoso**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Glauco José de Oliveira Rodrigues**

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil – UERJ

**Flávio de Andrade Silva**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**José Roberto Moraes d’Almeida**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de julho de 2021

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

## **Natália Victoria dos Santos**

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ – em 2019. No mestrado na PUC-Rio, desenvolveu a dissertação na linha de pesquisa de: materiais compósitos, fibras vegetais e impressão 3D.

### Ficha Catalográfica

Santos, Natália Victoria dos

Desenvolvimento e caracterização de compósitos verdes para habitações sociais / Natália Victoria dos Santos ; orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso ; coorientador: Glauco José de Oliveira Rodrigues. – 2021.

133 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Materiais compósitos. 3. Biocompósitos. 4. Habitações sociais. 5. Impressão 3D. 6. Fibras vegetais. I. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. II. Rodrigues, Glauco José de Oliveira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD:624

## Agradecimentos

O desenvolvimento acadêmico dificilmente é feito pelo aluno sozinho e comigo não foi diferente. Muitas pessoas foram essenciais no decorrer dessa etapa. Gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o meu sucesso.

Ao meu orientador, Daniel Carlos Taissum Cardoso, pelo seu apoio, paciência, disposição de embarcar nas minhas ideias e confiança que depositou em mim. Ao meu coorientador, Glauco José de Oliveira Rodrigues, por todo seu apoio ao longo de toda minha jornada acadêmica, desde a graduação. Obrigada aos dois por todos os conselhos, incentivos e, principalmente, pela amizade.

À minha mãe Patricia, ao meu pai Bernardo e Ricardo Cardoso a minha gratidão eterna pelo apoio, confiança e paciência. Obrigada pelo incentivo a sempre seguir os meus sonhos, mesmo que isso tenha significado ter de me carregar até o outro lado da cidade em plena pandemia e usar nossa casa de laboratório. Orgulhar vocês é e sempre será a minha meta.

A todos os técnicos e colegas de laboratório de estruturas e materiais da PUC-Rio. Euclides, sua forma atenciosa com tudo e todos torna o laboratório um lugar melhor. Bruno Jordão, Felipe Rodrigues, Filipe Sá, Jessé Bessera, Marina Saad e Vitor Carvalho, sem a ajuda de vocês não seria possível esse trabalho. Obrigada por sempre estarem dispostos a me ajudar.

A CAPES e a PUC-Rio. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Resumo

Santos, Natália Victoria; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Orientador); Rodrigues, Glauco José de Oliveira (Coorientador). **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Verdes para Habitações Sociais**. Rio de Janeiro, 2021. 133p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os profissionais da construção civil vêm se tornando mais conscientes sobre seu papel no agravamento dos problemas ambientais, levando estes à procura de métodos e materiais que apresentem menos impacto ambiental. O uso de fibras vegetais como reforço vem sendo feito ao longo dos anos de forma a melhorar as propriedades mecânicas de compósitos, sendo estas de caráter renovável e biodegradáveis. A presente pesquisa visa a caracterização de biocompósitos para fabricação de habitações sociais de baixo impacto ambiental através do processo de moldagem por compressão das placas de vedação de tecido de fibra de juta e matriz de poliuretano vegetal e de impressão 3D de perfis e ligações de PLA e fibra vegetal de juta, sisal e rami. Para as placas moldadas por compressão foi feito um estudo da influência da direção da fibra nas propriedades mecânicas, constatando, através de ensaio de flexão monotônica, que a direção principal da fibra (urdume do tecido) apresenta a melhor resistência e maior rigidez, alcançando  $37,2 \pm 0,9$ MPa e  $10,4 \pm 1,1$ GPa, respectivamente. Analisando os efeitos à longo prazo, foi estudado o efeito da radiação ultravioleta nas placas, onde foram feitos ensaios em corpos de prova nas direções  $0^\circ$  e  $90^\circ$  expostos a uma lâmpada ultravioleta de 365nm por 3 (três) meses. Além disso, com os resultados dos ensaios foi possível aplicar a regra das misturas de forma inversa na determinação das propriedades da fibra e da matriz. Para os compósitos impressos 3D foi analisada a influência do tipo de fibra na resistência à tração e rigidez do material. Pelo ensaio à tração foram constatados aumentos significativos na resistência com o uso de fibras de rami (61,8%) e sisal (110,8%), chegando à resistência de  $45,5 \pm 6,1$ MPa e  $59,3 \pm 4,1$ MPa, respectivamente.

## Palavras-chave

Materiais compósitos; Biocompósitos; Habitações sociais; Impressão 3D; Fibras vegetais.

## Abstract

Santos, Natália Victoria; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Advisor); Rodrigues, Glauco José de Oliveira (Co-advisor). **Development and Characterization of Green Composites for Social Housing**. Rio de Janeiro, 2021. 133p. Master' degree dissertation – Department of Civil and Environmental Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Civil construction professionals have become more aware of their role in aggravating environmental problems, leading them to search for methods and materials that have less environmental impact. Vegetable fibers have been used as reinforcement over the years to improve the mechanical properties of composites, which are renewable and biodegradable. This research aims at the characterization of biocomposites for social housing manufacture with low environmental impact through the sealing plates compression molded process of jute fiber fabric and vegetable polyurethane matrix and 3D printing of PLA profiles and connections of jute, sisal, and ramie vegetable fiber. For the compression molded plates, a study was made to determine the influence of fiber direction on mechanical properties, noting, through a monotonic bending test, that the main fiber direction (warp of the fabric) has the highest resistance and stiffness, with  $37.2\pm 0.9\text{MPa}$  and  $10.4\pm 1.1\text{GPa}$ , respectively. Analyzing long term effects, the plates were exposed to ultraviolet radiation. In these tests, the specimens were exposed to a 365nm ultraviolet lamp during three months before being submitted to directional resistance trials in  $0^\circ$  and  $90^\circ$ . Furthermore, with the test results, it was possible to apply the mixing rule inversely to determine the fiber and matrix properties. For 3D printed composites, the influence of fiber type on the material's tensile strength and stiffness was analyzed. The tensile test found significant increases in strength with the use of ramie (61.83%) and sisal (110.80%) fibers, reaching a strength of  $45.5\pm 6.1\text{MPa}$  and  $59.3\pm 4.1\text{MPa}$ , respectively.

## Keywords

Composite Materials; Biocomposites; Social housing; 3D Printing; Vegetable fibers.

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1.	Motivação	16
1.2.	Objetivo	20
1.3.	Estrutura do trabalho	20
2.	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1.	Introdução	21
2.1.1.	Fibras	23
2.1.2.	Matriz Polimérica	30
2.1.3.	Interface fibra-matriz	33
2.1.4.	Mecânica dos materiais compósitos	35
2.1.5.	Vantagens e desvantagens do uso de fibras naturais	39
2.2.	Estruturas e Componentes de Materiais Compósitos	41
2.2.1.	Comportamento estático	41
2.3.	Processo de fabricação de compósitos reforçados com fibras	45
2.4.	Impressão 3D	48
2.4.1.	Definição	48
2.4.2.	Método de impressão: Fused Deposition Modeling (FDM)	49
2.4.3.	Impressão com polímeros reforçados com fibras	51
2.4.4.	Métodos construtivos de impressão 3D de estruturas	57
2.4.5.	Aplicações na construção civil com outros materiais	59
2.5.	Habitações Sociais e de Emergência	62
2.5.1.	Definição	62
2.5.2.	Tipos existentes	65
2.5.3.	Programas Sociais Habitacionais	66
2.5.4.	Design para desmontagem	69

3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	71
3.1.	Habitação social	72
3.1.1.	Procedimento de montagem	73
3.2.	Seleção dos materiais	76
3.2.1.	Matriz	76
3.2.2.	Fibras	77
3.3.	Fabricação dos componentes	78
3.3.1.	Impressão 3D	78
3.3.2.	Placas moldadas	84
3.4.	Ensaio mecânicos nos componentes	87
3.4.1.	Ensaio de flexão – Placas moldadas	87
3.4.2.	Exposição à radiação ultravioleta (UV) – Placas moldadas	90
3.4.3.	Ensaio de tração – Impressão 3D	91
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
4.1.	Ensaio de flexão dos biocompósitos moldados por compressão	93
4.2.	Ensaio de flexão de compósitos submetidos à câmara UV	101
4.3.	Ensaio de tração nos compósitos impressos	106
5.	CONCLUSÃO	114
5.1.	Conclusão	114
5.2.	Sugestões para futuros trabalhos	115
6.	ANEXO 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS VEGETAIS.	116
7.	ANEXO 2 - PRÉ-DIMENSIONAMENTO	117
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

## Lista de Figuras

Figura 1 - Gráfico típico do comportamento de um material compósito [17].	23
Figura 2 - Tipos de orientação das fibras. Adaptado de [22, 23].	24
Figura 3 - Energia de fabricação em mega joules por tonelada para fabricação de fibras [26].	25
Figura 4 - Classificação das fibras vegetais e seus exemplos. Referência das imagens no ANEXO 1. Adaptado de [4, 8].	28
Figura 5 - Comparativo de performance dos polímeros utilizados na matriz [18].	32
Figura 6 - Resistências à tração e flexão de compósitos impressos 3D[51].	35
Figura 7 - Considerações das características dos materiais para o uso da regra das misturas. Adaptado de [17].	36
Figura 8 - Carregamentos aplicados ao material compósito. Adaptado de [17].	36
Figura 9 - Resistência à flexão em função da fração volumétrica da fibra de curauá. Adaptado de [53].	38
Figura 10 - Modos de falha de compósitos unidirecionais tracionados longitudinalmente. Adaptado de [59].	42
Figura 11 - Resistências à tração de compósitos de polipropileno reforçados com fibra vegetal [33].	43
Figura 12 - Modos de falha típicos à flexão. Adaptado de [60].	43
Figura 13 - Curvas típicas de ensaio de flexão em materiais compósitos. [61].	44
Figura 14 - Compósitos de polipropileno reforçados com fibras vegetais sujeitos à flexão: a) Resistência à flexão; b) Módulo de flexão [33].	44
Figura 15 - Procedimento de fabricação de compósitos de PLA reforçados com fibra de cânhamo [67].	45
Figura 16 - Resposta de tensão-deformação de tração de compósitos poliéster reforçados com juta [41].	46

- Figura 17 - (a) Moldagem por compressão de compósito reforçado com fibra natural (b) painel interno de porta feita com compósito reforçado com fibra natural. [46]. 47
- Figura 18 - a) Sistema de molde e prensa utilizado na fabricação dos painéis de pejibaye; b) A mistura de fibra e matriz sendo espalhada para a fabricação dos painéis c) Painéis fabricados [68]. 47
- Figura 19 - Modelo de impressora 3D com seus componentes. [7] 50
- Figura 20 - Modelagem 5D no processo de impressão de materiais compósitos. Adaptado de [31]. 51
- Figura 21 - Propriedades de tração média de amostras impressas em 3D para diferentes matrizes poliméricas: (a) Resistência, (b) Módulo de Young [75]. 51
- Figura 22 - Modelos impressos em Nylon reforçados com fibra de Kevlar [74]. 52
- Figura 23 - Modelo esquemático da impressão reforçada com fibra [51]. 53
- Figura 24 - Esquema dos tipos de preenchimento dos corpos de prova. (a) Concêntrico. (b) Isotrópico. 54
- Figura 25 - Processo de impressão 3D do compósito reforçado com fibra de carbono contínua. (a) Impressão em a área reta, (b) imprimir em curva de 90°[51]. 55
- Figura 26 - Impressão tridimensional de compósitos de fibra contínua. a) Esquema de funcionamento da impressora. b) Fotografia da impressão com fibras [82]. 55
- Figura 27 - Corpos de prova gerados pela impressão. a) Compósito impresso reforçado com fibra de carbono (CFRTP). b) Compósito impresso reforçado com fibra de juta (JFRTP) [82]. 56
- Figura 28 - Gráfico de tensão x deformação do ensaio de tração [82]. 56
- Figura 29 - a) Módulo de tração b) Resistência à tração de amostras impressas 3D. 56
- Figura 30 - Impressão com a utilização de braços robóticos [87]. 59
- Figura 31 - Vigas produzidas por manufatura aditiva feitas com plástico reciclado [91]. 59

Figura 32 - Construção de edificação multifamiliar utilizando impressão 3D. (a) vista externa e (b) interior da edificação [93].	60
Figura 33 - Fabricação da primeira ponte de bicicletas de concreto armado impressa no mundo. a) Fabricação do tabuleiro da ponte. b) Detalhe do bico de impressão.	61
Figura 34 - Ponte metálica impressa em Amsterdã [97].	61
Figura 35 - Casa impressa em 3D com matéria orgânica [98].	62
Figura 36 - Impressão <i>D-shape</i> para habitações na lua [99].	62
Figura 37 - Habitações sociais produzidas pelo Minha Casa Verde e Amarela [111].	67
Figura 38 - Habitações sociais produzidas pela TECHO [113].	68
Figura 39 - Números da TETO no Brasil [113].	68
Figura 40 - Habitação social produzida pela Better Shelter [114].	69
Figura 41 - Fluxograma do programa experimental.	71
Figura 42 - Componentes de fabricação do módulo da habitação social.	72
Figura 43 - Habitação social desmontável em diferentes opções de montagem.	72
Figura 44 - Modelo 3D do módulo triangular de construção.	73
Figura 45 - Etapas de montagem do módulo triangular.	74
Figura 46 - Etapas de encaixe entre módulos triangulares.	74
Figura 47 - Esqueleto estrutural da habitação social com indicação das ligações externas.	75
Figura 48 - Esquema de transporte da habitação social.	75
Figura 49 - Bobina de filamento de PLA transparente.	76
Figura 50 - Tecido de fibra de juta.	77
Figura 51 - Tecido de fibra de juta com definição de seus espaçamentos.	78
Figura 52 - Fios de fibra vegetal. a) Rami b) Juta c) Sisal.	78
Figura 53 - Modelagem das peças de ligação 3D em software CAD. (a) - Ligação principal (b) - Ligação interna.	79
Figura 54 - Modelo de ligação impressa.	79
Figura 55 - Impressora 3D. (a) - Impressora Zmorph VX. (b) - Extrusor modificado.	80

Figura 56 - Impressão com reforço de fibra vegetal.	80
Figura 57 - Corpos de prova impressos reforçados com fibra vegetal.	81
Figura 58 - Cabeçote tipo Single original da impressora Zmorph VX.	81
Figura 59 - Cabeçote adaptado para incorporação de fibra – versão intermediária.	82
Figura 60 - Cabeçote adaptado para incorporação de fibra - versão final.	82
Figura 61 - Esquema de fabricação do corpo de prova reforçado com fibra.	83
Figura 62 - Materiais utilizados na fabricação das placas de vedação de juta.	84
Figura 63 - Etapas de fabricação das placas de vedação.	85
Figura 64 - Processo de retirada do molde.	86
Figura 65 - Corpos de prova com a identificação da direção do tecido de fibra de juta.	86
Figura 66 - Modelo esquemático de disposição das fibras nos corpos de prova.	87
Figura 67 - Detalhes e dimensões (em milímetros) do ensaio de flexão em três pontos das placas moldadas por compressão.	88
Figura 68 - Máquina de testes universal (810 - 250 Material Test System) equipada com uma célula de carga.	89
Figura 69 - Estudo de resistência à raios ultravioletas. a) Câmara U.V.SL-204. b) Corpos de prova expostos à radiação UV.	91
Figura 70 - Máquina de testes universal (EMiC Série 23, modelo 23-30) equipada com célula de carga e clip gage.	92
Figura 71 - Gráfico de dispersão dos resultados dos ensaios deflexão dos compósitos moldados por compressão reforçados com fibra de juta.	93
Figura 72 - Gráfico da resistência à flexão média e módulo de elasticidade médio das placas de vedação.	94
Figura 73 - Modelo da disposição do compósito.	95
Figura 74 - Ensaio à flexão das placas de vedação - Direção 0°	98

Figura 75 - Ensaio à flexão das placas de vedação - Direção 45°	99
Figura 76 - Ensaio à flexão das placas de vedação - Direção 90°	99
Figura 77 -Ensaio à flexão das placas de vedação	100
Figura 78 - Modo de falha do ensaio à flexão. Adaptado de [60].	100
Figura 79 - Diferença colorimétrica entre as amostras devido à exposição UV.	101
Figura 80 - Gráfico de variação da resistência à flexão devido a exposição UV. (a) Direção 0° e (b) Direção 90°.	102
Figura 81 - Comparativo dos ensaios de flexão com e sem exposição UV - Direção 0°	104
Figura 82 - Comparativo dos ensaios de flexão com e sem exposição UV - Direção 90°	105
Figura 83 - Modos de falha em amostras submetidas à radiação ultravioleta.	105
Figura 84 - Gráfico de dispersão dos resultados dos ensaios de tração de compósitos reforçados com fibras vegetais.	106
Figura 85 - Gráfico dos resultados dos ensaios de tração a) Resistência à tração média e b) Módulo de secante médio.	107
Figura 86 - Gráficos dos resultados dos ensaios de tração comparados com resultados da literatura.	108
Figura 87 - Esquema com códigos de falha de teste de tração. Adaptado de ASTM D3039 [124].	109
Figura 88 - Modos de falha à tração obtidos experimentalmente. Adaptado de [59].	109
Figura 89 -Ensaio das amostras de PLA. a) Amostras ensaiadas b) Gráfico Tensão-Deformação.	110
Figura 90 - Ensaio das amostras de CPRFJ. a) Amostras ensaiadas b) Gráfico Tensão-Deformação.	110
Figura 91 - Ensaio de CPRFR. a) Amostras. b) Rompimento no meio do vão amostra CPRFR 3.	111
Figura 92 - Gráfico Tensão-Deformação CPRFR.	112
Figura 93 - Ensaio das amostras de CPRFS. a) Amostras ensaiadas b) Gráfico Tensão-Deformação.	112

Figura 94 - Amostra de CPRS. a) Rompimento da matriz. b) Rompimento da fibra. 113

Figura 95 - Comparativo dos gráficos de tensão-deformação de cada tipo de amostra. 113

“I’m gonna pick up the pieces and build a Lego house”  
Ed Sheeran

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação

Os profissionais da construção civil e público em geral vêm se tornando mais conscientes a respeito das causas e efeitos do agravamento das mudanças climáticas, crescimento do lixo e redução dos recursos naturais. Dessa forma, o impacto ambiental causado pela indústria AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) torna-se uma das principais questões a ser debatida. Como resultado, engenheiros, arquitetos, construtores e pesquisadores do mundo debatem o futuro da construção civil.

A construção civil é um dos setores da sociedade que mais causam impactos ambientais. Destacam-se o consumo elevado de recursos naturais, e a emissão de gás carbônico na fabricação de materiais industrializados, mudanças no solo e na vegetação durante a ocupação do solo, agravamento das ilhas de calor, aumento dos gastos de energia elétrica, produção de lixo, consumo de água potável, entre outros. Nos Estados Unidos, construções consomem cerca de 36% do total de energia, 30% das matérias primas e 12% da água [1]. Quanto à produção de resíduos, as áreas de construção e demolição constituem um terço do total de resíduos sólidos gerados na Europa, um total de mais de 800 milhões de toneladas geradas por ano [2]. Nesse sentido, se faz necessária uma análise dos materiais de construção tradicionais e seus impactos diretos e indiretos na produção de lixo e consumo de recursos.

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo e o principal responsável pelas construções. Para obtenção dos componentes do concreto são feitas extrações de matérias primas naturais não renováveis, tais como as britas oriundas de jazidas e a areia dos leitos dos rios. Além disso, o cimento, sua principal matéria prima, é um dos principais responsáveis pelas emissões de gás carbônico ( $CO_2$ ) na atmosfera. Ele ocupa a segunda posição no setor de processos industriais no Relatório de Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa, contribuindo com quase 25% das emissões desse setor [3]. Olhando pelo lado social, o uso do concreto acaba tornando a obra muito

cara e às vezes difícil, principalmente na construção de habitações sociais [4]. O aço, por sua vez, está envolvido direta e indiretamente com diversos problemas ambientais. A indústria siderúrgica é responsável pela emissão de gases tóxicos como gás carbônico ( $CO_2$ ) e gás metano ( $CH_4$ ), contribuindo para o agravamento o efeito estufa [5]. Pelo aspecto econômico, a estrutura metálica é conhecidamente mais onerosa que as tradicionais estruturas de concreto, não sendo viável para habitações de baixo custo. Por fim, a madeira, apesar de ser um material renovável, entra em desacordo com as políticas internacionais, uma vez que o alastramento do uso desse material abre caminho para o crescimento de madeiras ilegais que desmatam e provocam incêndios nas florestas mundiais. Outrossim, o uso desse material envolve uma complexa logística de transporte, necessitando que este percorra grandes distâncias e indiretamente aumente a produção de gases tóxicos por conta desse transporte.

Analisando construções mais simples, nas áreas rurais, os telhados são normalmente feitos de palha, folhas de palmeira, grama ou palha de coco, materiais naturais que não sofreram nenhum ou quase nenhum tipo de tratamento e acabam necessitando de substituição frequente, além de não serem normalmente impermeáveis. Outro problema se dá na facilidade de infestações e da flamabilidade. Nessas habitações simples, também há o uso de amianto e as chapas de aço corrugado, que apesar de mecanicamente serem um substituto melhor, são caras e também não são adequadas para regiões tropicais pela sua alta absorção de calor [4]. Ressalta-se ainda que o uso do amianto pode trazer risco à saúde da população, uma vez que a exposição do ser humano à essa fibra mineral pode causar câncer [6].

Verifica-se então que a escolha de um material de construção sólido não pode depender apenas de sua capacidade de carga e custo. Outras propriedades dos materiais devem ser ponderadas tais como durabilidade, resistência à umidade, resistência à temperatura, inflamabilidade entre outros aspectos. Destacando ainda a necessidade de os materiais selecionados não representarem risco à saúde, à segurança e ao meio ambiente [7]. Diante disso, a melhor forma de conservação do meio ambiente é através do uso de

materiais naturais renováveis e não tóxicos, e todos os esforços devem ser empreendidos para torná-los competitivos [8]. Assim, essa busca por novos materiais levou a indústria AEC a voltar seus olhos para o uso de recursos de origem vegetal. Isso despertou interesse em compósitos reforçados com fibras vegetais, uma vez que estes se apresentam como uma alternativa mais sustentável e que podem ser processados com menor consumo de energia.

A substituição dos materiais convencionais e artificiais por compósitos de fibras naturais contribui para a criação de uma economia sustentável [8]. Em muitas partes do mundo, além dos fins agrícolas, diferentes partes das plantas e frutos de muitas culturas têm se mostrado fontes viáveis de matéria-prima para fins industriais [9]. Fibras vegetais podem ser retiradas dessas matérias primas, proporcionando um reforço significativo para resinas e concretos na hora da concepção de elementos estruturais. As fibras de origem vegetal, que serão objeto de estudo do presente trabalho, apresentam abundância, maior disponibilidade que fibras sintéticas e sustentabilidade [10, 11]. Além disso, elas são mais baratas, não representam riscos à saúde e, finalmente, fornecem uma solução para a poluição ambiental, encontrando novos usos para os resíduos agrícolas [9] e permitindo que as construções se utilizem de materiais locais, não se preocupando com a logística de transporte. Entretanto, em muitos casos estas são dispostas em matrizes não naturais, conseqüentemente não produzindo um material completamente sustentável.

Dessa forma, uma solução encontrada na busca por um compósito mais sustentável é o uso de matrizes poliméricas de origem também vegetal, produzindo os chamados biocompósitos. Os biocompósitos consistem em polímeros biodegradáveis como matriz geralmente reforçados com uma fibra vegetal. O compósito se torna um material biodegradável uma vez que seus dois constituintes também são biodegradáveis [12]. Esse conceito vem ganhando cada vez mais aprovação e utilização pelos seus benefícios no controle da produção de lixo no planeta. A capacidade mundial de produção desses biopolímeros tem uma projeção de aumento de 0,36 milhões de toneladas em 2007 para 3,45 milhões em 2020 [13]. Nessa perspectiva, o

presente trabalho visa a fabricação desse tipo de material, verificando sua viabilidade para construção de habitações sociais.

Outro conceito a ser abordado é a falta de moradias para a população. Devido à grande escassez de materiais de construção essenciais, juntamente com baixa renda, desemprego e um aumento no crescimento populacional, milhões de pessoas em muitos países em desenvolvimento não têm abrigo adequado. O fornecimento de habitação social digna para as massas continua sendo um desafio real para todos os associados ao planejamento e execução de vários esquemas habitacionais [4].

“Mesmo ratificado por inúmeras nações por meio da Declaração Universal dos Direitos Humanos, o acesso à moradia adequada não é uma realidade para todos. Bilhões de pessoas vivem em condições precárias no mundo, inclusive nos países ricos. No Brasil, esse direito está assegurado também pela Constituição, mas o déficit habitacional é estimado em cerca de 7,9 milhões de lares” [14].

Em diversas cidades, a moradia de mais da metade da população urbana se restringe a favelas com pouco ou nenhum acesso às necessidades básicas como água e saneamento básico. Essa realidade afeta principalmente países ditos em desenvolvimento, como é o caso do Brasil [15]. A Fundação Getúlio Vargas e a Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias destacam que seriam necessárias cerca de 7,77 milhões de unidades habitacionais para suprir a demanda do país [16].

Nesse sentido o presente trabalho propõe avaliar a viabilidade no uso de fibras e matrizes vegetais como materiais para fabricação de componentes para habitações sociais com baixo impacto ambiental, economicamente viáveis e que supram a necessidade imediata da população. Diferente das demais pesquisas existentes, o projeto propõe o uso somente de materiais naturais com recursos que podem ser obtidos localmente, facilitando a

execução por parte da população em questão sem que sejam gerados problemas ambientais.

## 1.2. Objetivo

Essa pesquisa tem como objetivo geral avaliar o uso de fibras vegetais para a fabricação de biocompósitos como componentes para uma habitação social desmontável de baixo impacto ambiental. Como objetivos específicos é possível enumerar:

- Desenvolvimento e caracterização das propriedades de placa de vedação em biocompósito polimérico fabricada a partir da moldagem por compressão de tecido de fibra vegetal e resina vegetal.
- Avaliação da degradação das placas de vedação por radiação ultravioleta.
- Desenvolvimento e caracterização de biocompósitos com fibra contínua por impressão 3D para fabricação de ligações e perfis com geometria complexa.

## 1.3. Estrutura do trabalho

Esta dissertação é dividida em 6 capítulos. O Capítulo 1 descreve a contextualização, motivação e os objetivos da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre os temas abordados. O Capítulo 3 aborda o programa experimental, incluindo a proposta de edificação, a apresentação do programa, os métodos de fabricação e os ensaios realizados. O Capítulo 4 apresenta os resultados do estudo, dos ensaios realizados e discussões dos resultados. Por fim, o Capítulo 5 mostra as conclusões encontradas no decorrer da pesquisa e do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Introdução

Materiais compósitos em sua definição são uma composição de dois ou mais materiais de forma macroscópica de modo a criar um novo material com propriedades desejáveis, tais como: boa relação resistência/peso, isolamento térmico e transparência eletromagnética. Entre suas características deve-se destacar que a mistura dos materiais ocorre sem que haja ação química e todos os seus componentes podem ser identificados a olho nu [17].

O compósito é formado por duas partes, um constituinte que é chamado de *reforço* e aquele em que está inserido que é chamado de *matriz* [18]. Os componentes de um compósito não se dissolvem ou combinam ao entrar em contato, mas atuam em conjunto, de forma sincronizada, podendo ser caracterizados por meios físicos onde cada um mantém sua identidade própria [19].

Matrizes são elementos de união das fibras com objetivo de suporte, proteção e transferência de tensão entre elas. Já os reforços, representados pelas fibras, são, por sua vez, estruturas filamentosas em forma de feixe, que apresentam resistência mecânica bem mais alta que o mesmo material em sua forma a granel [17].

Os compósitos começaram a estar presentes no mercado da construção civil nas últimas décadas devido à sua superioridade em termos de propriedades mecânicas específicas, como resultado da crescente demanda por materiais e estruturas de alto desempenho. No entanto, a combinação das fibras com a matriz aumenta muito a complexidade, o que leva a desafios de projeto e fabricação na engenharia e, conseqüentemente, a soluções mais conservadoras, onde o material não é totalmente aproveitado [8].

Compósitos reforçados com fibras são cada vez mais úteis, especialmente em aplicações de alto desempenho, como aplicações estruturais, de construção, automotivas e de menor peso. O objetivo da

incorporação de fibras em polímeros é melhorar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos mesmos, bem como modificar a aparência superficial e as características de processamento, podendo também contribuir para a redução de custos do material final [19]. As fibras naturais são, em geral, adequadas para reforçar os polímeros (termorrígidos e termoplásticos) devido à sua resistência, rigidez e baixa densidade. Além disso, o uso da fibra natural em polímeros reforçados com fibras reduz significativamente o custo e os tornou ainda mais competitivos [20].

Existem duas formas de análise das propriedades físicas e mecânicas dos materiais compósitos: a micromecânica e a macromecânica. A micromecânica se relaciona ao estudo do compósito em que a interação dos materiais constituintes é examinada em escala microscópica, para poder determinar os efeitos nas propriedades do material como um todo. A macromecânica é feita quando se presume que o material é homogêneo e os efeitos dos materiais constituintes são detectados apenas como propriedades aparentes médias do material [17].

Analisando o comportamento macromecânico de um polímero reforçado com fibra ideal, isto é, com adesão perfeita entre os constituintes, é possível chegar à um gráfico típico de tensão-deformação do compósito. Em compósitos poliméricos com fração volumétrica de fibras acima da fração crítica, a tensão de ruptura do compósito é usualmente menor que a tensão de ruptura da fibra e maior que a da matriz. A deformação de ruptura do compósito teórica é a mesma da fibra, que por sua vez é menor que a deformação máxima da matriz. Na Figura 1 é representado um gráfico típico de tensão-deformação do comportamento de um material compósito, nele é possível verificar que a inserção de fibras na matriz melhora sua resistência e torna sua deformação máxima correlata a deformação máxima da fibra [17].

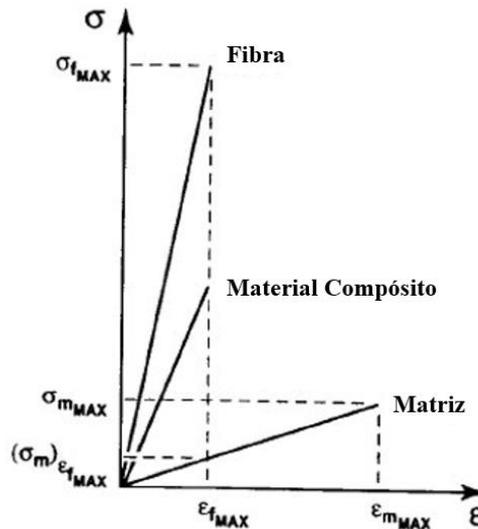


Figura 1 - Gráfico típico do comportamento de um material compósito [17].

### 2.1.1. Fibras

Fibras são estruturas filamentosas em forma de feixe, que apresentam resistência bem mais alta que o mesmo material em sua forma a granel, uma vez que a fibra apresentar muito menos defeitos [17]. São materiais essenciais para o comportamento adequado do compósito, formado por uma matriz que sozinha apresenta pouca resistência e comportamento frágil, como o caso das resinas poliméricas termorrígidas. Os reforços fibrosos são usados para melhorar a rigidez e a resistência mecânica da matriz, podendo também conferir estabilidade dimensional e bom desempenho a temperaturas elevadas, em alguns casos [19].

O comportamento mecânico dos materiais compósitos está diretamente ligado com a orientação dada à fibra, que podem ser orientadas em uma única direção, em duas direções, dispersas no plano ou dispersas no elemento tridimensional [21]. Quando dispostas de forma aleatória, uma aproximação feita é que o material tem comportamento isotrópico, ou seja, mantém as mesmas propriedades ao longo da estrutura. Entretanto, grande parte das estruturas de materiais compósitos tem uma direção de solicitação principal, sendo mais vantajoso a orientação das fibras nesse sentido. Com isso, o material tem comportamento ortotrópico, com diferentes propriedades em duas direções mutuamente perpendiculares entre si em um ponto do corpo

[17]. A Figura 2 apresenta alguns dos principais tipos de orientações e arranjos de fibras.

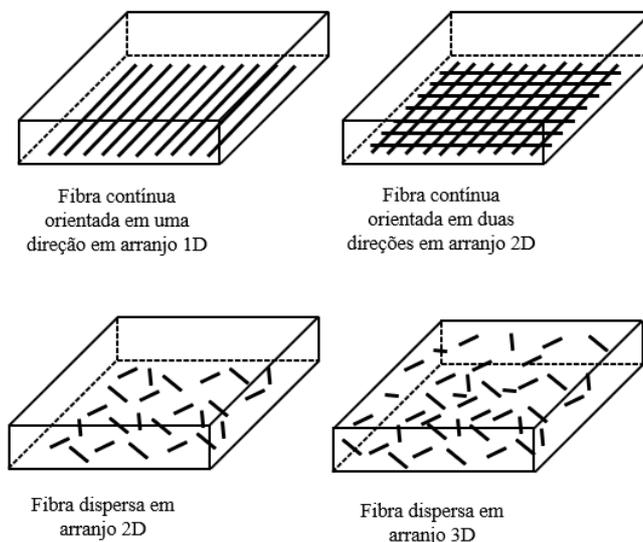


Figura 2 - Tipos de orientação das fibras. Adaptado de [22, 23].

As fibras podem ser classificadas de diversas formas quanto à sua origem, propriedades físico-químicas, mecânicas ou de acordo com as características da fibra. Pela origem elas podem ser: naturais subdividindo-se em animal, como por exemplo fibras de cabelo de cavalo, coelho e lã; vegetal, como é o caso das fibras de sisal, juta, rami, banana, bambu; mineral, como fibra de amianto e basáltica, e; as fibras sintéticas, que são mais presentes no mercado da construção, como fibra de vidro, carbono e aramida. A classificação por propriedades físico-químicas avalia fatores como densidade, rugosidade, estabilidade química e não reatividade com a matriz. A avaliação das propriedades mecânicas leva em conta parâmetros como resistência à tração, módulo de elasticidade, ductilidade, dentre outros. As características das fibra é classificado quanto ao comprimento da mesma, diâmetro, seção transversal e perfil longitudinal [24].

#### 2.1.1.1. Fibras metálicas e sintéticas

O uso de fibras sintéticas e metálicas é maior quando comparado ao de fibras naturais. Compósitos reforçados com fibra sintética têm aplicações em várias áreas, devido às suas propriedades mecânicas elevadas quando comparadas com os materiais convencionais.

Entretanto, apesar das fibras de aço apresentarem comportamento mecânico superior às naturais, a densidade elevada e a baixa resistência à corrosão das metálicas restringem sua aplicação [23]. As fibras sintéticas geralmente não estão prontamente disponíveis nos países em desenvolvimento e quando possível a aquisição, tendem a apresentar um valor elevado devido à grande quantidade de tecnologia investida, o que acaba tornando-as inviáveis para serem usadas em materiais de construção para moradias populares e construções de baixo orçamento.

Apesar de todas as vantagens em compósitos reforçados com fibras metálicas e sintéticas, estes não são sustentáveis, uma vez que são originários de materiais não naturais e por consequência não são biodegradáveis, não contribuindo para a melhora na pegada ecológica da construção civil [11, 25]. A Figura 3 mostra o gasto de energia necessário para fabricação de fibras naturais e sintéticas evidenciando a disparidade entre elas [26].

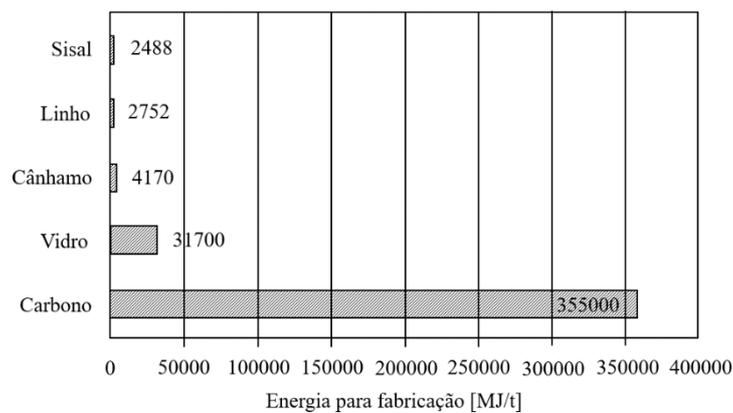


Figura 3 - Energia de fabricação em mega joules por tonelada para fabricação de fibras [26].

#### 2.1.1.2. Fibras naturais

Fibras naturais são obtidas a partir de animais, vegetais e minerais, com pouco ou nenhum tratamento depois de sua extração. Materiais feitos de recursos renováveis, como o caso de fibras naturais incorporadas em uma matriz polimérica, fornecem boas alternativas à compósitos de fibras sintéticas [25]. Comparado às sintéticas, o gasto de energia de processamento é muito mais baixo e a recuperação energética também é possível [8].

As fibras naturais possuem resistência e rigidez específicas moderadamente altas e podem ser usadas como materiais de reforço em matrizes de resina polimérica visando a obtenção de materiais compósitos para fins estruturais [9]. Seu uso permite o reaproveitamento de resíduos da agricultura e industriais nos quais elas se originam e melhora nas características da matriz, levando a elementos estruturais de menor dimensão e, conseqüentemente, menor gasto de materiais. Destacam-se como principais vantagens das fibras vegetais a sua abundância no meio ambiente, biodegradabilidade, baixo peso, regenerabilidade, não toxicidade, baixo custo de aplicação comparado com as fibras sintéticas e possibilidade de serem modificadas por tratamento químico [11]. Mais especificamente, as fibras de origem vegetal que serão objeto de estudo do presente trabalho, apresentam abundância, boa resistência comparada às fibras sintéticas e sustentabilidade [10].

As fibras vegetais são usadas há muito tempo para reforçar argila, lama, e mesmo concreto e argamassas, que tem suas propriedades mecânicas aprimoradas pela introdução das fibras no momento da fabricação [4]. Como ponto negativo, por se tratar de um material de origem natural, suas propriedades podem sofrer variações [9], que reduz a possibilidade de uso dessas fibras para aplicações em alta tecnologia, onde confiabilidade e consistência são fatores importantes [27]. As propriedades das fibras vegetais dependem principalmente da natureza da planta, da localidade em que é cultivada, da idade e do método de extração usado [9].

Esses tipos de fibra são compósitos naturais de estrutura celular, compostas de diferentes proporções de celulose, hemicelulose e lignina (Tabela 1) [28], cujas características de cada constituinte contribuem para as propriedades gerais da fibra como um todo e apresentam variações de quantidade de cada componente para os diferentes tipos de fibras presentes na natureza. Enquanto a lignina é termicamente estável e sofre degradação por ação de radiação UV, a hemicelulose é responsável para a biodegradação, absorção de umidade e degradação térmica da fibra, à medida que mostra menor resistência [29].

Tabela 1 - Composição das fibras vegetais [28, 30].

<b>Tipo de fibras vegetais</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Extrativo (%)</b>	<b>Cinza (%)</b>
Bagaço	21,80	41,70	28,00	4,00	3,50
Folha de Bananeira	24,84	25,65	17,04	9,84	7,02
Tronco de Bananeira	15,07	31,48	14,98	4,46	8,65
Cânhamo	3,7-13	57-77	14-22,4	NA	0,80
Coco	45,48	21,46	12,36	8,77	1,05
Juta	21-24	41-48	18-22	NA	0,80
Rami	0,6-0,7	68,6-91	5-16,7	NA	NA
Tecido de Coco	29,70	31,05	19,22	1,74	8,39
Eucalipto	25,40	41,57	32,56	8,20	0,22
Sisal	7-11	47-78	10-24	NA	0,6-1,0

Fibras vegetais podem ser classificadas de acordo com a região da planta de onde são extraídas, podendo ser encontradas em: folhas, como no caso de fibras de sisal e abacá; de caules, como as fibras de bananeira e linho; pé/talo da planta, como o trigo e o bambu; sementes, de onde se obtém o algodão, e frutos, como as fibras de casca de coco (Figura 4). As fibras naturais de origem vegetal possuem uma enorme variedade de espécies passíveis de serem pesquisadas, sendo designadas como materiais lignocelulósicos. No Brasil, as principais fibras lignocelulósicas geradas são provenientes da cana-de-açúcar, do arroz, do coco, do abacaxi, do sisal, dentre outras [31].



Figura 4 - Classificação das fibras vegetais e seus exemplos. Referência das imagens no ANEXO 1. Adaptado de [4, 8].

Outra forma de compreender as fibras vegetais é analisá-las, por si só, como compósitos vegetais compostos de fibrilas de celulose incorporadas na matriz de lignina. Nesse caso essas fibrilas são encontradas alinhadas ao longo do comprimento da fibra, tendo o comportamento de fibra orientada na direção principal da fibra, o que confere resistência máxima à tração e flexão. Destaca-se que esse comportamento ocorre de forma independente da origem da extração da fibra, ou seja, independente se ela foi retirada do caule, das folhas, de madeira ou de frutos e sementes [9]. As próprias fibras naturais, no geral, devem ser consideradas como compósitos de fibra curta orientadas, contendo várias frações de volume de fibrilas de comprimentos diferentes [32].

Com relação às suas características físicas, a Tabela 2 apresenta as propriedades de algumas fibras vegetais [28]. É notado que algumas fibras têm suas propriedades com grande variabilidade, mostrando a necessidade de caracterização da fibra antes de sua aplicação. Verifica-se ainda que, quando

comparado ao peso específico do concreto armado (2500 kg/m<sup>3</sup>) dito pela norma NBR 6120/1980, as fibras naturais apresentam considerável leveza.

Tabela 2 - Características físicas das fibras vegetais.

<b>Tipo de Fibra</b>	<b>Peso Específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Referência</b>
Bambu	1158	73-505	10-40	[28]
Banana	1031	384	20-51	[28]
Cânhamo	1500	900	34	[28]
Coco	1177	95-118	2,8	[28]
Juta	1460	400-800	10-30	[33]
Linho	1500	500-1500	27.6	[34]
Malva	1409	160	17.4	[28]
Kenaf	1450	930	53	[34]
Piçava	1054	143	5,6	[28]
Rami	1500	400-938	61.4-128	[33], [35]
Sisal	1370	347-378	15,2	[28]
Tamareira	1300-1450	70-170	2,5-4	[28]

Para o presente trabalho foram escolhidos três tipos de fibras: sisal, juta e rami, que foram usadas na forma natural, sob a forma de fios e tecidos.

O sisal é uma fibra extraída das folhas do *Agave Sisalana*. Dentre suas características físicas, o teor de fibra das folhas é de 3,5 a 5%, com comprimento que pode chegar até 1,5m e diâmetro de fibra inferior a 0,2 mm [36]. Trata-se de uma planta perene de origem mexicana, cuja extração da fibra é feita de suas folhas. Possui produção média no país de 1200 kg por hectare, crescimento em solos mais pobres e baixa umidade, possibilitando seu plantio em áreas mais secas. O Brasil hoje detém o controle de 60% da produção mundial, sendo a Bahia o estado com mais de 90% da produção. Outrossim, essas fibras também servem de matéria prima na produção de fios, cordas, tapetes e artesanatos [37].

Entre as fibras lignocelulosas, o sisal é uma das fibras mais importantes e tem potencial para substituir fibras sintéticas em várias aplicações. Esta fibra tem sido usada na fabricação de compósitos poliméricos como reforço [38], que apresentam alta resistência ao impacto e moderada resistência à tração e à flexão. Os compósitos reforçados com sisal se tornam atraentes por apresentar baixa densidade, altas resistências mecânicas e a abrasão [9].

A fibra de juta é extraída a partir da casca de duas plantas distintas: a juta branca de nome *Corchorus capsularis* e; em menor grau, da juta escura chamada *Colitorius*. Sua cultura é anual, tendo cerca de 120 dias para crescimento [39]. Pelo ponto de vista social, a produção de juta constituiu a principal fonte de renda para centenas de comunidades rurais no Amazonas entre 1960 e 1980, sendo hoje uma alternativa de produção econômica para essas populações [40].

As fibras de juta apresentam preço acessível e disponibilidade comercial em diversos formatos. Possuem maior resistência e módulo do que os polímeros, sendo um bom substituto para fibras convencionais em muitas situações [41]. As fibras de juta são longas, de comprimento entre 1 e 4 metros [39], no entanto, tem estrutura multicelular composta de microfibrilas e seção transversal altamente não uniforme. Apresentam ainda, propriedades físicas e mecânicas inconstantes pois dependem de origem geográfica, condições climáticas de crescimento e técnicas de processamento [41]. A viabilidade de compósitos de juta preparados é caracterizada por testes de propriedades mecânicas e quantificado pela resistência à tração e flexão [40, 41].

O rami, por sua vez, é uma planta perene, rizomatosa e produtora de fibras pelo seu caule. Seu cultivo no Brasil se iniciou em 1884 por agricultores radicados na colônia Grão Pará, em Santa Catarina. O estado até hoje é dos maiores produtores da fibra [39].

### 2.1.2. Matriz Polimérica

Matrizes são por definição elementos de união das fibras com objetivo de suporte, proteção e transferência de tensão entre elas. A seleção de uma matriz adequada para um material compósito envolve muitos fatores, especialmente porque é o elo de menor resistência e flexível em todas as propriedades desse tipo de material [17]. Na presente pesquisa o tipo de matriz utilizada será polimérica de origem vegetal.

A unidade fundamental do polímero é o monômero, que é uma pequena molécula que se conecta com suas semelhantes formando as ligações poliméricas. Essas ligações podem ser: lineares, quando são apenas uma

cadeia de monômeros simples; ramificadas, quando formadas por uma cadeia primária de monômeros com outras cadeias conectadas como galhos de árvores e; reticulada, que apresenta um grande número de cadeias tridimensionais altamente interconectadas [17].

Os polímeros podem ser classificados de três formas: as borrachas, formadas por polímeros reticulados, não possuem função estrutural; os termoplásticos, polímeros ramificados que não possuem muitas reticulações, podendo ser remoldados quando aquecidos e endurecem ao serem resfriados [17]. Os materiais termoplásticos dominam atualmente o mercado como matrizes para biofibras. Os mais comumente usados para esta finalidade são polipropileno (PP), polietileno (PE) e cloreto de polivinil (PVC) [44]. Os termorrígidos, por sua vez, uma vez que atinjam o estado endurecido são polímeros altamente reticulados e por conta disso sua forma não pode ser alterada [17].

A principal razão para o interesse em polímeros reforçados com fibras, do inglês *Fibre Reinforced Polymer* (FRP), é o seu alto módulo específico, boa relação rigidez e resistência com o peso [41]. As vantagens do uso de polímeros são, principalmente, a facilidade de processamento, alta produtividade e baixo custo, em combinação com sua versatilidade [45]. Quanto à comparação entre materiais termoplásticos e termorrígidos, os termoplásticos oferecem muitas vantagens. Compósitos desse tipo de matriz apresentam baixo custo de processamento, ciclo de processamento mais curto, melhor resistência ao impacto, flexibilidade de modelagem, maior confiabilidade na reprodução das peças e facilidade de moldagem de partes complexas, além da possibilidade de reuso dos materiais [17, 27].

Atualmente estão disponíveis diversos tipos de matrizes poliméricas como poliuretano, fenólico, epóxi, poliéster, silicone e poliamida. A Figura 5 apresenta um comparativo de performance de alguns polímeros utilizados como matriz. Essa análise é feita avaliando fatores de emissão de gases, resistência máxima, temperatura de serviço e custo [18].

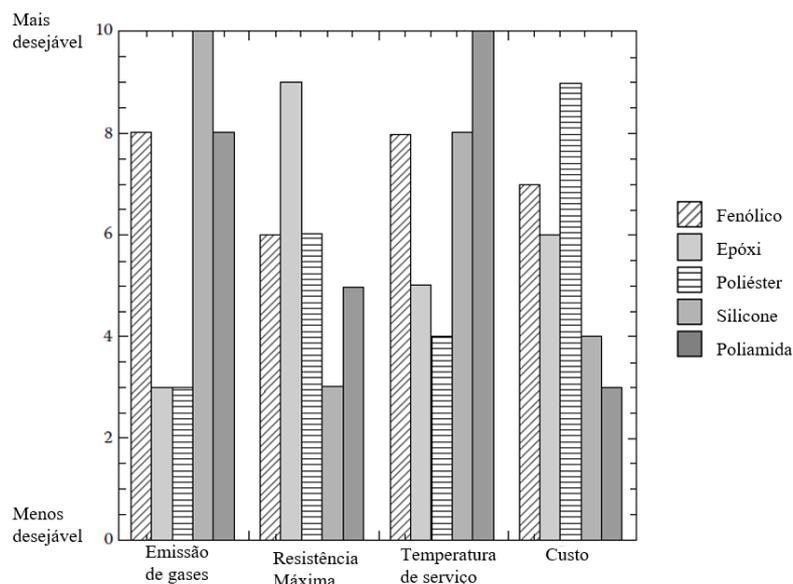


Figura 5 - Comparativo de performance dos polímeros utilizados na matriz [18].

As Tabela 3 e 4 mostram as propriedades mecânicas inerentes de diversos polímeros termoplásticos e termorrígidos utilizados na fabricação de materiais compósitos reforçados com fibra natural.

Tabela 3 - Propriedades de polímeros termoplásticos típicos usados em fibra natural para fabricação de compósitos [46].

Propriedades	PP	LDPE	HDPE	PS	Nylon 6	Nylon 6,6
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,899-0,920	0,910-0,925	0,940-960	1,040-1,060	1,120-1,140	1,13-1,115
Tg (°C)	-10 à -23	-125	-133 à -100	N/A	48	80
Tm (°C)	160-176	105-116	120-140	110-135	215	250-269
Temperatura de deflexão por calor (°C)	50-63	32-50	43-60	Max, 220	56-80	75-90
Coefficiente de expansão térmica (mm/mm/°Cx10 <sup>5</sup> )	6,8-13,5	10	12-13	6-8	8-8,6	7,2-9
Resistência à tração (MPa)	26-41,4	40-78	14,5-38	25-69	43-79	12,4-94
Módulo de Elasticidade (GPa)	0,95-1,77	0,055-0,38	0,4-1,5	4-5	2,9	2,5-3,9
Alongamento (%)	15-700	90-800	2,0-130	1-2,5	20-150	35->300

Resistência ao impacto Izod (J/m)	21,4-267	>854	26,7-1068	1,1	42,7-160	16-654
-----------------------------------	----------	------	-----------	-----	----------	--------

LDPE = polietileno de baixa densidade; HDPE = polietileno de alta densidade; PP = polipropileno; PS = poliestireno; Tm = Temperatura de fusão cristalina; Tg = Temperatura de transição vítrea.

Tabela 4 - Propriedades de polímeros termorrígidos típicos para compósitos de fibra natural [46].

Propriedades	Resina Poliéster	Resina Vinilester	Epóxi
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,2-1,5	1,2-1,4	1,1-1,4
Absorção de água – 24 horas (%)	0,1-0,3	0,1	0,1-0,4
Resistência à tração (MPa)	40-90	69-83	35-100
Resistência à compressão (MPa)	90-250	100	100-200
Módulo de Elasticidade (GPa)	2-4,5	3,1-3,8	3-6
Alongamento (%)	2	4-7	1-6
Encolhimento pela cura (%)	4-8	N/A	1-2
Resistência ao impacto Izod (J/m)	0,15-3,2	2,5	0,3

Nesta pesquisa optou-se pelo uso de matriz de origem vegetal para fabricação dos componentes de construção, uma vez que a premissa do projeto está no desenvolvimento de biocompósitos com menor impacto ambiental possível.

Compósitos de fibra natural com uma matriz termoplástica são soluções recentemente empregadas no mercado. Os de base biológica de fibras naturais, em matrizes biopoliméricas, mostraram ter impactos ambientais mais baixos que os de base petroquímica para certas aplicações [47].

### 2.1.3. Interface fibra-matriz

O primeiro e mais importante problema em materiais compósitos é a adesão entre fibra e matriz pela sua interface. A boa ligação interfacial entre elas é essencial para um ótimo desempenho [25]. O papel da matriz em compósitos é transferir a carga para as fibras através de tensões de

cisalhamento na interface. Este processo requer uma boa ligação entre a matriz polimérica e as fibras vegetais.

A má adesão se reflete no uso ineficiente do potencial do compósito, podendo ainda aumentar a porosidade do material, deixando-o vulnerável a ataques ambientais que pode reduzir resistência, reduzindo assim sua vida útil [33]. Do ponto de vista químico, essa má adesão interfacial entre a fibra e a matriz se dá pelas fibras naturais apresentarem uma natureza hidrofílica enquanto a maioria das matrizes poliméricas é de natureza hidrofóbica [27, 45]. Isso se dá devido à presença nas fibras naturais de elementos polares, levando à uma absorção de umidade alta, o que conseqüentemente produz uma ligação interfacial fraca entre as fibras e as matrizes poliméricas. De forma mecânica, a perda de resistência ocorre, pois, a presença de água leva à ocorrência de inchamento, hidrólise e plastificação da matriz. Além disso, a umidade causa maior degradação das propriedades mecânicas de compósitos com fibra natural quando comparados à compósitos reforçados com fibra sintética, como conseqüência do comportamento de maior absorção de umidade e a natureza orgânica das fibras naturais [48].

O alto nível de absorção de umidade pelas fibras naturais, sua fraca molhabilidade, adesão insuficiente entre as fibras não tratadas e a matriz polimérica levam à desunião entre a fibra e a matriz com a idade [49]. Nesse sentido, várias pesquisas foram feitas sobre os tipos de tratamento para reduzir essa absorção de água em fibras e, por conseqüência, reduzir seus efeitos negativos.

Exemplo disso está em Santiago e Botaro [50] que estudaram o uso de betume no tratamento de fibras de sisal contra a umidade, uma vez que esse material apresenta propriedades aglutinantes e impermeabilizantes. Os autores verificaram que as fibras tratadas apresentam cinética de absorção de água menor daquelas apresentadas pelas fibras não tratadas, comprovando a eficiência desse tipo de tratamento.

Em uma das pesquisas envolvendo compósitos impressos de ácido polilático (PLA) reforçados com fibra de carbono, foi feito um pré-tratamento

na fibra para melhora da ligação interfacial. Esse processo se inicia com partículas de PLA submersas em uma solução de diclorometano, sofrendo agitação magnética por 30 minutos. O líquido é então filtrado e emulsificado em alta velocidade, e recebe adição de agentes antiespumantes. Assim, a fibra de carbono é adicionada lentamente para modificar sua condição de superfície. Como pode ser visto na Figura 6, os compósitos tratados apresentaram maiores respostas à tração e flexão.

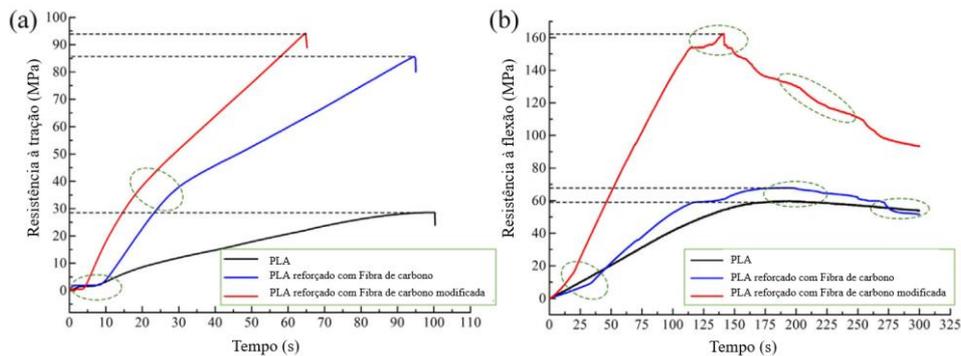


Figura 6 - Resistências à tração e flexão de compósitos impressos 3D[51].

#### 2.1.4. Mecânica dos materiais compósitos

Pela mecânica dos materiais é possível fazer uma análise do material compósito a partir dos seus constituintes. Inicialmente algumas considerações devem ser tomadas para uma previsão das características finais dos compósitos (Figura 7), como, por exemplo, todos os componentes e o compósito final trabalham no regime linear elástico. As fibras são consideradas homogêneas, isotrópicas, regularmente espaçadas, perfeitamente alinhadas e com adesão perfeita com a matriz. Esta, por outro lado, é considerada um material homogêneo, isotrópico e sem vazios. O compósito então é considerado sem tensões iniciais, macroscopicamente homogêneo e ortótropico [17].

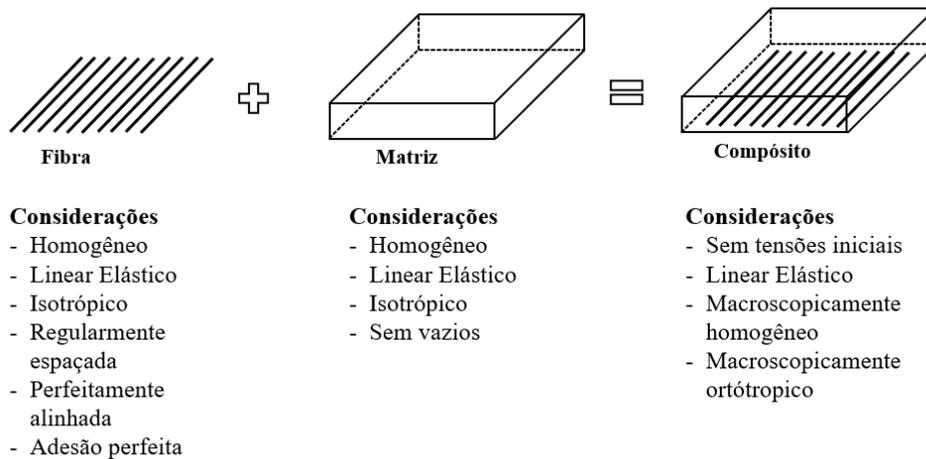


Figura 7 - Considerações das características dos materiais para o uso da regra das misturas. Adaptado de [17].

Diante dessas considerações é então estudado o comportamento do material como um todo pela combinação de seus componentes. A Regra das Misturas é uma relação com base nos modelos de Reuss e Voigt, que permite obter módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson para o compósito, levando em conta as propriedades da fibra e da matriz separadamente [52]. Para o caso do módulo de elasticidade na direção 1 (direção principal do material, paralela às fibras) (Figura 8), é possível escrever pelo modelo de Voigt:

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

onde  $E$  e  $V$  são o módulo de elasticidade e a fração volumétrica, respectivamente, e  $f$  e  $m$  são os índices correspondentes a fibra e matriz.

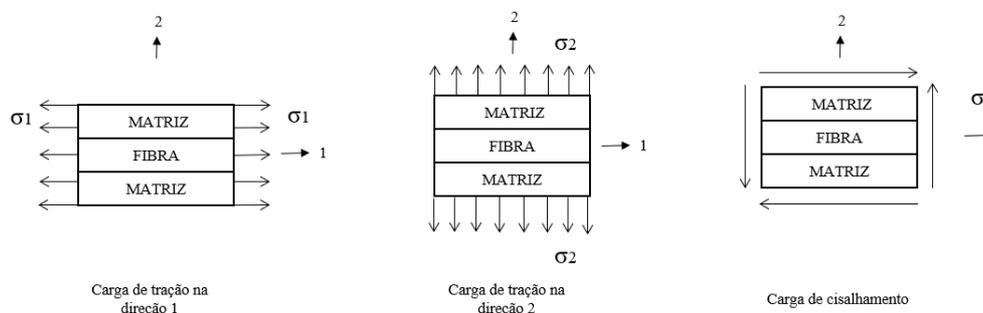


Figura 8 - Carregamentos aplicados ao material compósito. Adaptado de [17].

Já o módulo na direção 2 (perpendicular das fibras) é obtido pelo modelo de Reuss:

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (2)$$

É possível mostrar por considerações energéticas que o verdadeiro módulo de elasticidade de um compósito é um valor entre os resultados da fibra e da matriz, apenas se nenhum deslizamento ocorrer na interface [52]. Analogamente as demais equações podem ser obtidas como mostrado abaixo:

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f G_m + G_m G_f} \quad (3)$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (4)$$

onde  $G$  e  $\nu$  são o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson principal, respectivamente.

Entretanto, na prática o material não apresenta as características perfeitas, levando a um resultado inferior ao calculado. Esta incompatibilidade, causada dentre outros fatores pela variabilidade das propriedades da fibra, problemas de interface e erros de produção, podem levar a baixas propriedades mecânicas, tendo então uma resposta experimental diferente da prevista pela Regra das Misturas [47].

Na Figura 9, um experimento feito com matriz poliéster reforçada com fibra de curauá, foi flexionada em sua direção principal. Os resultados experimentais foram comparados com os teóricos. Como esperado, a resistência obtida acaba sendo menor que a teórica. Além disso, a regra das misturas é levantada para tensões normais, dessa forma, os resultados naturalmente tendem a ser inferiores ao teórico.

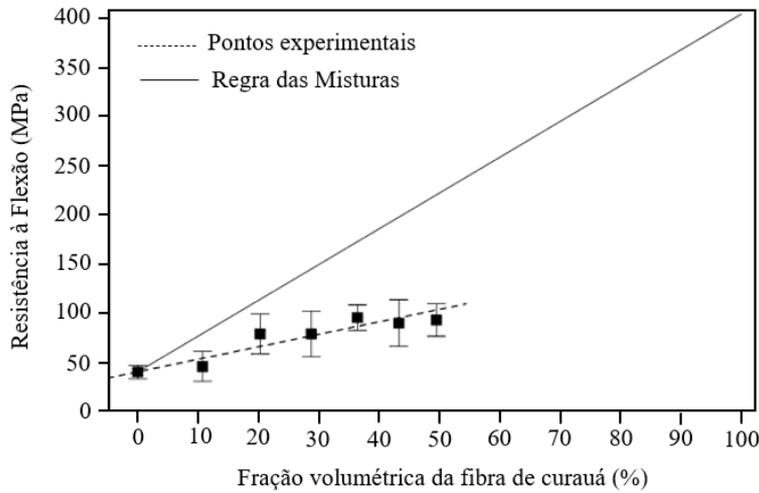


Figura 9 - Resistência à flexão em função da fração volumétrica da fibra de curauá. Adaptado de [53].

O sistema 1-2 da matriz constitutiva de compósitos ortotrópicos é descrita pelas quatro propriedades elásticas principais: os módulos de elasticidade  $E_1$  e  $E_2$ , módulo cisalhante  $G_{12}$  e coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$ . Quando trabalhado com compósitos em um sistema de referência x-y não-coincidente com suas direções principais (1-2), como é o caso da direção  $45^\circ$ , essa matriz passa a ser representada por seis propriedades de engenharia, que podem ser relacionadas com as propriedades no sistema 1-2 como mostrado nas Equações 5-10. É possível determinar de forma indireta as propriedades principais a partir de ensaios simples em outras direções utilizando-se dessas equações [17].

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \left[ \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_2} \sin^4 \theta \quad (5)$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{1}{E_1} \sin^4 \theta + \left[ \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_2} \cos^4 \theta \quad (6)$$

$$\nu_{xy} = E_x \left[ \frac{\nu_{12}}{E_1} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) - \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right] \quad (7)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = 2 \left[ \frac{2}{E_1} + \frac{2}{E_2} + \frac{4\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{12}} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \quad (8)$$

$$\eta_{xy,x} = E_x \left[ \left[ \frac{2}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin \theta \cos^3 \theta - \left[ \frac{2}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^3 \theta \cos \theta \right] \quad (9)$$

$$\eta_{xy,y} = E_y \left[ \left[ \frac{2}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^3 \theta \cos \theta - \left[ \frac{2}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin \theta \cos^3 \theta \right] \quad (10)$$

Onde,

$E_x$ = Módulo de elasticidade na direção x;

$E_y$ = Módulo de elasticidade na direção y;

$E_1$ = Módulo de elasticidade na direção 1;

$E_2$ = Módulo de elasticidade na direção 2;

$\nu_{xy}$ = Coeficiente de Poisson no plano xy;

$\nu_{12}$ = Coeficiente de Poisson principal;

$G_{xy}$ = Módulo Cisalhante no plano xy;

$G_{12}$ = Módulo Cisalhante principal;

$\eta_{xy,x}$ = Coeficiente de influência mútua na direção 1;

$\eta_{xy,y}$ = Coeficiente de influência mútua na direção 2;

$\theta$ = Ângulo de inclinação;

#### 2.1.5. Vantagens e desvantagens do uso de fibras naturais

O uso de fibras naturais na fabricação de estruturas de materiais compósitos apresenta grandes vantagens. Por essa característica ecológica, materiais compósitos permitem a fabricação de grandes estruturas biodegradáveis apenas com recursos naturais e com uma quantidade reduzida de energia incorporada [54]. Nesse sentido, elas se tornam um substituto eficaz das fibras sintéticas, dentre elas, fibras de carbono e de vidro. Isso se torna necessário uma vez que vários países têm feito restrições ao descarte de produtos feitos com fibra de vidro e de amianto. Além disso, o reforço de polímeros tradicionais e de base biológica com fibras naturais reduz a dependência de materiais à base de petróleo, desde as fibras sintéticas às

matrizes plásticas, já que é possível substituir até 50% do peso da matriz em fibras naturais [55].

Quanto as propriedades físicas destaca-se seu baixo peso específico, o que auxilia no transporte e na construção. Possuem ainda boas propriedades acústicas e de temperatura, sendo uma opção para necessidade de isolamento acústico e térmico [4, 48]. Esses compósitos de fibra natural apresentam ainda uma maior taxa de absorção de energia sob cargas de impacto, do que compósitos reforçados com fibra de vidro [56].

Sua fabricação é relativamente segura com redução de irritação dérmica e respiratória. O processo de incineração e descarte dos resíduos das fibras vegetais são inofensivos e não apresentam qualquer vestígio de metais pesados nocivos [55].

No quesito econômico fibras naturais apresentam um baixo custo e abundância no meio ambiente. Por conta disso, o preço final das peças é menor do que para compósitos reforçados com fibras sintéticas. Além disso, algumas fibras que são oriundas de resíduos agrícolas, podem representar uma nova fonte de renda e geração de emprego para seus produtores [9, 51].

Entretanto, como qualquer material, os compósitos com fibras naturais apresentam certas desvantagens. Dentre elas, destacam-se a ocorrência de grande variabilidade nas propriedades das fibras naturais, que pode levar a propriedades imprevisíveis, sensibilidade às condições do meio [57], degradabilidade quando sujeitas à altas temperaturas, baixa resistência ao fogo, à umidade e incertezas sobre o desempenho de longo prazo [23, 27, 49, 51].

A incompatibilidade na interface, por sua vez, pode levar a uma má dispersão, adesão não perfeita entre a fibra e a matriz e baixas propriedades mecânicas [27, 45]. Durante a sua produção ocorre uma dificuldade no uso de processos de fabricação, bem conhecidos quando comparado ao uso de fibras sintéticas [54], além da tendência de formar agregados durante o processamento [29].

## 2.2. Estruturas e Componentes de Materiais Compósitos

### 2.2.1. Comportamento estático

O comportamento mecânico de materiais compósitos, reforçados com fibras vegetais e matriz de base polimérica, depende não apenas da seleção de seus componentes, mas também da interface entre eles. Às vezes é necessário modificar a matriz e fibras para necessidades específicas [58]. Na prática, o que se deseja saber é o comportamento a curto e longo prazo desses compósitos, bem como descobrir como utilizar as características dos componentes da melhor maneira. Desta forma, neste capítulo serão apresentadas as propriedades mecânicas de matrizes poliméricas reforçadas com fibras vegetais sujeitas à carregamentos de tração, compressão e flexão.

O comportamento dos compósitos é diretamente afetado pelo volume de fibra. Estes por sua vez estão associados ao volume e comprimento crítico de cada tipo de fibra, além da orientação em que são colocadas [21]. Enquanto fibras curtas são normalmente difíceis de controlar e colocadas de formas dispersas, fibras longas podem ser postas alinhadas em uma direção, resultando numa maior resistência nessa orientação.

#### 2.2.1.1. Comportamento à tração

A resposta de compósitos à tração é um dos principais fatores na escolha desse tipo de material. Para carregamentos de tração paralelos a fibra em compósitos unidirecionais constituídos de fibras frágeis, a falha se inicia com a ruptura de algumas fibras individualmente de forma estável [59]. Com isso, o carregamento é redistribuído pelas demais fibras, que por sua vez vão se rompendo. Depois que uma quantidade de fibras se rompem, o compósito se torna instável, o que leva a ruptura completa do material.

Outrossim, fatores na fabricação dos materiais compósitos influenciam direta e indiretamente as propriedades mecânicas do material. A fração de fibra, ou seja, a porcentagem de fibra no compósito, está diretamente ligada às resistências finais do material. Como visto pela regra das misturas, um maior volume de fibras gera um maior módulo de

elasticidade e resistência a tração. Entretanto, esse volume deve ser limitado pois, uma vez que ocorra um aumento excessivo de fibras, a matriz para de agir como agente de união do material, gerando problemas de aderência e comprometendo as propriedades mecânicas.

Durante o processo de ruptura para esse tipo de carregamento, alguns modos de falha do material podem ocorrer (Figura 10). Dentre eles é possível citar: a ruptura frágil, quando as fibras se rompem de forma uniforme, que ocorre quando há uma boa adesão entre a fibra e a matriz; o desprendimento/escorregamento da fibra em relação a matriz, conhecida como “pull out” que ocorre em interfaces de baixa aderência; descolamentos entre fibra e matriz devido também à baixa aderência; e rupturas ou falhas na matriz [59].

Quando sujeitos a carregamentos de tração transversais às fibras, os compósitos podem romper por falha na matriz ou na interface fibra/matriz sob tensão, descolamento dos constituintes ou fratura das fibras. Este tipo de carregamento é considerado crítico do material, por não se utilizar a fibra em sua direção preferencial que é onde apresenta as melhores propriedades mecânicas da mistura [59]. Em casos como esse, a busca por configurações onde haja a presença de fibras na direção paralela ao carregamento é o ideal.

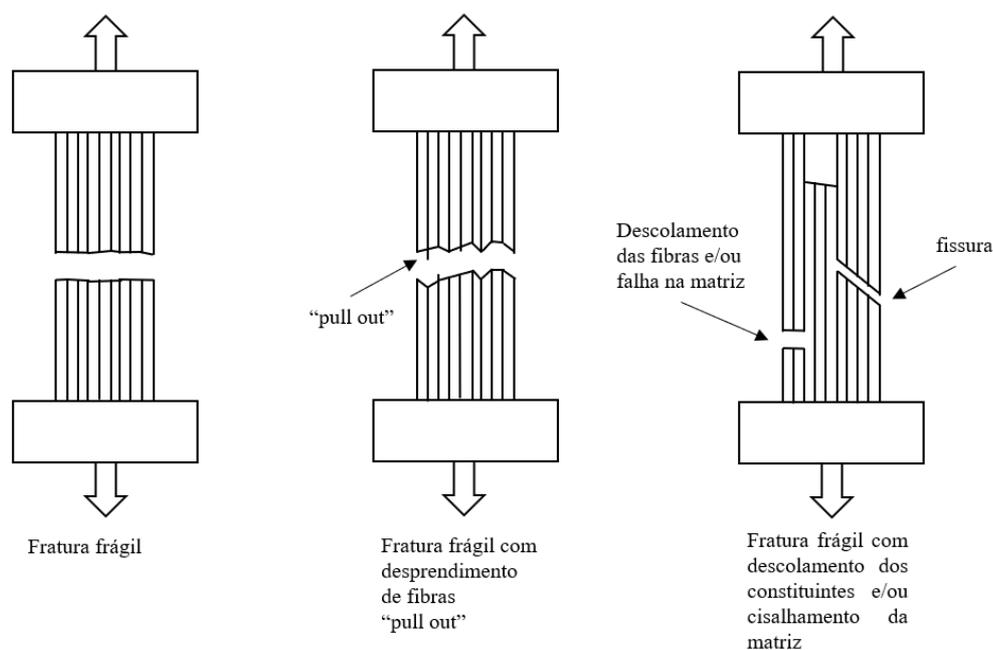


Figura 10 - Modos de falha de compósitos unidirecionais tracionados longitudinalmente. Adaptado de [59].

Um estudo avaliou a resistência à tração na direção preferencial para diferentes tipos de fibras vegetais com a mesma fração volumétrica. A Figura 11 mostra as resistências à tração medidas dos compósitos de fibra vegetal e matriz de polipropileno (PP). Compósitos de fibra de cânhamo apresentaram a maior resistência à tração (52 MPa), enquanto fibra de coco apresentaram menor resultado (cerca de 10 MPa). A resistência dos compósitos de kenaf, sisal e juta foi de aproximadamente 30 MPa [33].

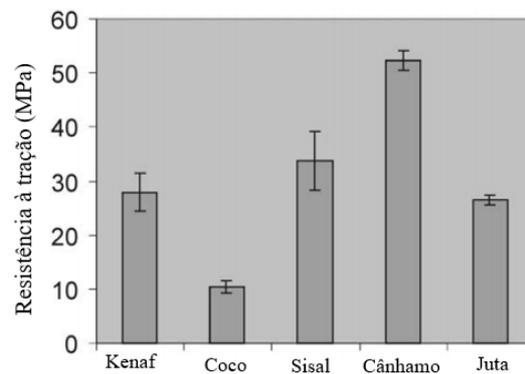


Figura 11 - Resistências à tração de compósitos de polipropileno reforçados com fibra vegetal [33].

### 2.2.1.2. Comportamento à flexão

O Comportamento dos compósitos sujeitos à flexão podem ser diversos. Quanto aos modos de falha típicos de compósitos de matriz polimérica, quando rompidos à flexão estão: compressão das fibras; rompimento das fibras tracionadas e cisalhamento interlaminar. A Figura 12 apresenta esses modos de falha.

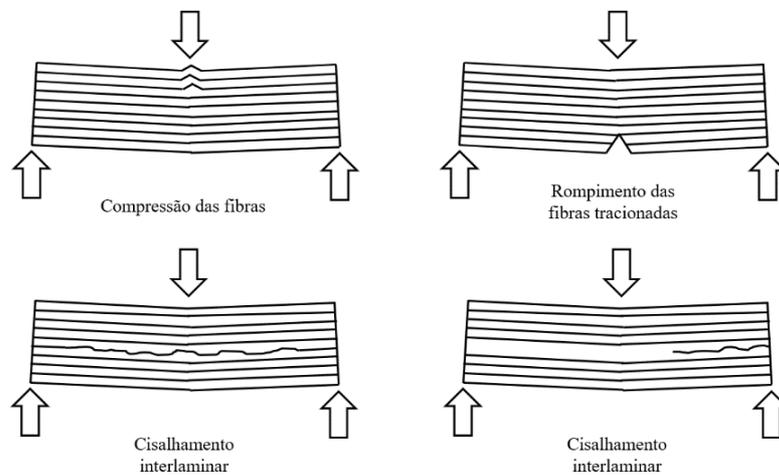


Figura 12 - Modos de falha típicos à flexão. Adaptado de [60].

Já a Figura 13 apresenta curvas típicas de ensaios de flexão em materiais compósitos segundo a norma ASTM D790 que verifica as propriedades à flexão de plásticos reforçados e não reforçados com partículas. O comportamento pode ser de três formas: a curva (a) representa estruturas de compósitos onde a ruptura se dá de forma abrupta, sem que as fibras atuem como ponte de carga da matriz rompida; a curva (b) apresenta a ruptura na deformação máxima das fibras com limite de deformação em 5%; a curva (c) ocorre quando não há ruptura mesmo depois da deformação da estrutura acima do limite de 5% de deformação [61].

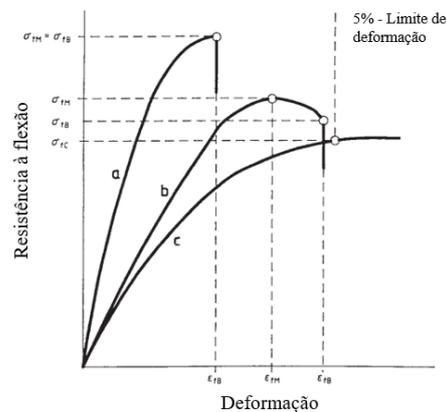


Figura 13 - Curvas típicas de ensaio de flexão em materiais compósitos. [61].

Wambua et al. [33] desenvolveu um trabalho analisando compósitos de polipropileno reforçados com fibra vegetal. No caso das fibras naturais sujeitas à flexão é notável uma semelhança de resistência entre os compósitos de kenaf, coco e sisal, que podem ser observada na Figura 14. Compósitos de cânhamo e juta mostraram as melhores propriedades de resistência e módulo à flexão [33].

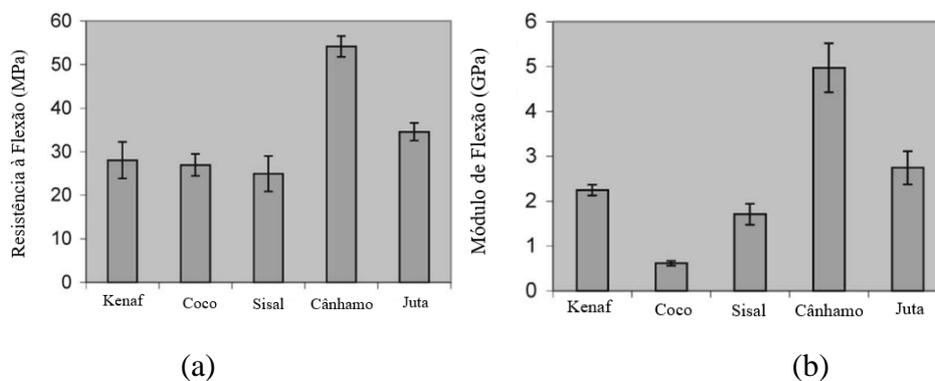


Figura 14 - Compósitos de polipropileno reforçados com fibras vegetais sujeitos à flexão: a) Resistência à flexão; b) Módulo de flexão [33].

Outras pesquisas foram desenvolvidas sobre o comportamento de biocompósitos sujeitos à flexão, tais como Bravo et al. [62], Gironès et al. [63] e Dong et al. [64], na tentativa de elucidar as possibilidades do uso desse tipo de material para esforços mecânicos e substituição de fibras sintéticas.

### 2.3. Processo de fabricação de compósitos reforçados com fibras

Apesar dos biocompósitos à base de fibras naturais não serem um tópico novo, seu desenvolvimento é relativamente recente em contraste ao uso de fibras sintéticas, uma vez que essas apresentam notavelmente características mecânicas superiores e, por consequência, tornaram-se preferência no mercado. O uso de fibras naturais encontrou desafios relacionados à falta de disponibilidade de pré-formas, falta de técnicas processamento de conhecimento, falta de informações de tempo de vida e compreensão limitada de seu comportamento mecânico [65].

O processo de moldagem por compressão de materiais compósitos reforçados com fibra natural já foi realizado por diversos pesquisadores. Ele consiste, basicamente, da aplicação da matriz escolhida intercalada com as camadas de tecido ou fibras avulsas no molde. Em seguida esse molde é então tampado e comprimido de forma que os vazios sejam reduzidos. Por fim, após o tempo de cura, o molde é aberto e as placas são retiradas prontas [66].

A exemplo disso, um estudo foi feito sobre as propriedades mecânicas de um compósito de PLA reforçado com fibra de cânhamo. Seu processo, conforme Figura 15, utilizou a matriz PLA em placas sólidas cortadas, que se fundem às fibras quando sofrem compressão quente [67].

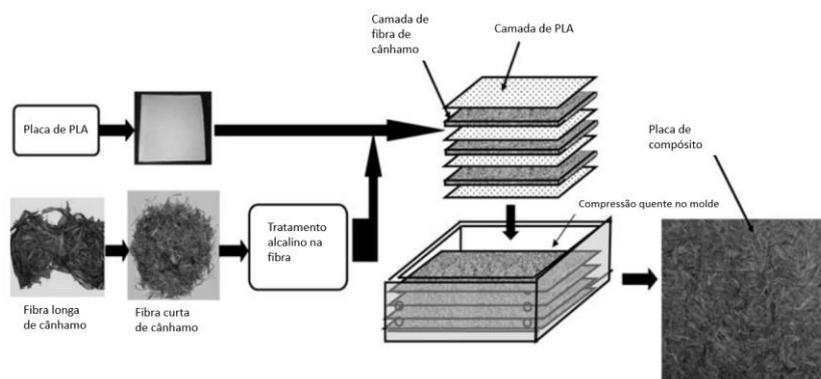


Figura 15 - Procedimento de fabricação de compósitos de PLA reforçados com fibra de cânhamo [67].

Analisando as propriedades mecânicas, a resistência do polímero reforçado com cânhamo foi muito maior do que o PLA puro, provando que a adição de fibras realmente se faz necessária quando se busca um material de uso estrutural. A resistência à flexão resultante desse compósito reforçado com 40% de fibra tratada foi de 112,7 MPa [67].

Outro exemplo é o estudo das propriedades mecânicas da matriz poliéster reforçada com fibra de juta (Figura 16), na condição de fibras dispersas e em tecido. Segundo os autores, essa composição pode ser um bom substituto para diversas aplicações internas de uma edificação, como prateleiras e lavatórios. Pela análise dos resultados foi obtido que, em média, os laminados reforçados com fibra de juta obtiveram resistência à tração de 60MPa, muito maiores quando comparados ao da resina não reforçada [41].

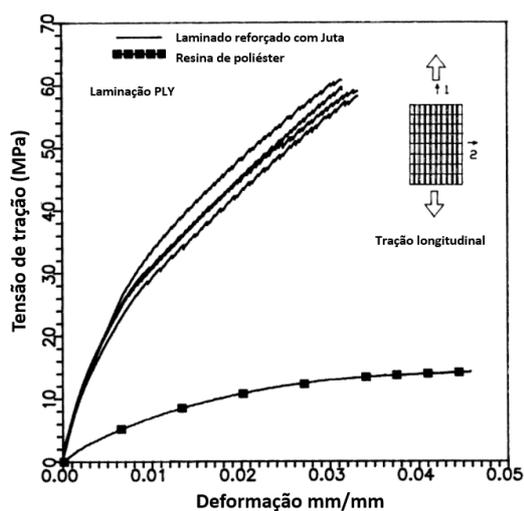


Figura 16 - Resposta de tensão-deformação de tração de compósitos poliéster reforçados com juta [41].

Quanto às aplicações, um dos segmentos industriais a utilizar compósitos reforçados com fibras é o da indústria automotiva. Isso acontece porque as fibras naturais apresentam um baixo custo e baixo peso, de forma a se oferecer como potencial substituto dos enchimentos de fibra de vidro e mineral nas peças internas e externas dos automóveis [46]. A Figura 17 apresenta o compósito produzido por compressão (a) e um painel interno de uma porta de um automóvel moldado com esse material (b).

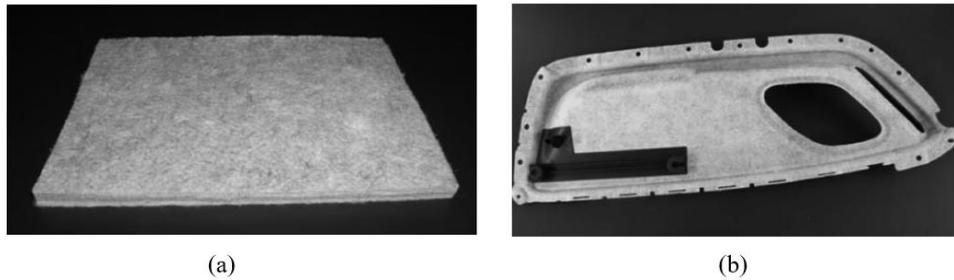


Figura 17 - (a) Moldagem por compressão de compósito reforçado com fibra natural (b) painel interno de porta feita com compósito reforçado com fibra natural. [46].

Exemplificando a aplicação compósitos reforçados com fibras vegetais a partir de resíduos da produção de alimentos, a Figura 18 apresenta as etapas de moldagem de painéis de pejibaye, feitas com resíduos da produção de palmito. Estes, por sua vez se utilizaram de fibras dispersas e moldagem por compressão para redução do número de vazios[68]. Esses painéis foram então ensaiados e classificados de acordo com sua fração de massa de densidades baixa e média, segundo a ANSI A208.1 [68]. Suas propriedades podem ser vistas na Tabela 5.



Figura 18 - a) Sistema de molde e prensa utilizado na fabricação dos painéis de pejibaye; b) A mistura de fibra e matriz sendo espalhada para a fabricação dos painéis c) Painéis fabricados [68].

Tabela 5 - Placas de Pejibaia / PU - Propriedades de flexão em ensaio de três pontos [68].

Densidade da placa	Fração de massa	$\sigma_r$ (MPa)	E (MPa)
Baixa Densidade	50/50	3,4±0,3	140±28
	60/40	6,2±0,7	313±63
	70/30	8,3±1,3	605±68
Média Densidade	50/50	9,9±2,0	561±32
	55/45	10,7±1,0	469±50
	60/40	12,7±2,8	660±121

## 2.4. Impressão 3D

### 2.4.1. Definição

Manufatura Aditiva (MA) ou *Additive Manufacturing* é o nome do processo que produz um objeto tridimensional camada por camada, a partir de um arquivo gerado digitalmente. Este processo, que é popularmente conhecido como impressão 3D, pode ocorrer de diversas formas e utilizar uma variedade de materiais [69].

A impressão 3D também é definida como uma técnica de prototipagem rápida, para fabricar componentes funcionais feitos diretamente de modelos desenvolvidos no computador, permitindo o controle da composição local de um protótipo. Esse controle permite a fabricação de materiais com microestruturas controladas e definidas na modelagem, o que torna viável a impressão de materiais compósitos, uma vez que suas camadas precisam ser moldadas de forma específica [70]. A manufatura aditiva se distingue das técnicas tradicionais, como fundição e usinagem, por sua capacidade de lidar com formas complexas, com grande flexibilidade de projetar e sem o desperdício típico das outras técnicas [69].

Entretanto, dois problemas podem ser ressaltados: o primeiro se dá na taxa de produção da impressão 3D ser extremamente baixa e, o segundo, ocorre pelo fato de o tamanho físico das peças ser geralmente reduzido, em função dos equipamentos tradicionais. Além disso, para criação de peças sujeitas a carregamento, diferente de protótipos, faz-se necessário o aprimoramento das técnicas e dos materiais de alimentação, uma vez que as propriedades mecânicas de polímeros, não são adequadas para fins estruturais. Dentre os problemas desta técnica, observa-se elevada porosidade de compósitos, fenômeno esse explicado pela mudança da orientação a cada camada, dispersão das fibras e formação de vazios [89, 91].

O processo de impressão 3D pode ser descrito como a modelagem de uma estrutura com softwares 3D CAD (computer aided design). Este modelo é salvo em formato STL (do inglês *Standard Triangle Language*), que converte a casca externa do objeto em uma malha triangular. O arquivo é

então importado para um fatiador, que realiza o corte do objeto em camadas de espessuras definidas. Esse programa permite a definição de parâmetros necessários para a impressão, de forma a atender as necessidades do usuário.

Inicia-se então, o processo de impressão, que varia conforme o método de impressão escolhido. De forma geral material é depositado pela impressora, formando camadas uniformes de espessura pré-fixada. As cabeças de impressão se movem horizontalmente pelos eixos xy. A estrutura horizontal é elevada em um passo também pré-fixado e uma segunda camada é então colocada por sobre a primeira. As camadas vão se sobrepondo até que o final é dado quando o modelo é desafixado da mesa de impressão [72].

#### 2.4.2. Método de impressão: Fused Deposition Modeling (FDM)

*Fused Deposition Modelling* (FDM) é uma técnica, no ramo da prototipagem rápida, que realiza a construção de um objeto camada por camada através de um bico em padrão raster (extrusor), composto por linhas paralelas. Historicamente, em razão de os tipos de materiais serem limitados, os produtos finais acabam por apresentar propriedades mecânicas limitadas [69].

Neste processo, filamentos de resina termoplástica aquecidas são extrudadas a partir de uma cabeça de extrusão que se move no plano x-y. O material termoplástico utilizado para a construção dos modelos, sob a forma de fio, é alimentado através de uma bobina. Uma cabeça da máquina deposita filamentos de material sobre uma base, formando a primeira camada do componente. A plataforma é mantida a uma temperatura inferior à do material extrusado, de forma que a resina termoplástica endureça rapidamente. Após este processo, a plataforma movimenta-se no sentido vertical (eixo z) e a cabeça deposita uma segunda camada sobre a primeira. O processo é repetido até à construção total do protótipo [73].

Esse método vem introduzindo vantagens de fabricação de materiais compósitos. Na literatura, é possível encontrar trabalhos sobre a impressão 3D de compósitos reforçados com fibra produzidos a partir de estereolitografia (SLA) ou *Fused Deposition Modelling* (FDM). Entretanto,

há uma preferência na utilização do método FDM, uma vez que permite a impressão 3D de composto estruturais com melhor desempenho mecânico específico [74].

A Figura 19 representa o modelo de impressora de FDM com adição da fibra vegetal. Nele são utilizadas duas bobinas, uma contendo a matriz polimérica que atua como a matriz do compósito e na outra a fibra que age como reforço. Os materiais são unidos no bico de extrusão para a formação das camadas de forma orientada conforme as demandas do usuário.

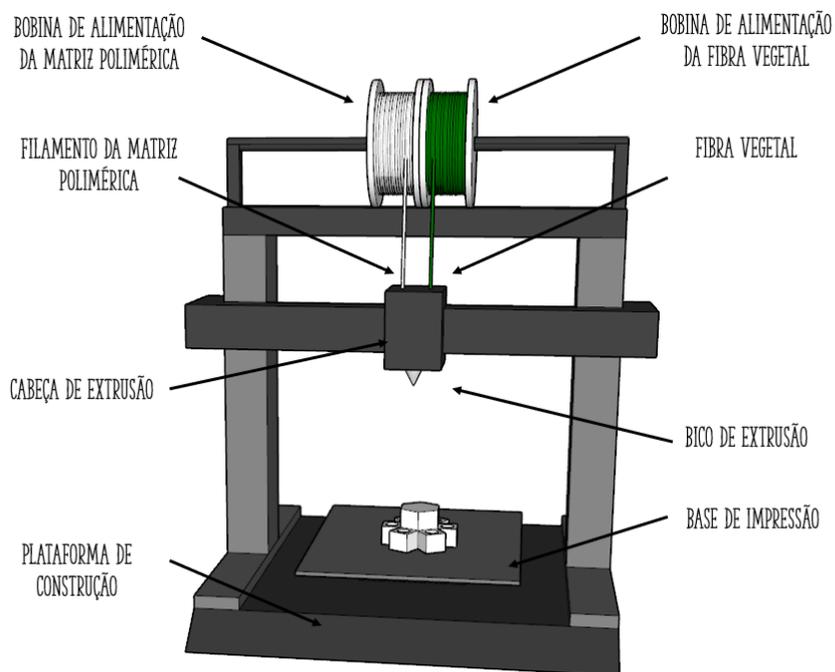


Figura 19 - Modelo de impressora 3D com seus componentes. [7]

Todo esse processo de impressão para materiais compósitos leva à ideia de uma modelagem 5D (Figura 20). Esse termo é dado com a combinação de uma modelagem 3D, aliado ao controle de composição da camada e orientação da partícula [31].

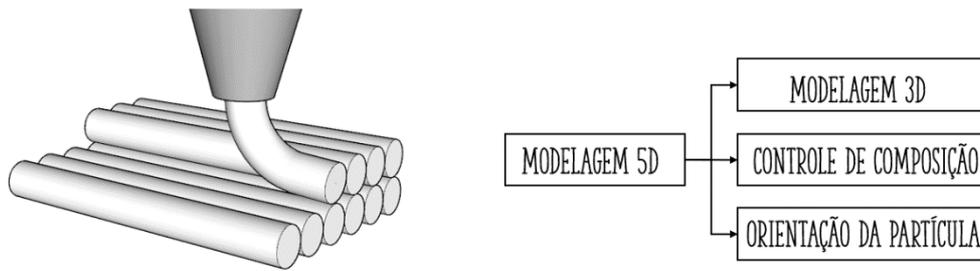


Figura 20 - Modelagem 5D no processo de impressão de materiais compósitos. Adaptado de [31].

### 2.4.3. Impressão com polímeros reforçados com fibras

Inicialmente, a impressão 3D surgiu para criação de protótipos, sem a necessidade de que o objeto fosse capaz de resistir a esforços mecânicos. A limitação da prototipagem decorre do fato de os materiais tradicionais de impressão apresentarem baixa resistência mecânica. Com o aprimoramento das técnicas de impressão, a manufatura aditiva, que antes se restringia na área de modelagem geométrica e prototipagem, passou a ser pensada para produção de elementos estruturais, com resistência a cargas elevadas [82].

Diante dessa fragilidade dos modelos impressos unicamente com filamentos poliméricos tradicionais, pesquisas vêm desenvolvendo métodos de reforço para melhora nas características mecânicas. O comparativo das resistências dos principais filamentos utilizados conforme Figura 21, mostram uma variação de 20 a 30MPa [75].

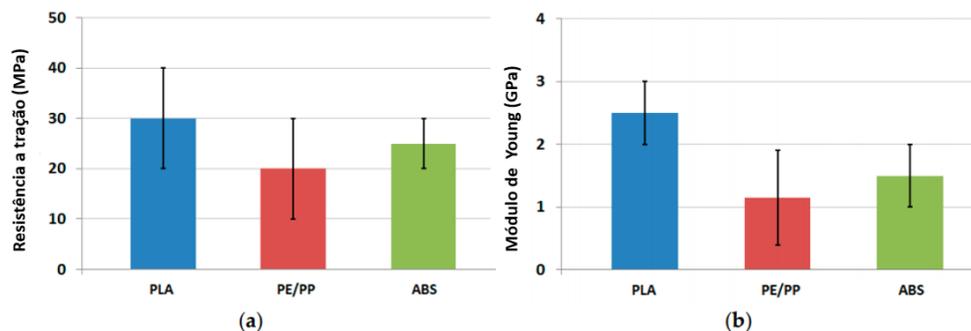


Figura 21 - Propriedades de tração média de amostras impressas em 3D para diferentes matrizes poliméricas: (a) Resistência, (b) Módulo de Young [75].

Uma das soluções para essas baixas resistências foi a adição de fibras, criando um material compósito onde os filamentos poliméricos agem como uma matriz, que por sua vez é reforçada pelas fibras escolhidas.

Diversos são os fatores de escolha para o uso de fibra como reforço na impressão 3D. O comprimento das fibras tem impacto direto nos resultados das propriedades mecânicas do material. Fibras curtas apresentam baixas propriedades a ponto de sofrerem arrancamento da matriz, em vez de reforçar o compósito até que haja falha da fibra. O comprimento mínimo para ter a ruptura da fibra, em vez do escorregamento, é conhecido como o comprimento crítico. Por esse motivo, fibras contínuas são vistas como soluções mais viáveis para reforço [74]. Este método é conhecido como *Continuous Fiber Reinforced Additively Manufactured* (CFRAM), ou, Manufatura Aditiva com Fibra Contínua de Reforço [76].

O método de impressão determina a viabilidade do reforço com fibras no modelo. A impressão de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), tratada anteriormente, se torna um ótimo meio para inserção destas fibras, já que esse tipo de impressora se utiliza de um filamento polimérico que é puxado pelo motor para o bico, onde este filamento é aquecido e então depositado na mesa de impressão. Quando adaptado, as fibras contínuas são puxadas juntamente com a matriz, fazendo com que ambas sejam depositadas na mesa em posições pré-definidas. A Figura 22 apresenta modelos impressos reforçados com fibra de Kevlar, desenvolvidos pela empresa MarkForged [74].



Figura 22 - Modelos impressos em Nylon reforçados com fibra de Kevlar [74].

A adaptação das impressoras FDM tradicionais pode ser feita de diversas formas, dentre elas, com deposição de polímero e fibra por bicos de impressão independentes, ou por um único bico como é o caso da Figura 23. A configuração onde os bicos de impressão da fibra e do filamento são independentes pode gerar problemas de interface, uma vez que a distância

entre os bicos pode fazer com que a matriz endureça antes da deposição da fibra, prejudicando a aderência entre os constituintes.

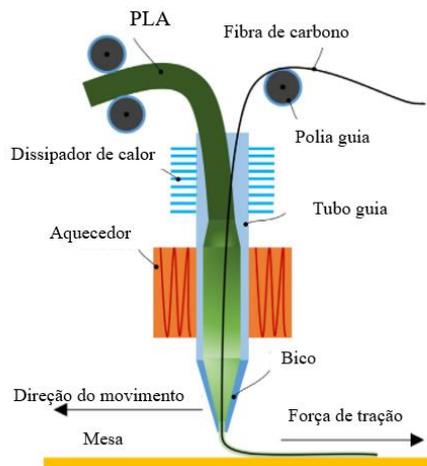


Figura 23 - Modelo esquemático da impressão reforçada com fibra [51].

As propriedades dos materiais compostos impressos 3D são afetadas pelo tipo de fibras utilizadas, sua rigidez, resistência e capacidade para ligação interfacial com a matriz polimérica [77]. Quanto ao tipo de fibra, pesquisas foram feitas investigando principalmente a adição de fibras sintéticas na impressão, tendo poucos casos do uso de fibras naturais. Mohammadzadeh et al [76] usaram fibras de carbono (CF), vidro (FG) e Kevlar como agentes de reforço do filamento de nylon. Foram feitas análises micro e macromecânicas, tendo sido avaliado no caso das últimas, as condições de falha da fibra, correlações entre a densidade e propriedades mecânicas de compósitos impressos. Os compósitos de fibra de carbono apresentaram os melhores resultados conforme Tabela 6, chegando a resistências de até 400MPa. Os tipos de preenchimento utilizados na fabricação dos corpos de prova estudados podem ser vistos na Figura 24, onde a quantidade de anéis representa o número de voltas dados na impressão concêntrica.

Tabela 6 - Resultados experimentais dos compósitos [76].

Fibra	Preenchimento	Anéis	Resistência (MPa)	Deformação (mm/mm)
CF	Isotrópico Concêntrico	+ 2	404,3	0,0085
FG	Isotrópico Concêntrico	+ 2	372,1	0,01752
Kevlar	Isotrópico Concêntrico	+ 2	309,1	0,01329

CF	Concêntrico	5	235,5	0,00583
FG	Concêntrico	5	302,6	0,02311
Kevlar	Concêntrico	5	259,7	0,01199
CF	Isotrópico	0	330,6	0,0071

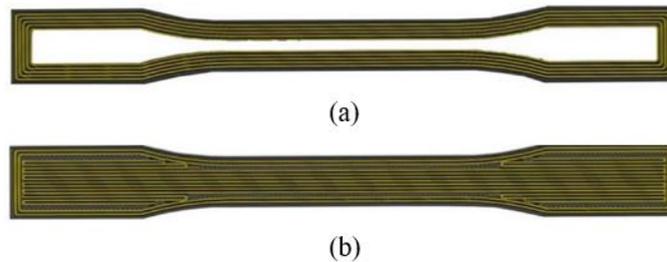


Figura 24 - Esquema dos tipos de preenchimento dos corpos de prova. (a) Concêntrico. (b) Isotrópico.

Além deles, compósitos de nylon reforçados de fibras de carbono chegaram a resistências à tração de 500MPa, enquanto os corpos de prova puramente de nylon ficaram com resistências em torno de 15MPa [78]. Em estudo utilizando fibra de carbono como reforço para o ABS, os resultados mostraram que a resistência à flexão e à tração com 10% em peso de fibra de carbono contínua (CCF), foi melhorada para 127 e 147 MPa, respectivamente, muito maior que do ABS sem reforço [79].

Na área médica estudos fizeram uso de fibras sintéticas e naturais como reforço de materiais impressos. Um deles foi realizado com diversas fibras sintéticas para o reforço de peças impressas em matriz de poliuretano. Os testes mecânicos de amostras impressas revelaram um aumento de resistência acima de 180% em comparação com amostras impressas não reforçadas [80]. No caso das fibras naturais, ainda que com resistências mecânicas consideravelmente mais baixas que as de fibras sintéticas, apresentaram bom desempenho. O uso de PLA reforçado com fibras naturais nos ensaios de flexão segundo a ASTM D790, apresentou uma resistência máxima com fibra de seda de 24,58 MPa, enquanto os de lã se limitaram a 23,63 MPa [81].

Li et al. [51] realizaram um estudo sobre compósitos impressos de PLA reforçados com fibra de carbono. Assim como será realizado no presente

trabalho, os autores realizaram a fabricação de um novo bico para a impressora. Utilizando a técnica de FDM, este bico foi projetado para que a fibra de carbono fosse depositada juntamente com o PLA em uma única saída, conforme Figura 25. Eles ensaiaram os corpos de prova impressos à flexão, com e sem o reforço da fibra, para caracterização do material e verificação de suas reais vantagens. Os resultados experimentais demonstraram que o aumento da resistência à flexão dos compósitos reforçados com fibra de carbono, chegou à 164% a mais que as amostras sem fibras de reforço [51].

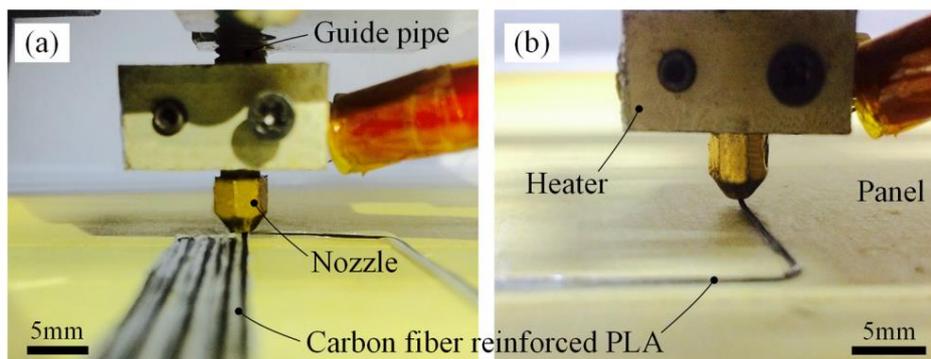


Figura 25 - Processo de impressão 3D do compósito reforçado com fibra de carbono contínua. (a) Impressão em a área reta, (b) imprimir em curva de 90° [51].

Na Universidade de Ciência de Tóquio foi desenvolvido um método de impressão tridimensional de compósitos de fibra contínua, por impregnação no bocal, que ocorre com a coextrusão da fibra e do filamento de PLA, ambos passando pelo mesmo bico conforme desenho esquemático da Figura 26. O estudo foi feito com fibra sintética de carbono e fibra vegetal de juta e, ao fim, os materiais foram avaliados quanto a esforços de tração e flexão [82]. A Figura 27 apresenta os corpos de prova gerados.

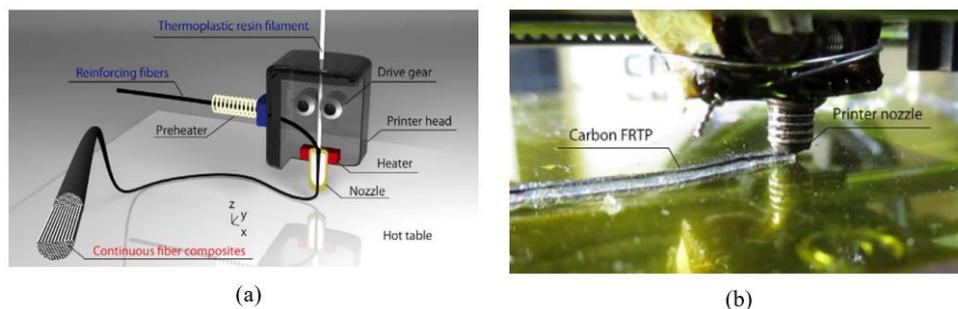


Figura 26 - Impressão tridimensional de compósitos de fibra contínua. a) Esquema de funcionamento da impressora. b) Fotografia da impressão com fibras [82].

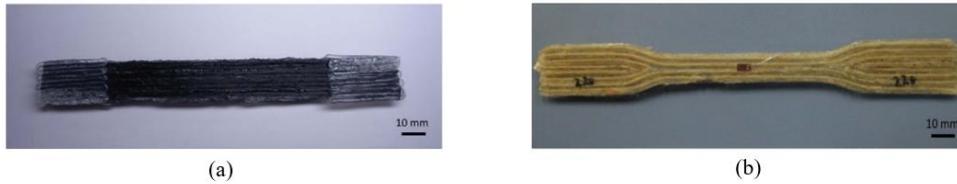


Figura 27 - Corpos de prova gerados pela impressão. a) Compósito impresso reforçado com fibra de carbono (CFRTP). b) Compósito impresso reforçado com fibra de juta (JFRT) [82].

Os estudos foram capazes de demonstrar propriedades de tração muito mais altas que o método teórico da regra de misturas usando PLA com fibra de carbono. Além disso, também foi possível se observar a possibilidade do uso de fibra vegetal de juta, apesar de nenhum ganho significativo ter sido apontado no uso desse material como reforço (Figura 28 e Figura 29). Destaca-se ainda que o experimento só apresentou fração volumétrica de juta de 7% [82].

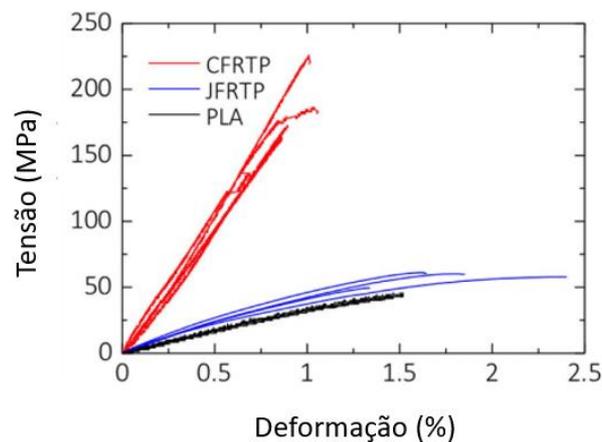


Figura 28 - Gráfico de tensão x deformação do ensaio de tração [82].

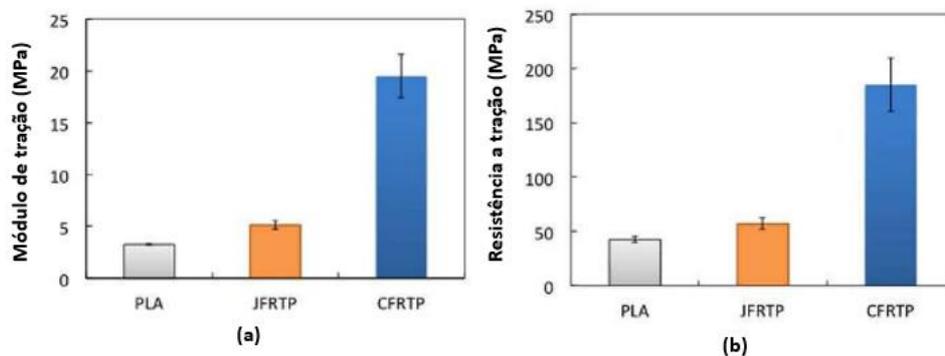


Figura 29 - a) Módulo de tração b) Resistência à tração de amostras impressas 3D.

É necessário destacar, no entanto, que biocompósitos usados para impressão 3D são reforçados principalmente com fibras naturais descontínuas (fibras curtas) ou pó de fibra [77]. E, entre as fibras vegetais usadas e suas

respostas aos ensaios mecânicos, o reforço com fibra de bambu e linho em matriz de PLA obtiveram resultados promissores, uma vez que houve um aumento no módulo de elasticidade dos compósitos reforçados com fibras curtas de bambu de 91-230%, enquanto no caso do linho esse valor chegou a até 39%.

Estudos também foram feitos para verificação da utilidade de fibras curtas de cânhamo e harakeke como reforço em ácido polilático [83] e polipropileno [84]. Os testes mecânicos apontaram que o reforço do PLA com fibras levou a um aumento no módulo de Young de 42,3% e na resistência à tração de 5,4%. Enquanto isso, o reforço em PP levou a filamentos com resistência à tração de até 39 MPa e módulo de Young de 2,8 GPa.

Quando testado o pó de cânhamo em filamento de PLA foi exibido um módulo de elasticidade sempre mais alto do que as amostras sem reforço, sendo esse módulo crescente com o aumento da porcentagem de pó de cânhamo [85]. Entretanto, como retratado em um estudo envolvendo o uso de fibra de coco como reforço em ABS, os resultados mostraram que a fibra influenciou negativamente nas propriedades mecânicas, uma vez que reduziu a adesão mútua das camadas [86].

Nesse sentido, fica claro que, apesar do uso de fibras sintéticas ter sido de grande reforço aos materiais impressos, é necessário um aprofundamento na pesquisa do uso de fibras naturais contínuas na manufatura aditiva, uma vez que com base nos artigos encontrados o conhecimento desse assunto ainda é escasso, principalmente com relação ao uso de fibras contínuas.

#### 2.4.4. Métodos construtivos de impressão 3D de estruturas

Enquanto as primeiras impressoras foram produzidas para modelos reduzidos incapazes de resistir a esforços de maior magnitude, o crescimento de pesquisas na área tem levado à produção de máquinas mais sofisticadas para escalas maiores, sendo capazes de construir até edificações completas.

A limitação inicial de escala na manufatura aditiva se dava pela área de impressão ser limitada ao volume da câmara da impressora 3D [87].

Todavia, em diversas áreas como a da construção civil, a escala reduzida inviabiliza seu uso, sendo necessárias alternativas para possibilitar sua aplicabilidade.

O uso da impressão 3D em grande escala é feita com base na troca de conhecimento de diversas áreas, desde a engenharia estrutural, passando pela ciência dos materiais, mecatrônica, engenharia de software, inteligência artificial e arquitetura [88]. Nesse sentido, é possível ressaltar algumas das técnicas de impressão em larga escala, a saber:

*D-shape* e *Contour Crafting* são processos de impressão baseados em pórticos que se materializam como uma máquina de maiores proporções, controlada por um atuador que permite a translação do bico em qualquer direção dos três eixos cartesianos. Em outras palavras, se trata de uma impressora 3D de grandes dimensões [89]. Apesar de ser uma forma aceitável, necessita de um alto investimento e suas dimensões acabam sendo limitadas, tornando impraticável a construção de impressoras maiores que edifícios reais [87].

*Robotic Arm Solutions* ou solução com uso de braços robóticos, veio como uma resposta às limitações dos métodos listados anteriormente. Pesquisadores do Centro de Singapura produziram um sistema de manufatura aditiva, que emprega braços robóticos móveis que realizam a impressão simultaneamente de uma grande estrutura de peça única (Figura 30). Dessa forma, a movimentação livre e assistida dos braços permite que a produção não se limite à uma mesa de impressão [87]. Também conhecido como Método de Continuidade Tangencial (TCM), essa aplicação da robótica na construção permite que os graus de liberdade sejam aumentados [90], possibilitando a produção de camadas não planejadas com espessura variando localmente [88].



Figura 30 - Impressão com a utilização de braços robóticos [87].

Outra alternativa se dá na produção de estruturas menores que possam posteriormente ser montadas. A Universidade Politécnica de Valência vem produzindo vigas modulares de encaixe impressas com plástico reciclado. Embora dados técnicos não estejam disponíveis, os autores afirmam que sua estrutura alveolar permite que essas vigas atinjam peso até 80%, menor que as tradicionais de concreto e aço, mantendo boas propriedades mecânicas [91]. Figura 31 apresenta algumas das vigas produzidas por esse método.

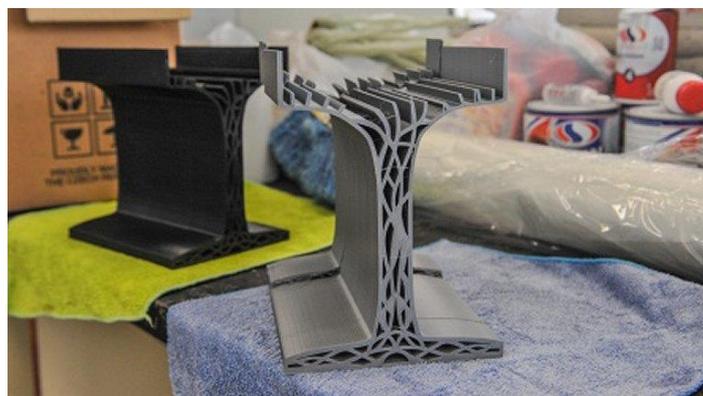


Figura 31 - Vigas produzidas por manufatura aditiva feitas com plástico reciclado [91].

#### 2.4.5. Aplicações na construção civil com outros materiais

O aumento da escala de impressão teve impacto direto com o setor de construção civil. Atualmente, já existem diversas edificações construídas com o uso da impressão 3D, pela sua economia de materiais, velocidade de execução e possibilidade maior de *design*. Contudo, a maioria dos métodos de impressão usados pelo ramo envolvem o uso de matriz cimentícia e fabricação de estruturas monolíticas, que não permitem a desmontagem e

dificultam o processo de reforma, além de necessitar o transporte da impressora para o local da construção.

Esse crescimento teve grande influência devido a empresa chinesa ‘Winsur’ ter se utilizado da impressão em grande escala pelo método *Contour Crafting* para a fabricação de casas em um curto período de tempo, alegando ser capaz de produzir 10 casas em um único dia ao custo de menos de cinco mil dólares a unidade [92]. A empresa também foi responsável pela construção do primeiro prédio impresso do mundo, cuja construção da edificação requereu o uso de uma impressora de 6,6 metros de altura, 10 metros de largura e 40 metros de comprimento (Figura 32). Além disso, a empresa também possui uma impressora que permite o uso de materiais reciclados para impressão dos blocos 3D da edificação, mistura essa que pode conter desde partes de solo, rejeitos de minerais e resíduos de construção [93].



Figura 32 - Construção de edificação multifamiliar utilizando impressão 3D. (a) vista externa e (b) interior da edificação [93].

A primeira ponte para bicicletas de concreto (Figura 33) impressa no mundo foi feita na Holanda em 2017, pela *Eindhoven University of Technology* [94]. A Universidade destaca como vantagem no processo de manufatura aditiva, a redução do volume de concreto, quando comparado à forma tradicional, pois a impressora só deposita material nos locais necessários [95].



Figura 33 - Fabricação da primeira ponte de bicicletas de concreto armado impressa no mundo. a) Fabricação do tabuleiro da ponte. b) Detalhe do bico de impressão.

Já a maior ponte do mundo em impressão 3D foi construída por alunos da Universidade de Arquitetura de Tsinghua na China, cujo projeto levou 450 horas para tornar a estrutura pronta para uso. Segundo o professor Xu Weiguo, toda a construção teve o custo e o tempo reduzidos em dois terços do que o necessário para uma construção tradicional [96].

Outro material usado na impressão 3D é o metal. Em Amsterdã, a empresa MX3D produziu uma ponte em manufatura aditiva com o uso de impressoras, também com braços robóticos e tendo como seu material principal o metal conforme Figura 34. Esses braços derretem o metal a temperaturas de 1500°C soldando a estrutura com um método chamado de conta gotas, instruídos por um modelo feito em tecnologia CAD [97].

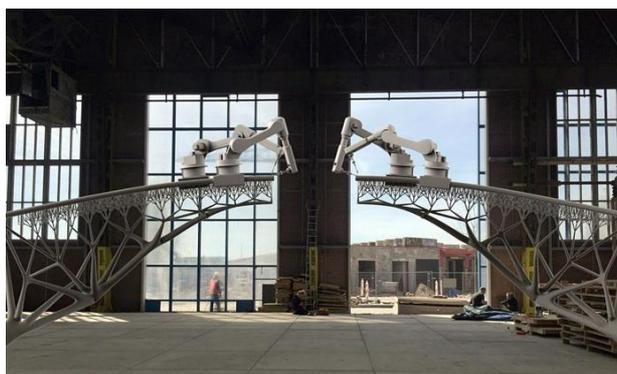


Figura 34 - Ponte metálica impressa em Amsterdã [97].

A empresa italiana Mario Cucinella Architects, por sua vez, foi a pioneira na construção de uma habitação impressa em 3D, utilizando-se apenas de materiais naturais (Figura 35) e maximizando o desempenho do solo (matéria orgânica bruta). Esse modelo de habitação foi desenvolvido para atender à demanda de soluções habitacionais de baixo custo, construindo moradias financeiramente viáveis e em um curto período de tempo [98].



Figura 35 - Casa impressa em 3D com matéria orgânica [98].

Um último exemplo é a aplicação da impressão 3D no programa “Blocos de construção impressos em solo lunar”, feito pela Agência Espacial Europeia (AEE). Esse projeto tem como objetivo a construção de habitações para residência humana na lua. A Figura 36 apresenta um pórtico de impressão por processo *D-shape* para testes da AEE [99].



Figura 36 - Impressão *D-shape* para habitações na lua [99].

Destaca-se nessa seção que a maioria das aplicações da impressão 3D na construção civil está voltada para o uso de concreto, solo ou materiais cerâmicos, com poucos casos do uso de polímeros nesse setor.

## 2.5. Habitações Sociais e de Emergência

### 2.5.1. Definição

Habitação Social ou Habitação de Interesse Social é um tipo de construção voltada para população carente que não possui condições para contratação de serviços de profissionais ligados à construção civil [100]. Sua utilização faz-se necessária uma vez que milhões de pessoas não apresentam

mínimas condições de moradia. E, o direito à moradia é assegurado por instituições e governos. Entretanto, a realidade difere dos projetos de proteção ao ser humano, seja por falta de recurso ou problemas socioambientais.

Ao longo da história, o homem se viu sem abrigo devido à desastres ambientais, conflitos humanos ou condições econômicas do local onde vive. Desastres naturais como o terremoto no Haiti em 2010, o tufão nas Filipinas em 2010 e o tsunami no Japão em 2011, levaram milhões de pessoas a perderem suas casas na última década, cabendo aos governos e organizações não governamentais resolver esse problema [101]. Estes desastres, por outro lado, poderiam ter sido efetivamente amenizados com o uso inteligente da engenharia [101], [102].

Quanto aos conflitos sociais, estes estão presentes e fazem parte da sociedade humana, em diferentes contextos históricos e espaços geográficos [103]. Ainda que no início, o século XXI é marcado por guerras e fluxo migratório. As guerras, com destaque ao movimento migratório decorrente da Primavera Árabe de 2010, levaram a movimentação de milhares de pessoas e o consequente desastre habitacional mundial na tentativa de realoca-las [104].

A luta contra a falta de moradia foi oficializada ainda no século XX, ao final da Segunda Guerra Mundial, quando a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu por meio da Declaração Universal dos Direitos Humanos um ideal comum a se atingir, para que todos os povos e Nações do planeta, possam garantir seus direitos e liberdades. No contexto da habitação social destaca-se o artigo 25º que define:

“Todo ser humano tem direito a um padrão de vida capaz de assegurar-lhe, e a sua família, saúde e bem-estar, inclusive alimentação, vestuário, habitação, cuidados médicos e os serviços sociais indispensáveis, e direito à segurança em caso de desemprego, doença, invalidez, viuvez,

velhice ou outros casos de perda dos meios de subsistência em circunstâncias fora de seu controle.” [105].

No caso do Brasil a habitação digna está assegurada pela Constituição da República em seu artigo 6º, onde a moradia, juntamente com educação, saúde, alimentação, lazer, segurança, previdência social são direitos sociais dos cidadãos [106]. Entretanto, o déficit habitacional é estimado em cerca de 7,9 milhões de lares [14].

Grande parte desse déficit ocorre porque a moradia de grande parte da população se restringe a favelas, com construções precárias e instáveis, com pouco ou nenhum acesso as necessidades básicas como água e saneamento [15]. Além disso, as construções estão sujeitas à possíveis deslizamentos, como no caso de Angra dos Reis em 2002, Morro do Bumba em 2010 e Região Serrana em 2011, gerando a necessidade de realocação das pessoas para locais seguros, de forma imediata [107].

Desastres de grandes proporções como os rompimentos das barragens do Fundão em Mariana-MG e na mina do Córrego do Feijão em Brumadinho-MG geraram consequências à curto e longo prazo no que tange à habitação, levando muitas famílias a precisar de habitações de emergência. Apesar da gravidade da situação, depois de muitos anos as pessoas envolvidas nas tragédias continuam sem acesso à uma habitação permanente, em razão de problemas judiciais e governamentais [108].

Desta forma, habitações sociais emergenciais com caráter provisório, na maioria dos casos, acabam durando mais do que o esperado, necessitando assim de projetos que atendam às condições mínimas de seus ocupantes, por um maior período de tempo. De acordo com o Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais (PIDESC, 1966), muito mais que uma edificação para proteção contra intempéries, a moradia apresenta as seguintes características [109]:

- Segurança da posse: Independente do tipo de posse, todas as pessoas têm o direito de um grau de segurança contra despejo forçado, assédio e outras ameaças.

- Disponibilidade de serviços, materiais, infraestrutura e equipamentos públicos: Deve conter infraestruturas essenciais para saúde, segurança, conforto e nutrição.

- Habitabilidade: Moradia que garanta a segurança física dos ocupantes, protegendo os moradores contra intempéries, riscos estruturais e transmissão de doenças.

- Custo acessível: Os custos habitacionais devem ser de um nível que não afetem as outras necessidades básicas do cidadão.

- Localização adequada: Local que permita acesso à emprego, saúde, educação e outros equipamentos sociais.

- Adequação cultural: Moradia de forma a permitir a expressão de identidade cultural e diversidade.

- Não-discriminação e priorização de grupos em situação de vulnerabilidade: Garantia de acesso a habitação adequada e prioritária à grupos vulneráveis como idosos, crianças, população LGBTQIA+, portadores de deficiência, portadores de problemas de saúdes persistentes e vítimas de desastres naturais.

### 2.5.2. Tipos existentes

As soluções para habitações sociais temporárias seguem padrões em comum, normalmente com materiais de baixo custo e de construção rápida. Alguns exemplos de classificação segundo Anders [110] são:

- Construções in loco: Definidos como abrigos construídos com materiais disponível no local, de baixo custo e com possibilidade de reutilização após o período de emergência.

- Fornecimento de kits: Possuem um caráter durável, estas unidades são geometricamente pequenas e baixo peso, com aparência de construção temporária e aceitabilidade cultural. Podendo ser subdivididos em:

a) Módulos: São unidades praticamente prontas para serem usadas, sem necessidade de montagem. Também podem ser divididas em individualizadas, quando só precisam ser conectadas às redes hidrossanitária e de energia; e; modulares, quando tem função de necessidades específicas, podendo ser conectadas umas às outras para aumentar seu tamanho.

b) Encaixes: Similares ao sistema de módulo, mas entregues com os componentes desmontados o que facilita seu transporte. Entretanto, seu uso depende da montagem no local e em alguns casos, de mão de obra especializada.

c) Tensionadas: Consiste em uma armação rígida coberta com uma membrana fina de vedação. Esse tipo de habitação é indicado quando são necessários espaços adaptáveis. Estrutura leve, prática e de fácil transporte e armazenamento.

d) Infláveis: Também chamadas de pneumáticas, estas construções são similares estruturas tensionadas. Sua diferença se dá que a pressão exercida na membrana é feita pelo ar. Também se apresenta como uma estrutura leve, fácil de transportar e de rápida montagem; entretanto, precisa de uma maior manutenção.

### 2.5.3. Programas Sociais Habitacionais

Programas Habitacionais têm sido de suma importância para combater o déficit de moradias e na resolução de construções emergenciais, promovendo soluções criativas no país e no mundo. Destaca-se no Brasil o programa governamental Minha Casa Verde e Amarela e iniciativas de Organizações Não-Governamentais (ONG's), que auxiliam em áreas as quais os entes federativos não conseguem alcançar.

### 2.5.3.1. Minha Casa Verde e Amarela

O Programa Minha Casa Minha Vida, atualmente intitulado Programa Minha Casa Verde e Amarela (PMCVVA) (Figura 37), é uma iniciativa do Governo Federal criado em 2009, com objetivo de fornecer condições acessíveis para a geração de moradias para população mais carente, de forma a organizar uma cooperação entre essas famílias, cooperativas habitacionais, associações e demais entidades privadas sem fins lucrativos [111].



Figura 37 - Habitações sociais produzidas pelo Minha Casa Verde e Amarela [111].

Destinado a famílias com renda mensal de até R\$ 9.000,00, cujas concessões de benefícios se subdividem por faixa de renda (Tabela 7) [111]. Desde seu início o programa já entregou de mais de quatro milhões de unidades habitacionais, gerando cerca de 1,2 milhões de empregos ao longo dos anos [16].

Tabela 7 - Faixas de renda do Programa Minha Casa Minha Vida [111].

RENDA FAMILIAR MENSAL	FAIXA DO MCMV	CARACTERISTICA
Até R\$ 1.800,00	FAIXA 1	Até 90% de subsídio do valor do imóvel. Pago em até 120 prestações mensais de, no máximo, R\$ 270,00, sem juros.
Até R\$ 2.600,00	FAIXA 1,5	Até R\$ 47.500,00 de subsídio, com 5% de juros ao ano.
Até R\$ 4.000,00	FAIXA 2	Até R\$ 29.000,00 de subsídio, com 6% a 7% de juros ao ano.
Até R\$ 9.000,00	FAIXA 3	8,16% de juros ao ano

Por outro lado, a busca para uma produção rápida de imóveis sem o devido cuidado e fiscalização, acabou por gerar diversos problemas

construtivos. E, com a fiscalização do Ministério da Transparência e Controladoria-Geral da União (CGU), foram identificados problemas construtivos em 56,4% dos imóveis, ocorridos ainda dentro do prazo de garantia. Para essa pesquisa foram visitados 1472 unidades habitacionais durante o ano de 2015, que apresentaram falhas como infiltrações, falta de prumo, de esquadros, trincas e vazamentos [112].

### 2.5.3.2. Um Teto para meu País

*Un Techo para mi País*, ou simplesmente TETO como é conhecida no Brasil, é uma ONG fundada no Chile em 1997. Sua missão é promover o desenvolvimento das comunidades e superar a pobreza em que vivem milhões de pessoas, por meio de construção de habitações sociais, engajamento comunitário e da mobilização de jovens voluntários (Figura 38) [113].

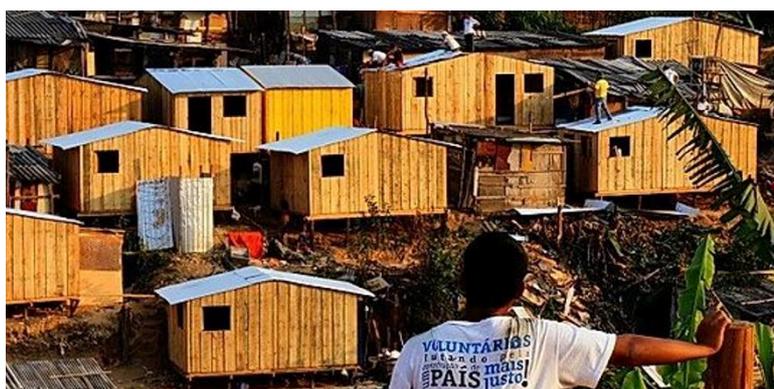


Figura 38 - Habitações sociais produzidas pela TECHO [113].

A organização se estabeleceu no Brasil em 2007 e, desde então, já realizou trabalhos nos estados da Bahia, Paraná, Rio de Janeiro, São Paulo e Sergipe. No Rio de Janeiro, as atividades são concentradas em comunidades em Duque de Caxias, Santa Cruz e Jacarepaguá. A Figura 39 representa um infográfico dos números da ONG no país [113].



Figura 39 - Números da TETO no Brasil [113].

### 2.5.3.3. Better Shelter

Better Shelter é uma empresa social com projeto de inovação humanitária para habitação sediada em Estocolmo, Suécia. Sua proposta é a criação de soluções para abrigos de emergências, clínicas provisórias e salas de aula para população sujeita a crises prolongadas em todo o mundo. O projeto foi iniciado em 2010 e lançado em escala global em 2015. Desde então, o projeto já conseguiu produzir e fornecer mais de 50.000 abrigos para campos de refugiados, locais de transido e programas de resposta emergencial em diversos países [114].

Sua solução habitacional (Figura 40) inclui telhado e paredes com lonas de espuma de poliolefina, tratados com proteção ultravioleta, estrutura e fundação de aço galvanizado leve, folhas de piso de fibras de polietileno de alta densidade, portas, janelas, caixilhos e escotilhas de ventilação de plástico polimérico, resistente ao calor e aos raios UV [114].



Figura 40 - Habitação social produzida pela Better Shelter [114].

### 2.5.4. Design para desmontagem

Para fabricação da edificação desta pesquisa foi incluído o conceito de Design para desmontagem, com o intuito da reutilização da moradia quando sua finalidade for cumprida em determinada região.

Design para desmontagem é um conceito aliado à prática de reutilização de materiais de construção, promovendo o planejamento de desmontes futuros e contribuição da cadeia de suprimentos com materiais para reutilização, reduzindo a produção de resíduos [115].

O conceito de projetar um produto ou uma construção para desmontagem, leva em conta que seus componentes são considerados valiosos. Tais elementos e materiais podem ser desmontados, reutilizados ou reconfigurados. Para que tal processo ocorra é necessário que os elementos permaneçam em um bom estado, após o processo de desmontagem. Atualmente construções convencionais de concreto não seguem esse mecanismo, tendo seus elementos demolidos e descartados [116].

As regras de design para desmontagem que maximizam a flexibilidade dos projetos podem ser numeradas como [115]:

- Durabilidade: permite que os materiais não sejam danificados durante o processo de desmontagem e por efeitos climáticos;
- Redução de acabamentos: elementos sem acabamentos secundários evita a danificação dos materiais durante o processo de reuso;
- Ligações aparafusadas: dar preferência a ligações de encaixe, às soldadas e coladas, pelas últimas serem ligações irreversíveis e gerarem descarte das peças;
- Não toxicidade dos materiais: materiais tóxicos podem comprometer a segurança dos usuários e da equipe de desmonte; logo, devem ser evitadas.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi definido com base nas necessidades da proposta de construção da habitação social. Nessa proposta os materiais construtivos foram divididos em dois grupos: placas de vedação feitas com moldagem por compressão e amostras para ligações e perfis feitos por impressão 3D. Para a proposta de impressão de ligações e perfis, os corpos de prova são impressos com PLA reforçados com três tipos de fibra, nomeados por: compósito polimérico reforçado com fibra de juta (CPRFJ), compósito polimérico reforçado com fibra de rami (CPRFR) e compósito polimérico reforçado com fibra de sisal (CPRFS), ensaiados à tração e comparados a corpos de prova não reforçados. No caso da proposta para as placas de vedação, este material foi feito utilizando tecido de fibra de juta com resina de poliuretano de mamona. Os corpos de prova gerados foram feitos em três direções da fibra:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . Estes foram então ensaiados a flexão. Alguns dos corpos de prova de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  foram submetidos à Câmara UV e então ensaiados também a flexão, vendo a influência da radiação ultravioleta nas propriedades mecânicas. A Figura 41 apresenta o fluxograma de trabalho da pesquisa.

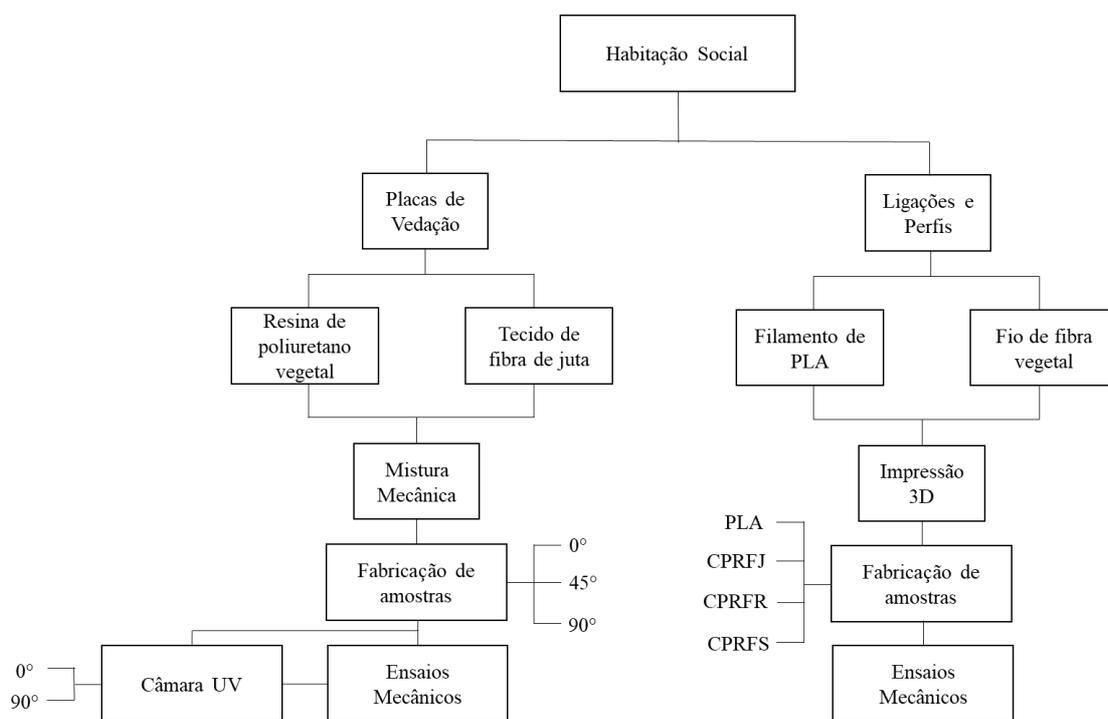


Figura 41 - Fluxograma do programa experimental.

### 3.1. Habitação social

O projeto consiste no desenvolvimento de uma edificação desmontável de compósitos reforçados de fibras vegetais. Sua modulação consiste em três elementos principais (Figura 42): placas de vedação moldadas por compressão, ligações e perfis produzidos via impressão 3D. A geometria dos perfis pode ser otimizada em função do carregamento, seguindo metodologia proposta por Tsavdaridis et al. [117].

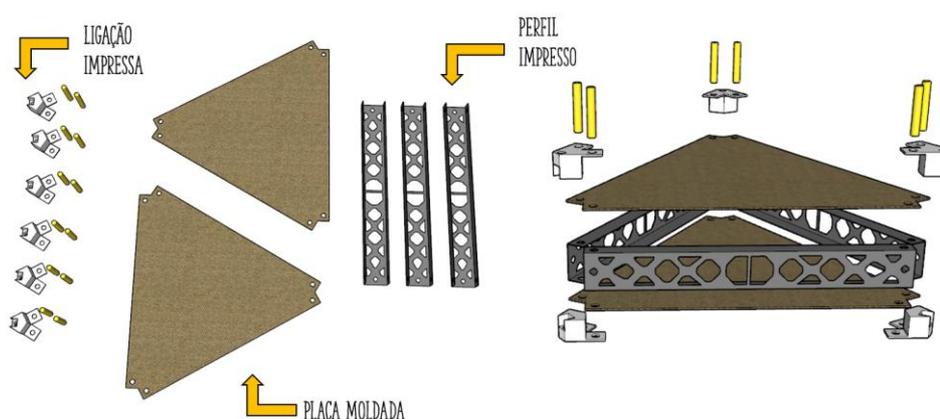


Figura 42 - Componentes de fabricação do módulo da habitação social.

Em formato de edificação simples com cobertura em duas águas, a habitação social (Figura 43) permite a modelagem de acordo com a necessidade do usuário, podendo abrigar desde uma única pessoa a famílias completas, bem como pode ser usada para outras finalidades. Seus módulos de encaixe permitem a grande mobilidade da construção para os locais onde ela é requisitada, podendo ser 100% reaproveitada ao final de seu uso.

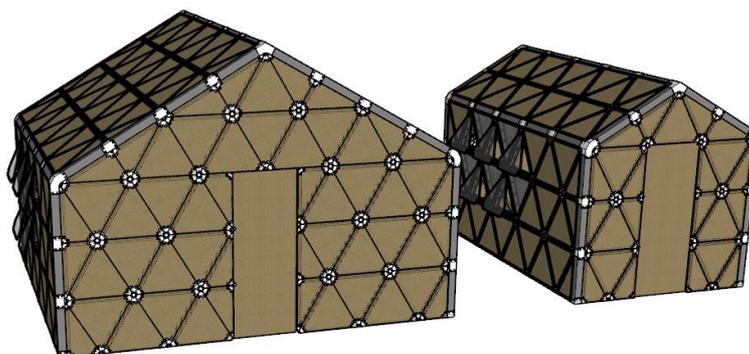


Figura 43 - Habitação social desmontável em diferentes opções de montagem.

Suas paredes e cobertura são feitas por módulos triangulares de encaixe, que serão referidos no presente trabalho como unidades de construção ou simplesmente unidades. Essa geometria facilita a troca de uma ou mais peças danificadas, sem que haja necessidade de substituição da estrutura como um todo. Além disso, as aberturas presentes nos perfis, permitem a passagem de tubulação elétrica e hidráulica de forma conveniente. A Figura 44 representa uma unidade padrão, destacando cada uma de suas peças e a forma com que elas se unem.

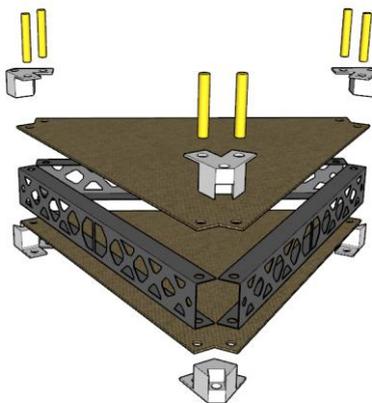


Figura 44 - Modelo 3D do módulo triangular de construção.

Destaca-se que a impressão 3D está sendo usada para prototipagem das ligações e dos perfis, com objetivo maior de provar a eficiência desse conceito de habitação. Outras técnicas de fabricação poderão ser utilizadas posteriormente, uma vez que a geometria final seja obtida. Além disso, alguns aspectos construtivos como as tolerâncias de execução, ligações com a base e vedação das juntas entre as placas ainda se encontram em fase de estudo. O pré-dimensionamento da estrutura pode ser encontrado no ANEXO 2.

### 3.1.1. Procedimento de montagem

O procedimento de montagem, de forma simplificada, pode ser dividido em duas partes distintas: a montagem interna dos módulos (Figura 45) e o encaixe entre eles na montagem da edificação (Figura 46). O primeiro procedimento começa com o posicionamento das ligações (a); em seguida, sobre elas coloca-se uma das placas de vedação (b); após, são fixados os perfis

(c); depois disso, é pousada outra placa de vedação (d). E, por derradeiro, são posicionadas as demais ligações (e) que são fixadas com pinos (f).

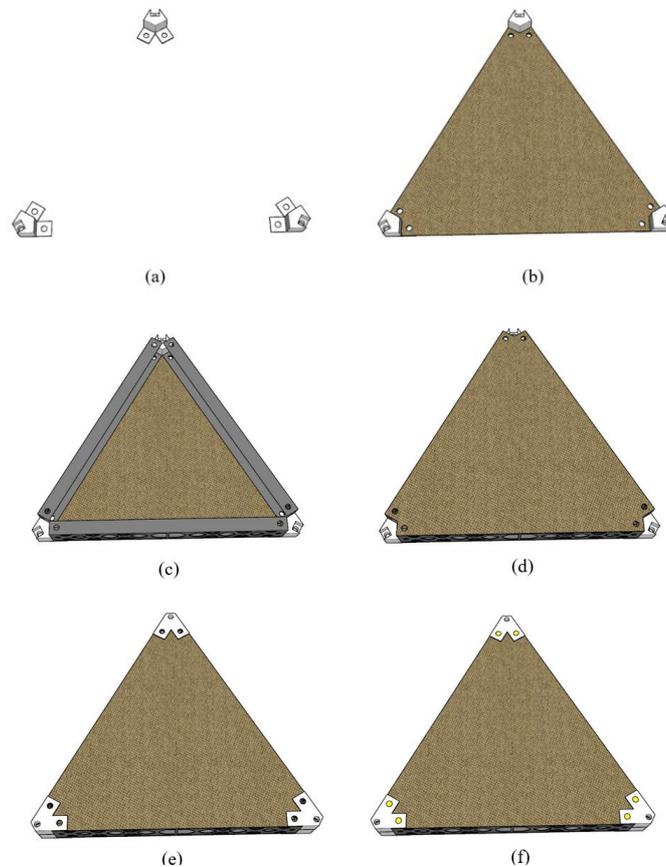


Figura 45 - Etapas de montagem do módulo triangular.

A conexão entre os módulos (Figura 46) é feita através das ligações intramodulares (a). Uma vez posicionadas, os módulos triangulares são encaixados nas suas laterais (b), onde posteriormente são fixados com o auxílio de pinos (c) e (d).

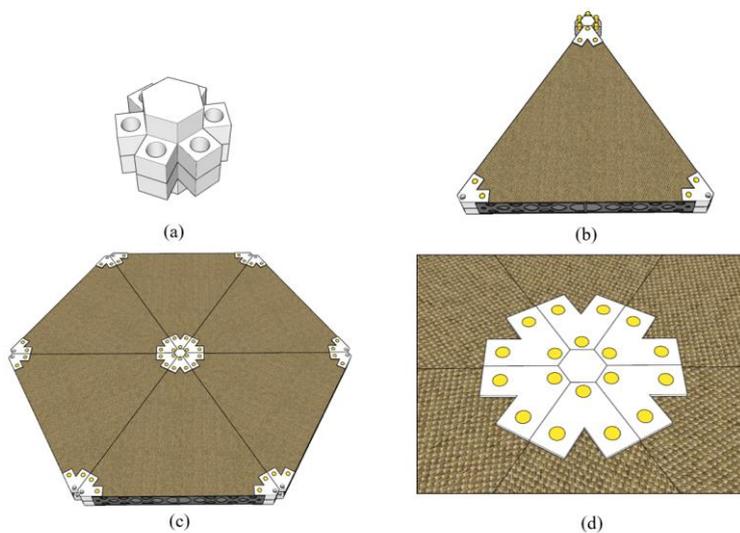


Figura 46 - Etapas de encaixe entre módulos triangulares.

Para conexão entre planos da habitação social foi necessária a projeção de um esqueleto estrutural, responsável pelo encaixe entre as faces da estrutura, contendo também ligações e perfis tubulares impressos (Figura 47). O manual de montagem completo se encontra no ANEXO 3.



Figura 47 - Esqueleto estrutural da habitação social com indicação das ligações externas.

Quanto ao transporte, dentre as diversas opções possíveis, é sugerido o envio da habitação social por meio de 4 (quatro) caixas de 1,0x1,5x0,8m conforme Figura 48. Com peso médio de 180kg por caixa. Esta disposição pode ser adaptada conforme a necessidade do usuário.

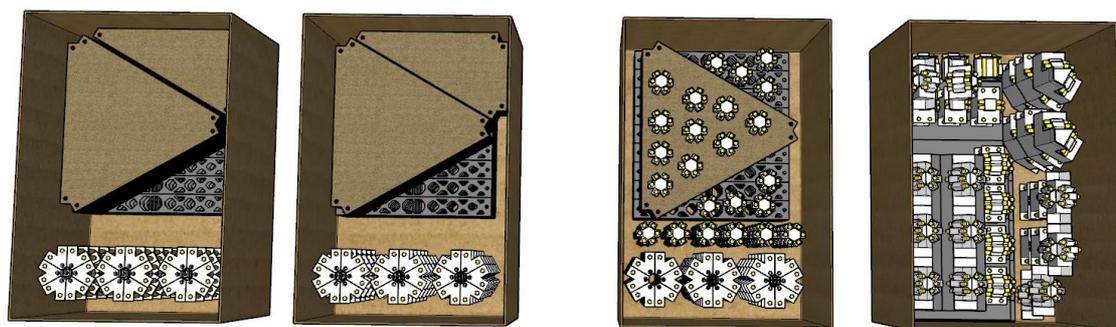


Figura 48 - Esquema de transporte da habitação social.

## 3.2. Seleção dos materiais

### 3.2.1. Matriz

Os principais fatores a serem considerados na escolha dos materiais para produção de um compósito são a rigidez e a resistência para aplicações estruturais [17]. Para a fabricação das placas de vedação optou-se pelo uso da resina Imperveg AGT 1315, que é feita à base de poliuretano vegetal oriunda de óleo de mamona e está de acordo com a premissa do trabalho de utilização de materiais naturais. É formada por dois componentes: o componente **A** sendo isocianato e o componente **B** sendo polioliol. Dentre as vantagens citadas pelo fabricante está a alta durabilidade, grande resistência aos raios ultravioletas, estanqueidade a líquidos e gases, excelente penetração nos poros da superfície, gerando uma boa aderência e não retração volumétrica após a cura [118].

Para a fabricação das ligações e dos perfis será usado o filamento de PLA (Figura 49), de diâmetro de 1,75mm da empresa 3D Lab. Esse material trabalha com temperatura de bico entre 190°C a 220°C e mesa aquecida de até 60°C.



Figura 49 - Bobina de filamento de PLA transparente.

O ácido polilático (PLA) é um poliéster termoplástico que tem como característica a sua biodegradabilidade e composição a base de fontes renováveis, como amido de milho, beterraba, mandioca e cana-de-açúcar. Não apresenta sozinho capacidade de resistência a esforços mecânicos.

Entretanto, sua dureza superficial elevada, permite que a peça tenha alta resistência à abrasão, fator importante quando considerada a questão da desmontagem [119]. Dentre as vantagens do uso do PLA comparado ao seu principal concorrente, o ABS, destacam-se a maior rigidez e resistência, matérias primas renováveis, maior velocidade de impressão e menor probabilidade de deformação [120].

### 3.2.2. Fibras

Para as placas de vedação foi optado pelo uso do tecido de juta (Figura 50), fornecido pelo Armazém da Juta com as fibras originárias da região Norte do Brasil. Essa escolha foi feita com base nos estudos de Wambua et al. [33] que mostraram que esse tipo de fibra apresenta boas respostas quando sujeito à flexão, que é o principal tipo de carregamento para essa peça. Além disso, os tecidos de juta estão prontamente disponíveis no mercado a um preço acessível.



Figura 50 - Tecido de fibra de juta.

O tecido de juta é composto por fios de 1mm uniformemente distribuídos à distância de 3 mm no urdume (comprimento), que será considerada a principal, por 5 mm na trama (largura). O tecido é cortado em pedaços retangulares de 15x20 cm, com peso médio de cinco gramas conforme Figura 51.

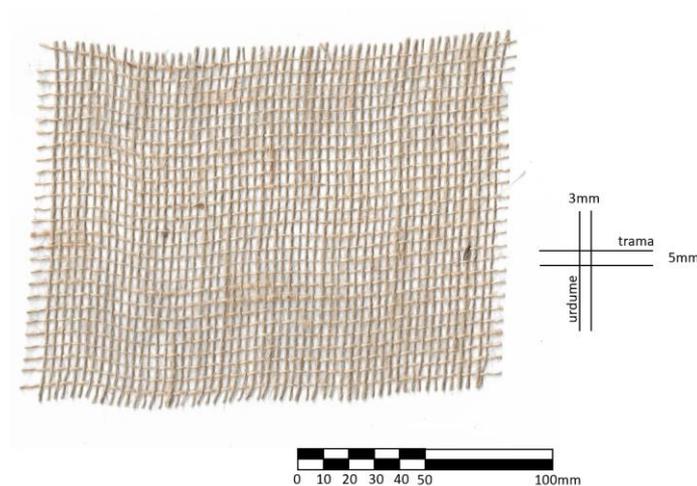
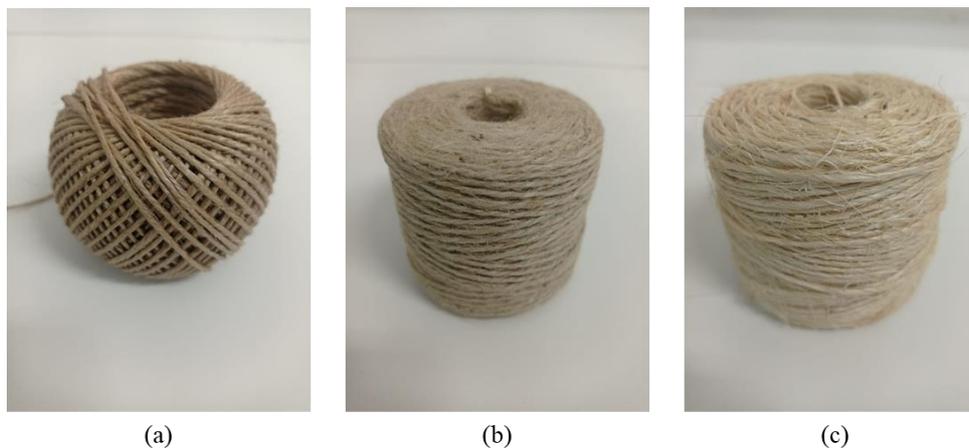


Figura 51 - Tecido de fibra de juta com definição de seus espaçamentos.

Enquanto isso, no caso da fabricação das ligações e dos perfis impressos foram usados fios de rami, juta e sisal (Figura 52). Esses fios também foram obtidos pelo fornecedor Armazém da Juta. O rami é originário de Santa Catarina, a juta do Amazonas e o sisal da Bahia. Os fios de rami apresentaram diâmetros de 1mm, enquanto os de juta e sisal medem 2mm.



(a)

(b)

(c)

Figura 52 - Fios de fibra vegetal. a) Rami b) Juta c) Sisal.

### 3.3. Fabricação dos componentes

#### 3.3.1. Impressão 3D

O processo usado para fabricação de perfis e ligações é o de manufatura aditiva. Inicialmente as ligações são modeladas em software CAD (*computer aided design*) como é o caso da Figura 53. As dimensões das ligações foram inicialmente definidas para montagem de unidades de

construção de um metro de lado. Depois de modeladas, são então exportadas em um formato STL, muito usado na área de impressão 3D.

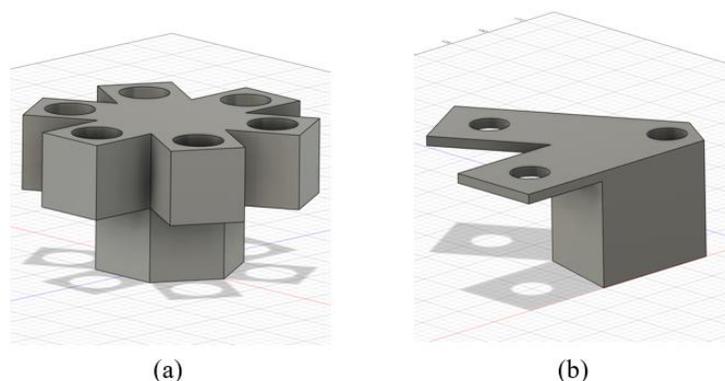


Figura 53 - Modelagem das peças de ligação 3D em software CAD. (a) - Ligação principal  
(b) - Ligação interna.

O objeto modelado é importado para o programa de preparação para impressão 3D, sendo posicionado de forma a ocupar um local adequado na mesa de impressão, fatiado em camadas de espessuras iguais e definido se há ou não a necessidade de suporte para a impressão. Feito isso, são definidos os parâmetros inerentes da impressora, como espessura das camadas, velocidade de deposição de material, direção de disposição, dentre outros fatores detalhados no item 3.3.1.1. O objeto é então impresso, camada por camada, por deposição de filamento na mesa de impressão. A Figura 54 apresenta um modelo de ligação de encaixe impresso de PLA.

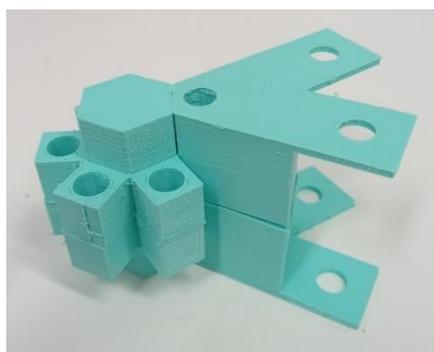


Figura 54 - Modelo de ligação impressa.

Para melhora das características mecânicas dos elementos da habitação social, a impressora 3D tradicional foi modificada de forma a produzir modelos onde o filamento PLA trabalhe juntamente com a fibra vegetal. Para isso, foi utilizada a impressora 3D da marca Zmorph VX (Figura

55a) com mesa aquecida e extrusor de plástico adaptado com uma entrada para filamento e outra para fibra em fio (Figura 55b).

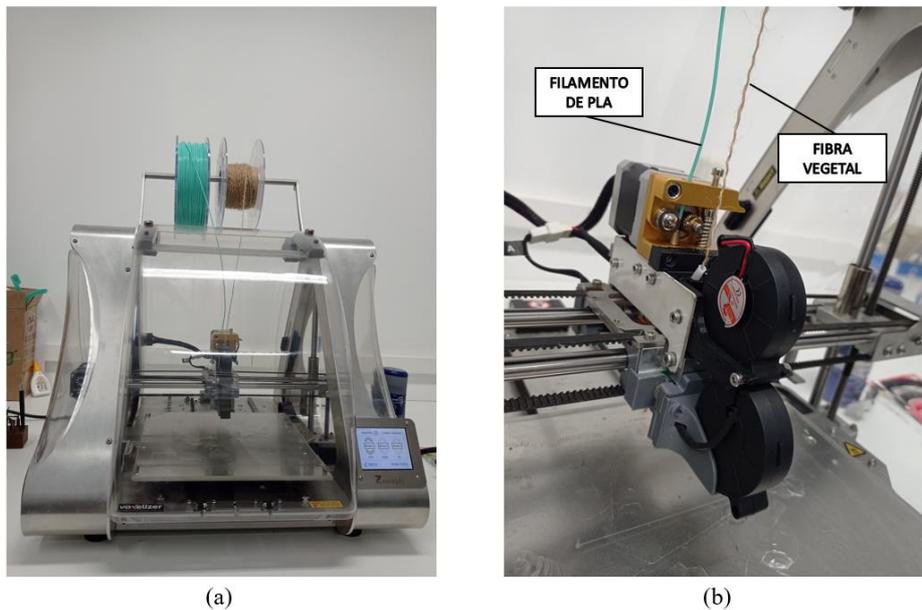


Figura 55 - Impressora 3D. (a) - Impressora Zmorph VX. (b) - Extrusor modificado.

A impressão é feita com a passagem de filamento e fibra pelo bico, onde o material é depositado na mesa aquecida, conforme Figura 56. Para esse projeto, foram produzidos materiais utilizando fibras de rami, juta e sisal (Figura 57).

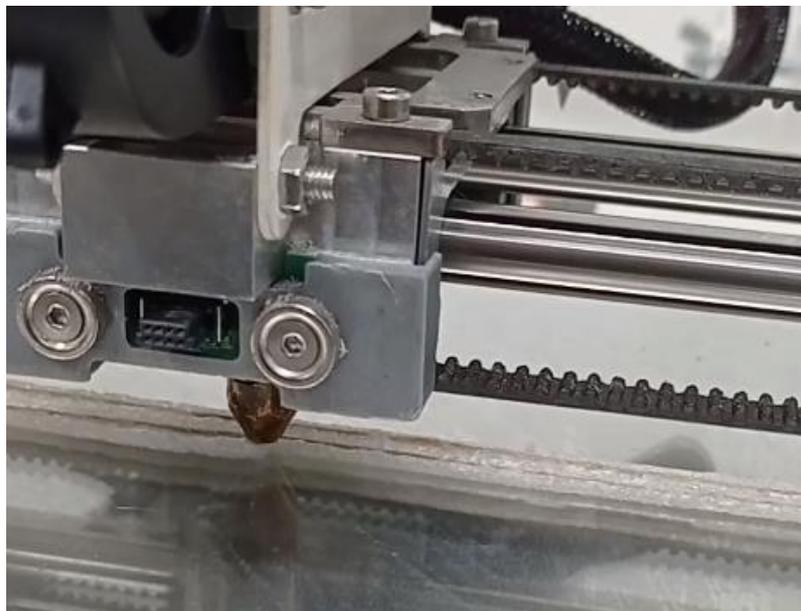


Figura 56 - Impressão com reforço de fibra vegetal.



Figura 57 - Corpos de prova impressos reforçados com fibra vegetal.

#### 3.3.1.1. Evolução nas modificações do bico

Como qualquer desenvolvimento tecnológico, diversas tentativas são feitas até a obtenção dos resultados finais. Para a presente pesquisa a modificação ocorreu com a criação de um cabeçote próprio para incorporação da fibra. A primeira modificação ocorreu com a definição de uma nova abertura de bico, uma vez que os cabeçotes originais (Figura 58) tem abertura de 0,2 a 0,4mm e as fibras eram dispostas em fio com 1,0 a 2,0mm de diâmetro.

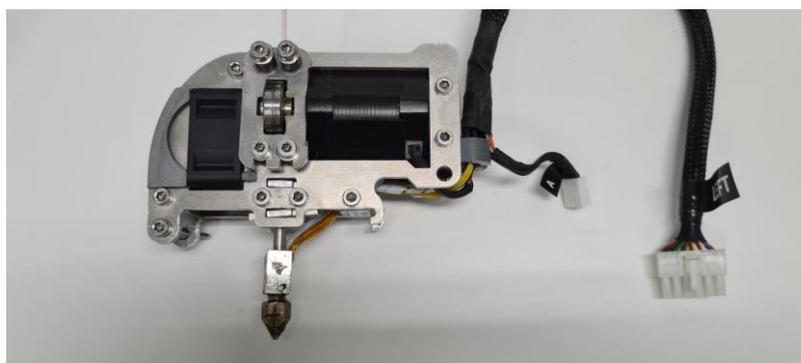


Figura 58 - Cabeçote tipo Single original da impressora Zmorph VX.

Diante disso, o bico foi inicialmente adaptado para um diâmetro de 2,1mm em um novo cabeçote (Figura 59) com uma adaptação para entrada de fibra por um tubo teflon que permite essa pelo tubo de alimentação até a saída do bico.

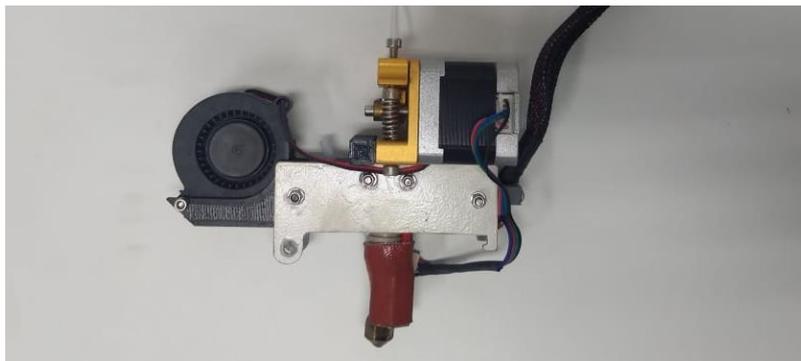


Figura 59 - Cabeçote adaptado para incorporação de fibra – versão intermediária.

Entretanto, essa primeira adaptação não obteve sucesso uma vez que o diâmetro escolhido dificultava a passagem simultânea levando a casos constantes de entupimento. Como forma de solução foi testada a passagem de parte do cordão de fibra, separando um terço do seu volume, de forma a facilitar a passagem, contudo, a baixa resistência das fibras nessa condição inviabilizou sua utilização, pois o atrito com o PLA juntamente com a temperatura do bico levou a degradação e rompimento das mesmas. Dessa forma, foi optado por elaborar um novo bico com aumento do tubo de alimentação e bico, este último com espesura de 2,4mm. Além disso, a entrada de fibra com o auxílio do tubo de teflon ocorreu mais próximo da saída do bico, facilitando sua passagem. Assim, a versão final do cabeçote foi o da Figura 60.



Figura 60 - Cabeçote adaptado para incorporação de fibra - versão final.

### 3.3.1.2. Parâmetros de impressão

Cabe destacar os parâmetros da impressora, uma vez que, diferente da impressão tradicional, devem ser alterados para se adequar às características das fibras vegetais. Com o bico fabricado, os parâmetros de impressão são escolhidos para melhor adaptar às características pretendidas. Assim,

utilizando-se do programa Repetier-host [121], com o fatiador PrusaSlicer [122], foi possível definir as diferentes propriedades pretendidas.

A altura da camada foi de 1,6mm, com largura de 2,25mm e velocidade de deposição de filamento de 2mm/s. Além disso, o multiplicador de extrusão, que por sua vez é a quantidade de filamento lançado para o bico, foi de 1,5. Com esses parâmetros e temperatura do bico de 180°C e da mesa de 60°C, foram feitos corpos de prova de 200mm de comprimento, que tiveram suas pontas cortadas conforme esquema da Figura 61, resultando em comprimento final de 150mm.

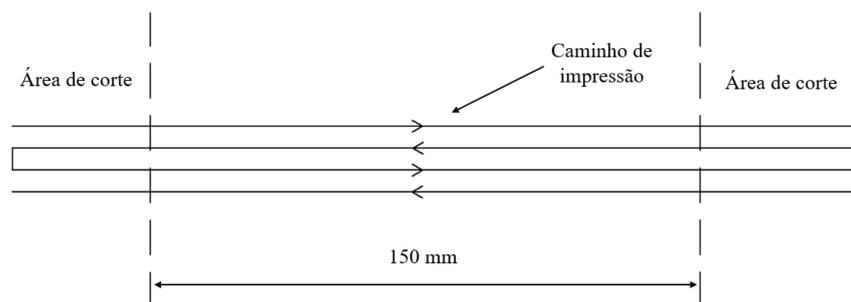


Figura 61 - Esquema de fabricação do corpo de prova reforçado com fibra.

### 3.3.2. Placas moldadas

Para fabricação das placas de vedação é necessário inicialmente enumerar os materiais utilizados (Figura 62): Resina vegetal da marca Imperveg AGT 1315 – componentes A (Isocianato) e B (Poliol); spray de silicone; forma de aço; tecido de fibra de juta.



Figura 62 - Materiais utilizados na fabricação das placas de vedação de juta.

As etapas de fabricação consistem na aplicação de silicone no molde para que o painel não fique preso (a). Depois disso, é misturada uma solução de resina de Componentes A e B na proporção de 1:1,5 (b). As camadas de resina e juta são dispostas de forma que as fibras fiquem embebidas na resina (c) e (d). Feito isso, o molde recebe sua tampa (e) e é prensado com grampos de fixação (f), com objetivo de reduzir a quantidade de vazios. Na Figura 63 é possível observar as etapas de fabricação das placas.

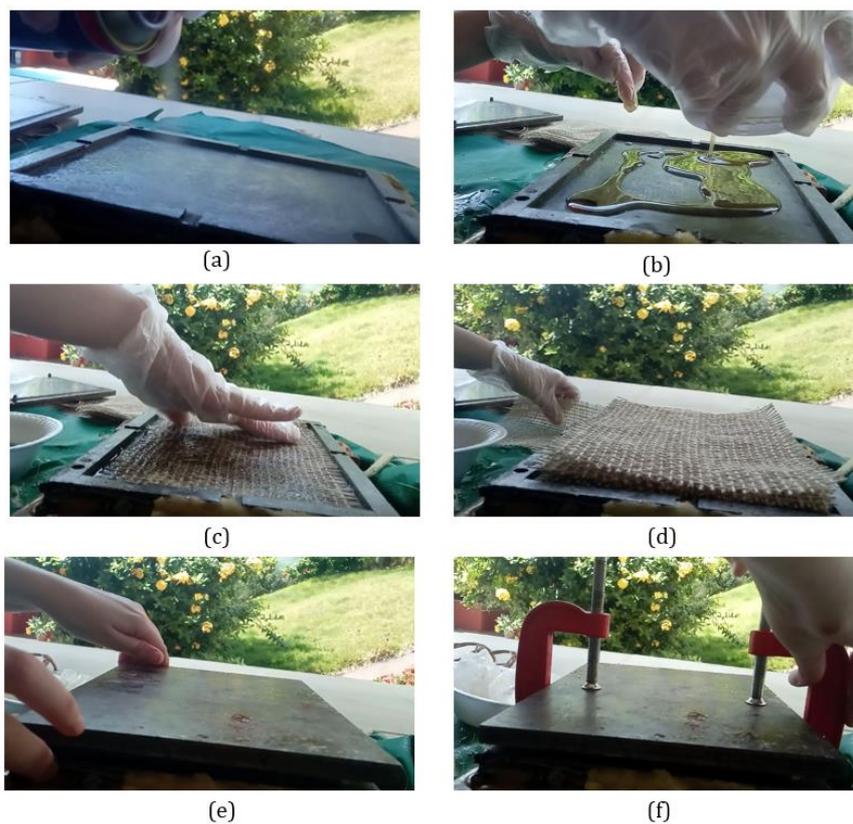


Figura 63 - Etapas de fabricação das placas de vedação.

Depois de um período de cura de 24 horas, o processo de desmoldagem (Figura 64) começa com a retirada da tampa (a) e a placa tem suas laterais cortadas com o auxílio de uma espátula (b). Assim, é retirada do molde (c) e está pronta para ser dividida em amostras para os respectivos ensaios (d).

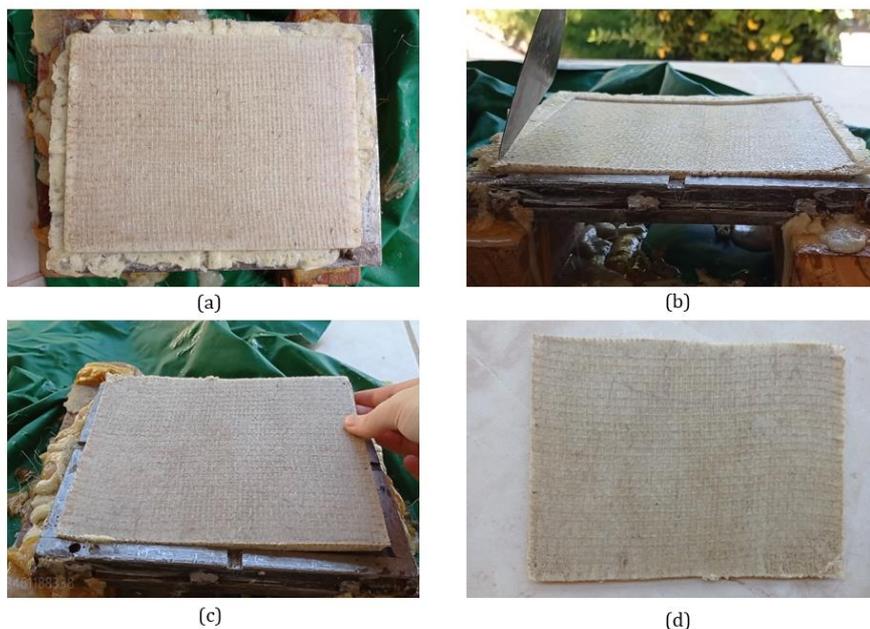


Figura 64 - Processo de retirada do molde.

Para esse estudo, foram fabricadas placas com 40% de fibra em peso. Para isso, foram utilizadas dez camadas de tecido de juta, com peso médio de 5 gramas cada, totalizando cinquenta gramas de fibra por placa. Quanto ao volume de fibra, este está se subdividindo em  $33,0\% \pm 2\%$  desse volume na direção do urdume e  $11,0\% \pm 2\%$  na direção da trama em cada corpo de prova (Figura 65) de dimensões  $150 \times 10 \text{ mm}$  e espessura de  $6,5 \pm 0,5 \text{ mm}$  que, por sua vez, foram cortados em três direções com relação ao urdume do tecido:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .



Figura 65 - Corpos de prova com a identificação da direção do tecido de fibra de juta.

Por se tratar de um tecido, as fibras são trançadas em ângulos retos entre elas. Dessa forma, a direção da trama, apesar de mais espaçada, ainda

possui fibras longas longitudinais, diferente da direção 45°, onde as fibras não possuem continuidade em todo o comprimento da amostra. O esquema da Figura 66 apresenta como são dispostas as fibras em cada corpo de prova.

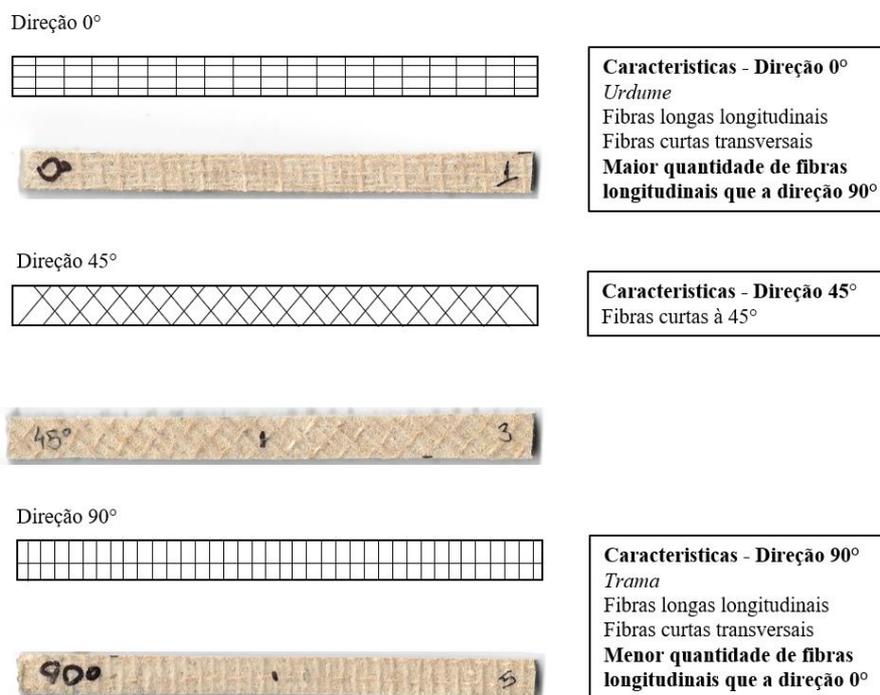


Figura 66 - Modelo esquemático de disposição das fibras nos corpos de prova.

### 3.4. Ensaio mecânico nos componentes

#### 3.4.1. Ensaio de flexão – Placas moldadas

Os ensaios de flexão das placas de vedação seguiram as normas da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM), seguindo o procedimento ASTM D790 - *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials* [61]. Foram ensaiados 5(cinco) corpos de prova em cada uma das três direções na fibra (0°, 45° e 90°). O posicionamento das amostras e suas dimensões foram definidas conforme a Figura 67.

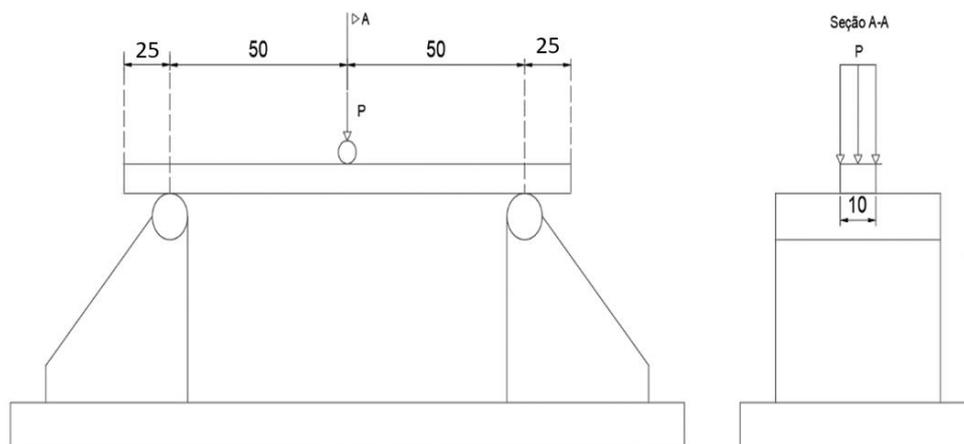


Figura 67 - Detalhes e dimensões (em milímetros) do ensaio de flexão em três pontos das placas moldadas por compressão.

A montagem dos equipamentos de ensaio se inicia com a conexão da célula de carga de 2,5kN à máquina de testes 810 - 250 Material Test System (Figura 68). Em seguida, os roletes de apoio são posicionados a uma distância de 100 mm entre si e de 25mm das bordas do corpo de prova. Quanto aos graus de liberdade do sistema, os roletes de apoio apresentaram liberdade de movimento na direção horizontal, permitindo que o ensaio ocorresse sem a geração de esforços normais na peça. Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento a uma velocidade de 2,65 mm/min até a ruptura ou, com limite de deslocamento de 20,0 mm.

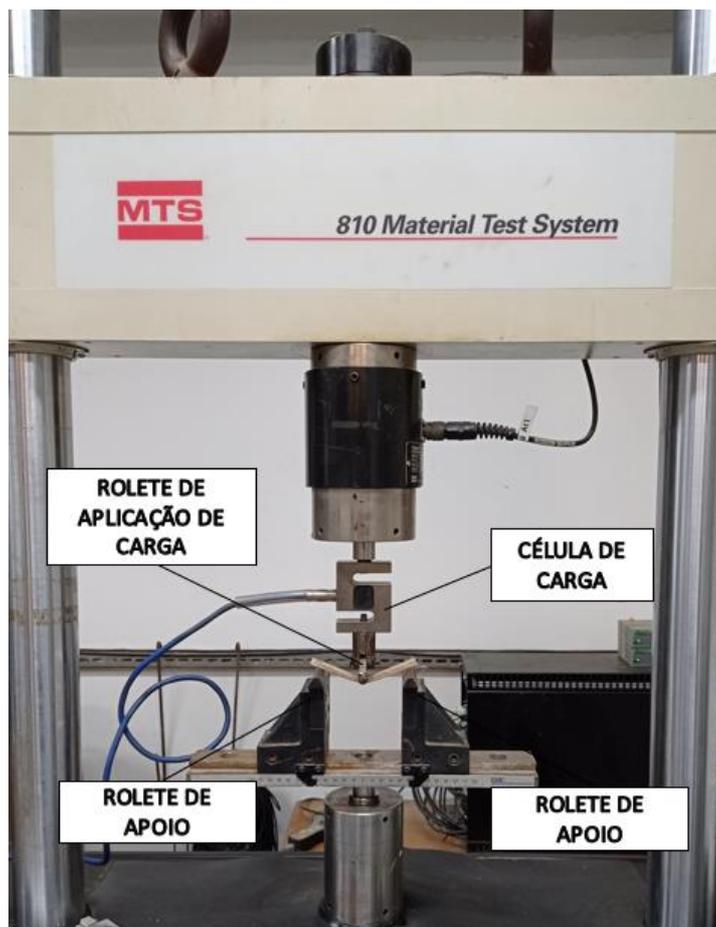


Figura 68 - Máquina de testes universal (810 - 250 Material Test System) equipada com uma célula de carga.

Com os ensaios, é possível obter a curva de tensão *versus* deformação do material. Para isso, os valores de tensão são obtidos a partir da Equação 5, onde P refere-se à carga aplicada, L é o comprimento do vão entre os roletes, b é a largura do corpo de prova e h é a altura do corpo de prova.

$$\sigma = \frac{3 P L}{2 b h^2} \quad (11)$$

Quanto ao módulo de Young, este é encontrado na região elástica do gráfico P/delta do ensaio, esta definição é feita a partir de um ponto preciso que o material perde seu comportamento linear e começa sua fase plástica. Assim, o módulo de Young está relacionado com a rigidez do material, sendo ele obtido pela inclinação da reta da parte linear do gráfico P/delta multiplicada por  $\frac{L^3}{bh^3}$  considerando as condições de contorno do elemento da flecha como biapoiada.

### 3.4.2. Exposição à radiação ultravioleta (UV) – Placas moldadas

Ensaio a longo prazo são necessários para predeterminação das performances futuras dos compósitos poliméricos reforçados com fibra sujeitos à carregamentos. Efeitos como umidade, radiação ultravioleta e temperatura levam a mudanças físicas e mecânicas nas propriedades dos compósitos, podendo ou não comprometer sua funcionalidade.

Nesse sentido, para determinar o desempenho de compósitos reforçados com fibras vegetais aos efeitos anteriormente mencionados, os materiais fabricados para essa dissertação foram expostos a fatores ambientais de maneira controlada. Apesar de que durante sua utilização o material estará exposto à diferentes fatores ao mesmo tempo, faz-se necessário a avaliação individual, para determinação dos potenciais problemas de cada um. O fabricante da matriz Imperveg AGT 1315 declara que a resina possui boa resistência à radiação ultravioleta. Entretanto, é necessária uma análise mais detalhada das perdas devido à essa exposição, para verificação da resistência estrutural ao longo do tempo.

A exposição do compósito ao intemperismo artificial foi regido pela norma ASTM G154-16 - *Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials* [123]. Para avaliação da resistência das placas de vedação à radiação ultravioleta, 5 (cinco) corpos de prova em cada uma das direções 0° e 90° foram inicialmente acomodados em câmara escura U.V.SL-204 da marca Solab, ligada com lâmpada de comprimento de onda de 365nm, pelo período de 3 (três) meses, ou seja, cerca de 2100 horas. Após o envelhecimento, as amostras foram submetidas aos ensaios de flexão descritos no item anterior. A Figura 69 apresenta a câmara UV utilizada (a), bem como os corpos de prova expostos (b). Ressalta-se que apenas uma das faces foi exposta ao UV, sendo esta face na parte comprimida do ensaio da flexão.

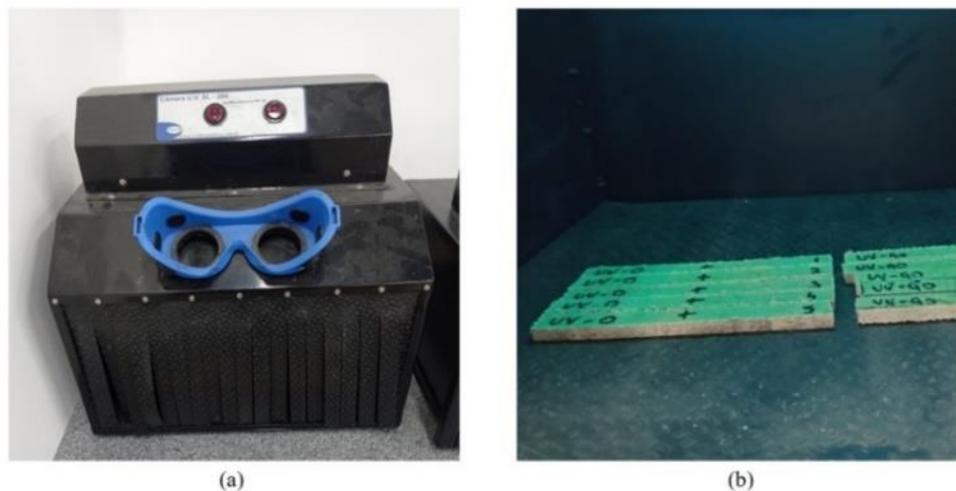


Figura 69 - Estudo de resistência à radiação ultravioleta. a) Câmara U.V.SL-204. b) Corpos de prova expostos à radiação UV.

### 3.4.3. Ensaio de tração – Impressão 3D

Nessa seção são descritos os procedimentos para a determinação das propriedades de tração do compósito de PLA reforçado e não reforçado. Para isso, os cinco corpos de prova de cada tipo produzidos foram impressos utilizando a impressora 3D Zmorph VX com os parâmetros descritos no item 3.3.1.1. As diretrizes do teste padrão foram feitas de acordo com as normas da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM), seguindo o procedimento ASTM D3039 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* [124]. Os corpos de prova foram classificados e preparados conforme Tabela 8 com fibras orientadas na direção principal. Sua medição foi feita após a impressão com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01mm.

Tabela 8 - Classificação e dimensões dos corpos de prova ensaiados à tração.

Nomenclatura	Descrição	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Fração de fibra (%)
<b>PLA</b>	Ácido Polilático	150	13,0±1,0	2,3±0,2	-
<b>CPRFJ</b>	Compósito polimérico reforçado com fibra de juta	150	12,0±1,0	2,0±0,2	17,0±1,0
<b>CPRFR</b>	Compósito polimérico reforçado com fibra de rami	150	14,0±1,0	1,7±0,2	18,0±1,0

<b>CPRFS</b>	Compósito polimérico reforçado com fibra de sisal	150	14,5±1,0	1,6±0,2	19,0±1,0
--------------	---	-----	----------	---------	----------

A Figura 70 apresenta a configuração do equipamento. O ensaio foi realizado em uma máquina de testes universal, EMiC Série 23, modelo 23-30, equipada com célula de carga interna de 2kN e externa de 5kN, bem como clip gage para medição das deformações no trecho central da amostra. O ensaio foi feito com controle de deslocamento a velocidade de ensaio foi de 1,00 mm/min uma vez que velocidades mais elevadas dificultavam a aderência da fibra na matriz, até a ruptura da amostra. Para fixação nas garras, as amostras foram reforçadas nas pontas com PLA, de forma a impedir o deslizamento.

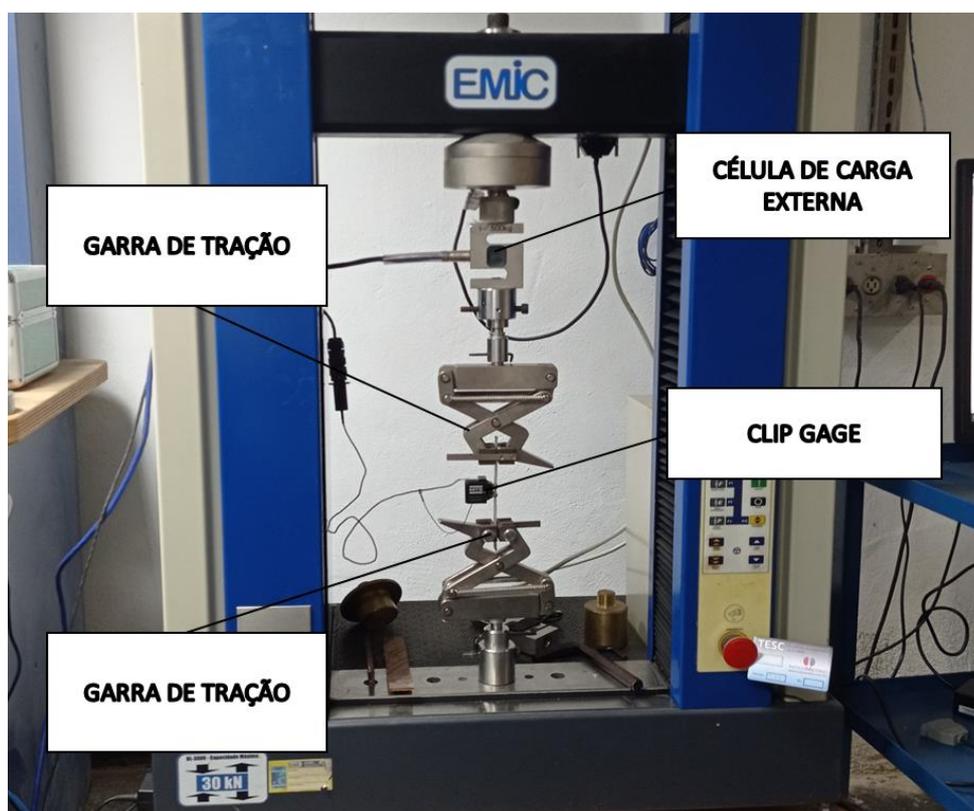


Figura 70 - Máquina de testes universal (EMiC Série 23, modelo 23-30) equipada com célula de carga e clip gage.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Ensaio de flexão dos biocompósitos moldados por compressão

As placas de vedação foram submetidas a ensaios de flexão com carregamento monotônico, conforme estabelecido no item 3.4.1. Realizaram-se ensaios em 15 corpos de prova, sendo cinco para cada direção estudada, com deflexão máxima limitada em 20 mm. A Figura 71 apresenta o gráfico de dispersão dos resultados obtidos nos ensaios de flexão do compósito reforçado com tecido de fibra de juta, que será utilizado na fabricação das placas de vedação. É observado que o posicionamento da fibra influencia diretamente na resistência e na deformabilidade do compósito.

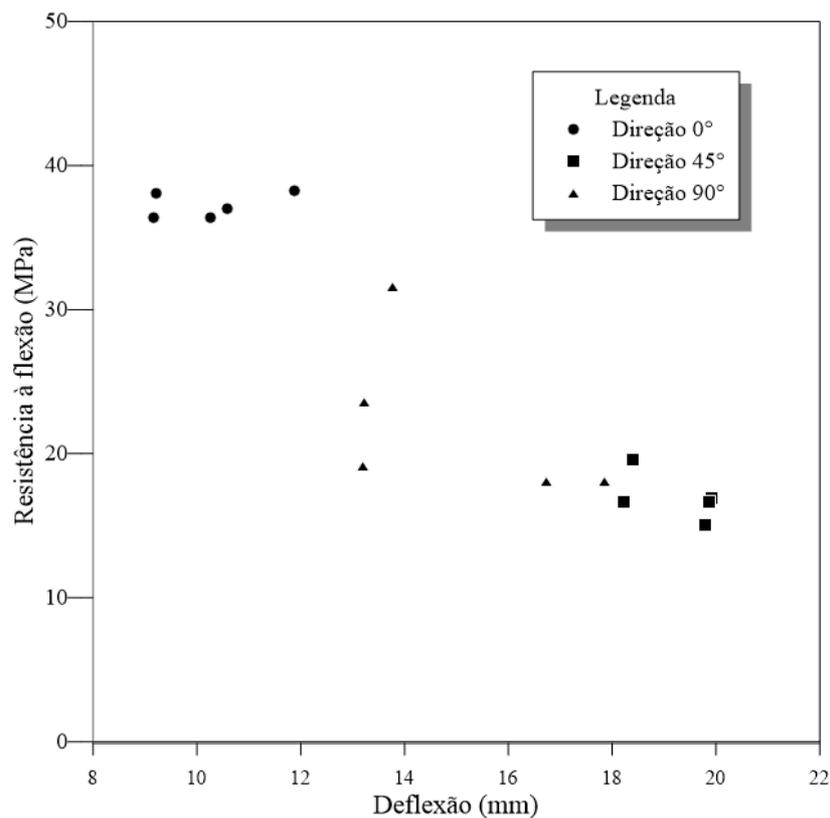


Figura 71 - Gráfico de dispersão dos resultados dos ensaios de flexão dos compósitos moldados por compressão reforçados com fibra de juta.

Analisando o gráfico de resistência à flexão (a) e módulo de elasticidade (b) da Figura 72, verifica-se que, como esperado, os melhores resultados são obtidos quando a fibra é disposta na direção longitudinal do

material, uma vez que é nessa posição que ela melhor resiste aos esforços solicitantes.

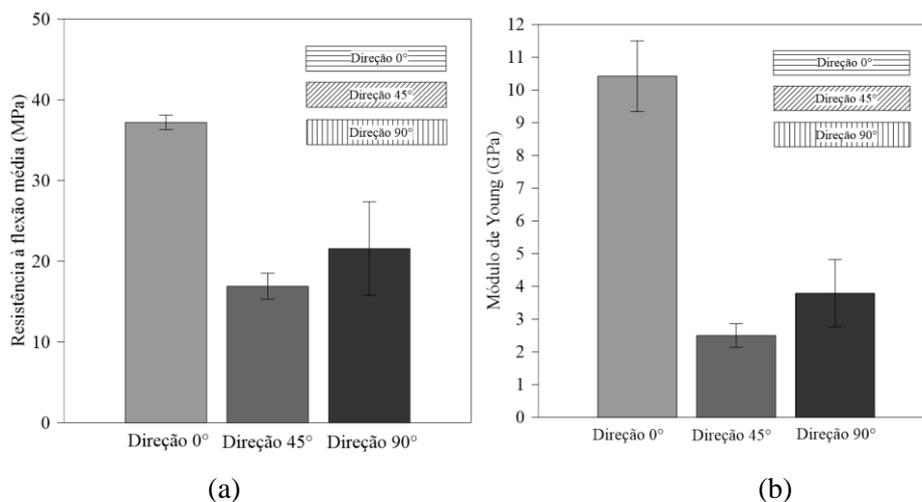


Figura 72 - Gráfico da resistência à flexão média e módulo de elasticidade médio das placas de vedação.

Além disso, os resultados superiores de resistência na direção 90° (trama) comparados à direção 45°, pode ser atribuído por se tratar de um tecido e não de fibras soltas. O tecido apresenta fibras trançadas em ângulos retos entre elas. Dessa forma, a direção da trama, apesar de mais espaçada, ainda possui fibras longas longitudinais, diferente da direção 45°, onde as fibras não possuem continuidade em todo o comprimento da amostra.

A Tabela 9 apresenta um resumo dos resultados do ensaio, bem como seus parâmetros. Os valores apresentados se referem às médias dos resultados dos corpos de prova, para cada direção estudada, seguidas de seu desvio padrão. Conforme recomendação da norma ASTM D790 [61], a partir dos ensaios de flexão é possível obter parâmetros característicos do compósito estudado, dentre eles, a tensão máxima e o módulo de elasticidade.

Tabela 9 - Resumo das propriedades de flexão das placas de vedação.

Direção da fibra	Direção 0°	Direção 45°	Direção 90°
Resistência à flexão média (MPa)	37,21	16,91	21,57
Desvio padrão da resistência à flexão (MPa)	0,90	1,62	5,79
Módulo de elasticidade médio (GPa)	10,42	2,50	3,79
Desvio padrão do módulo de elasticidade (GPa)	1,08	0,36	1,03

Comparando os resultados com a Tabela 10, proveniente da *American National Standards Institute*, pela norma ANSI A208 – *Particleboard.1* é possível notar que, na direção paralela ao urdume ( $0^\circ$ ), os painéis reforçados com fibra de juta atingem a maior classificação quanto a sua densidade (H-3) de  $1,14\text{kg/m}^3$ . Desta forma, é possível se verificar que com uma boa distribuição das fibras, é possível alcançar resultados elevados, permitindo que essas placas sejam utilizadas para fins industriais.

Tabela 10 - Classificação de painéis reforçados com partículas. Adaptado de [125].

Densidade da placa	Fração de massa	$\sigma_r$ (MPa)	E (MPa)	Uso/Classificação
Baixa Densidade	LD-1	3,0	550	Painéis de uso em interiores
	LD-2	5,0	1025	
Média Densidade	M-1	11,0	1725	Painéis de uso comercial
	M-S	12,5	1900	
	M-2	14,5	2250	Painéis de uso industrial
	M-3	16,5	2750	
Grande Densidade	H-1	16,5	2400	Painéis de alta densidade de uso industrial
	H-2	20,5	2400	
	H-3	23,5	2750	

Com base nos resultados encontrados no ensaio, é possível definir o comportamento do compósito ortotrópico, representando o compósito conforme modelo na Figura 73. Esse comportamento, conforme definido no item 2.1.4, pode ser obtido com o auxílio da regra das misturas reescrevendo os resultados dos ensaios de flexão da seguinte forma:

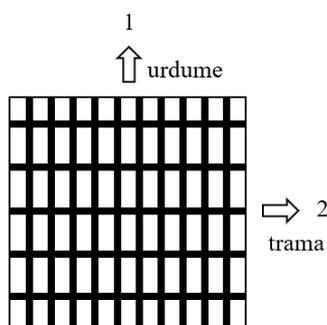


Figura 73 - Modelo da disposição do compósito.

Módulo de elasticidade paralelo às fibras

$$E_1 = E_{0^\circ} = 10,42 \text{ GPa} \quad (12)$$

Módulo de elasticidade perpendicular às fibras

$$E_2 = E_{90^\circ} = 3,79 \text{ GPa} \quad (13)$$

Módulo de elasticidade na direção 45°

$$E_x = E_{45^\circ} = 2,50 \text{ GPa} \quad (14)$$

Para o coeficiente de Poisson, foi feita uma estimativa com base nos resultados dos componentes separadamente na literatura. Karpiesiuk [126] em sua pesquisa sobre as propriedades do poliuretano para aplicação em pisos de alumínio obteve como resultado de ensaios de tração em adesivos de poliuretano o valor de 0,41. Já o coeficiente de Poisson da fibra de juta, com base nos trabalhos de Suthenthiraveerappa e Gopalan [127], foi estipulado um valor de 0,374. Dessa forma, é possível obter um coeficiente de Poisson do compósito pela Regra das Misturas:

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (15)$$

$$\nu_{12} = 0,404 \quad (16)$$

Onde,

$\nu_f$  = Coeficiente de Poisson da fibra

$\nu_m$  = Coeficiente de Poisson da matriz

$V_f$  = Fração volumétrica da fibra

$V_m$  = Fração volumétrica da matriz

Aplicando esses valores na Equação 5 do item 2.1.4, obtém-se o módulo de cisalhamento do material:

$$G_{12} = 0,103 \text{ GPa} \quad (17)$$

Além disso, utilizando-se da regra das misturas de forma inversa é possível obter as propriedades de cada constituinte, ou seja, as propriedades mecânicas da matriz e da fibra de forma separada, permitindo a validação do ensaio. De forma simplificada, as fibras perpendiculares à direção considerada têm pouca influência na rigidez geral do compósito, podendo escrever as equações como:

$$E_1 = E_m V_{m1} + E_f V_{f1} \quad (18)$$

$$E_2 = E_m V_{m2} + E_f V_{f2} \quad (19)$$

Onde,

$E_f$  = Módulo de elasticidade da fibra

$E_m$  = Módulo de elasticidade da matriz

$V_{f1}$  = Fração volumétrica da fibra na direção 1 sobre o volume total

$V_{f2}$  = Fração volumétrica da fibra na direção 2 sobre o volume total

$V_{m1}$  = Fração volumétrica da matriz na direção 1 sobre o volume total

$V_{m2}$  = Fração volumétrica da matriz na direção 2 sobre o volume total

Dessa forma é formado um sistema de duas equações e duas incógnitas, obtendo-se:

$$E_m = 0,47 \text{ GPa} \quad (20)$$

$$E_f = 30,63 \text{ GPa} \quad (21)$$

Comparando os resultados obtidos ao artigo de Wambua et al. [33], verifica-se um resultado coerente, uma vez que os autores avaliaram que as fibras de juta apresentam módulo de elasticidade variando entre 10 e 30 GPa. Já o módulo de elasticidade do poliuretano, quando comparado aos trabalhos de Saliba Júnior [128] também tem resultados aceitáveis, uma vez que a autora obteve módulos de elasticidade entre 0,21 e 0,47 GPa.

Analisando os diagramas tensão-deformação para cada direção individualmente, é possível observar que, para a direção paralela ao urdume (direção 0°), conforme a Figura 74 mostra, que a variação da tensão máxima

nessa orientação foi entre 35 e 40 MPa. Uma vez atingida a carga de pico, é observada uma queda acentuada na tensão com a deflexão, embora uma ruptura completa não tenha sido observada.

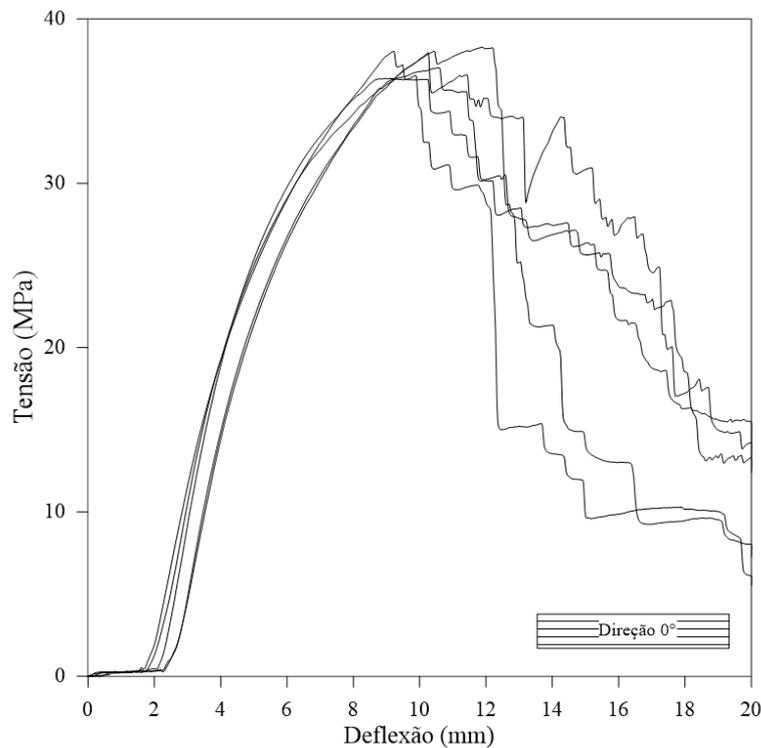


Figura 74 - Ensaio à flexão das placas de vedação - Direção 0°

Ao analisar a Direção de 45°, verifica-se uma maior uma resposta diferente dos resultados dos corpos de prova ensaiados à flexão, conforme apresentado na (Figura 75). Isso porque as fibras deixam de ser contínuas ao longo do comprimento da amostra, fazendo com que o material tenha um comportamento semelhante ao de um compósito de fibras curtas. Ainda por conta de as fibras serem vistas como curtas, o corpo de prova sofre uma maior deformação por uma menor tensão, não se rompendo ao longo do limite estabelecido para o ensaio, com um comportamento essencialmente dúctil.

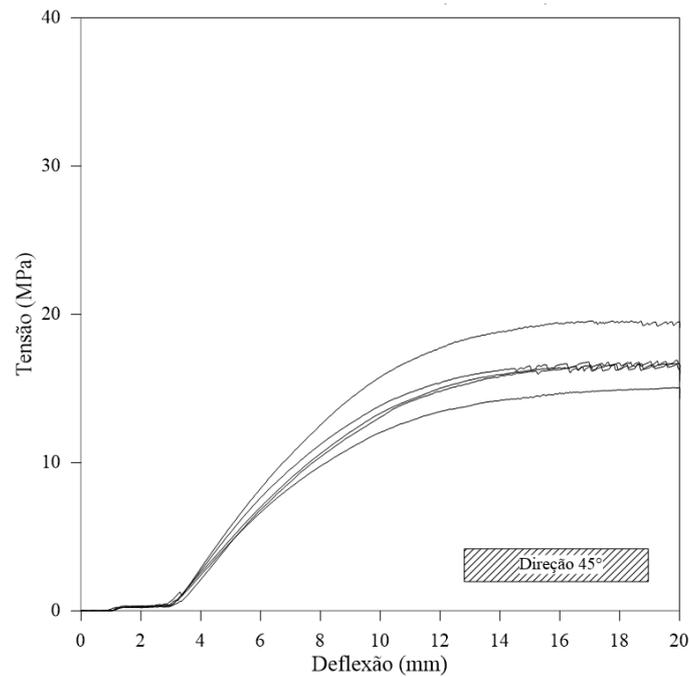


Figura 75 - Ensaio à flexão das placas de vedação - Direção 45°

Por fim, as amostras testadas na direção da trama (90°) apresentaram um comportamento intermediário entre as demais direções (Figura 76). Sua variabilidade pode ser explicada pelas fibras terem um espaçamento maior entre si, gerando possivelmente corpos de provas com quantidades de fibras diferentes. Com isso, os resultados dessa direção apresentam maior variação.

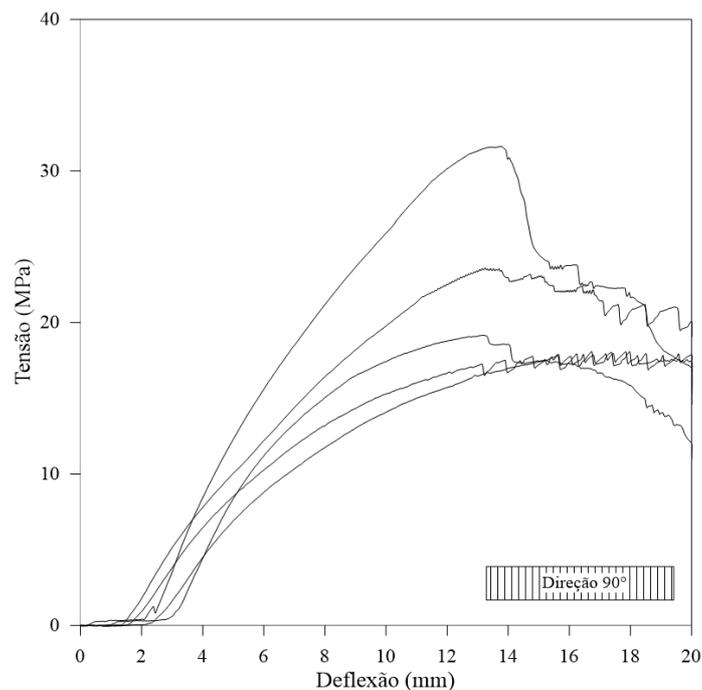


Figura 76 - Ensaio à flexão das placas de vedação - Direção 90°

Comparando com a literatura, os resultados se tornam coerentes uma vez que, quando a fibra sofre esforços longitudinalmente, o compósito tende a apresentar uma resistência superior. A Figura 77 apresenta os resultados nas três direções sobrepostos.

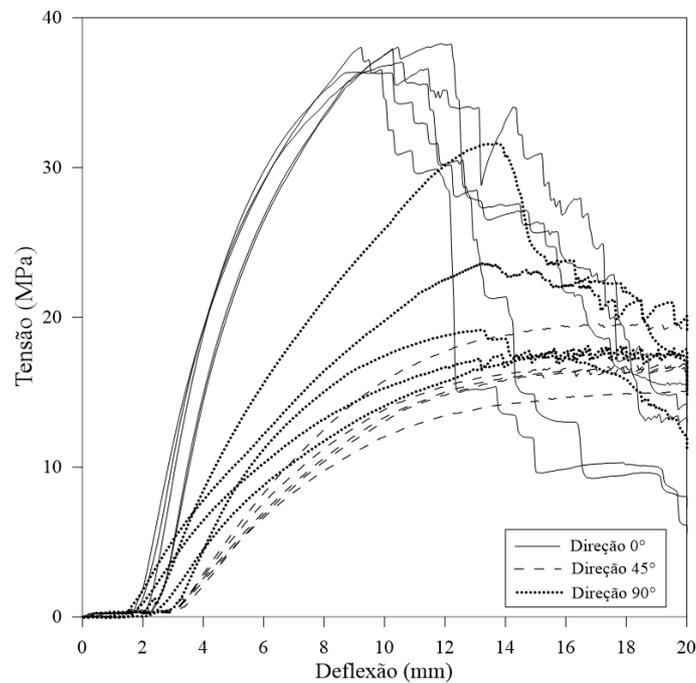


Figura 77 -Ensaio à flexão das placas de vedação

Quanto aos modos de falha, na direção 0° ocorreu o rompimento das fibras tracionadas, conforme Figura 78. Nas direções 45° e 90° não houve rompimento do material, tendo o final do ensaio sendo limitado pela deflexão excessiva sem ganhos de resistência.

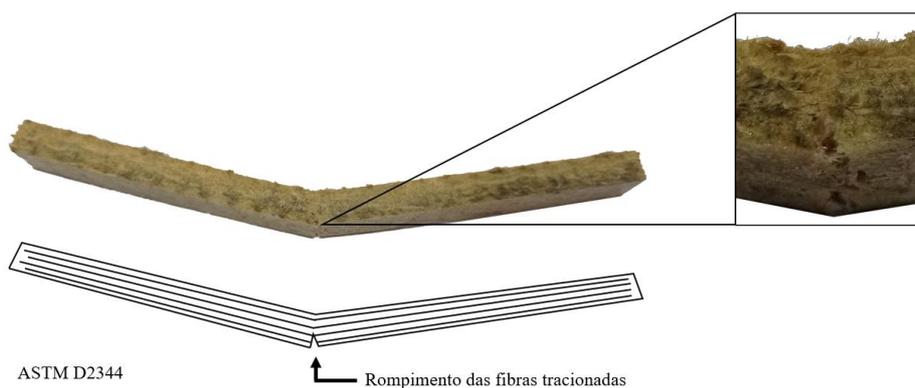


Figura 78 - Modo de falha do ensaio à flexão. Adaptado de [60].

#### 4.2. Ensaio de flexão de compósitos submetidos à câmara UV

Foi realizado um processo de envelhecimento acelerado através da exposição prolongada à radiação UV, por um período de 3 (três) meses ou aproximadamente 2100 horas, conforme estabelecido no item 3.4.2. Uma análise normalmente feita é que, a cada 300 horas de exposição ao intemperismo artificial acelerado, considerando apenas a ação da radiação ultravioleta, equivale a aproximadamente um ano de exposição ao intemperismo natural na cidade de São Paulo [129]. Nesse sentido, pelo tempo analisado o corpo de prova estaria exposto equivalente à 7 (sete) anos do intemperismo natural.

A primeira constatação do efeito da exposição da amostra se deu a nível visual. As amostras expostas à radiação ultravioleta apresentaram cor mais amarelada evidenciando a mudança das características do material. A Figura 79 apresenta a diferença colorimétrica devido à radiação UV.

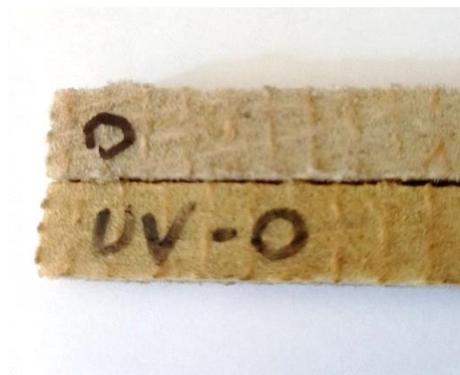


Figura 79 - Diferença colorimétrica entre as amostras devido à exposição UV.

Foram expostos à radiação ultravioleta 5 (cinco) corpos de prova de cada uma das direções  $0^\circ$  e  $90^\circ$  que depois do período proposto foram ensaiados à flexão monotônica. Feitos os ensaios, os resultados foram comparados aos resultados dos corpos de prova sem exposição UV, com o objetivo de verificar de que forma a radiação afeta o material.

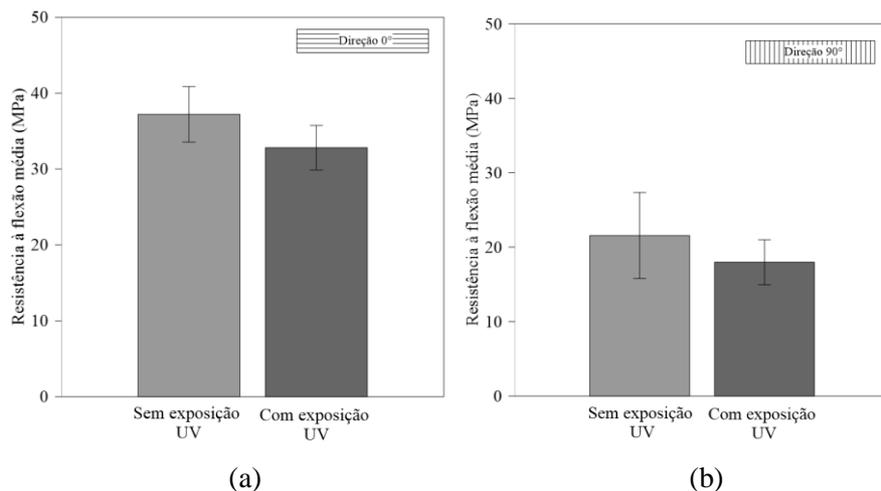


Figura 80 - Gráfico de variação da resistência à flexão devido a exposição UV. (a) Direção 0° e (b) Direção 90°.

A Figura 80 apresenta os resultados de resistência a flexão nas direções 0° e 90° com e sem exposição UV. Observa-se que, para o período analisado, houve uma queda não acentuada na resistência, comprovada pelos resultados numéricos das Tabelas 11 e 12 onde as variações nas propriedades mecânicas chegam a no máximo 19%.

Tabela 11 - Resumo das propriedades à flexão antes e depois da degradação UV – Direção 0°

Direção 0°	Sem exposição UV	Com exposição UV por 3 meses	Diferença relativa (%)
Resistência à flexão média (MPa)	37,21	32,81	11,82
Desvio padrão da resistência (MPa)	0,90	2,92	-
Módulo de elasticidade (GPa)	10,42	8,42	19,19
Desvio padrão do módulo de elasticidade (GPa)	1,08	0,40	-

Tabela 12 - Resumo das propriedades à flexão antes e depois da degradação UV – Direção 90°

Direção 90°	Sem exposição UV	Com exposição UV por 3 meses	Diferença relativa (%)
Resistência à flexão média (MPa)	21,57	17,99	16,60
Desvio padrão da resistência (MPa)	5,79	3,03	-
Módulo de elasticidade (GPa)	3,79	3,76	0,79
Desvio padrão do módulo de elasticidade (GPa)	1,03	0,37	-

Aplicando novamente a regra das misturas de forma inversa foi possível obter as propriedades de cada constituinte depois da degradação UV. Sabe-se que a radiação tem maior influência na degradação do material mais próximo à superfície exposta. No entanto, para fins de avaliação global, a análise aqui considerada assume como premissa uma degradação uniforme e homogênea sobre o material. As propriedades obtidas com resposta são, portanto, aparentes.

Módulo de elasticidade paralelo às fibras

$$E_1 = E_{0^\circ UV} = 8,42 \text{ GPa} \quad (22)$$

Módulo de elasticidade perpendicular às fibras

$$E_2 = E_{90^\circ UV} = 3,76 \text{ GPa} \quad (23)$$

Aplicando

$$E_1 = E_m V_{m1} + E_f V_{f1} \quad (24)$$

$$E_2 = E_m V_{m2} + E_f V_{f2} \quad (25)$$

Dessa forma é formado um novo sistema de duas equações e duas incógnitas, obtendo-se:

$$E_m = 1,42 \text{ GPa} \quad (26)$$

$$E_f = 22,67 \text{ GPa} \quad (27)$$

Comparando com os resultados dos módulos de elasticidade dos constituintes não expostos à radiação ultravioleta, se obtém a degradação de cada constituinte:

$$\%_{fibra}^{degradação} = 26,0\% \quad (28)$$

Dessa forma verifica-se que a degradação ocorreu apenas na fibra do biocompósito. Por outro lado, houve aumento da rigidez da matriz, conforme visto também nas pesquisa de Tena et al. [130] e Juárez-Estrada et al. [131], provando que a exposição UV nesse caso serviu como um processo de cura para o material, melhorando sua rigidez. Os valores da fibra, no entanto, aparentam estar acima do valor de referência informado anteriormente e,

portanto, novas análises podem ser necessárias para uma melhor avaliação da degradação.

Avaliando as Figuras 81 e 82, verifica-se que apesar de apresentar um comportamento semelhante ao das amostras não expostas à radiação UV, estas tiveram redução em suas tensões máximas.

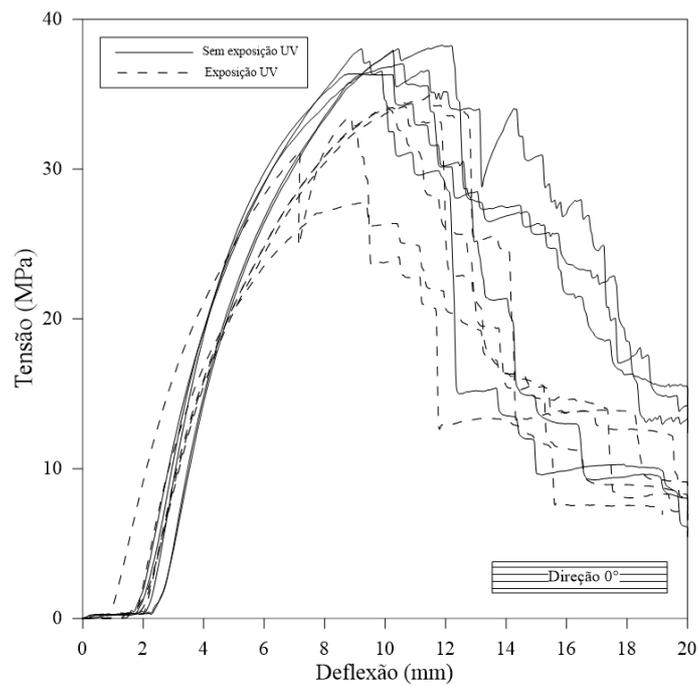


Figura 81 - Comparativo dos ensaios de flexão com e sem exposição UV - Direção 0°

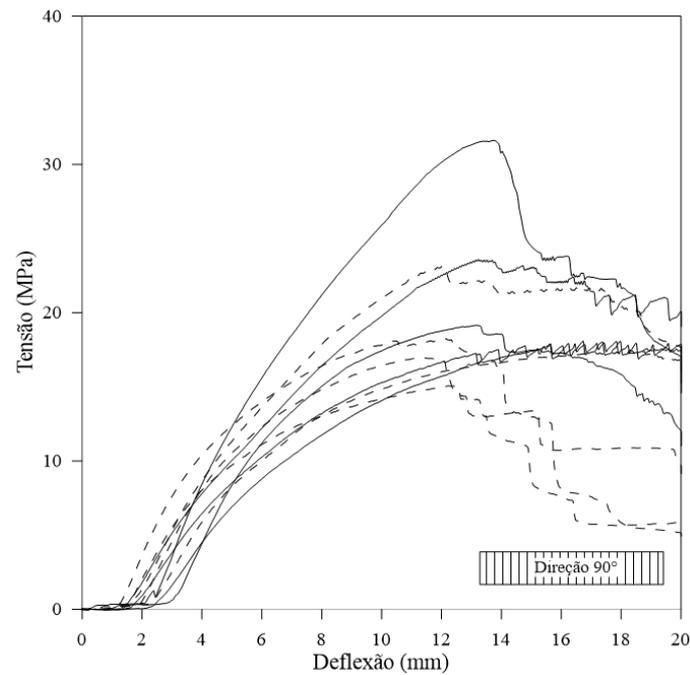


Figura 82 - Comparativo dos ensaios de flexão com e sem exposição UV - Direção 90°

Quanto aos modos de falha, depois de submetidos à radiação ultravioleta, todos os corpos de prova em ambas as direções (0° e 90°) sofreram ruptura por rompimento das fibras tracionadas (Figura 83).



Figura 83 - Modos de falha em amostras submetidas à radiação ultravioleta.

Diante disso, é possível concluir que no período analisado a radiação ultravioleta não altera significativamente os compósitos estudados, confirmando a afirmação do fabricante de que o material possui boa resistência a esse fator [118].

### 4.3. Ensaio de tração nos compósitos impressos

As propriedades mecânicas das fibras vegetais variam de acordo com a planta utilizada, a forma de plantio, fatores climáticos durante o seu crescimento, dentre outros. Diante disso, foi necessário verificar quais das fibras vegetais brasileiras, mais presentes no mercado, seriam potenciais recursos para o reforço de elementos submetidos a tração.

Conforme item 3.4.3, corpos de prova impressos com juta, rami e sisal foram submetidos a ensaio de tração e seus resultados individuais podem ser vistos na Figura 84. Analisando esta figura, é notado que os elementos reforçados com fibras de rami e sisal apresentaram as maiores resistências, enquanto os corpos de prova reforçados com juta atingiram sua resistência com menores deformações.

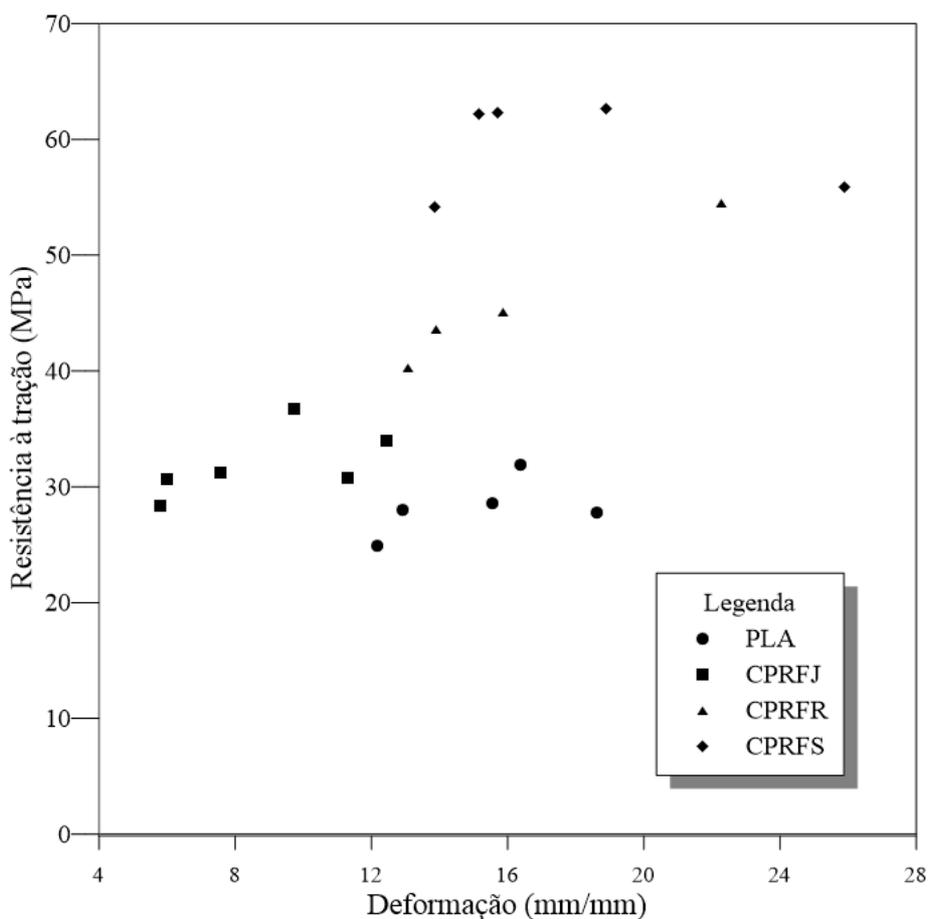


Figura 84 - Gráfico de dispersão dos resultados dos ensaios de tração de compósitos reforçados com fibras vegetais.

A Tabela 13 apresenta um resumo dos parâmetros de cada compósito encontrado. Verifica-se que os reforçados com fibra de sisal apresentaram

resultados superiores aos demais, chegando a uma melhora de 110,80% da resistência do PLA sem reforço. O uso de fibra de rami também apresentou resultados satisfatórios de melhora à resistência à tração, com aumento de 61,83%.

Tabela 13 - Resultados médios dos ensaios de tração de compósitos reforçados com fibras vegetais.

<b>Tipo de compósito</b>	<b>PLA</b>	<b>CPRFJ</b>	<b>CPRFR</b>	<b>CPRFS</b>
Resistência à tração média (MPa)	28,14	31,81	45,54	59,32
Varição de resistência comparado à matriz (%)	-	13,04	61,83	110,80
Desvio padrão da resistência à tração (MPa)	2,52	2,94	6,10	4,07
Módulo de elasticidade (GPa)	1,77	3,52	3,19	3,90
Desvio padrão do módulo de elasticidade (GPa)	0,16	0,94	0,22	1,02
Deformação na resistência máxima (mm/mm)	1,489	0,843	1,593	1,745

Analisando as Figura 85 (a) e (b), verifica-se que, apesar de não levar o compósito a uma melhora significativa em termos de resistência, as fibras de juta promoveram compósitos de boa rigidez comparados ao polímero sem reforço.

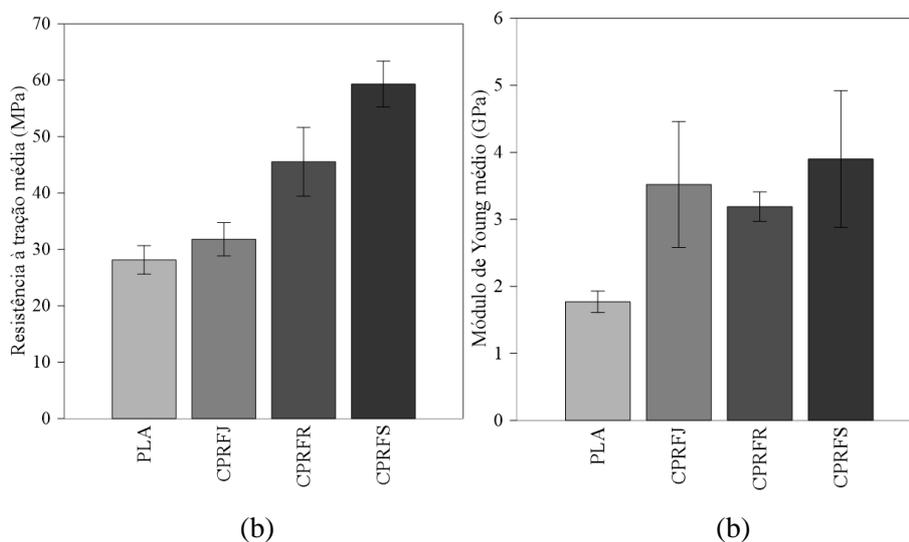


Figura 85 - Gráfico dos resultados dos ensaios de tração a) Resistência à tração média e b) Módulo de secante médio.

Entretanto, comparados à literatura conforme Figura 86, os resultados ainda são inferiores aos de compósitos reforçados com fibras sintéticas, como fibra de carbono (CPRFC) e fibra de vidro (CPRFV). Além disso, os

resultados de Mohammadzadeh et al. [76] para compósitos reforçados com fibra de Kevlar (CPRFK), também foram elevados. Essa resposta pode ser explicada além da maior resistência das fibras sintéticas, as impressoras usadas pelas demais pesquisas possibilitaram um aumento da fração de fibra no compósito impresso.

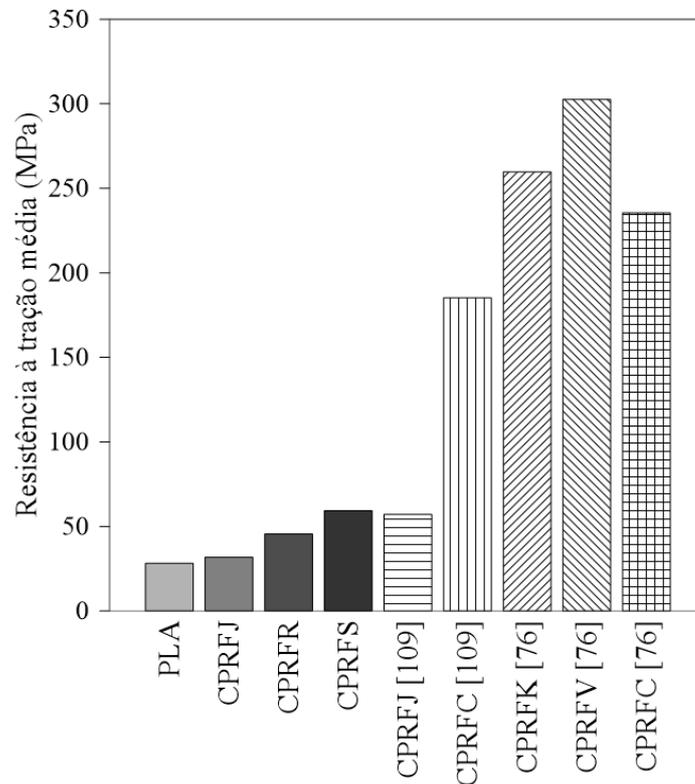


Figura 86 - Gráficos dos resultados dos ensaios de tração comparados com resultados da literatura.

Quanto aos modos de falha obtidos, de acordo com a Norma ASTM D3039 [124], podem ser classificados como no meio do corpo de prova (Lateral gage middle) e próximo à garra (Lateral at grip). A Figura 87 ilustra os dois modos de falhas encontrados, bem como exemplos reais dos corpos de prova rompidos.

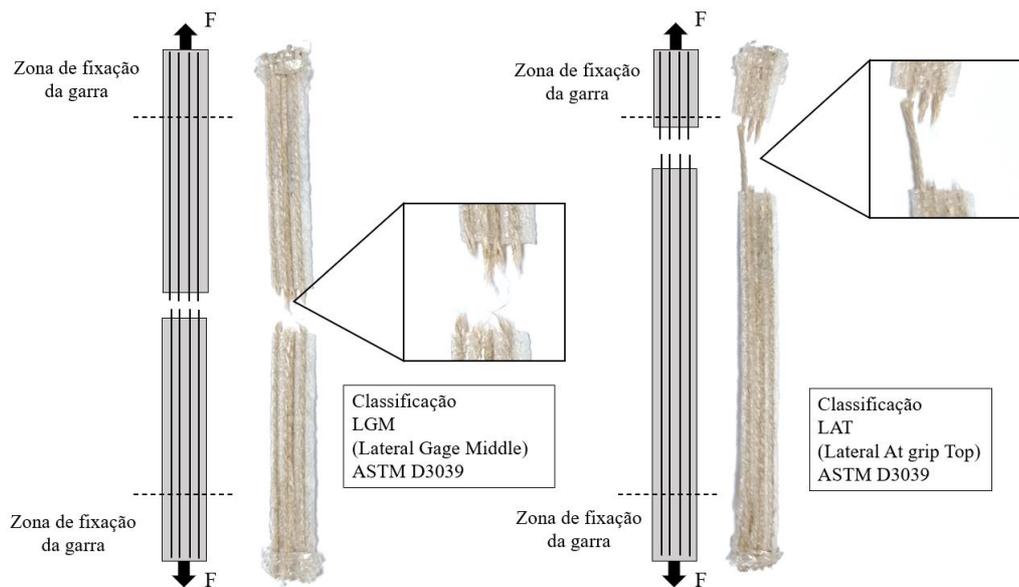


Figura 87 - Esquema com códigos de falha de teste de tração. Adaptado de ASTM D3039 [124].

Falando especificamente dos modos de falha (Figura 88) é possível se verificar: desprendimentos de fibras (a), uma vez que a adesão entre os materiais não é suficiente para assegurar o rompimento do compósito como um todo e fraturas frágeis (b), quando a fibra e a matriz rompem unidas.

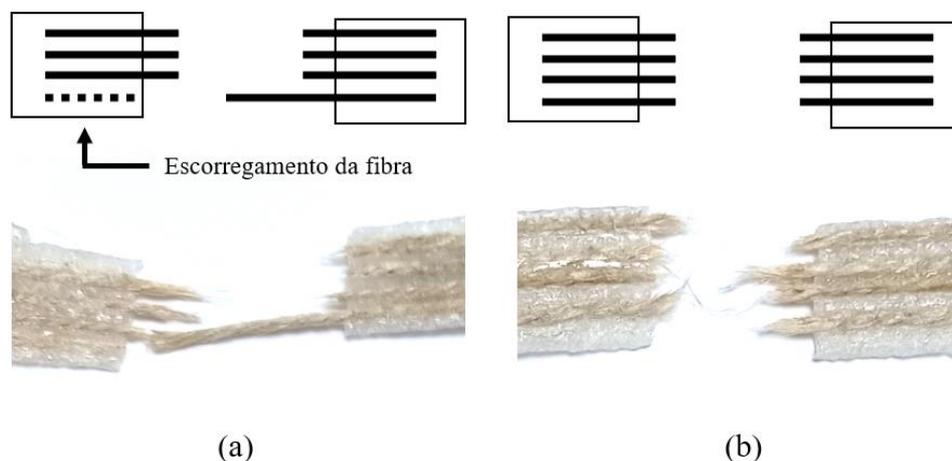


Figura 88 - Modos de falha à tração obtidos experimentalmente. Adaptado de [59].

Analisando esses modos de falha para cada compósito separadamente é possível chegar à algumas conclusões. No caso das amostras impressas unicamente com PLA (Figura 89), os modos de falha se restringiram próximos à garra, com rompimento do material de forma frágil.

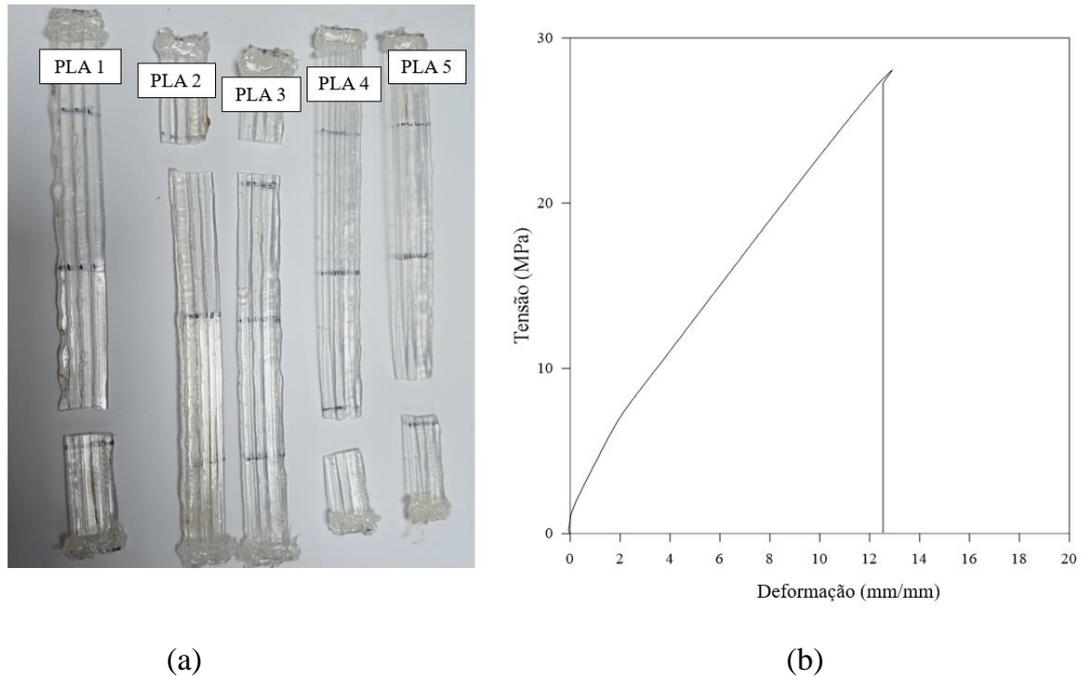


Figura 89 -Ensaio das amostras de PLA. a) Amostras ensaiadas b) Gráfico Tensão-Deformação.

No caso dos compósitos poliméricos reforçados com fibra de juta (CPRFJ). Conforme Figura 90, ocorreram dois tipos de rompimento. O rompimento no meio do vão, no caso da amostra CPRFJ 3 e próximos à garra nos demais casos. A adesão dos materiais nesse caso permitiu que todas as amostras rompessem por fratura frágil.

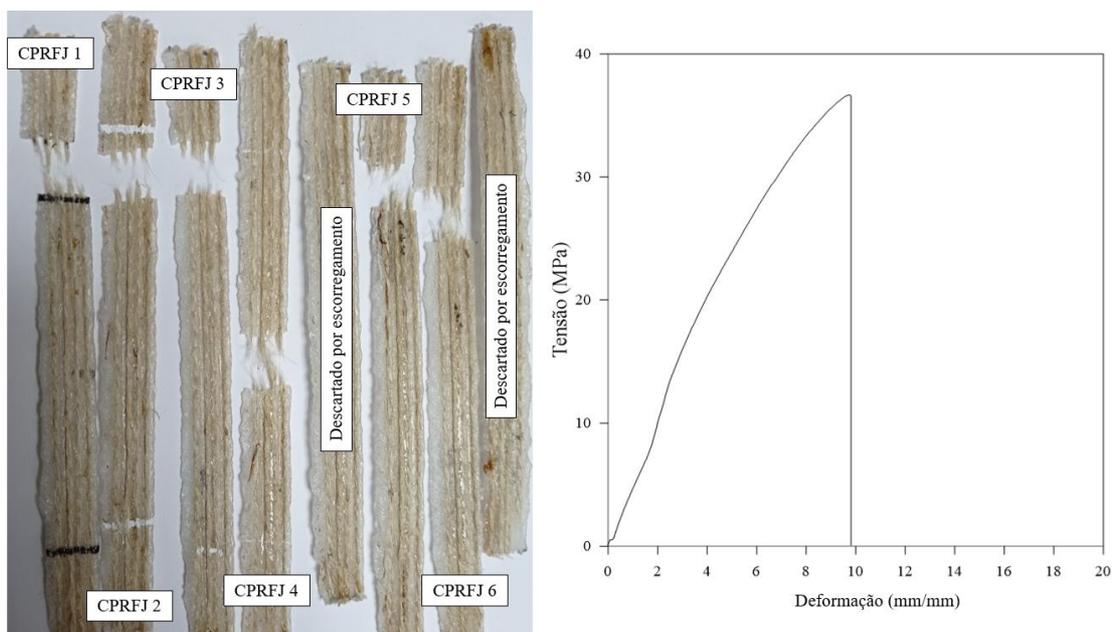


Figura 90 - Ensaio das amostras de CPRFJ. a) Amostras ensaiadas b) Gráfico Tensão-Deformação.

Os compósitos poliméricos reforçados com fibra de rami (CPRFR), conforme Figura 91a, apresentaram também dois tipos de rompimento. Foram eles: no meio do vão no caso da amostra CPRFR 3 (Figura 91b), e próximo à garra (demais casos). Diferente dos compósitos reforçados com juta, o rami apresentou mais de um modo de falha, sendo as amostras CPRFR 1 e 3 com ruptura frágil e as amostras CPRFR 2 e 4 com escorregamento da fibra. Este escorregamento pode ser explicado pela má adesão entre a fibra e a matriz, levando algumas fibras a deslizarem e romperem fora do plano, comprometendo a resistência final do compósito.

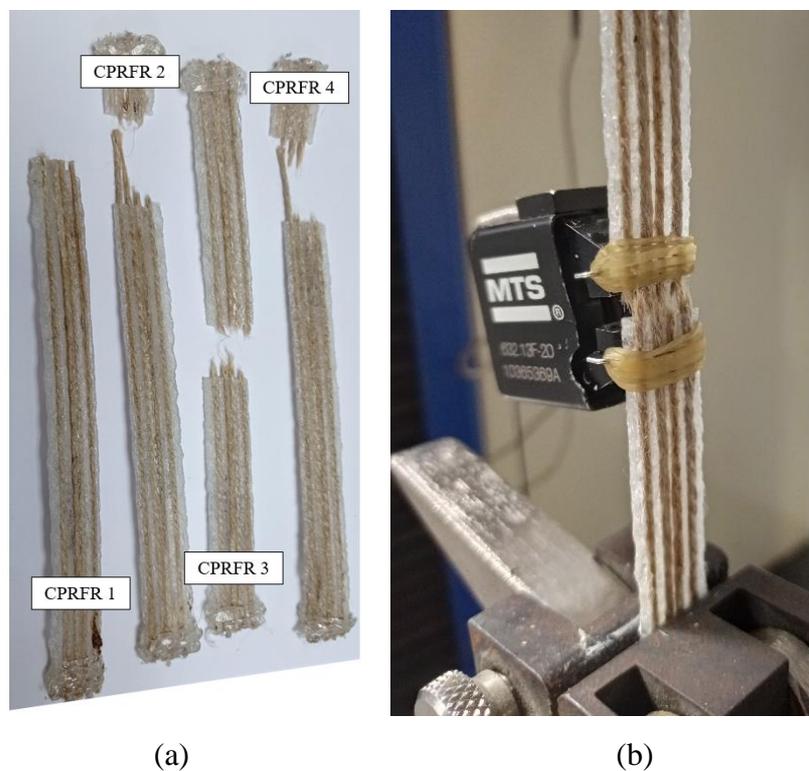


Figura 91 - Ensaio de CPRFR. a) Amostras. b) Rompimento no meio do vão amostra CPRFR 3.

Esse comportamento frágil fica comprovado na Figura 92 que apresenta o gráfico de tensão-deformação de uma das amostras de CPRFR ensaiadas.

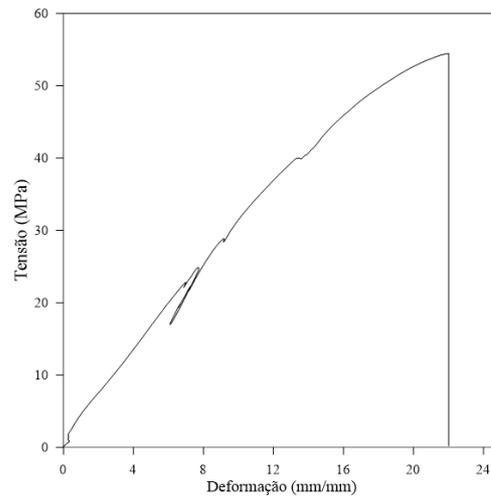


Figura 92 - Gráfico Tensão-Deformação CPRFR.

Por fim, os compósitos poliméricos reforçados com fibra de sisal (CPRFS), conforme Figura 93, apresentaram rompimento no meio do vão nas amostras CPRFS 3 e 4 e rompimento próximo à garra nos demais casos.

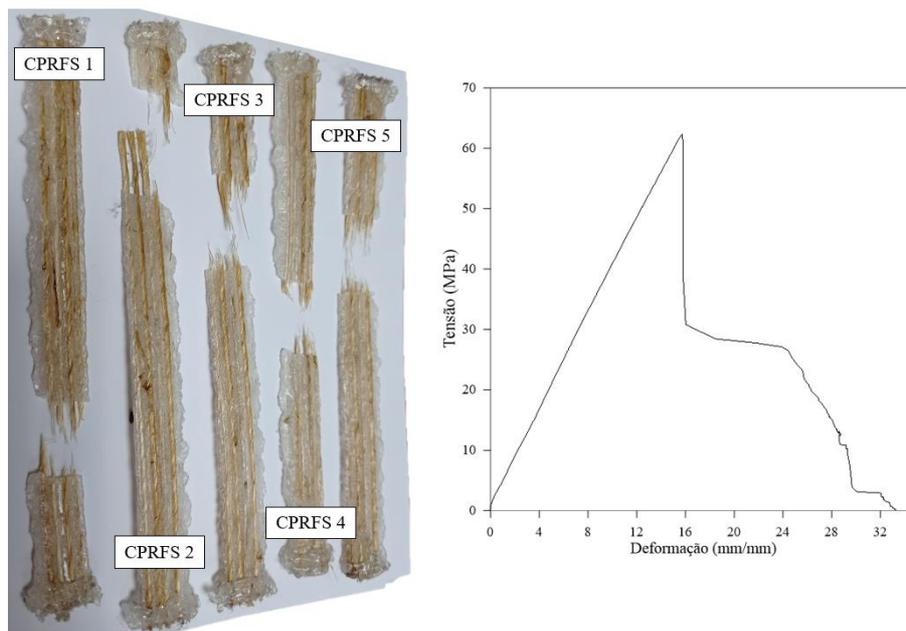


Figura 93 - Ensaio das amostras de CPRFS. a) Amostras ensaiadas b) Gráfico Tensão-Deformação.

Dentre os modos de falha, ocorreram deslizamento das fibras na amostra CPRF 2 devido à pouca adesão entre os componentes e fraturas frágeis nos demais casos. Outro destaque no caso desse compósito foi que durante o rompimento do material inicialmente ocorreu o rompimento da matriz, entretanto, diferente dos demais casos, as fibras de sisal mantiveram-se íntegras durante um tempo (Figura 94a), resistindo a parte da carga, criando

pontes de transferência de tensão. Com o limite de resistência da fibra, estas então se romperam (Figura 94b).

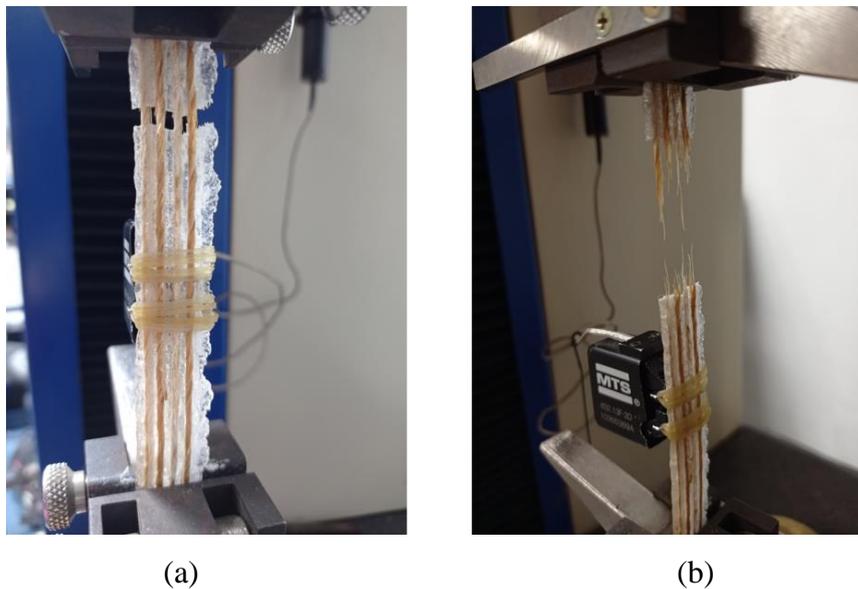


Figura 94 - Amostra de CPRS. a) Rompimento da matriz. b) Rompimento da fibra.

Por fim, a Figura 95 apresenta um comparativo entre os gráficos de tensão-deformação de cada tipo de amostra. Fica evidente que as amostras reforçadas com sisal conseguiram manter parte do carregamento por conta das pontes de tensão feitas pela fibra, mostrando um comportamento mais dúctil.

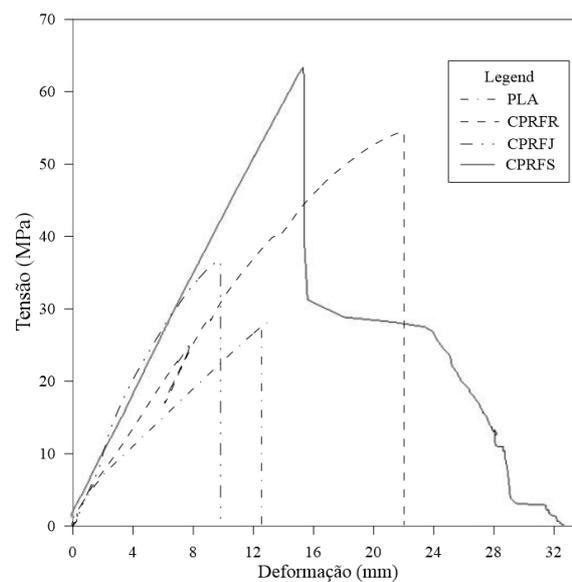


Figura 95 - Comparativo dos gráficos de tensão-deformação de cada tipo de amostra.

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1. Conclusão

No presente trabalho, foi proposto um modelo de habitação social desmontável feito de biocompósitos reforçados de fibra vegetal. Estes compósitos vegetais foram reforçados com fibras de juta, rami e sisal e foram avaliados quanto ao seu comportamento mecânico. Sua fabricação ocorreu de duas formas: moldados por compressão com 40% de tecido de fibra de juta em matriz de poliuretano vegetal, à base de mamona da marca Imperverg, constituindo assim de uma placa de biocompósito totalmente vegetal impressos 3D em impressora Zmorph VX com a utilização de um bico adaptado, imprimindo com matriz de ácido polilático (PLA) não reforçado e reforçado com fibras de juta, rami e sisal.

Para as placas moldadas foi feito um estudo da influência da direção da fibra nas propriedades mecânicas. Assim, foram ensaiadas as três direções: direção 0° (urdume), direção 45° e direção 90° (trama). Ficou constatado através de ensaio de flexão, que na direção principal da fibra, o urdume do tecido, o material compósito apresenta a melhor resistência e a maior rigidez, alcançando  $37,21 \pm 0,90$  MPa e  $10,42 \pm 1,08$  GPa, respectivamente. As demais direções apresentaram: direção 45° -  $16,91 \pm 1,62$  MPa e  $2,50 \pm 0,36$  GPa; direção 90° -  $21,57 \pm 5,79$  MPa e  $3,79 \pm 1,03$  GPa.

Para caracterização do efeito da radiação ultravioleta nas placas de compósitos reforçados com fibra de juta foram feitos ensaios em corpos de prova nas direções 0° e 90°, submetidos a uma lâmpada ultravioleta de 365nm, por 3 (três) meses. Como resultado, verificou-se que depois desse período de tempo, os compósitos com fibras na direção principal sofreram um decaimento de resistência de 11,82% contra 16,60% na direção da trama, provando sua boa resistência a esse fator.

Para os compósitos impressos foi feito um estudo da influência do tipo de fibra nas propriedades mecânicas. O ensaio à tração constatou aumentos significativos na resistência com o uso de fibras de rami (61,83%) e sisal

(110,80%), chegando à resistência de  $45,54 \pm 6,10$  e  $59,32 \pm 4,07$  MPa, respectivamente. Por outro lado, apesar do baixo aumento de resistência, o uso de fibra de juta promoveu as menores deformações e um módulo de Young de  $3,52 \pm 0,94$  GPa.

Do ponto de vista ambiental e econômico, o uso de fibras vegetais em compósitos é um ponto de interesse para o presente e o futuro da pesquisa no país. Portanto, diante de todas as análises realizadas, o uso de fibras vegetais como reforço, pode ser visto como uma alternativa no ramo da engenharia estrutural. Aplicando os módulos de elasticidade e demais propriedades obtidas dos ensaios numa análise de deslocamentos, verifica-se que a proposta de habitação social apresenta possibilidade de execução, contribuindo para uma solução para o problema de falta de moradia de forma sustentável e eficiente.

## 5.2. Sugestões para futuros trabalhos

Para os trabalhos futuros são sugeridos alguns temas para serem avaliados, a fim de fundamentar, justificar e ampliar as conclusões deste trabalho. São eles:

- Aprofundamento de pesquisas de compósitos vegetais com matrizes naturais;
- Verificação dos demais efeitos a longo prazo em compósitos naturais, como umidade, fadiga e temperatura;
- Melhora na aderência entre as fibras e a matriz de PLA, com a realização de algum tratamento prévio;
- Fabricação e ensaio de ligações e perfis reforçados com fibras vegetais;
- Estudo de tratamentos antichamas dos compósitos com poliuretano;
- Utilização de outros tecidos de fibra na fabricação de compósitos vegetais;
- Combinação de duas ou mais fibras vegetais na busca por um material que adquira uma melhor resistência e rigidez.

## 6. ANEXO 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS VEGETAIS

Acesso em 03 de set. de 2020

- [1] [https://www.123rf.com/photo\\_48365409\\_extreme-macro-of-luffa-sponge-fibers.html](https://www.123rf.com/photo_48365409_extreme-macro-of-luffa-sponge-fibers.html)
- [2] <https://clubedasuculenta.com.br/loja-online/materia-prima/fibra-de-coco/>
- [3] <https://pt.dreamstime.com/fim-acima-da-fibra-palma-de-oleo-sob-o-microscopio-para-analise-quimica-no-laboratorio-image134292053>
- [4] <https://boaspraticasagronicas.com.br/noticias/o-algodao/>
- [5] [https://www.alibaba.com/product-detail/100-Kapok-Fiber\\_62006434976.html](https://www.alibaba.com/product-detail/100-Kapok-Fiber_62006434976.html)
- [6] <https://www.papnews.com/wood-fiber-costs-for-pulp-mills-in-the-western-us-have-increased-substantially/>
- [7] <https://www.texatlas.com/100-natural-sisal-fiber.html>
- [8] <https://www.indiamart.com/proddetail/banana-fiber-14039277112.html>
- [9] <https://www.plurale.com.br/site/noticias-detelhes.php?cod=14985&codSecao=>
- [10] <https://www.freemansupply.com/products/plasters-gypsum-cements-accessories/plaster-accessories/abaca-fiber>
- [11] <https://yucantoday.com/from-yucatan-to-the-world-henequen-handcrafts/?lang=en>
- [12] <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/calçado/materiais-para-o-fabrico-de-calçado/palha/>
- [13] <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/wheat-straw-animal-feed-122180485.html>
- [14] <http://factsanddetails.com/world/cat54/sub343/item1583.html>
- [15] [http://guiakalunga.org.br/agqk-leva-curso-de-artesanato-de-fibras-naturais-para-comunidade-kalunga-do-engenho-ii/curso-de-artesanato-flores-arranjos-e-bonecas-de-fibras-naturais20150910\\_163231/](http://guiakalunga.org.br/agqk-leva-curso-de-artesanato-de-fibras-naturais-para-comunidade-kalunga-do-engenho-ii/curso-de-artesanato-flores-arranjos-e-bonecas-de-fibras-naturais20150910_163231/)
- [16] [https://www.alibaba.com/product-detail/Kenaf-Fiber\\_104790510.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Kenaf-Fiber_104790510.html)
- [17] <https://www.indiamart.com/proddetail/jute-fibers-17705709897.html>
- [18] <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/kenaf-fiber-104790510.html>
- [19] <https://napavalleyfiber.com/products/ramie-top-fiber-2-oz>
- [20] [https://www.123rf.com/photo\\_72264458\\_raw-flax-fiber.html](https://www.123rf.com/photo_72264458_raw-flax-fiber.html)

## 7. ANEXO 2 - PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Para o pré-dimensionamento da habitação social proposta, foi inicialmente definido o arranjo de uma edificação padrão, conforme Figura A2.1. Para esse arranjo, são então definidas as cargas atuantes, sendo limitadas ao peso próprio da estrutura e ações do vento.

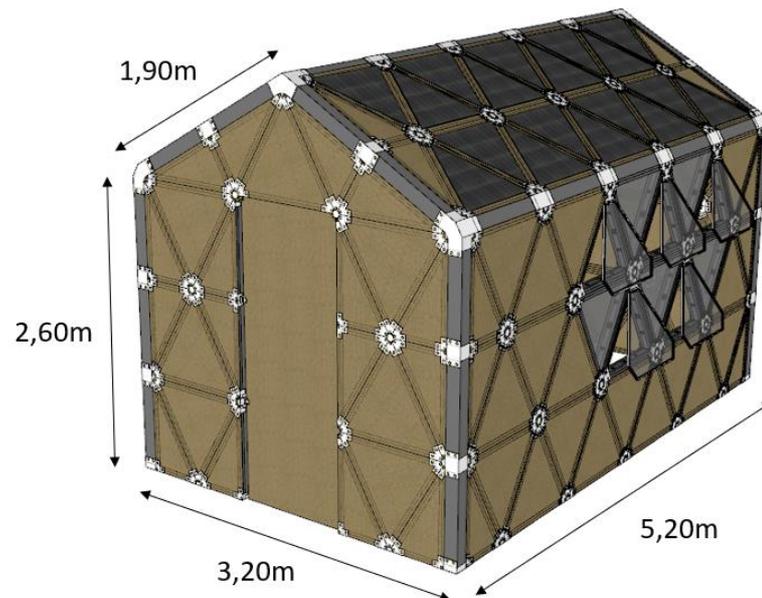


Figura A21 - Dimensões da habitação social.

Para o cálculo da carga de vento foram utilizadas as seguintes considerações conforme NBR 6123/88 - Forças devidas ao vento em edificações:

- Velocidade básica do vento para a região do Rio de Janeiro de 35 m/s;
- Fator topográfico - Terreno plano ou fracamente acidentado;
- Fator de rugosidade do terreno Categoria I - Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;
- Classe da edificação A - Maior dimensão menor ou igual a 20m;
- Fator estatístico Grupo 5 - Edificação de caráter temporário.

Com essas considerações, com o auxílio do programa VisualVentos [132] obtém-se os coeficientes de pressão externa das paredes (Figura A22) e os coeficientes de pressão externa do telhado (Figura A23).

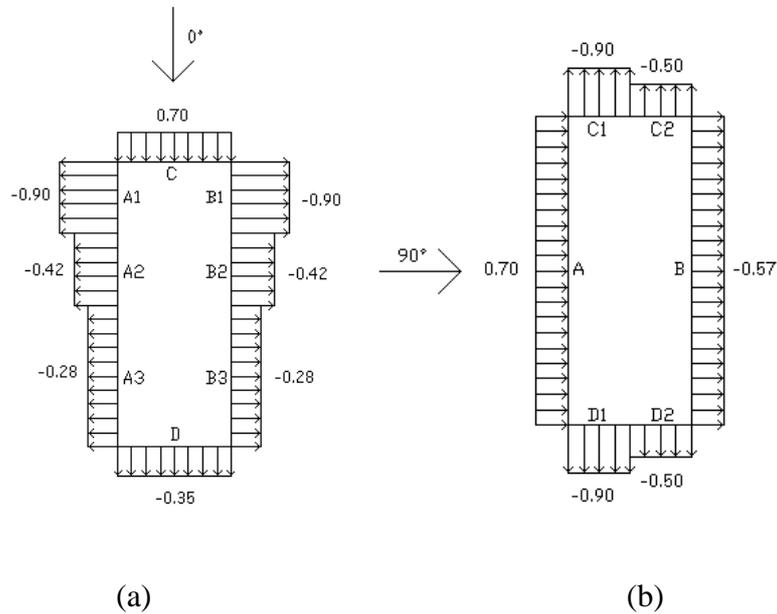


Figura A22 - Coeficiente de pressão externa das paredes. a) Vento 0°. b) Vento 90°.

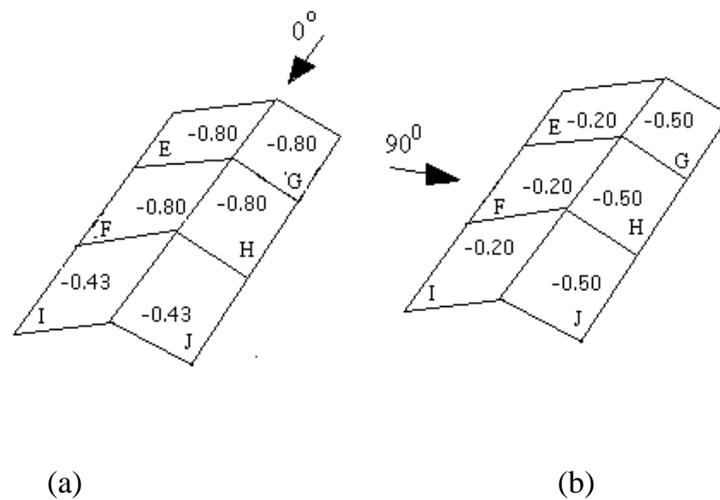


Figura A23 - Coeficiente de pressão externa do telhado. a) Vento 0°. b) Vento 90°.

Para o coeficiente de pressão interna considerando as quatro faces igualmente permeáveis, com  $C_{pi} = -0,3$  ou  $0,0$ . Sua sobreposição aos coeficientes externos é dada nas Figuras A24 e A25.

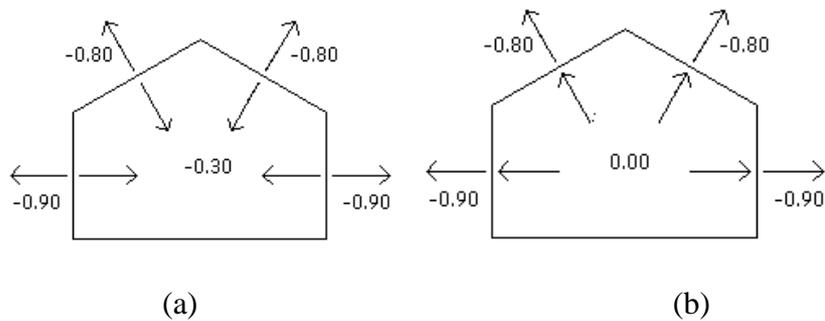


Figura A24 - Combinações dos coeficientes de pressão - Vento 0°. a)  $C_{pi} = -0,3$   
b)  $C_{pi} = 0,0$ .

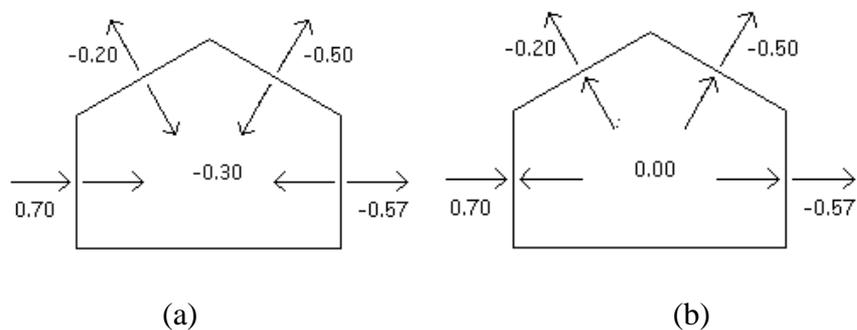


Figura A25 - Combinações dos coeficientes de pressão - Vento 90°. a)  $C_{pi} = -0,3$   
b)  $C_{pi} = 0,0$ .

Os esforços resultantes são dados na forma de cargas lineares à seção transversal da edificação, conforme Figuras A26 e A27.

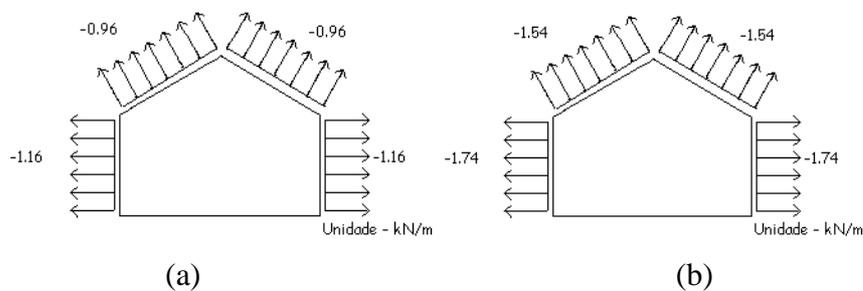


Figura A26 - Esforços resultantes - Vento 0°. a)  $C_{pi} = -0,3$ . b)  $C_{pi} = 0,0$ .

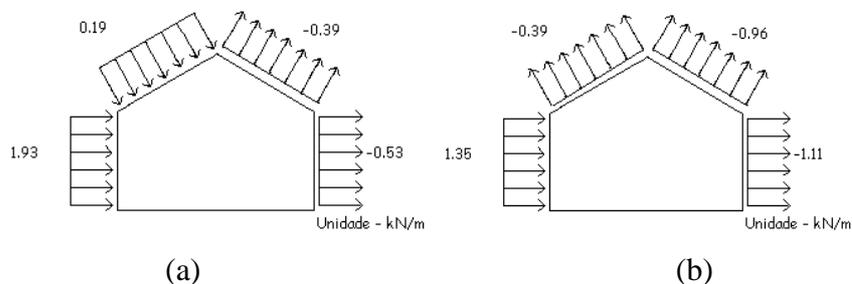


Figura A27 - Esforços resultantes - Vento 90°. a)  $C_{pi} = -0,3$ . b)  $C_{pi} = 0,0$ .

Essas cargas, juntamente com o peso próprio da estrutura são aplicadas no modelo simplificado da estrutura feito no programa Metálicas

3D [133]. A estrutura modelada (Figura A28) é feita com perfis tubulares simples com módulo de elasticidade de 3,90 GPa, conforme resultado dos ensaios dos corpos de prova impressos. As placas de vedação foram consideradas as propriedades dos ensaios das amostras na direção 45°, com módulo de elasticidade de 2,50 GPa, coeficiente de Poisson de 0,39 e peso específico de 3,25 kN/m<sup>3</sup> com base nas amostras ensaiadas. Nos nós da base da edificação é definida uma ligação externa rotulada, de forma a permitir a rotação da base.

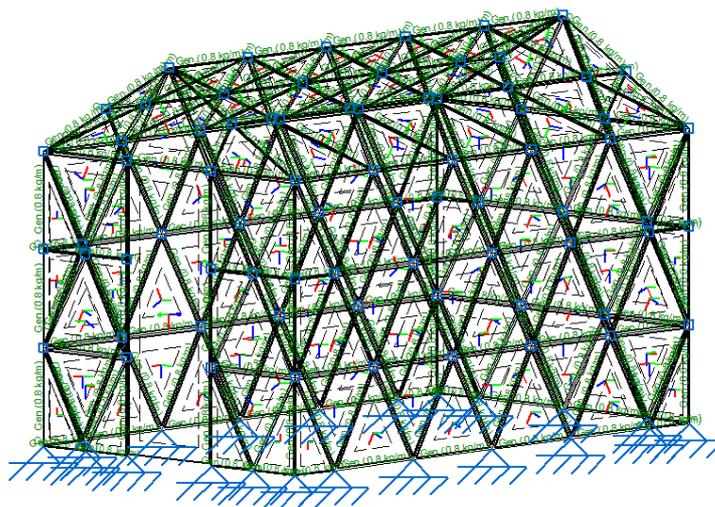


Figura A28 - Modelo simplificado da estrutura.

Com a aplicação das cargas e definição das possibilidades de combinação de cargas são obtidas as duas maiores deformadas conforme Figuras A29 e A210, tem o ponto de maior deformada com 15,5mm. Nesse sentido é possível verificar que em primeiro momento, o projeto de habitação social é viável no âmbito estrutural uma vez que apresenta pequenas deformações.

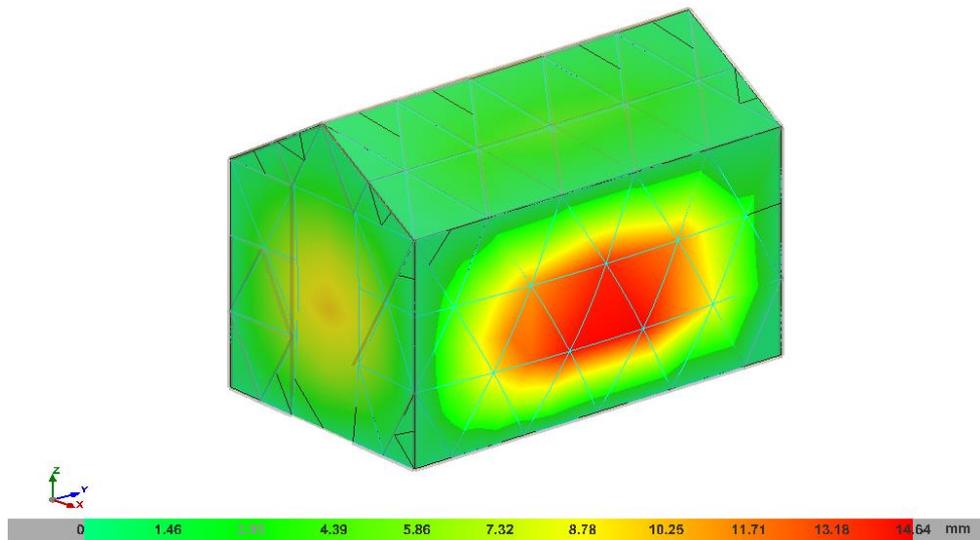


Figura A29 - Deformada da estrutura. Combinação de carga - peso próprio + vento 0°.

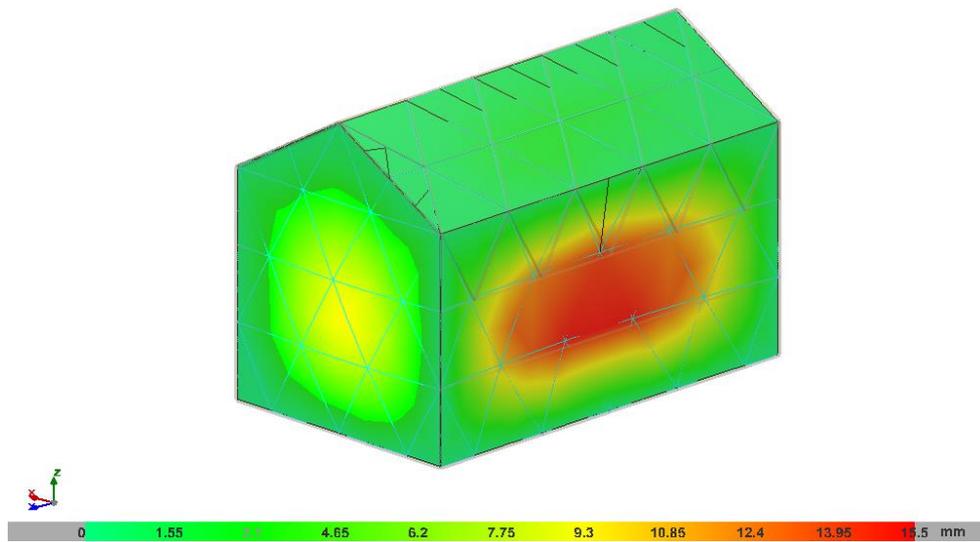
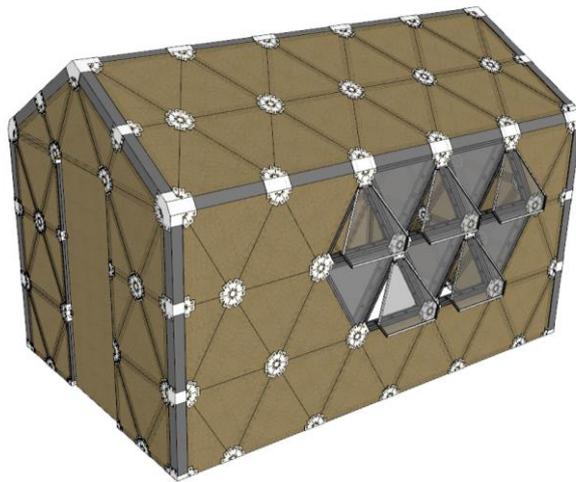


Figura A210 - Deformada da estrutura. Combinação de carga - peso próprio + vento 90°.

## 8. ANEXO 3 - MANUAL DE MONTAGEM DE HABITAÇÃO SOCIAL

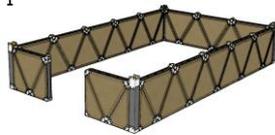
# MANUAL DE MONTAGEM

## HABITAÇÃO SOCIAL

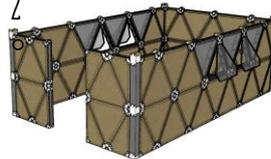


### ETAPAS

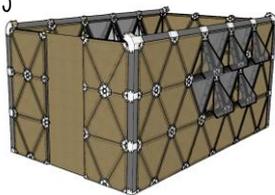
1º



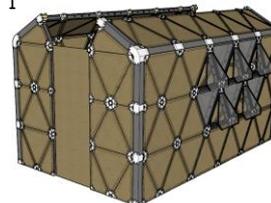
2º



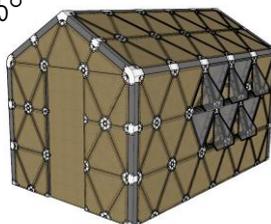
3º



4º

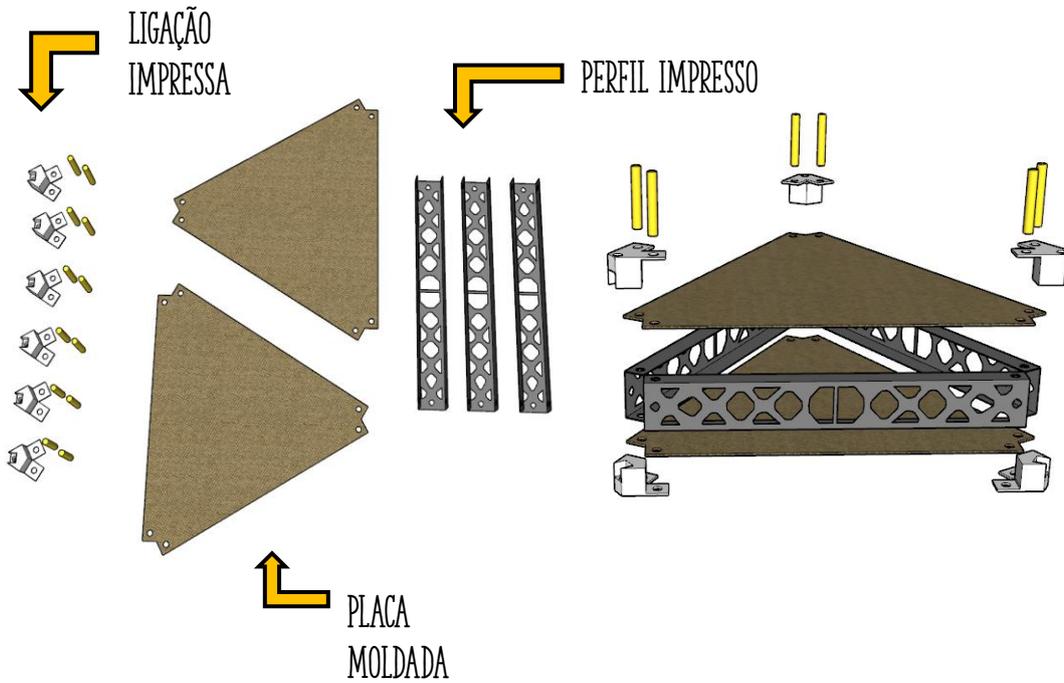


5º

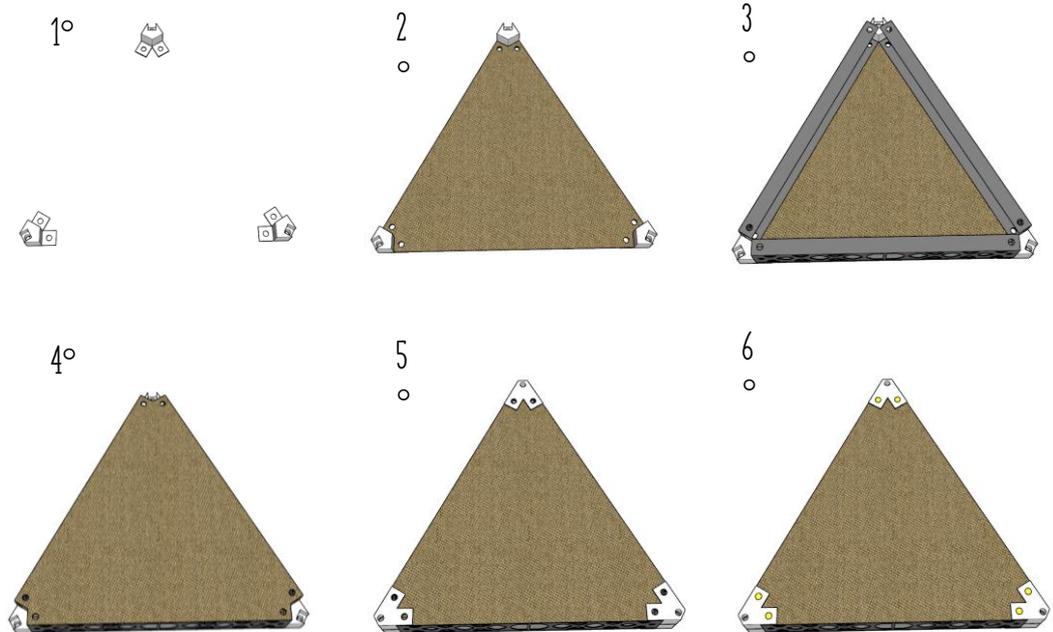


# MANUAL DE MONTAGEM

## MÓDULOS

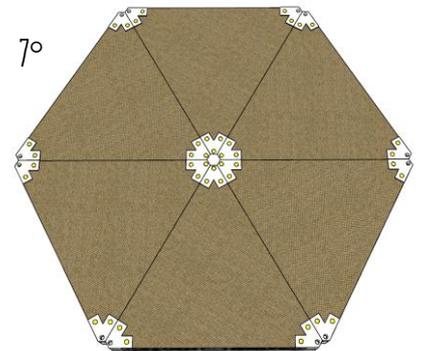
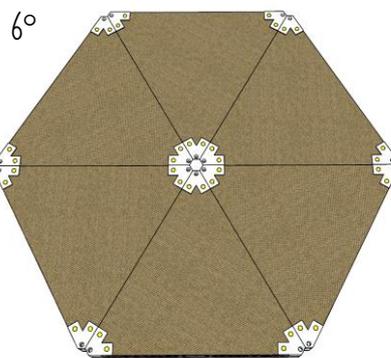
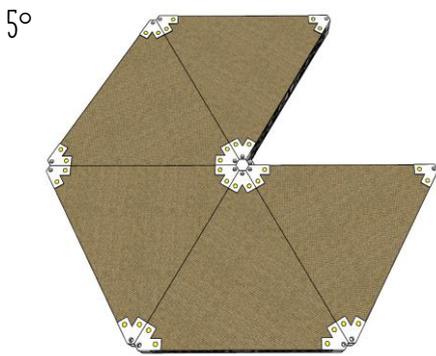
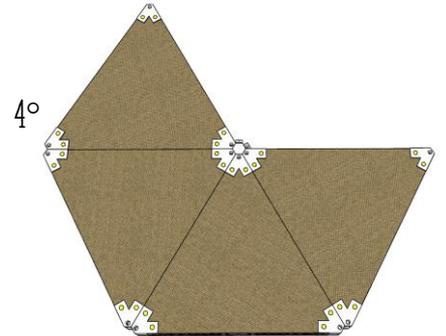
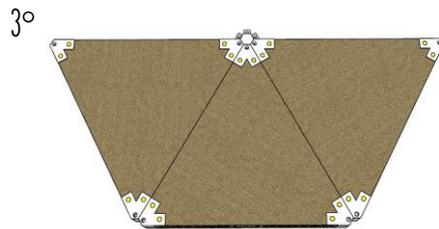
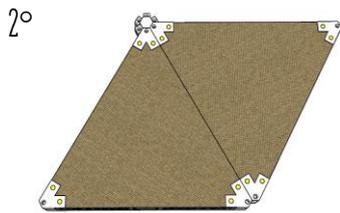


### LIGAÇÃO INTERNA DO MÓDULO - ETAPAS

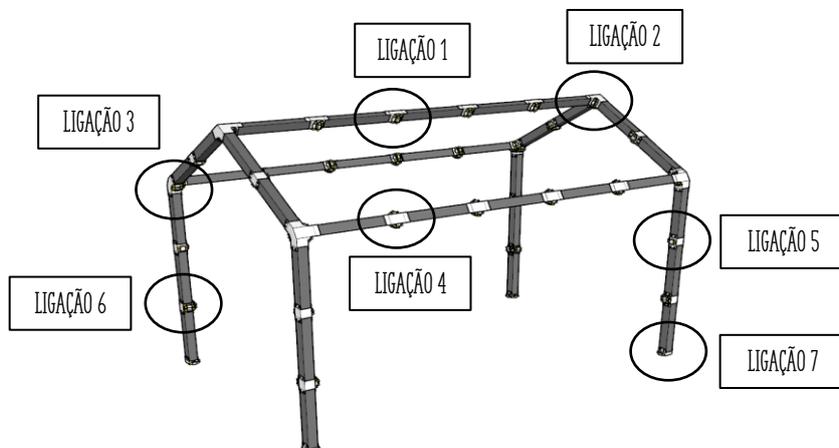


# MANUAL DE MONTAGEM

## LIGAÇÃO ENTRE MÓDULOS



## TIPOS DE LIGAÇÕES



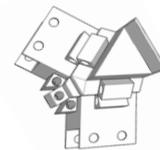
LIGAÇÃO 1



LIGAÇÃO 2



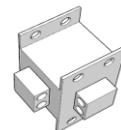
LIGAÇÃO 3



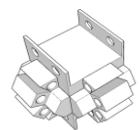
LIGAÇÃO 4



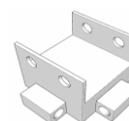
LIGAÇÃO 5



LIGAÇÃO 6

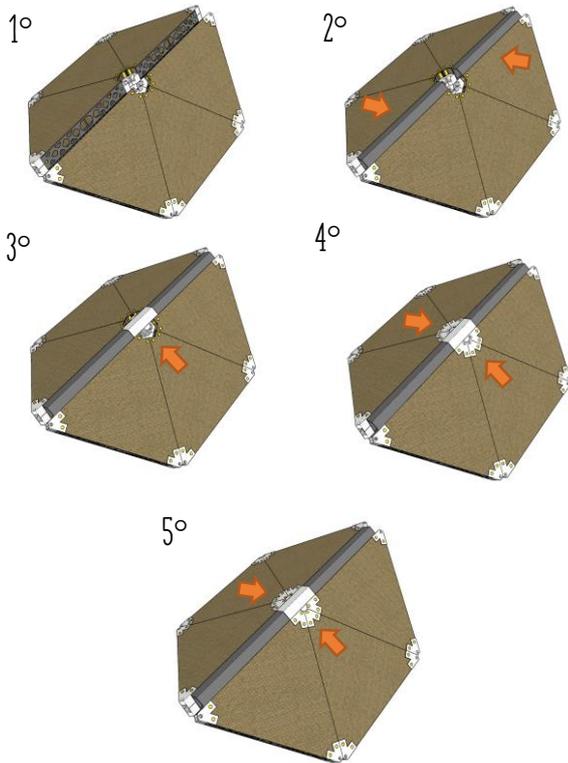


LIGAÇÃO 7

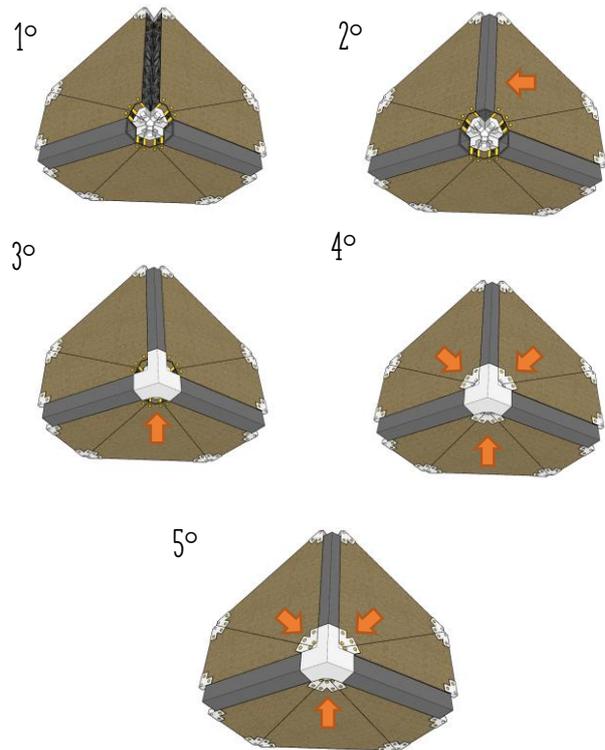


# MANUAL DE MONTAGEM

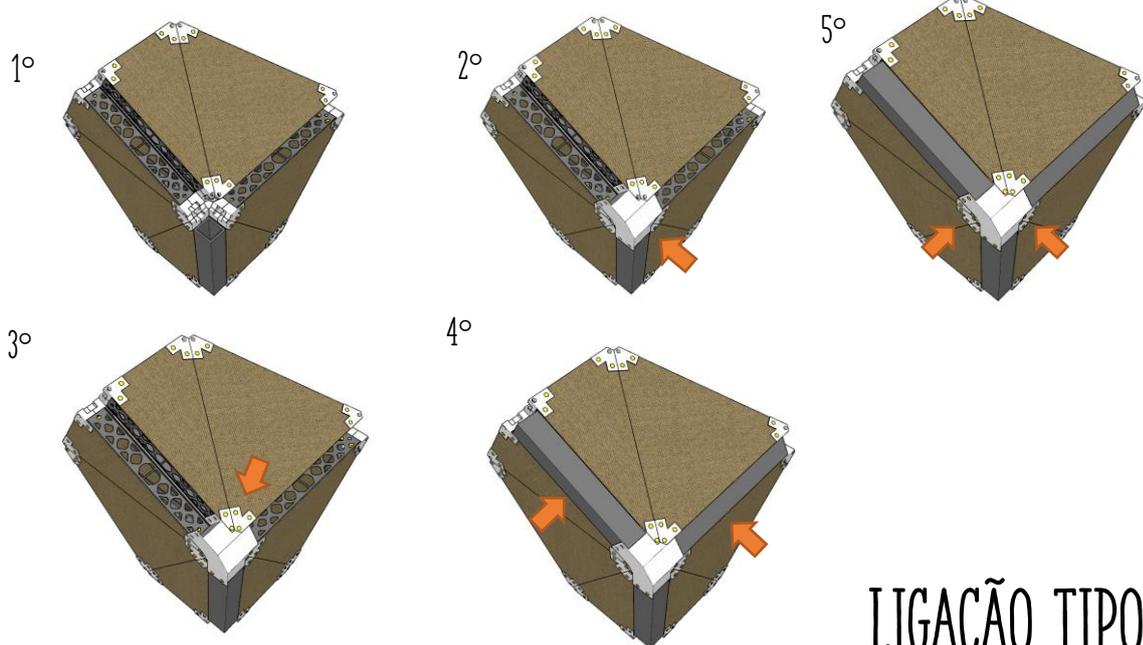
## LIGAÇÃO TIPO 1



## LIGAÇÃO TIPO 2



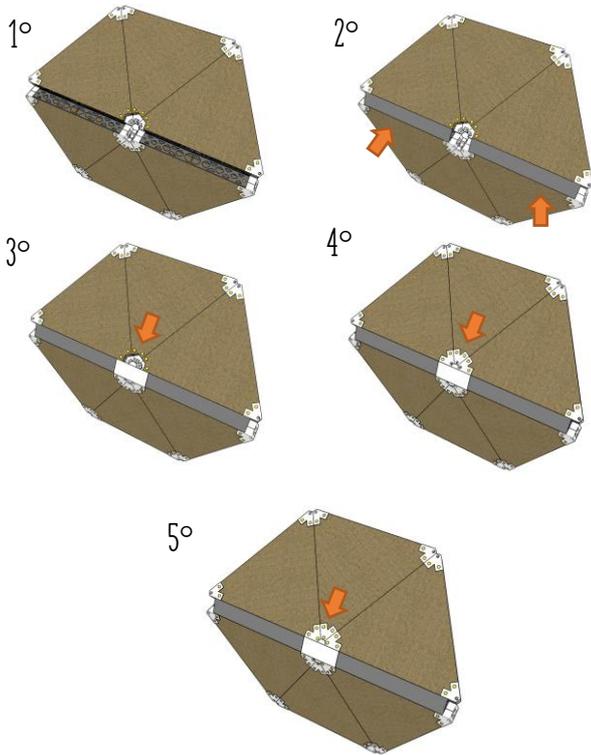
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1921190/CA



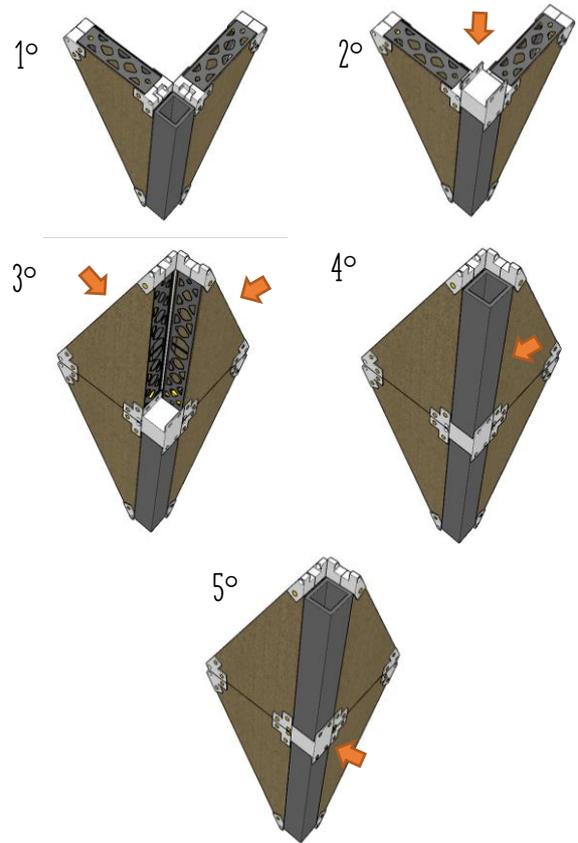
## LIGAÇÃO TIPO 3

# MANUAL DE MONTAGEM

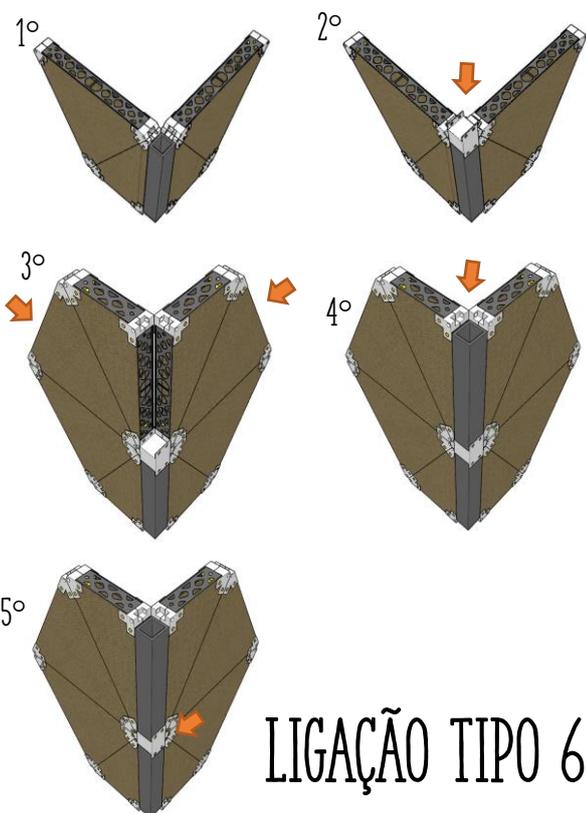
## LIGAÇÃO TIPO 4



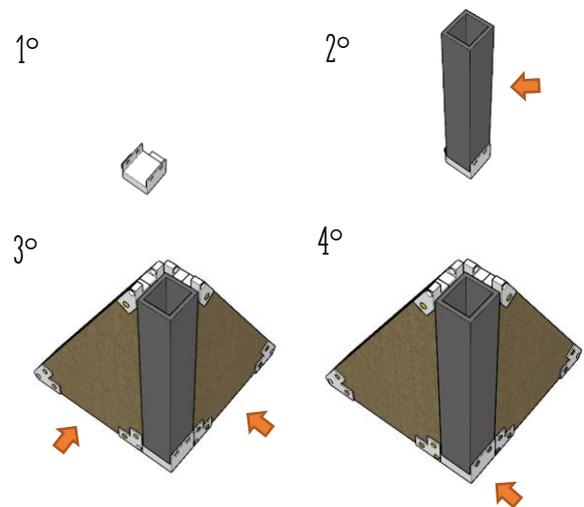
## LIGAÇÃO TIPO 5



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1921190/CA



## LIGAÇÃO TIPO 6



## LIGAÇÃO TIPO 7

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Klotz, M. Horman, and M. Bodenschatz, “A lean modeling protocol for evaluating green project delivery,” *Lean Constr. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–18, 2007.
- [2] E. Iacovidou, P. Purnell, and M. K. Lim, “The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution?,” *J. Environ. Manage.*, vol. 216, pp. 214–223, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.093.
- [3] I. e C. Ministério da Ciência, Tecnologia, “De emissões de gases de efeito estufa no brasil,” 2017.
- [4] R. R. R. Sethunaryanan, S. Chockalingam, “Natural fiber reinforced concrete,” *Fibrous Compos. Mater. Civ. Eng. Appl.*, no. 5, pp. 154–167, 2011, doi: 10.1016/B978-1-84569-558-3.50005-3.
- [5] I. Jatoba, “Impactos ambientais das siderúrgicas,” 2013. <http://www.universojatoba.com.br/sustentabilidade/consumo-consciente/impactos-ambientais-das-siderurgicas> (accessed Nov. 04, 2019).
- [6] Instituto Nacional do Câncer, “Amianto,” *Instituto Nacional de Câncer*, 2018. <https://www.inca.gov.br/causas-e-prevencao/o-que-cao-cancer> (accessed Oct. 14, 2020).
- [7] J. Gardiner, “Exploring the emerging design territory of construction 3D printing-project led architectural research,” *RMIT Univ. Melbourne, Aust.*, 2011.
- [8] R. D. S. G. Campilho, *Natural fiber composites*, 1st Editio. Taylor & Francis, 2015.
- [9] K. Joseph, R. D. Tolêdo Filho, B. James, S. Thomas, and L. H. de Carvalho, “a Review on Sisal Fiber Reinforced Polymer Composites,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 3, no. 3, pp. 367–379, 1999, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v3n3p367-379.
- [10] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 575–581, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024.
- [11] M. A. Esmeraldo, “Preparação De Novos Compósitos Suportados Em Matriz De Fibra Vegetal / Natural,” Universidade Federal do Ceará, 2006.
- [12] A. K. Mohanty, M. Misra, and G. Hinrichsen, “Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview,” *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 276–277, pp. 1–24, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W.
- [13] L. Shen, J. Haufe, and M. K. Patel, “Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. PRO-BIP; Final Report, Report No: NWS-E-2009-32,” p. 243, 2009, [Online]. Available: [https://www.uu.nl/sites/default/files/copernicus\\_probip2009\\_final\\_june\\_2009\\_revised\\_in\\_november\\_09.pdf](https://www.uu.nl/sites/default/files/copernicus_probip2009_final_june_2009_revised_in_november_09.pdf).
- [14] L. Lavoratti, “Muito mais que um simples teto,” 2009. [https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=117](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=117) (accessed Aug. 20, 2020).
- [15] Nações Unidas Brasil, “A ONU e os assentamentos humanos,” 2020. <https://nacoesunidas.org/acao/assentamentos-humanos/> (accessed Aug. 13, 2020).
- [16] FENAE, “Minha Casa Minha Vida terá o da história em 2020,” 2019. <https://www.fenae.org.br/portal/fenae-portal/noticias/minha-casa-minha-vida-tera-o-menor-orcamento-da-historia-em-2020-8A19A3046D127117016D129F73D059F8.htm> (accessed Aug. 14, 2020).
- [17] R. M. Jones, “Mechanics Of Composite Materials.” CRC Press, p. 519, 1999.
- [18] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed. Taylor & Francis, 2006.
- [19] E. Freire and E. E. C. Monteiro, “Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno com Fibra de Vidro,” *Polim. E Tecnol.*, vol. 4, no. 3, pp. 25–32, 1994.
- [20] M. F. Omar, H. Md Akil, Z. A. Ahmad, A. A. M. Mazuki, and T. Yokoyama, “Dynamic properties of pultruded natural fibre reinforced composites using Split Hopkinson Pressure Bar technique,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 9, pp. 4209–4218, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.04.036.
- [21] A. Bentur and S. Mindess, *Fibre reinforced cementitious composites*. Taylor & Francis, 2006.

- [22] R. de S. Castoldi, “Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal,” Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.
- [23] J. J. Li, J. G. Niu, C. J. Wan, B. Jin, and Y. L. Yin, “Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 118, pp. 27–35, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.116.
- [24] A. E. Naaman, “High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Classification and Applications,” *CBM-CI Int. Work. Karachi, Pakistan*, vol. 1, no. 1, pp. 389–401, 2009, doi: 978-969-8620-06-6.
- [25] S. Nunna, P. R. Chandra, S. Shrivastava, and A. K. Jalan, “A review on mechanical behavior of natural fiber based hybrid composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 31, no. 11, pp. 759–769, 2012, doi: 10.1177/0731684412444325.
- [26] N. Jauhari, R. Mishra, and H. Thakur, “Natural Fibre Reinforced Composite Laminates - A Review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, pp. 2868–2877, 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.304.
- [27] N. Chand and S. A. R. Hashmi, “Mechanical properties of sisal fibre at elevated temperatures,” *J. Mater. Sci.*, vol. 28, no. 24, pp. 6676–6682, 1993, doi: 10.1007/BF00356422.
- [28] K. Arsène, M-A Savastano Jr, H. Allameh, S. M. Ghavami and W. O. Soboyejo, “Cementitious composites reinforced with vegetable fibers,” *Proc. 1st Interam. Conf. Non-conventional Mater. Technol. Eco-construction Infrastruct.*, no. November 2003, pp. 13–16, 2003, [Online]. Available: [http://www.nku.edu/~allamehs1/Arsene-Natural Fibers fianl IAC NOCMAT.pdf](http://www.nku.edu/~allamehs1/Arsene-Natural%20Fibers%20fianl%20IAC%20NOCMAT.pdf).
- [29] D. Nabi Saheb and J. P. Jog, “Natural fiber polymer composites: A review,” *Adv. Polym. Technol.*, vol. 18, no. 4, pp. 351–363, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1098-2329(199924)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X.
- [30] X. Li, L. G. Tabil, and S. Panigrahi, “Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review,” *J. Polym. Environ.*, vol. 15, no. 1, pp. 25–33, 2007, doi: 10.1007/s10924-006-0042-3.
- [31] B. Khoshnevis, “Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies,” *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, 2004, doi: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.
- [32] C. Pavithran, P. S. Mukherjee, M. Brahmakumar, and A. D. Damodaran, “Impact properties of natural fibre composites,” *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 6, no. 8, pp. 882–884, 1987, doi: 10.1007/BF01729857.
- [33] P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest, “Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1259–1264, 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00096-4.
- [34] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, *NATURAL FIBERS, BIOPOLYMERS, AND BIOCOSCOMPOSITES*. 2005.
- [35] S. J. Eichhorn *et al.*, “Current international research into cellulosic fibres and composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 9, pp. 2107–2131, 2001, doi: 10.1023/A:1017512029696.
- [36] H.-E. Gram, *Durability of natural fibres in cement composites*, vol. 5, no. 6. 1983.
- [37] K. Araújo, “Gargalos das culturas do sisal, malva, piaçava, coco, seda e bambu: breve panorama para orientar uma proposta de governança,” *CSFN/MAPA - Câmara Setoriais de Fibras Naturais*, 2019. [http://antigo.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/fibras-naturais/2019/21a-ro/diagnostico-setor-fibras\\_20-marco-2019\\_final-convertido.pdf](http://antigo.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/fibras-naturais/2019/21a-ro/diagnostico-setor-fibras_20-marco-2019_final-convertido.pdf) (accessed Aug. 18, 2020).
- [38] N. Chand, R. K. Tiwary, and P. K. Rohatgi, “Bibliography Resource structure properties of natural cellulosic fibres - an annotated bibliography,” *J. Mater. Sci.*, vol. 23, no. 2, pp. 381–387, 1988, doi: 10.1007/BF01174659.
- [39] Eco Bags Brasil, “Projeto juta da amazônia.” [https://www.changemakers.com/sites/default/files/inclusao\\_social\\_-\\_juta\\_da\\_amazonia.pdf](https://www.changemakers.com/sites/default/files/inclusao_social_-_juta_da_amazonia.pdf) (accessed Sep. 20, 2020).
- [40] T. De Jesus and P. Fraxe, “Nova técnica para extração de fibras de juta e malva em processo a seco no Estado do Amazonas: o resgate da utopia,” *Inclusão Soc.*, vol. 12, no. 1, pp. 161–171, 2018.

- [41] T. Munikenche Gowda, A. C. B. Naidu, and R. Chhaya, "Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, no. 3, pp. 277–284, 1999, doi: 10.1016/S1359-835X(98)00157-2.
- [42] C. cui Fang, Y. Zhang, S. yuan Qi, Y. chang Liao, Y. yuan Li, and P. Wang, "Influence of structural design on mechanical and thermal properties of jute reinforced polylactic acid (PLA) laminated composites," *Cellulose*, vol. 8, 2020, doi: 10.1007/s10570-020-03436-8.
- [43] R. Basak, P. L. Choudhury, and K. M. Pandey, "Effect of Temperature Variation on Surface Treatment of Short Jute Fiber-Reinforced Epoxy Composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 1271–1277, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.211.
- [44] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoo, and M. Trada, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 856–873, 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.01.010.
- [45] S. T. Georgopoulos, P. A. Tarantili, E. Avgerinos, A. G. Andreopoulos, and E. G. Koukios, "Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 90, no. 2 SPEC. ISS., pp. 303–312, 2005, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.020.
- [46] J. Holbery and D. Houston, "Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications," *Jom*, vol. 58, no. 11, pp. 80–86, 2006, doi: 10.1007/s11837-006-0234-2.
- [47] A. J. Nunez, N. E. Marcovich, and M. I. Aranguren, "Analysis of the creep behavior of polypropylene-woodflour composites," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 44, no. 8, pp. 1594–1603, 2004, doi: 10.1002/pen.20157.
- [48] M. M. Thwe and K. Liao, "Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 3–4, pp. 375–387, 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(02)00225-7.
- [49] J. Gassan and A. K. Bledzki, "Effect of moisture content on the properties of silanized jute-epoxy composites," *Polym. Compos.*, vol. 18, no. 2, pp. 179–184, 1997, doi: 10.1002/pc.10272.
- [50] Gislene A. Santiago and V. R. Botaro, "Fibras de sisal impermeabilizadas com betume para reforço em matrizes de solo argiloso," 2009.
- [51] N. Li, Y. Li, and S. Liu, "Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 238, Elsevier B.V., pp. 218–225, 2016.
- [52] A. Ghesquiere and J. C. Bauwens, "Theoretical model for the elastic behavior of composites reinforced with short fibers," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 20, no. 4, pp. 891–902, 1976, doi: 10.1002/app.1976.070200403.
- [53] S. N. Monteiro, F. P. D. Lopes, A. S. Ferreira, and D. C. O. Nascimento, "Natural-fiber polymer-matrix composites: Cheaper, tougher, and environmentally friendly," *Jom*, vol. 61, no. 1, pp. 17–22, 2009, doi: 10.1007/s11837-009-0004-z.
- [54] D. B. Dittenber and H. V. S. Gangarao, "Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 1419–1429, 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.11.019.
- [55] J. K. Pandey, V. Nagarajan, A. K. Mohanty, and M. Misra, *Commercial potential and competitiveness of natural fiber composites*, Fourteenth. Elsevier Ltd., 2015.
- [56] W. Kim *et al.*, "High strain-rate behavior of natural fiber-reinforced polymer composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 9, pp. 1051–1065, 2012, doi: 10.1177/0021998311414946.
- [57] H. S. Sobral, *Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials: Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. 1990.
- [58] P. Noorunnisa Khanam, M. Mohan Reddy, K. Raghu, K. John, and S. Venkata Naidu, "Tensile, flexural and compressive properties of sisal/silk hybrid composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 26, no. 10, pp. 1065–1070, 2007, doi: 10.1177/0731684407079347.
- [59] G. P. de Souza, "Avaliação de critérios de falhas de compósitos poliméricos reforçados aplicados a vigas sob carregamento de flexão," Universidade de São Carlos, 2003.
- [60] ASTM INTERNATIONAL, *ASTM D2344 - Short Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*. .

- [61] ASTM INTERNATIONAL, “ASTM D790 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.,” *Annual Book of ASTM Standards*. pp. 1–12, 2002, doi: 10.1520/D0790-15E02.
- [62] A. Bravo, L. Toubal, D. Koffi, and F. Erchiqui, “Development of novel green and biocomposite materials: Tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission,” *Mater. Des.*, vol. 66, no. PA, pp. 16–28, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.10.026.
- [63] J. Gironès, J. P. Lopez, F. Vilaseca, R. Bayer, P. J. Herrera-Franco, and P. Mutjé, “Biocomposites from *Musa textilis* and polypropylene: Evaluation of flexural properties and impact strength,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 2, pp. 122–128, 2011, doi: 10.1016/j.compscitech.2010.10.012.
- [64] Y. Dong, A. Ghataura, H. Takagi, H. J. Haroosh, A. N. Nakagaito, and K. T. Lau, “Polylactic acid (PLA) biocomposites reinforced with coir fibres: Evaluation of mechanical performance and multifunctional properties,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 63, pp. 76–84, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.04.003.
- [65] A. Le Duigou and M. Castro, “Hygromorph BioComposites: Effect of fibre content and interfacial strength on the actuation performances,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 99, pp. 142–149, 2017, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.02.004.
- [66] C. L. Nogueira, J. M. F. Marlet, and M. C. Rezende, “Processo de obtenção de pré-impregnados poliméricos termoplásticos via moldagem por compressão a quente,” *Polímeros*, vol. 9, no. 3, pp. 18–27, 1999, doi: 10.1590/s0104-14281999000300006.
- [67] R. Hu and J. K. Lim, “Fabrication and mechanical properties of completely biodegradable hemp fiber reinforced polylactic acid composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 41, no. 13, pp. 1655–1669, 2007, doi: 10.1177/0021998306069878.
- [68] B. C. Temer and J. R. M. D’Almeida, “Development and Characterization of Agglomerated Panels Using Residues From the Sustainable Production of Heart of Palm From Pejibaye (*Bactris gasipaes*) Palms,” vol. 6, no. 2, 2015.
- [69] H. L. Tekinalp *et al.*, “Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 105, pp. 144–150, 2014, doi: 10.1016/j.compscitech.2014.10.009.
- [70] M. J. Cima *et al.*, “computer-derived microstructures by 3D Printing: Sio- and Structural Materials,” *Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 181–190, 1994, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2152/68644>.
- [71] L. J. Love *et al.*, “The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing,” *J. Mater. Res.*, vol. 29, no. 17, pp. 1893–1898, 2014, doi: 10.1557/jmr.2014.212.
- [72] G. Cesaretti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, and L. Pambaguian, “Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology,” *Acta Astronaut.*, vol. 93, pp. 430–450, 2014, doi: 10.1016/j.actaastro.2013.07.034.
- [73] S. A. C. Abreu, “Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo,” Universidade do Porto, 2015.
- [74] M. Chapiro, “Current achievements and future outlook for composites in 3D printing,” 2016.
- [75] V. Mazzanti, L. Malagutti, and F. Mollica, “FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 7, 2019, doi: 10.3390/polym11071094.
- [76] M. Mohammadizadeh, A. Imeri, I. Fidan, and M. Elkelany, “3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 175, no. April, Elsevier Ltd, p. 107112, 2019.
- [77] A. Le Duigou, D. Correa, M. Ueda, R. Matsuzaki, and M. Castro, “A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites,” *Mater. Des.*, vol. 194, p. 108911, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108911.
- [78] F. Van Der Klift, Y. Koga, A. Todoroki, M. Ueda, Y. Hirano, and R. Matsuzaki, “3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens,” *Open J. Compos. Mater.*, vol. 06, no. 01, pp. 18–27, 2016, doi: 10.4236/ojcm.2016.61003.
- [79] C. Yang, X. Tian, T. Liu, Y. Cao, and D. Li, “3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance,” *Rapid*

- Prototyp. J.*, vol. 23, no. 1, pp. 209–215, 2017, doi: 10.1108/RPJ-08-2015-0098.
- [80] S. Christ, M. Schnabel, E. Vorndran, J. Groll, and U. Gbureck, “Fiber reinforcement during 3D printing,” *Mater. Lett.*, vol. 139, pp. 165–168, 2015, doi: 10.1016/j.matlet.2014.10.065.
- [81] A. S. Mangat, S. Singh, M. Gupta, and R. Sharma, “Experimental investigations on natural fiber embedded additive manufacturing-based biodegradable structures for biomedical applications,” 2018.
- [82] H. Ryosuke Matsuzaki, Masahito Ueda, Masaki Namiki, Tae-Kun Jeong and A. & Y. H. Keisuke Horiguchi, Taishi Nakamura, “Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation,” 2016.
- [83] D. Stoof, K. Pickering, and Y. Zhang, “Fused Deposition Modelling of Natural Fibre/Poly(lactic Acid) Composites,” *J. Compos. Sci.*, vol. 1, no. 2, p. 8, 2017, doi: 10.3390/jcs1010008.
- [84] D. Stoof and K. Pickering, “Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 135, pp. 110–118, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.005.
- [85] B. Coppola, E. Garofalo, L. Di Maio, P. Scarfato, and L. Incarnato, “Investigation on the use of PLA/hemp composites for the fused deposition modelling (FDM) 3D printing,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1981, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1063/1.5045948.
- [86] J. Šafka, M. Ackermann, J. Bobek, M. Seidl, J. Habr, and L. Běhálek, “Use of composite materials for FDM 3D print technology,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 862, pp. 174–181, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.862.174.
- [87] X. Zhang *et al.*, “Large-scale 3D printing by a team of mobile robots,” *Autom. Constr.*, vol. 95, no. July, pp. 98–106, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.08.004.
- [88] H. Al Jassmi, F. Al Najjar, and A. H. I. Mourad, “Large-Scale 3D Printing: The Way Forward,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 324, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/324/1/012088.
- [89] N. Labonnote, A. Rønquist, B. Manum, and P. Rütger, “Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities,” *Autom. Constr.*, vol. 72, pp. 347–366, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
- [90] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, and P. Morel, “Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders,” *Mater. Des.*, vol. 100, pp. 102–109, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.097.
- [91] S. de I. Tecnológica, “Vigas de plástico superam vigas de concreto e aço.” <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=vigas-plastico-superam-vigas-concreto-aco&id=010170210312#.YFNFYtqSmUI> (accessed Mar. 18, 2021).
- [92] S. Griffiths, “Giant 3D printer creates 10 full-sized houses in a DAY: Bungalows built from layers of waste materials cost less than £3,000 each,” 2014. .
- [93] Mariana Madrigali, “O primeiro prédio construído por uma impressora 3D,” 2018. <https://www.chinalinktrading.com/blog/winsun-predios-impressora-3d/>.
- [94] BAM Infra, “Two world’s first 3D printed reinforced concrete bridges,” 2017. <https://materialdistrict.com/article/3d-printed-reinforced-concrete-bridges/> (accessed Sep. 02, 2020).
- [95] Eindhoven University of Technology, “The world’s first 3D printed reinforced concrete bridge starts to take shape,” *Eindhoven University of Technology*, 2017. <https://www.tue.nl/en/university/news-and-press/news/16-06-2017-the-worlds-first-3d-printed-reinforced-concrete-bridge-starts-to-take-shape/> (accessed Sep. 02, 2020).
- [96] D. Kokkinis, M. Schaffner, and A. R. Studart, “Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials,” *Nat. Commun.*, vol. 6, 2015, doi: 10.1038/ncomms9643.
- [97] Els Zijlstra, “The 3D Printed Bridge of Amsterdam,” 2020. <https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/>.
- [98] M. C. Architects, “Tecla, prima casa stampata in 3D low cost e ad alta sostenibilità,” 2021, [Online]. Available: <https://www.mcarchitects.it/tecla-prima-casa-stampata-in-3d-low-cost-e-ad-alta-sostenibilita>.
- [99] C. F. and M. Z. Enrique Canessa, *Low-cost 3D printing for science, education & sustainable development*. 2013.

- [100] M. S. A. Ramos, “Estudo de retardantes de chama, isentos de halogéneos, em espumas de Poliuretano monocomponente,” 2015.
- [101] T. T. Zin, P. Tin, H. Hama, and T. Toriu, “Knowledge based social network applications to disaster event analysis,” *Lect. Notes Eng. Comput. Sci.*, vol. 2202, no. i, pp. 279–284, 2013.
- [102] R. Bilham, “Lessons from the Haiti earthquake,” *Nature*, vol. 463, no. February, pp. 878–879, 2010, doi: 10.1038/news.2010.51.
- [103] D. M. C. Brito, C. M. C. B. Bastos, R. T. S. de Farias, D. C. Brito, and G. A. de C. Dias, “Conflitos socioambientais no século XXI,” *Pracs*, no. 4, pp. 51–58, 2011, [Online]. Available: <http://periodicos.unifap.br/index.php/pracs/article/download/371/296>.
- [104] K. Q. FAÇANHA, “Fluxos migratórios: da primavera árabe à crise humanitária instalada na Europa,” Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- [105] ONU, *Declaração Universal dos Direitos Humanos*. 1948.
- [106] BRASIL, *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasil, 1988.
- [107] C. A. M. Da Silva, “Os desastres no Rio de Janeiro: conceitos e dados.,” *Cad. do Desenvol. Flum.*, vol. 0, no. 8, pp. 55–71, 2016, doi: 10.12957/cdf.2015.26555.
- [108] B. M. R. GOMES, “Quatro anos do rompimento da barragem de fundão: Desafios e conquistas dos/as atingidos/as de Mariana/MG - Um olhar à partir das diretrizes de reparação do direito à moradia homologadas,” Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, 2019.
- [109] Firbida T. apud FIDESC 1966, “Acesso à informação e direito à moradia adequada,” 2016.
- [110] G. C. Anders, “Abrigos temporários de caráter emergencial,” Universidade de São Paulo, 2007.
- [111] BRASIL, “Programa Minha Casa Minha Vida,” *Ministério do Desenvolvimento Regional*, 2016. <https://www.mdr.gov.br/habitacao/programa-minha-casa-minha-vida-pmcmv> (accessed Aug. 14, 2020).
- [112] BRASIL, “Ação de Controle - Minha Casa Minha Vida: 56,4% dos imóveis avaliados apresentam defeitos na construção.,” *Controladoria-Geral da União*, 2017. <https://www.gov.br/cgu/pt-br/assuntos/noticias/2017/08/minha-casa-minha-vida-56-4-dos-imoveis-avaliados-apresentam-defeitos-na-construcao> (accessed Aug. 14, 2020).
- [113] TECHO, “O que é TETO?,” *Um teto para o meu país*. <https://www.techo.org/brasil/teto/> (accessed Aug. 13, 2020).
- [114] BETTER SHELTER, “Un Global Compact Communication on Progress,” 2019. <https://bettershelter.org/about/> (accessed Aug. 20, 2020).
- [115] C. C. de Mendonça, “Fluxo de informação ( IDM ) considerando o cálculo da energia e carbono embutido para reuso de aço estrutural,” Pontifícia Universidade Católica - PUC- Rio, 2019.
- [116] W. Salama, “Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6, no. 2, pp. 617–635, 2017, doi: 10.1016/j.ijse.2017.03.005.
- [117] K. D. Tsavdaridis, J. J. Kingman, and V. V. Toropov, “Application of structural topology optimisation to perforated steel beams,” *Comput. Struct.*, vol. 158, pp. 108–123, 2015, doi: 10.1016/j.compstruc.2015.05.004.
- [118] Imperveg, “Imperveg® Agt 1315,” *Datasheet*, 2018. <http://imperveg.com.br/wp-content/uploads/2015/05/FICHA-TÉCNICA-IMPERVEG-AGT-1315.pdf> (accessed Sep. 11, 2020).
- [119] 3D LAB, “PLA: Tudo o que você precisa saber sobre o lamento PLA.” <https://3dlab.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/> (accessed Aug. 19, 2020).
- [120] Wishbox, “Filamento PLA: Filamento Biodegradável,” 2020. <https://www.wishbox.net.br/blog/filamento-pla-filamento-biodegradavel/#btn-continuar-lendo> (accessed Aug. 24, 2020).
- [121] Hot-World GmbH & Co., “Repetier-Host,” 2018.
- [122] J. Prusa, “PrusaSlicer,” 2013.
- [123] ASTM INTERNATIONAL, “ASTM G154-16 Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 14.04, doi: 10.1520/G0154-16.

- [124] ASTM INTERNATIONAL, “ASTM D3039 / D3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 15.03, doi: 10.1520/D3039\_D3039M-17.
- [125] J. C. Caraschi, A. L. Leão, and P. V. C. Chamma, “Avaliação de painéis produzidos a partir de resíduos sólidos para aplicação na arquitetura,” *Polímeros*, vol. 19, no. 1, pp. 47–53, 2009, doi: 10.1590/s0104-14282009000100012.
- [126] J. Karpiesiuk, “Young’s Modulus and Poisson’s Ratio of Polyurethane Adhesive in Lightweight Floor System,” *Mod. Approaches Mater. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 251–255, 2020, doi: 10.32474/mams.2020.02.000139.
- [127] V. Suthenthiraveerappa and V. Gopalan, “Elastic constants of tapered laminated woven jute/epoxy and woven aloe/epoxy composites under the influence of porosity,” *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, pp. 1453–1469, 2017.
- [128] C. C. S. Junior, “Avaliação das propriedades mecânicas de poliuretano tendo como agente de reforço uma nova fibra inorgânica natural,” Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC-Minas, 2003.
- [129] F. Vittorino and G. R. Cavani, “Relação entre exposição ao intemperismo artificial acelerado e natural,” São Paulo, 1998.
- [130] I. Tena, M. Sarrionandia, J. Aurrekoetxea, and J. Torre, “Monitorizado del curado ultravioleta ( UV ) de un compuesto poliéster reforzado con fibra de vidrio,” *Matcomp2013*, pp. 1–6, 2013, [Online]. Available: <https://synthesites.com/resources/files/UV-curing- MATERIALES COMPUESTOS 13- MondragonUniveristy.pdf>.
- [131] J. D. S.-J. M.A. Juárez-Estrada, O. Olivares-Xometl, J.A. Galicia-Aguilar, “Preparación y caracterización de recubrimientos resina epóxica / montmorillonita curados por UV sobre acero al carbón Preparation and characterization of UV cured epoxy resin / montmorillonite coatings on carbon steel,” *Superf. y Vacío 29(3) 74*, Sept. 2016, vol. 29, no. September, pp. 74–77, 2016.
- [132] M. Zacarias and P. Chamberlain, “VisualVentos.” Fundação Universidade de Passo Fundo, 2008.
- [133] Cype Ingenieros, “Metálicas 3D.” 2021.