REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2024, Vol. 14, No. 28
DOI 10.23972/det2024iss28pp50-61

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Ferramenta de auxílio à seleção de compósitos termofixos

Bernardo Z. Dias[1]; Cristina E. de Alvarez[2]; Arthur H. Lara[3]

1 *Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil*

2 *Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil*

3 *Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil*

RESUMO

Algumas pesquisas no campo do *Design* abordam as propriedades sensoriais dos compósitos termofixos, além de analisá-los qualitativamente sob o prisma da sustentabilidade. Porém, também é necessário que os profissionais possuam informações sobre as propriedades que interferem no produto, tais como densidade, resistência mecânica e custo do compósito, que devem ser considerados em conjunto com dados quantitativos sobre sua sustentabilidade. Já existem algumas ferramentas de simulação e previsão de propriedades para compósitos termofixos, entretanto, caracterizam-se por serem sofisticadas, demandando uma sólida formação na área, além de não serem gratuitas. Uma ferramenta de livre acesso, que estima de forma simples e conforme as necessidades do usuário algumas características do compósito, pode contribuir para difundir e orientar o uso desses materiais. Assim, esta pesquisa objetivou desenvolver uma ferramenta computacional de auxílio a arquitetos, *designers* e pequenos fabricantes de compósitos que desejem empregar esses materiais em seus projetos e necessitem fazer escolhas a partir de algumas de suas características. Como método, foram pesquisados os *softwares* e ferramentas computacionais existentes que realizam tarefa semelhante. Em paralelo, baseando-se no público-alvo da ferramenta, foram definidas as propriedades dos compósitos a serem inseridas no processo de escolha, sendo definidos seus métodos de cálculo. Após a estruturação inicial da ferramenta, foram realizadas as simulações de teste, que levaram a aprimoramentos até a versão final. Como resultado, apresenta-se uma ferramenta elaborada a partir do *software* Microsoft Excel 2019, que possibilita estimar, a partir da matriz e da fibra de reforço selecionada pelo usuário, a densidade, o custo/kg, o percentual de matéria-prima de origem renovável e biodegradável do compósito, a espessura de um laminado feito com ele e o quantitativo de materiais de uma peça feita com esse laminado. O teste final ocorreu a partir de sua aplicação no projeto arquitetônico de um abrigo de ponto de ônibus. A ferramenta funcionou corretamente durante a simulação, sendo possível visualizar os compósitos mais densos e caros, as peças com maior quantidade de matéria-prima com conteúdo renovável, as mais pesadas, as mais baratas, entre outras características.

PALAVRAS-CHAVE

Compósito polimérico;
Biocompósito;
Fibra reforçadora;
Resina.

Tool to aid the selection of thermosetting composites

ABSTRACT

Some research in the field of Design addresses the sensory properties of thermosetting composites and analyzes them qualitatively from the perspective of sustainability. However, professionals also need information about the properties that affect the product, such as density, mechanical strength and cost of the composite, which must be considered simultaneously with quantitative data on its sustainability. Some simulation and property prediction tools for thermosetting composites already exists, however, they are sophisticated, demanding a solid formation in the area, and are not free. A free access tool, which estimates in a simple way and according to the user's needs some characteristics of the composite, can contribute to disseminate and guide the use of these materials. Therefore, this research aimed to develop a computational tool to help architects, designers and small composite manufacturers who wish to use these materials in their design projects and need to make choices based on some of their characteristics. For that, the method included research about existing software and computational tools that perform a similar task. In parallel, based on the target audience of the tool, the properties of the composites to be included in the selection process were defined, and its calculation methods too. After the initial structuring of the tool, test simulations were carried out, which led to improvements up to the final version. The result is a tool developed in the Microsoft Excel 2019 software that makes it possible to estimate, based on the matrix and reinforcement fiber selected by the user, the composite's density, cost/kg and percentage of raw material from renewable sources and that is biodegradable, the thickness of a laminate made with such composite and the amount of material in a component made with that laminate. The final test was based on its application in the architectural plan of a bus stop shelter. The tool worked correctly during the simulation, making it possible to visualize the composites that are denser and more expensive, the shelter components with the highest amount of raw material from renewable sources, those that are heaviest, cheapest, among other characteristics.

KEYWORDS

Polymer composite;
Biocomposite;
Reinforcement fiber;
Resin.

CONTATO: Bernardo Z. Dias – *bernardozdias@usp.br*

© 2024 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos termofixos são materiais formados por partículas ou fibras, que podem ser de diferentes naturezas, envoltos por um polímero termofixo – isto é, um polímero que após a cura não pode ser amolecido novamente por aquecimento –, também chamado de matriz (KURUVILLA et al., 2021; POHL, 2010). As fibras propiciam a maior parte da resistência do compósito, enquanto a matriz (epóxi, poliéster insaturada, poliuretana, entre outras) as mantém juntas e as protege de agentes externos (RAJENDRAN; NAGARAJAN, 2021), como umidade e névoa salina. Há décadas empregados em indústrias que precisam de componentes de baixo peso e elevadas resistências mecânica e química (como resistência à corrosão), como a aeronáutica, espacial, naval, automobilística e esportiva (GREENE, 1999; KURUVILLA et al., 2021; MEENAKSHI; KRISHNAMOORTHY, 2018; POHL, 2010), os compósitos termofixos ganham espaço na arquitetura, em elementos de fachada como sombreadores e vedações (MIGUEL; DIAZ, 2015), assim como em processos de restauro de edificações históricas (ACMA - AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2016), e no *design*, como mobiliários de uso interno ou externo, como os projetados pelo arquiteto Greg Lynn (LYNN, 2018a, 2018b).

Compósitos termofixos são geralmente produzidos com polímeros e fibras de origem sintética que, mesmo expostos às intempéries, possuem elevada durabilidade (BAI, 2013; GREENE, 1999). Porém, caso os componentes feitos com eles precisem ser substituídos, seu destino se torna um problema ambiental, uma vez que não se biodegradam e são de difícil reciclagem (MEENAKSHI; KRISHNAMOORTHY, 2018), como ocorre com pás danificadas de aerogeradores em usinas eólicas (MAMANPUSH et al., 2018). Assim, cada vez mais se destacam aspectos dos compósitos termofixos relacionados à economia circular e à sustentabilidade ambiental, como o percentual de matéria-prima de origem renovável e biodegradável em sua composição (SILVA; OLIVEIRA, 2021). Entende-se por renovável o recurso natural que se renova rapidamente e que, com isso, possui menor risco de exaurimento (RAY, 2017), enquanto biodegradável é a matéria-prima que pode ser destruída por organismos vivos, como bactérias, fungos, insetos e roedores, de modo que, quando a peça em compósito tiver de ser substituída ou descartada, seus materiais sejam reinseridos no ciclo biológico, evitando seu envio para aterro ou incineração (CANGEMI et al., 2008; MEI; OLIVEIRA, 2017).

O emprego de matrizes poliméricas termofixas de origem vegetal e fibras vegetais na produção dos chamados biocompósitos é recente e ganhou força devido ao crescente descarte no meio-ambiente de resíduos de difícil degradação e à produção de polímeros a partir do petróleo, uma matéria-prima finita e não-renovável (KUMAR et al., 2018; SABA et al., 2016). A sustentabilidade ambiental também possui implicações comerciais para os biocompósitos, cujo mercado está em ascensão, principalmente devido a preocupações com o meio-ambiente e com a reciclagem dos materiais (ALI et al., 2020), e pode lucrar com marketing (BOSQUETTI et al., 2021) e eventuais incentivos fiscais.

Ainda pouco conhecidos no setor da construção civil, por engenheiros e por *designers* (BIRON, 2014), os compósitos termofixos são uma classe de material de fácil moldagem e com grande potencial e flexibilidade de uso (BIRON, 2014). Considerando principalmente a recente intensificação no uso de peças ou componentes com fibras de carbono, fibras de vidro (MCISAAC; FAM, 2018) ou de linho (RAMESH, 2019), por exemplo, é de grande importância que os conhecimentos produzidos na área sejam disponibilizados aos projetistas, na forma do denominado "conhecimento útil". Estudos como os de Silva e Oliveira (2021) e Monteiro et al. (2021) no campo do *Design* se aprofundam nas propriedades táteis e sensoriais dos compósitos, além de analisá-los qualitativamente sob o prisma da sustentabilidade. Por outro lado, também é necessário que os profissionais possuam informações sobre propriedades como densidade, resistência mecânica, custo do compósito e dados quantitativos sobre sua sustentabilidade, que irão ditar o peso de uma peça, quanto de carga suportará, o custo do componente e se um compósito é, sob certos aspectos, mais ou menos sustentável que outro.

Atualmente existem algumas ferramentas de simulação e previsão de propriedades para compósitos termofixos, como as apresentadas por Cassola et al. (2022) e as das desenvolvedoras de *softwares* Ansys e Siemens. Entretanto, são ferramentas sofisticadas, de uso complexo, que demandam uma sólida formação na área, além de não serem de acesso livre. Assim, para que de fato a "cultura" no uso dos compósitos termofixos seja implementada, é necessário que sejam criadas estratégias e desenvolvidos instrumentos facilitadores para os projetistas. Uma ferramenta gratuita que estime de forma simples e fácil, a partir da matriz e da fibra selecionadas pelo usuário – e de acordo com as necessidades específicas de seus projetos – características relevantes do compósito resultante, a quantidade e o custo de material de certa peça, além de aspectos da sustentabilidade ambiental, pode contribuir para difundir e orientar o uso desses materiais. Profissionais com baixo conhecimento teórico no tema, pequenos fabricantes de peças em compósito e *designers* que produzem suas próprias peças, por exemplo, poderiam visualizar previamente algumas características de seus produtos.

Assim, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional de auxílio a profissionais (arquitetos, *designers* e pequenos fabricantes de compósitos) que desejem empregar materiais compósitos termofixos em seus projetos e, para isso, queiram simular algumas características de diferentes compósitos, quantificar aspectos relacionados à sustentabilidade ambiental da matriz e da fibra, avaliar a adequabilidade do compósito aos seus projetos e calcular o quantitativo e o custo de material para uma determinada peça ou componente construtivo que estejam projetando.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No processo da pesquisa foi feita a revisão de literatura visando identificar as ferramentas e os *softwares* existentes que auxiliam na seleção de compósitos termofixos, sua abordagem sobre a estimativa de propriedades dos compósitos e seu público-alvo. A pesquisa foi feita em buscadores como o Google, em *websites* de desenvolvedores de *softwares* voltados à seleção de materiais e ao desenvolvimento de projetos de peças, construções, etc., e em base de dados de pesquisas científicas, como Scielo, Google Acadêmico e Scopus.

Nos buscadores e base de dados de pesquisas científicas foram pesquisados os seguintes termos: "*composite calculator*", "compósito cálculo materiais", "*cured ply thickness*", "*polymer composite calculator*", "*polymer composite tool*", "*polymer composite simulation*", "*composite tool*", "compósito simulação", "polímero simulação", "polímero ferramenta", "regra misturas simulação", "regra misturas ferramenta", "*rule mixtures simulation*" e "*rule mixtures tool*".

As principais ferramentas e/ou *softwares* encontrados seguem listados no Quadro 1, sendo que alguns deles também apresentam propriedades de lâminas – isto é, uma camada de material compósito formada por fibras orientadas em certa(s) direção(ões) ou aleatoriamente distribuídas impregnada numa película de matriz (HARRIES; SHARMA, 2019) – e de laminados, que são a sobreposição de uma ou mais lâminas, interligadas pela matriz (HARRIES; SHARMA, 2019).

Quadro 1: Principais ferramentas computacionais existentes para auxiliar projetistas na seleção e especificação de compósitos termofixos. Abreviaturas: Cód. = Código; Fer. = Ferramenta; Desen. = Desenvolvedor ou Proprietário; e Ref. = Referência.

Cód.	Fer.	Desen.	Aplicação	Público	Dados	Acesso	Ref.
1	MECH-Gcomp	GCOMP LAPOL/UFRGS	Estima as propriedades mecânicas, térmicas e higroscópicas de materiais compósitos com base em dados inseridos pelo usuário	Profissionais que lidam com o cálculo das propriedades mecânicas, térmicas e higroscópicas de compósitos	Selecionados no banco de dados da ferramenta e inseridos pelo usuário	Livre	https://gcomp-srv01.nuvem.ufrgs.br/pt-br/about/
2	CES Edu-pack	Ansys	Visualização e comparação das propriedades de diferentes materiais. Não estima as propriedades de novos materiais com base em dados inseridos pelo usuário	Estudantes e acadêmicos de áreas ligadas à seleção de materiais, engenharias, *design* e sustentabilidade	Ampla lista fornecida. Usuário pode criar novos materiais, mas deve fornecer os valores de suas propriedades	Pago	https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack
3	Calculators	Composites Evolution	Estima a densidade do compósito e a espessura de uma lâmina em um laminado com base em dados inseridos pelo usuário	Profissionais que trabalham com compósitos de modo geral	Fornecimento de poucos dados. Usuário deve inserir maior parte das informações	Livre	https://compositesevolution.com/resources/
4	Calculators	Hexcel	Estima a densidade do compósito e a espessura de uma lâmina em um laminado com base em dados inseridos pelo usuário	Profissionais que trabalham com compósitos de modo geral	Usuário deve selecionar no banco de dados da ferramenta resinas e fibras produzidos pela própria empresa (Hexcel)	Livre	https://www.hexcel.com/Resources/Calculators
5	Material calculator	Saertex	Estima a espessura e o peso do laminado, e a quantidade, em massa, de matriz e fibra necessária para sua produção com base em dados inseridos pelo usuário	Profissionais que trabalham com compósitos de modo geral	Fornecimento de poucos dados. Usuário deve inserir maior parte das informações	Livre	https://www.saertex.com/en/services/material-calculator

(Fonte: Elaborado pelos autores).

Há, ainda, *softwares* voltados ao desenvolvimento de projetos, como os da plataforma BIM (Building Information Modelling), a exemplo do Archicad (da Graphisoft), e o Revit (da Autodesk), que possuem uma lista de materiais disponíveis aos projetistas e, dentre eles alguns compósitos termofixos, que podem ser selecionados e empregados em elementos no uso do próprio *software*. O Archicad, em sua versão 24, fornece alguns dados sobre esses materiais, como densidade, condutividade térmica e energia embutida. Já o Revit, em sua versão 2023, fornece dados como densidade, coeficiente de dilatação e porosidade. Entretanto, esses dados são genéricos, não sendo relativos a um compósito com matriz e fibras específicas. No caso do Archicad, se os materiais listados não atenderem o usuário, ele poderá criar um novo material e inserir os dados de que dispõe a respeito desse material, inclusive designando para ele novas propriedades como resistência à tração e absorção de água.

Também se encontrou *softwares* como "The Laminator" e "Composite Star", direcionados ao cálculo mecânico dos compósitos – geralmente realizado por engenheiros –, como o MECH-Gcomp, mencionado no Quadro 1. Tais softwares abordam um tema da área dos compósitos no qual arquitetos, *designers* e mesmo pequenos fabricantes de peças em compósito geralmente não atuam, sendo de difícil uso por esses e outros profissionais que não dominam conceitos da engenharia de materiais.

Por fim, foram encontrados alguns *softwares* e ferramentas simples de fabricantes de materiais para compósitos, que auxiliam o profissional a estimar a densidade do compósito, a espessura e o peso do laminado, e a quantidade de matriz e fibra necessária para sua produção, sendo eles os de número 3, 4 e 5 do Quadro 1. Outros fabricantes também fornecem ferramentas similares a essas, como a Toray Advanced Composites e a Composyst GmbH. Entretanto, há outras propriedades relevantes dos compósitos não estimadas por elas, o que evidencia a necessidade de uma ferramenta que cumpra esse papel.

3. METODOLOGIA

Baseando-se na revisão bibliográfica, no público-alvo da ferramenta – arquitetos, *designers*, pequenos fabricantes de materiais compósitos e profissionais com baixo conhecimento teórico sobre o tema – e em suas necessidades ao projetarem e produzirem peças e componentes construtivos, foram selecionadas as propriedades dos compósitos a serem estimadas e apresentadas aos usuários da ferramenta. No passo seguinte, a partir de dados e informações obtidos na literatura, definiu-se o método de cálculo dessas propriedades. Posteriormente, a ferramenta foi desenvolvida em forma de planilha tendo como base o *software* Microsoft Excel 2019, visto ser um aplicativo amplamente conhecido e comumente utilizado pelo público-alvo previsto inicialmente. Finalmente, para validar a ferramenta proposta, foram feitos testes simulando seu uso, sendo também criados alguns compósitos e peças para a verificação da adequabilidade e confiabilidade da ferramenta proposta. Considerando ainda a necessária

agilidade e facilidade de uso da ferramenta, foram feitos os ajustes e aprimoramentos de acordo com os resultados obtidos nos testes da etapa anterior.

3.1 Público-alvo e Propriedades dos Compósitos

Conforme comentado anteriormente, a definição do público-alvo levou em consideração o direcionamento das ferramentas e *softwares* existentes, buscando-se atender a um público pouco contemplado atualmente, ou seja, arquitetos, *designers* e pequenos fabricantes de peças em compósito que possuem pouca familiaridade com o tema, destacando-se, no entanto, que algum conhecimento sobre o assunto é necessário. A partir da definição do público-alvo foram selecionadas as propriedades dos compósitos termofixos consideradas relevantes para as suas atividades profissionais e para o desenvolvimento de peças e componentes construtivos, também sendo inseridas na ferramenta propriedades relacionadas à sustentabilidade ambiental (Quadro 2), tendo em vista a relevância do tema atualmente, inclusive sob o aspecto comercial.

Quadro 2: Propriedades englobadas pela ferramenta proposta e a relevância de cada uma para o desenvolvimento de projetos por arquitetos, *designers* e demais profissionais.

Propriedade	Relevância
Densidade	Cálculo do peso da peça e do consumo e custo de material
Custo/kg	Viabilidade econômica do material
Origem renovável	Apelo sustentável ligado à renovação de recursos naturais
Biodegradável	Apelo sustentável ligado à redução da geração de resíduos
Espessura do laminado após a cura	Dimensionamento da peça

(Fonte: Elaborado pelos autores).

Além das propriedades listadas no Quadro 2, os materiais possuem diversas outras inerentes às áreas de conhecimento da mecânica, térmica, elétrica, ótica, etc. Dentre essas propriedades estão o módulo de elasticidade, a resistência à tração, o coeficiente de Poisson, a condutibilidade térmica, a condutibilidade elétrica e a porosidade. Entretanto, o uso das informações referentes à essas propriedades, além de exigirem conhecimentos específicos, foram consideradas de menor importância frente às demandas de trabalho do público-alvo e, assim, não foram inseridas na ferramenta proposta.

3.2 Método de Cálculo das Propriedades

O método de cálculo das propriedades apresentadas no Quadro 2 foi definido com base na literatura, sendo empregado para todas elas a Regra das Misturas, que diz que uma propriedade de um material compósito formado por duas fases distintas será resultado da soma do valor das propriedades de cada fase multiplicada por suas respectivas frações volumétricas no compósito (JOHN; THOMAS, 2008; MENEGHETTI et al., 2010), conforme Equação 1.

$$P_c = P_m V_m + P_f V_f, \text{ onde } V_m + V_f = 1 \quad (1)$$

Sendo P_c a propriedade do compósito que se deseja estimar, P_m e P_f as propriedades correspondentes da matriz e da fibra, respectivamente, e V_m e V_f as frações volumétricas de matriz e fibras previstas para o compósito, respectivamente (JOHN; THOMAS, 2008).

Por meio da Regra das Misturas, a densidade e o custo/kg do compósito são calculados a partir das densidades e dos custos/kg da matriz e do reforço selecionados pelo usuário da ferramenta, sendo as densidades retiradas da literatura ou de fichas técnicas de fabricantes. No caso do preço/kg, os valores inseridos na ferramenta são referentes aos respectivos fornecedores ou fabricantes (explicitados na ferramenta) da resina ou do reforço e não incluem frete. Ressalta-se que o preço/kg pode variar dependendo do fornecedor ou fabricante, de promoções, da quantidade a ser comprada, da escassez do item no mercado no momento da aquisição, entre outros fatores.

As propriedades "Origem renovável" e "Biodegradável" são baseadas na quantidade, em massa, de material de origem vegetal presente na matriz e na fibra selecionadas pelo usuário. As fibras vegetais foram consideradas 100% renováveis e biodegradáveis, enquanto as sintéticas (vidro, aramida e carbono) 0%. Já a quantidade de matéria-prima de origem vegetal empregada na fabricação das resinas poliméricas foi obtida da literatura e de fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes, podendo variar consideravelmente, por exemplo: epóxi Super SAP® CLR (21-30%) (DOMINGUEZ, 2016), epóxi SR Greenpoxy 56® (50-58%) e endurecedor SD Surf Clear® (0%) (THIAGAMANI et al., 2019), poliéster insaturado Biopoli® BP 290 (0-20%) (BEZERRA, 2014), e poliuretano Imperveg® UG 132 (% não relatado) (MERLINI, 2011). Resinas de origem sintética foram consideradas com massa 0% renovável e biodegradável. A partir desses dados o percentual de material de origem renovável e biodegradável presente no compósito é calculado a partir da Regra das Misturas.

A espessura do laminado após a cura é calculada por meio da Equação 2, derivada da Regra das Misturas:

$$t_l = \frac{W_w N}{1000 \rho_f \rho_m} \times \left[\frac{\rho_f}{M_f} - (\rho_f - \rho_m)\right] \quad (2)$$

Sendo t_l a espessura do laminado em milímetros, W_w a gramatura do tecido ou manta de reforço em g/m², N o número de lâminas no laminado, ρ_f a densidade da fibra em g/cm³, ρ_m a densidade da matriz em g/cm³, e M_f a fração mássica de fibras prevista para o compósito.

É importante ressaltar que a Regra das Misturas considera que no corpo do compósito somente existem a matriz e as fibras, isto é, não há bolhas ou vazios em seu volume (MAHJOUB et al., 2014). Essa é uma situação idealizada, tendo em vista que mesmo processos de moldagem sofisticados não conseguem eliminar totalmente os vazios ou bolhas do material (KURUVILLA et al., 2021; MONTICELI et al., 2019; RODRIGUES; SOUZA; FUJIYAMA, 2015). Assim, a Regra das Misturas pode superestimar suas propriedades, uma vez que considera que não há falhas em sua estrutura (VENKATESHWARAN; ELAYAPERUMAL; SATHIYA, 2012). Como exemplo, a densidade teórica de um compósito, calculada por meio da Regra das Misturas, pode ser superior à sua densidade real, medida experimentalmente após a moldagem do compósito (ALI et al., 2020). Entretanto, mesmo com limitações, esse modelo matemático consegue estimar com razoável acurácia algumas propriedades dos compósitos termofixos (KU et al., 2011; MARROT et al., 2014; MOSIEWICKI et al., 2012).

3.3 Testes e Simulação de Uso

Para testar inicialmente o funcionamento da ferramenta, foi simulada nela a criação de alguns compósitos, laminados e peças fictícias. Durante esse processo, verificou-se as estimativas apresentadas e as funcionalidades propostas para a ferramenta, observando-se a necessidade de ajustes nos cálculos, e de aprimoramentos ou simplificação de sua estrutura. Após isso, foram feitas as modificações necessárias.

Posteriormente, a ferramenta foi novamente testada por meio da criação de novos compósitos e laminados e de sua aplicação em um projeto arquitetônico de um abrigo em ponto

de ônibus (Figura 1), a fim de se calcular o quantitativo de matriz polimérica, de fibras reforçadoras, seu custo e o peso final das peças do abrigo. Algumas das peças do projeto foram agrupadas em uma única para simplificar a simulação e facilitar o entendimento da ferramenta. Além disso, considerou-se as peças do projeto formadas somente por lâminas, isto é, sem material de núcleo, como chapas de poliestireno expandido ou chapas colmeia (*honeycomb*).

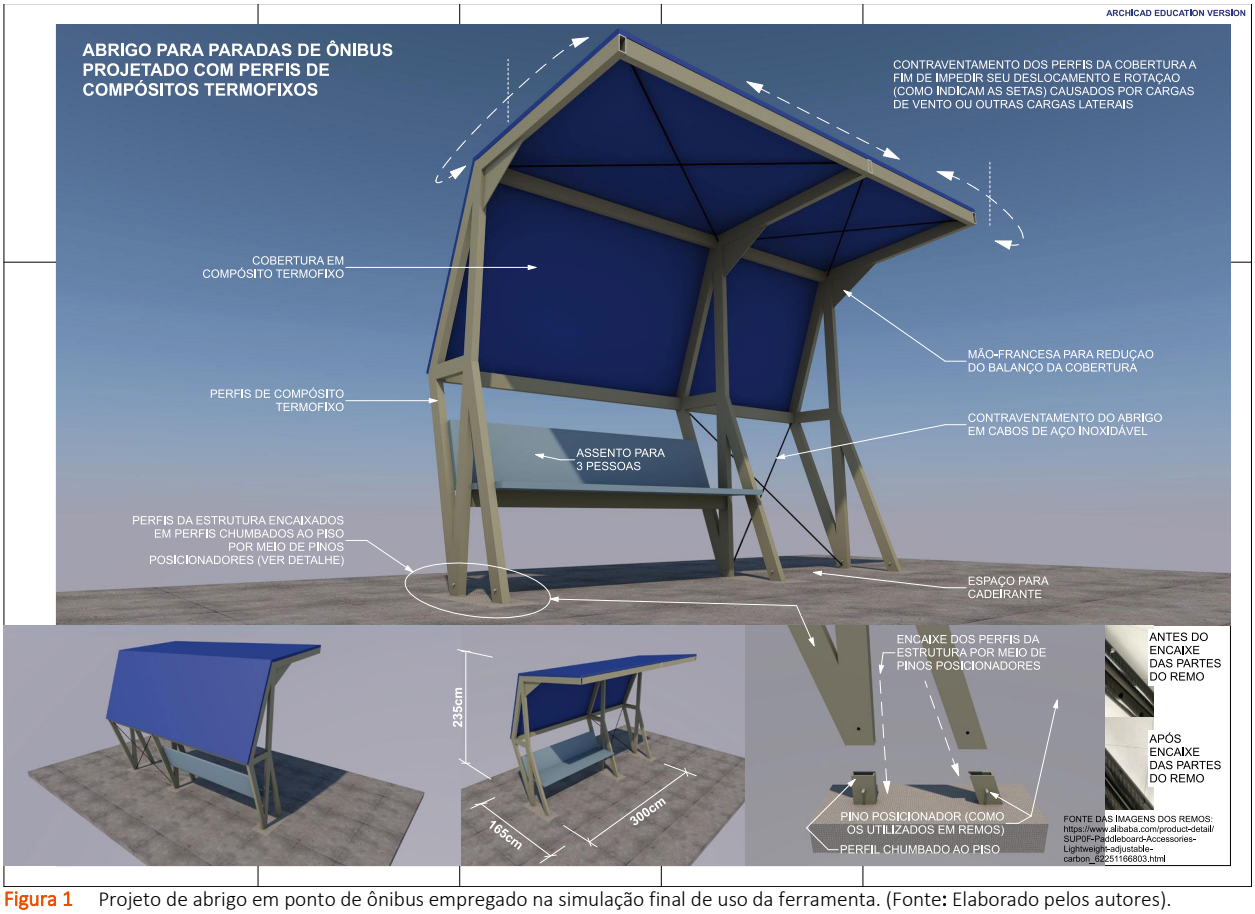


Figura 1 Projeto de abrigo em ponto de ônibus empregado na simulação final de uso da ferramenta. (Fonte: Elaborado pelos autores).

4. RESULTADOS

A seguir, a ferramenta desenvolvida e suas funcionalidades são apresentadas e, ao fim dos Resultados, são apresentados os problemas encontrados e as soluções adotadas após a realização dos testes e da simulação final de uso da ferramenta.

4.1 Ferramenta Computacional

A estrutura da ferramenta e seu modo de funcionamento são explicados abaixo.

4.1.1 Tela inicial da ferramenta

Ao ingressar na ferramenta o usuário é direcionado para a tela inicial (Figura 2), a partir da qual ele pode acessar as abas referentes a:

1. matrizes ou fibras já cadastradas na ferramenta, visualizando as características de cada uma, e cadastrar novas matrizes e fibras, inserindo seus dados;
2. criação de compósitos, visualizando as estimativas de suas propriedades a partir da seleção de uma matriz e uma fibra de sua preferência;
3. criação de laminados, visualizando sua espessura final após a cura a partir da seleção de um compósito criado;
4. cadastro de peças, especificando para elas um laminado criado por ele e informando a área superficial de cada uma; e
5. cálculo de peças, visualizando o volume e a massa finais das peças, o consumo de resina e de fibra paras elas, os percentuais de sua massa que são de origem renovável ou biodegradável e os custos de resina, de fibra e o custo total de material (resina + fibra) da peça.



Figura 2 Tela inicial da ferramenta. (Fonte: Elaborado pelos autores)

Os campos das abas Matriz e Reforço permitem a edição pelo usuário. As abas Compósito, Laminado e Cadastro de Peças possuem alguns campos com fundo amarelo, os únicos que os usuários podem editar, sendo que, ao clicar em algum deles, é mostrada ao usuário uma mensagem informando o modo como o respectivo campo deve ser preenchido (Figura

3). Caso o usuário insira dados não permitidos para aquele campo, a ferramenta exibe uma mensagem de erro e solicita que o usuário tente mais uma vez, informando novamente os valores aceitos para o respectivo campo (Figura 4). Todos os demais campos são bloqueados e permitem apenas a visualização dos dados. Por fim, a aba Cálculo de Peças é exclusiva para a visualização dos dados. Ao passar o ponteiro do mouse sobre os termos existentes nos cabeçalhos das abas, são mostradas ao usuário as explicações sobre cada um, de modo a facilitar o uso da ferramenta mesmo por aqueles com pouco conhecimento sobre o tema (Figura 5). A partir de cada aba o usuário pode acessar as demais e criar ou excluir matrizes, reforços, compósitos, laminados e peças, existindo nelas um menu de opções similar ao mostrado na Figura 6.

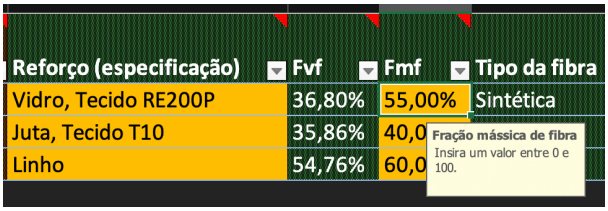


Figura 3: Mensagem da ferramenta informando ao usuário como preencher os campos em amarelo. Nesse caso, um exemplo referente à coluna "Fmf" (fração mássica de fibra). (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 4: Exemplo de mensagem de erro exibida após simulação de inserção incorreta de dados na coluna "Compósito (Código)". (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 5: Explicação exibida na ferramenta. Nesse caso, um exemplo sobre o termo "Massa específica". (Fonte: Elaborado pelos autores).



Figura 6: Menu de opções da aba Compósito. Nas demais abas há menus similares. (Fonte: Elaborado pelos autores).

4.1.2 Abas referentes a matrizes e reforços

Nas abas referentes a matrizes e reforços, o usuário visualiza as características de cada um e pode cadastrar novos materiais, inserindo os dados solicitados pela ferramenta, isto é, aqueles listados no Quadro 2. Essas informações são geralmente fornecidas em fichas técnicas pelos fabricantes ou encontradas em publicações científicas. As células dessas abas são desbloqueadas para permitir que o usuário edite dados como o custo/kg do material, atualizando-as sempre que necessário. Nessas abas são apresentadas informações referentes à cor e à transparência das matrizes e das fibras, de modo a fornecer aos profissionais, como arquitetos e *designers*, dados sobre as características visuais dos materiais que pretendem empregar em suas peças (Figura 7).

Na Figura 7 é possível visualizar a coluna "Tipo", que classifica as matrizes e os reforços como sintéticas ou naturais (vegetais). Foi considerada vegetal a matriz com qualquer percentual de origem vegetal em sua composição, não significando que é totalmente vegetal, como pode ser observado na coluna "Origem renovável", que indica o percentual em massa da matriz que possui origem renovável: duas das seis matrizes cadastradas são classificadas como naturais, sendo seus percentuais de origem renovável iguais a 28 e 41%.

4.1.3 Aba para criação de compósitos

Na aba "Compósito" o usuário deve selecionar uma matriz termofixa, um reforço e inserir o valor da fração mássica de fibras (Fmf) que deseja para o compósito. Esses campos são os com fundo amarelo mostrados na Figura 8, e que permitem a inserção de dados pelo usuário. Assim, baseando-se nas informações inseridas pelo usuário nos campos amarelos, a ferramenta estimará e mostrará as propriedades apresentadas no Quadro 2 do compósito resultante e suas frações volumétricas de resina e fibra. O usuário pode criar ou excluir quantos compósitos quiser, ficando registrados na ferramenta os que restaram.

Adotou-se a fração mássica para a entrada de dados pelo usuário (e não a fração volumétrica) devido à maior facilidade de entendimento do conceito e de determinação pelo arquiteto, *designer* e demais profissionais, tendo em vista que, caso necessário, apenas com uma balança é possível determinar a variável. A partir da fração mássica desejada pelo usuário, as frações volumétricas são calculadas e, com base nestas, as propriedades do compósito são estimadas.

Para o teste final, foram criados 3 compósitos diferentes para a simulação e avaliação da funcionalidade da ferramenta proposta (Figura 8).

4.1.4 Aba para criação de laminados

Na aba "Laminado" os compósitos criados são listados e apresentados para que o usuário selecione aquele que pretende empregar na criação de um determinado laminado. Nessa aba, também deverá ser informada a gramatura do tecido ou manta que se pretende utilizar na laminação e quantas laminações serão feitas para o laminado final. Após isso, a ferramenta estimará a espessura final do laminado após a cura (Figura 9). Esse dado é empregado posteriormente pela ferramenta para estimar o volume e a massa de material necessário para compor determinada peça criada pelo usuário. Além disso, conhecendo o valor da espessura do laminado, o usuário já pode identificar se ela está adequada, maior ou menor que o desejado e, com isso, realizar alterações na quantidade de laminações, na gramatura do tecido ou manta, ou mesmo selecionar outro compósito para a laminação. A aba "Laminado" também permite a criação e exclusão de quantos laminados o usuário desejar.

Dos 3 compósitos criados gerou-se 4 laminados. Assim, foram empregados um mesmo compósito para 2 laminados diferentes, sendo a diferenciação entre estes devida ao número de laminações e, logo, à sua espessura (Figura 9).

Matriz	Tipo	Referência	Massa específica (g/cm³)	Custo (R$/kg)	Origem renovável	Biodegradável	Cor	Transparência	Observação
Epóxi 2001 e Endurecedor 3154	Sin	https://www.redelease.com.br/catalog/pr	1,11	131,32	0%	0%	Incolor	Transparente	Proporção Resina/Endureo Endurecedor. Embalagem de endurecedor 3154). Fre
Poliéster Arazyn 1.0 # 00	Sin	https://www.redelease.com.br/resinacristaldealtaviscosidadelataoubombonas203kg.html; ARAASHLAND, 2011	1,21	46,79	0%	0%	Incolor	Transparente	Proporção Resina/Catalisa Endurecedor. Embalagem 00 + 0,3kg de catalisador B
Poliéster Arazyn 1.0 # 41	Sin	https://www.redelease.com.br/resinacristalcomprotecaouv5100kg.html; ARAASHLAND, 2011	1,18	49,16	0%	0%	Incolor	Transparente	Proporção Resina/Catalisa Endurecedor. Embalagem 0,1kg de catalisador Butan
Poliuretano CST 47	Sin	https://www.redelease.com.br/resina-poliuretano-cst-47-900-g.html.html	1,20	199,89	0%	0%	Bege	Não relatada	Proporção Resina/Endureo Endurecedor. Embalagem 0,4kg de endurecedor CST
Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast	Nat	https://entropyresins.com/product/one-high-biobased-laminating-epoxy/	1,09	109,44	28%	0%	Amarela	Não relatada	Proporção Resina/Endureo Endurecedor. Embalagem 18,61kg
Epóxi SR Greenpoxy 56 e Endurecedor SD Surf Clear	Nat	http://sicomin.com/datasheets/product-pdf1172.pdf	1,17	185,06	41%	0%	Incolor	Transparente	Proporç Endureo 56 + 1,8

A

Reforço	Tipo	Referência (propriedades físicas)	Tratamento	Massa específica (g/cm³)	Custo (R$/kg)	Origem renovável	Biodegradável	Cor	Referência (preço
Aramida, Tecido K200P	Sin	MAHARANA et al., 2020		1,44	1613,6	0%	0%	Amarela	https://www.e-composites.com.br/tec
Bananeira	Nat	VENKATESHWARAN; ELAYAPERUMAL; SATHIYA, 2012		1,35	28,19	100%	100%	Bege	
Cânhamo	Nat	MAINO; JANSZEN; DI LANDRO, 2019		1,45	69,46	100%	100%	Bege	https://www.casamimosa.c
Carbono, Tecido RC200P	Sin	MENEGHETTI et al., 2010		1,40	2090,88	0%	0%	Preta	https://www.e-composites.com.br/tec
Coco	Nat	FARIA et al., 2020		1,69	42,50	100%	100%	Bege	https://www.cobasi.com.br/fibra-de-c
Folha do Abacaxi	Nat	NEGRÃO; PINTO; SILVA, 2020		1,40	27,23	100%	100%	Bege	
Juta	Nat	BOOPALAN; NIRANJANAA; UMAPATHY, 2013		1,30	30,00	100%	100%	Bege	
Juta, Tecido T10	Nat	BOOPALAN; NIRANJANAA; UMAPATHY, 2013		1,30	57,12	100%	100%	Bege	
Kenaf	Nat	YOUSIF et al., 2012		0,62	11,24	100%	100%	Bege	https://www.indiamart.com/prod
Linho	Nat	MEENAKSHI; KRISHNAMOORTHY, 2018		1,45	16,86	100%	100%	Bege	https://www.indiamart.com/prod
Rami	Nat	SOUZA, 2013		1,59	43,72	100%	100%	Bege	
Sisal	Nat	VENKATESHWARAN; ELAYAPERUMAL; SATHIYA, 2012		1,45	23,90	100%	100%	Bege	
Vidro, Tecido RE200P	Sin	MEENAKSHI; KRISHNAMOORTHY, 2018		2,54	80,64	0%	0%	Branca	https://www.e-composites.com.br

B

Figura 7: Vista parcial das abas referentes às matrizes (A) e às fibras (B). (Fonte: Elaborado pelos autores).

Código	Matriz (especificação)	Fvm	Fmm	Tipo da matriz	Reforço (especificação)	Fvf	Fmf	Tipo da fibra	Co
Compósito 01	Poliéster Arazyn 1.0 # 00	63,20%	45,00%	Sintética	Vidro, Tecido RE200P	36,80%	55,00%	Sintética	Po
Compósito 02	Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast	64,14%	60,00%	Vegetal	Juta, Tecido T10	35,86%	40,00%	Vegetal	Epó
Compósito 03	Epóxi SR Greenpoxy 56 e Endurecedor SD Surf Clear	5,24%	40,00%	Vegetal	Linho	54,76%	60,00%	Vegetal	Epó

Epóxi 2001 e Endurecedor 3154
Poliéster Arazyn 1.0 # 00
Poliéster Arazyn 1.0 # 41
Poliuretano CST 47
Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast
Epóxi SR Greenpoxy 56 e Endurecedor SD Surf Clear

A

Compósito resultante	Tipo do compósito	Massa específica (g/cm³)	Custo (R$/kg)	Origem renovável	Biodegradável
Poliéster Arazyn 1.0 # 00 63,2% + Vidro, Tecido RE200P 36,8%	Resina Sintética + Fibra Sintética	1,699440	59,25	0,00%	0,00%
Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast 64,14% + Juta, Tecido T10 35,86%	Resina Vegetal + Fibra Vegetal	1,165306	90,68	56,80%	40,00%
Epóxi SR Greenpoxy 56 e Endurecedor SD Surf Clear 45,24% + Linho 54,76%	Resina Vegetal + Fibra Vegetal	1,323328	92,95	76,40%	60,00%

B

Figura 8: Vista parcial da aba para criação de compósitos e compósitos 01 a 03 simulados. A imagem A mostra a lista de resinas disponíveis para a escolha do usuário. A imagem B é continuação da A. (Fonte: Elaborado pelos autores).

Código	Compósito (Código)	Compósito (Especificação)	Gramatura do reforço (g/m²)	Laminações (un.)	Espessura (mm)
Laminado 01	Compósito 01	Poliéster Arazyn 1.0 # 00 63,2% + Vidro, Tecido RE200P 36,8%	200	10	2,14
Laminado 02	Compósito 01	Poliéster Arazyn 1.0 # 00 63,2% + Vidro, Tecido RE200P 36,8%	200	30	6,42
Laminado 03	Compósito 02	Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast 64,14% + Juta, Tecido T10 35,86%	350	12	9,01
Laminado 04	Compósito 03	Epóxi SR Greenpoxy 56 e Endurecedor SD Surf Clear 45,24% + Linho 54,76%	300	50	18,89

Figura 9: Aba para a criação de laminados, com exemplos das simulações realizadas. (Fonte: Elaborado pelos autores).

4.1.5 Aba para o cadastro de peças

Nesta aba, denominada "Cad_Pecas", o usuário cria quantas peças desejar, inserindo o nome da peça, uma imagem dela (caso queira), seleciona para ela um dos laminados que criou na aba "Laminado" e insere a área superficial da peça (Figura 10), podendo esta ser calculada manualmente pelo usuário ou extraída de *softwares* de projeto, como o Archicad, o Revit ou o Rhino. Com base na área superficial das peças e na espessura do laminado selecionado para elas, a ferramenta calcula o volume de compósito de cada uma.

Foram simuladas 5 peças, sendo essas as que compõem o projeto arquitetônico mostrado na Figura 1. Foi inserida uma

figura para cada peça a fim de facilitar sua identificação (Figura 10).

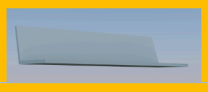
Código	Nome	Imagem	Laminado	Compósito (Especificação)	Área superficial (cm²)	Volume (cm³)
Peça 01	Estrutura vertical		Laminado 02	Poliéster Arazyn 1.0 # 00 63,2% + Vidro, Tecido RE200P 36,8%	18008,00	11561,14
Peça 02	Barra horizontal longa		Laminado 03	Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast 64,14% + Juta, Tecido T10 35,86%	7104,00	6400,71
Peça 03	Cobertura		Laminado 01	Poliéster Arazyn 1.0 # 00 63,2% + Vidro, Tecido RE200P 36,8%	73568,00	15743,56
Peça 04	Banco		Laminado 04	Epóxi SR Greenpoxy 56 e Endurecedor SD Surf Clear 45,24% + Linho 54,76%	14608,00	27594,52
Peça 05	Barra horizontal curta		Laminado 03	Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast 64,14% + Juta, Tecido T10 35,86%	4224,00	3805,83

Figura 10: Aba para cadastro de peças e demonstração das 5 peças simuladas. (Fonte: Elaborado pelos autores).

4.1.6 Aba de cálculo de peças

As peças cadastradas na aba "Cadastro de Pecas" são listadas na aba "Cálculo de Pecas", sendo estimados seu volume e massa finais, consumo de resina e de fibra, percentuais de sua massa que são de origem renovável ou biodegradável, e os custos de resina, de fibra e o custo total de material (resina + fibra). Nesta aba o usuário não necessita inserir nenhum dado, sendo ela utilizada exclusivamente para a visualização das características citadas anteriormente. No cabeçalho da planilha da Figura 11, as letras maiúsculas "V", "M" e "C" tratam de volume, massa e custo da peça, respectivamente, enquanto as letras minúsculas "r", "b", "m", "f" e "t" nas colunas fazem referência à material renovável, material biodegradável, matriz, fibras (reforço) e ao total de material (matriz + reforço) na peça, nesta ordem. Assim, "Mrm" significa massa de matriz de origem renovável empregada na peça. Ao usar a ferramenta, o significado dessas siglas e uma breve explicação são apresentadas ao usuário quando ele posiciona o mouse do computador sobre elas.

Nessa aba é possível visualizar qual das peças é a mais pesada, a com maior consumo de matriz ou de fibra, a de maior custo (em relação ao valor do material) e a com maior conteúdo de origem renovável ou biodegradável. Essas informações são mostradas na Figura 11 nas colunas "M (g)" (massa da peça em gramas), "Mm (g)" (massa de matriz na peça em gramas), "Mf (g)" (massa de fibras na peça em gramas), "Ct (R$)" (custo total de compósito para a peça em reais), "Mrt (g)" (massa total em gramas de material de origem renovável na peça) e "Mbt" (massa total em gramas de material biodegradável na peça).

Código	Nome	Laminado	Compósito (Código)	Compósito (Especificação)	V (cm³)	M (g)	Vm (cm³)
Peça 01	Estrutura vertical	Laminado 02	Compósito 01	Poliéster Arazyn 1.0 # 00 63,2% + Vidro, Tecido RE200P 36,8%	11561,14	19647,47	7306,65
Peça 02	Barra horizontal longa	Laminado 03	Compósito 02	Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast 64,14% + Juta, Tecido T10 35,86%	6400,71	7458,79	4105,42
Peça 03	Cobertura	Laminado 01	Compósito 01	Poliéster Arazyn 1.0 # 00 63,2% + Vidro, Tecido RE200P 36,8%	15743,56	26755,24	9949,93
Peça 04	Banco	Laminado 04	Compósito 03	Epóxi SR Greenpoxy 56 e Endurecedor SD Surf Clear 45,24% + Linho 54,76%	27594,52	36516,61	1248
Peça 05	Barra horizontal curta	Laminado 03	Compósito 02	Epóxi ONE e Endurecedor ONF Fast 64,14% + Juta, Tecido T10 35,86%	3805,83	4434,96	2441

A

Vf (cm³)	Vt (cm³)	Mm (g)	Mf (g)	Mt (g)	Mrm (g)	Mrf (g)	Mrt (g)	Mbm (g)	Mbf (g)	Mbt (g)	Cm (R$)	Cf (R$)	Ct (R$)
4254,50	11561,15	8841,05	10806,43	19647,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	413,68	871,44	1285,12
2295,30	6400,72	4474,91	2983,89	7458,80	1252,98	2983,89	4236,87	0,00	2983,89	2983,89	489,74	170,44	660,18
5793,64	15743,57	12039,42	14715,85	26755,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	563,33	1186,69	1750,02
15110,76	27594,53	14606,02	21910,61	36516,63	5988,47	21910,61	27899,08	0,00	21910,61	21910,61	2703,00	369,42	3072,42
1364,78	3805,84	2660,76	1774,22	4434,98	745,02	1774,22	2519,24	0,00	1774,22	1774,22	291,20	101,35	392,55

B

Figura 11: Aba de cálculo das peças e características das 5 peças simuladas. A imagem B é continuação da A. (Fonte: Elaborado pelos autores).

4.2 Testes e Simulação Final de Uso

Nos testes iniciais, verificou-se a necessidade de pequenos ajustes devido a discrepâncias nas estimativas ocorridos por arredondamento de alguns valores durante os cálculos. Com isso, aumentou-se a quantidade de casas decimais dos valores empregados nos cálculos, o que sanou o problema. Ainda, algumas colunas que reapresentavam ao usuário, em diferentes abas, informações da matriz e do reforço selecionados por ele foram retiradas, a fim de deixa-las sucintas e apenas com informações novas. Assim, caso o usuário deseje rever alguma característica da matriz ou reforço escolhido por

ele para um compósito, ele deverá acessar a aba Matriz ou Reforço, respectivamente.

Posteriormente, no teste final com as peças que compõem o ponto de ônibus, a ferramenta funcionou conforme o previsto.

4.3 Nome e Logotipo da Ferramenta

A ferramenta computacional desenvolvida foi nomeada "Estimat", resultado da junção entre as palavras "Estimativa" e "Materiais".

O logotipo criado para ela é mostrado na Figura 12. A forma irregular das linhas e as cores de tom marrom e levemente avermelhado empregadas em seu fundo foram baseadas na aparência dos tecidos e mantas feitos com fibras vegetais, como linho, sisal, juta e coco, empregados como reforço em compósitos termofixos.

Buscando diferenciar a forma das letras que formam o nome da ferramenta e o fundo do logotipo, as letras seguiram traços retos, sendo definidas para elas as cores preta e amarela, fazendo referência às fibras de carbono e de aramida, respectivamente, fibras sintéticas também comumente empregadas como reforço em compósitos. A forma e as cores das letras também foram pensadas para destacá-las, de modo a aparentarem estar posicionadas sobre o fundo, facilitando sua visualização e leitura.

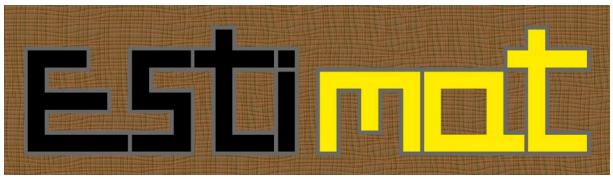


Figura 12: Logotipo criado para a ferramenta computacional. (Fonte: Elaborado pelos autores).

5. DISCUSSÃO

A ferramenta foi projetada para ser a mais simples e intuitiva possível – embora exija um conhecimento mínimo do usuário sobre o assunto – visando atender o público-alvo inicialmente previsto, contando com explicações sobre os termos e conceitos físicos utilizados e requerendo do usuário poucos dados de entrada, sendo esses apenas:

1. matriz polimérica, que ele escolherá dentre as matrizes cadastradas ou criará uma nova, cadastrando-a com dados fornecidos pelo fabricante ou da literatura científica;
2. fibras de reforço, que ele escolherá dentre os reforços cadastrados ou criará um novo, cadastrando-o com dados fornecidos pelo fabricante ou da literatura científica;
3. fração mássica de fibras, sendo essa a razão entre a massa de fibras desejada para o compósito e a massa total desejada para o compósito, que deve ser planejada por ele;
4. gramatura do reforço, que deve ser prevista por ele ou observada na ficha técnica do fabricante, caso ele já possua um reforço que deseja empregar;
5. número de laminações, que deve ser planejada por ele, tendo em vista a espessura, o custo e uma maior ou menor resistência mecânica desejada para a peça; e
6. área superficial da peça, que deve ser calculada por ele com base na peça que pretende produzir.

Tendo em vista que aspectos como o custo e o percentual de matéria-prima biodegradável ou de origem renovável de certa matriz ou fibra podem variar devido a novas tecnologias de produção, por exemplo, e que diferentes matrizes e fibras são lançadas no mercado ou estudadas em pesquisas científicas frequentemente, torna-se importante a atualização do banco de dados da ferramenta. Para isso, ela foi projetada de forma que o usuário cadastre facilmente uma nova matriz ou fibra de seu interesse e edite as propriedades daquelas já constantes da base de dados, não necessitando que aguarde a atualização da ferramenta para alterar uma informação específica ou utilizar uma matriz ou fibra desejada. Diferentemente das ferramentas 3 a 5 do Quadro 1, cuja criação de compósitos é temporária, na ferramenta proposta os compósitos criados são cadastrados e ficam salvos, facilitando a comparação entre materiais.

Para verificar os resultados da simulação, os Compósitos 01 a 03 também foram simulados na ferramenta 3 do Quadro 1, chegando-se aos mesmos valores de densidade e de fração volumétrica de fibras e matriz (Figura 13). Do mesmo modo, a espessura dos Laminados 01 a 04 foram simuladas nas ferramentas 3 a 5 do Quadro 1, que também chegaram aos mesmos valores da ferramenta proposta, como ilustram a simulações feitas na ferramenta 5 e apresentadas na Figura 14.

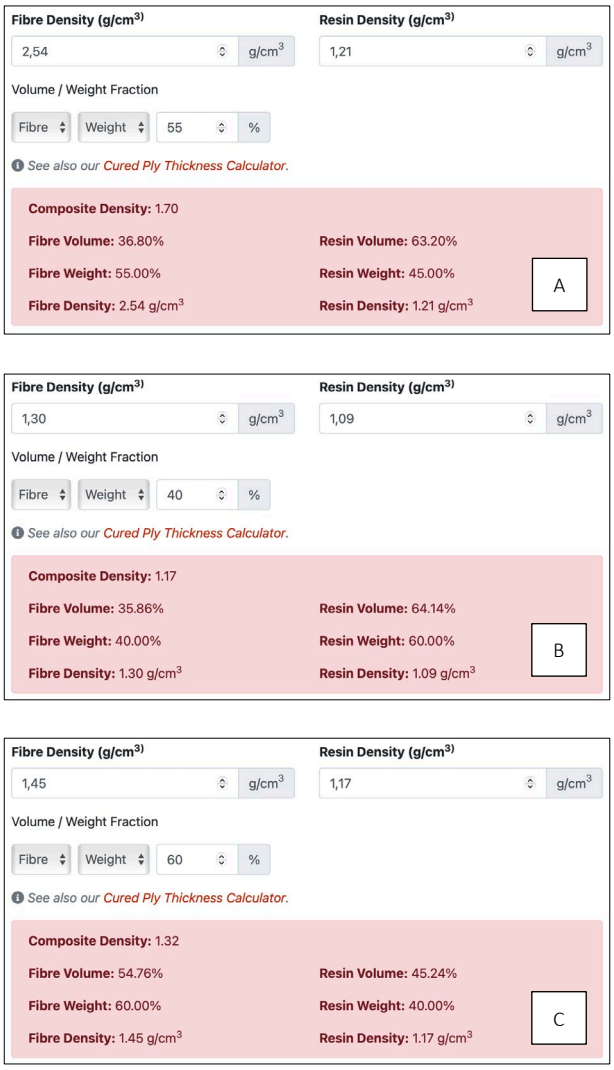


Figura 13: Simulação dos Compósitos 01 a 03 na ferramenta "*Volume-weight fraction calculator*" (imagens A a C, nesta ordem), da empresa inglesa Composites Evolution, a partir de dados de densidade das fibras e da matriz (resina) e de fração mássica de fibras fornecidos pelo usuário. Observar que os valores calculados pela ferramenta da Composites Evolution para as frações volumétricas de fibra e matriz do compósito são os mesmos apresentados na Figura 8A, relativa à ferramenta proposta. Ressalta-se que há uma pequena diferença no valor de densidade (massa específica) dos compósitos apresentado por ambas as ferramentas pois a ferramenta proposta não arredonda o valor da densidade para duas casas decimais (Figura 8B), como faz a ferramenta da

Composites Evolution no campo "*Composite Density*" (imagens A a C). (Fonte: Elaborado pelos autores).

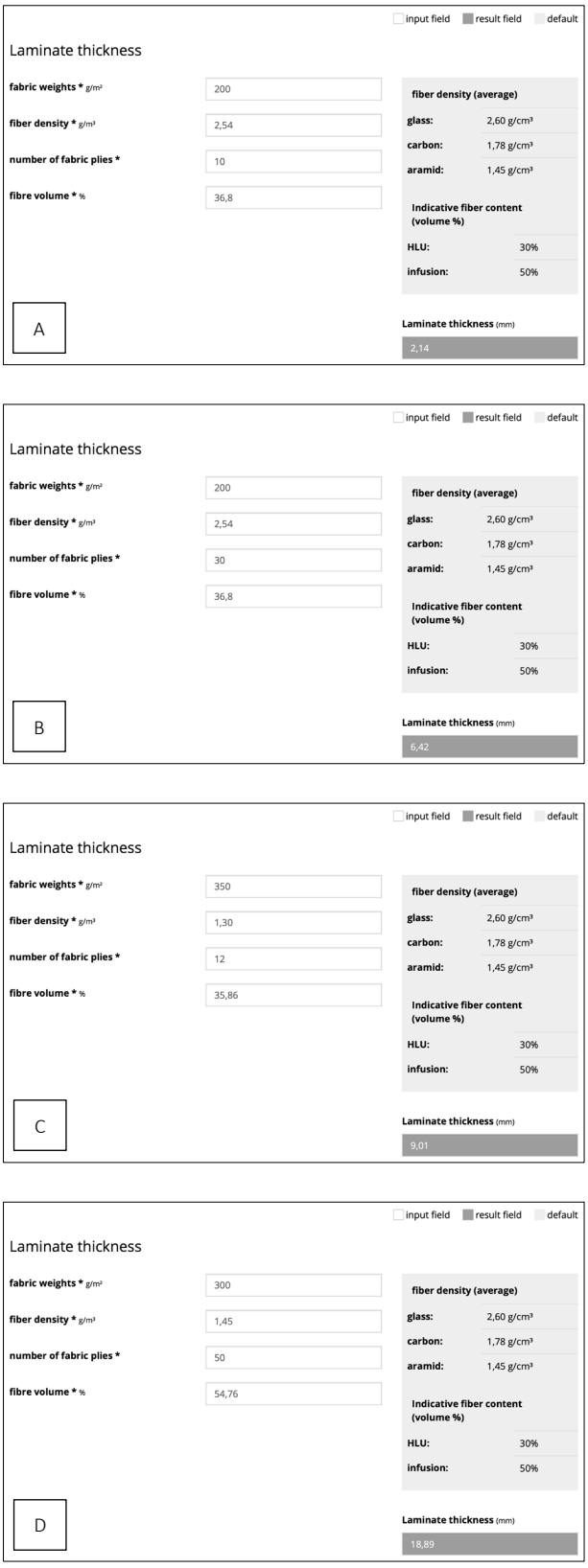


Figura 14: Simulação dos Laminados 01 a 04 na ferramenta "*Material calculator*" (imagens A a D, nesta ordem), da empresa alemã Saertex, a partir de dados fornecidos pelo usuário referentes à gramatura do reforço, densidade das fibras, número de laminações e fração volumétrica de fibras. Observar que os valores calculados pela ferramenta da Saertex para a espessura dos laminados (*Laminate thickness*) são os mesmos apresentados na Figura 9, relativa à ferramenta proposta. (Fonte: Elaborado pelos autores).

A simulação das peças do projeto da Figura 1 mostrou que a mais pesada foi a Peça 04 (Banco), com cerca de 36,5kg (ver coluna "M (g)" da Figura 11, observando que os valores estão em gramas), principalmente devido ao elevado número de laminações (em outras palavras, de material) especificadas para ele. Com massa específica próxima de 1,32g/cm³, o Compósito 03 empregado no Banco está numa posição intermediária dentre os 3 compósitos simulados (Figura 8), possuindo essa propriedade, assim, menor impacto no peso da peça. A maior quantidade de material também contribuiu para que a Peça 04 fosse a mais cara (R$ 3072,42). Porém, outro fator relevante é o custo/kg do Compósito 03 especificado para o Laminado 04, que forma o Banco. Ao observar a Figura 8, percebe-se que o Compósito 03 é o que possui o maior custo/kg (R$ 92,95/kg). Assim, não só a maior quantidade de compósito do Banco contribuiu para o seu maior custo, como também o custo/kg desse compósito.

O Compósito 03 também é o que possui, em relação à sua massa, o maior percentual de matéria-prima de origem renovável (76,40%) e biodegradável (60,00%) em sua composição (Figura 8), o que levou o Banco a ser a peça com maior massa de material renovável (cerca de 27,9kg) e biodegradável (cerca de 21,9kg), como mostram, respectivamente, as colunas "Mrt (g)" e "Mbt (g)" da Figura 11. A diferença entre esses valores ocorre em função de várias resinas que possuem matéria-prima de origem renovável e que, após sua cura (reação de polimerização), não são biodegradáveis. Nessas situações, a massa de matéria-prima biodegradável é função apenas do reforço, como é o caso dos Compósitos 02 e 03, cujo percentual de material biodegradável é equivalente à fração mássica de fibras (vegetais) no compósito (Figura 8). Para visualizar as características de uma resina ou fibra e saber se ela é ou não biodegradável, por exemplo, o usuário deve acessar a aba Matriz (Figura 7).

A peça com menor consumo, em massa, de matriz e de fibra e, logo, a peça mais leve, foi a Peça 05 (Barra horizontal curta), que emprega cerca de 2,6kg de matriz e 1,7kg de fibra (ver colunas "Mm (g)" e "Mf (g)" da Figura 11, respectivamente).

Após visualizar o resultado das simulações, caso se desejasse alterar alguma característica de uma peça, como reduzir seu peso ou custo, é possível:

1. acessar a aba "Laminado" e editar o laminado selecionado inicialmente para a peça, escolher outro laminado dentre os cadastrados ou criar um novo laminado para ela; ou
2. acessar a aba "Compósito" e editar o compósito selecionado inicialmente para o laminado especificado para a peça, escolher outro compósito para ele dentre os cadastrados ou criar, a partir do banco de matrizes e fibras cadastradas, um novo compósito para o laminado especificado para a peça.

Outro modo de usar a ferramenta proposta é como fornecedora de dados para *softwares* como o CES Edu-pack (ferramenta 2 do Quadro 1) ou da plataforma BIM, que posteriormente seriam inseridos em materiais criados nesses *softwares*. Com isso, ao se editar um componente no *software* BIM, o peso e o custo de uma peça, por exemplo, seriam automaticamente calculados nesse *software* a partir de dados de densidade e de custo/kg estimados com a ferramenta proposta. Para estimar as propriedades mecânicas dos compósitos, os usuários são incentivados a utilizar ferramentas como o MECH-Gcomp, de uso gratuito e com cálculos detalhados sobre essa categoria de propriedades. Desse modo, o usuário pode alternar entre as ferramentas para estimar diversas propriedades do compósito que pretende empregar em seu projeto.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desenvolveu-se uma ferramenta no *software* Microsoft Excel 2019 que estima, a partir da matriz e da fibra de reforço selecionada pelo usuário, a densidade, o custo/kg, o percentual de matéria-prima de origem renovável e biodegradável do compósito, a espessura de um laminado e o quantitativo de materiais de uma peça feita com esse laminado. A ferramenta funcionou corretamente durante a simulação final após apenas alguns ajustes preliminares nos cálculos devido a pequenas discrepâncias nas estimativas. Como resultado, é possível visualizar os compósitos mais densos e caros, as peças com maior quantidade de matéria-prima com conteúdo renovável, as mais pesadas, as mais baratas, entre outras características.

Tendo em vista a falta de familiaridade de arquitetos e *designers* com os compósitos termofixos e a inexistência de ferramentas sobre essa classe de materiais voltadas a eles, a pequenos fabricantes de peças em compósito e àqueles cuja produção é experimental e baseada em baixo conhecimento teórico, a ferramenta proposta pretende colaborar para aumentar a compreensão desses profissionais sobre o tema e contribuir com alguns dados quantitativos, de modo a facilitar a comparação e a seleção de materiais para seus produtos. Ela foi projetada para que poucos dados de entrada fossem requisitados aos usuários e para que esses dados fossem encontrados ou medidos facilmente pelos profissionais que estão criando as peças em compósito. Buscou-se simplificá-la – sem perda da qualidade e confiabilidade dos dados de saída –, tornando-a de fácil uso para o público-alvo definido. Observa-se que, como resultado adicional, a ferramenta também pode ser utilizada para fins didáticos, seja nos cursos de graduação em arquitetura ou *design*, por exemplo, seja em cursos específicos relacionados ao aprimoramento profissional sobre materiais.

Após a publicação dos resultados, a ferramenta será disponibilizada de modo aberto e gratuito nos *websites* do Laboratório Didático e de Pesquisa Materiais e Estruturas Arquitetônicas (LabMat) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da Universidade de São Paulo (USP) e do Laboratório de Planejamento e Projetos (LPP) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

REFERÊNCIAS

1. ACMA - AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION. Guidelines and recommended practices for fiber-reinforced-polymer (FRP) architectural products. Arlington: American Composites Manufacturers Association, 2016.
2. ALI, J. B. et al. Physico-mechanical properties of unsaturated polyester resin reinforced maize cob and jute fiber composites. Journal of Natural Fibers, p. 1–13, 9 nov. 2020.
3. BAI, J. (ED.). Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013.
4. BIRON, M. Thermosets and composites: material selection, applications, manufacturing, and cost analysis. Cambridge: Elsevier Ltd., 2014.
5. BOSQUETTI, M. et al. Analysis of the mechanical strength of polymeric composites reinforced with sisal fibers. Journal of Natural Fibers, v. 18, n. 1, p. 105–110, 2 jan. 2021.
6. CANGEMI, J. M. et al. Biodegradation of polyurethane derived from castor oil. Polímeros, v. 18, n. 3, p. 201–206, set. 2008.
7. CASSOLA, S. et al. Machine learning for polymer composites process simulation – a review. Composites Part B: Engineering, v. 246, p. 110208, nov. 2022.
8. GREENE, E. Marine composites. Annapolis: Eric Greene Associates, Inc., 1999.
9. HARRIES, K. A.; SHARMA, B. (EDS.). Nonconventional and vernacular construction materials: characterisation, properties and applications. 2. ed. Cambridge: Elsevier, 2019.
10. JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. Carbohydrate Polymers, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.
11. KU, H. et al. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. Composites Part B: Engineering, v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011.
12. KUMAR, S. et al. Synthesis and characterization of petroleum and biobased epoxy resins: a review: Petroleum and biobased epoxy resins. Polymer International, v. 67, n. 7, p. 815–839, jul. 2018.
13. KURUVILLA, J. et al. Fibre reinforced composites: constituents, compatibility, perspectives and applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021.
14. LYNN, G. Index Award Pavilions: design to improve life, 2011. Disponível em: <http://glform.com/environments/index-awards-design-to-improve-life-2011-pavilions/>. Acesso em: 27 jun. 2018a.
15. LYNN, G. RV (Room Vehicle) House Prototype. Disponível em: <http://glform.com/buildings/rv-room-vehicle-house-prototype/>. Acesso em: 27 jun. 2018b.
16. MAHJOUB, R. et al. Characteristics of continuous unidirectional kenaf fiber reinforced epoxy composites. Materials and Design, v. 64, p. 640–649, 2014.
17. MAMANPUSH, S. H. et al. Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites. Waste Management, v. 76, p. 708–714, jun. 2018.
18. MARROT, L. et al. Multi-scale study of the adhesion between flax fibers and biobased thermoset matrices. Materials & Design (1980-2015), v. 62, p. 47–56, out. 2014.
19. MCISAAC, A.; FAM, A. The effect of bio-based content in resin blends on tensile properties of FRP wet layup systems. Construction and Building Materials, v. 168, p. 328–337, abr. 2018.
20. MEENAKSHI, C. M.; KRISHNAMOORTHY, A. Preparation and mechanical characterization of flax and glass fiber reinforced polyester hybrid composite laminate by hand lay-up method. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 13, p. 26934–26940, 2018.
21. MEI, L. H.; OLIVEIRA, N. Caracterização de um compósito polimérico biodegradável utilizando Poli (ε-caprolactona) e borra de café. Polímeros, v. 27, n. spe, p. 99–109, 16 jan. 2017.
22. MENEGHETTI, L. C. et al. Resistência à fadiga de polímeros reforçados com fibras de aramida, vidro e carbono. Engenharia Estudo e Pesquisa, v. 10, n. 2, p. 15–22, 2010.
23. MIGUEL, J. C.; DIAZ, M. A. N. Fiber reinforced polymer (FRP): a new material used in façades of tall buildings. CTBUH 2015 New York Conference - Global Interchanges:

Resurgence of the Skyscraper City. Anais...Nova York: Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2015.

24. MONTEIRO, A. S. et al. Compósito de fibra de tururi: confecção e potencialidade como material sustentável. MIX Sustentável, v. 7, n. 4, p. 161–172, 23 ago. 2021.
25. MONTICELI, F. M. et al. Mechanical behavior simulation: NCF/epoxy composite processed by RTM. Polymers and Polymer Composites, v. 27, n. 2, p. 66–75, fev. 2019.
26. MOSIEWICKI, M. A. et al. Moisture dependence of the properties of composites made from tung oil based polyurethane and wood flour. Journal of Polymer Research, v. 19, n. 2, p. 9776, fev. 2012.
27. POHL, G. Textiles, polymers and composites for buildings. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010.
28. RAJENDRAN, M.; NAGARAJAN, C. KAVITHA. Experimental investigation on bio-composite using jute and banana fiber as a potential substitute of solid wood based materials. Journal of Natural Fibers, p. 1–10, 17 jan. 2021.
29. RAMESH, M. Flax (Linum usitatissimum L.) fibre reinforced polymer composite materials: a review on preparation, properties and prospects. Progress in Materials Science, v. 102, n. December 2017, p. 109–166, 2019.
30. RAY, D. Biocomposites for high-performance applications. Cambridge: Elsevier Ltd., 2017.
31. RODRIGUES, J.; SOUZA, J. A.; FUJIYAMA, R. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão. Matéria (Rio de Janeiro), v. 20, n. 4, p. 946–960, dez. 2015.
32. SABA, N. et al. Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 35, n. 6, p. 447–470, mar. 2016.
33. SILVA, I. C. R. DA; OLIVEIRA, A. K. F. DE. Ecocompósito de resina vegetal e resíduos de fibra de piaçava: Estudos de usinagem e sensorialidade para aplicações no campo do design. Design e Tecnologia, v. 11, n. 23, p. 24–37, 27 dez. 2021.
34. VENKATESHWARAN, N.; ELAYAPERUMAL, A.; SATHIYA, G. K. Prediction of tensile properties of hybrid-natural fiber composites. Composites Part B: Engineering, v. 43, n. 2, p. 793–796, 2012.