

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS - PPGCEM**

MATHEUS DOS SANTOS SALAZAR

**AVALIAÇÃO DE MATERIAIS UTILIZADOS EM COMPÓSITOS COM
ESTRUTURA SANDUÍCHE PARA APLICAÇÃO EM PRANCHAS DE SURFE**

CRICIÚMA

2026

MATHEUS DOS SANTOS SALAZAR

**AVALIAÇÃO DE MATERIAIS UTILIZADOS EM COMPÓSITOS COM
ESTRUTURA SANDUÍCHE PARA APLICAÇÃO EM PRANCHAS DE SURFE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Orientador: Prof. Dr. Matheus Vinicius Gregory
Zimmermann
Coorientadora: Profa. Dra. Daiane Romanzini

CRICIÚMA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S161a Salazar, Matheus dos Santos.

Avaliação de materiais utilizados em compósitos com estrutura sanduíche para aplicação em pranchas de surfe / Matheus dos Santos Salazar. - 2026.
73 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2026.

Orientação: Matheus Vinicius Gregory Zimmermann.
Coorientação: Daiane Romanzini.

1. Materiais compostos. 2. Prancha de surfe. 3. Estrutura sanduíche. 3. Polímeros. I. Título.

CDD 23. ed. 620.118

Matheus dos Santos Salazar

Avaliação de materiais utilizados em compósitos com estrutura sanduíche para aplicação em pranchas de surfe

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 25 de fevereiro de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Junca

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Ademir José Zattera

Universidade de Caxias do Sul (UCS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC – CP 48/2021 MESTRADO), pelo apoio financeiro concedido e pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa, tornando possível a realização deste trabalho e contribuindo significativamente para minha formação acadêmica e profissional.

À Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) e ao Grupo de Pesquisa CEPOL, pela estrutura oferecida, pelo ambiente acadêmico estimulante e pelas oportunidades de crescimento proporcionadas ao longo desta trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Matheus Zimmerman, pela orientação segura, pela confiança depositada em meu trabalho e pelas contribuições técnicas essenciais ao longo desta jornada acadêmica.

À minha mãe, Daniela Salazar, e ao meu pai, Paulo Salazar, por todo amor, apoio incondicional e pelos valores que sempre me transmitiram, sendo minha base e maior inspiração.

Ao meu irmão, Dimitry Salazar, pela parceria e incentivo constante.

Aos meus amigos, pelo incentivo, apoio e companheirismo durante todas as etapas deste percurso.

E, de maneira muito especial, à minha namorada, Maiara Werle, pelo companheirismo, paciência e apoio nos momentos mais desafiadores, compartilhando comigo cada conquista e cada aprendizado ao longo dessa caminhada.

RESUMO

Compósitos estruturais do tipo sanduíche são amplamente empregados em aplicações que exigem elevada rigidez específica e baixo peso, características essenciais para pranchas de surfe. Entretanto, a seleção de materiais nesse setor ainda ocorre predominantemente de forma empírica, com limitada correlação entre parâmetros físico-mecânicos e desempenho estrutural. Este trabalho propõe uma abordagem inédita ao avaliar comparativamente diferentes combinações de fibras, matrizes e núcleos estruturais, visando estabelecer critérios técnicos para otimização de pranchas de surfe. Foram analisadas fibras sintéticas, híbridas e vegetais associadas a matrizes epoxídica e poliéster, bem como núcleos de PU, EPS, XPS, PET e PVC. Compósitos com fibras sintéticas apresentaram resistência à tração significativamente superior, alcançando até 283 MPa (carbono/epóxi), enquanto compósitos vegetais variaram entre 14 e 42 MPa. Para fibras naturais, observou-se melhora estatisticamente significativa na resistência quando associadas à matriz epoxídica ($p < 0,05$), indicando melhor interação interfacial. Entre os núcleos, verificou-se tendência crescente de resistência na ordem $EPS < PU < XPS < PET < PVC$. Apesar das maiores resistências apresentadas por PET e PVC, o XPS destacou-se pelo melhor equilíbrio entre densidade, rigidez e morfologia celular fechada. A estrutura sanduíche composta por núcleo de XPS e *skins* híbridas de carbono/vidro com matriz epoxídica apresentou desempenho mecânico adequado, sendo validada por meio da fabricação de um protótipo funcional. Os resultados contribuem para a sistematização da seleção de materiais para pranchas de surfe, reduzindo a dependência de decisões empíricas e ampliando a base técnica para o desenvolvimento de compósitos aplicados ao setor.

Palavras-chave: compósitos; estrutura sanduíche; pranchas de surfe; materiais poliméricos.

ABSTRACT

Sandwich-structured composites are widely used in applications requiring high specific stiffness and low weight, characteristics that are essential for surfboards. However, material selection in this sector is still predominantly empirical, with limited correlation between measurable physico-mechanical parameters and structural performance. This work proposes an innovative approach by comparatively evaluating different combinations of fibers, polymer matrices, and structural cores in order to establish technical criteria for surfboard optimization. Synthetic, hybrid, and natural fibers associated with epoxy and polyester matrices were analyzed, as well as PU, EPS, XPS, PET, and PVC foam cores. Composites reinforced with synthetic fibers exhibited significantly higher tensile strength, reaching up to 283 MPa (carbon/epoxy), whereas natural fiber composites ranged from 14 to 42 MPa. For natural fibers, a statistically significant improvement in tensile strength was observed when combined with epoxy resin ($p < 0.05$), indicating enhanced interfacial interaction. Regarding core materials, an increasing trend in mechanical strength was observed in the order $\text{EPS} < \text{PU} < \text{XPS} < \text{PET} < \text{PVC}$. Although PET and PVC exhibited higher strength values, XPS demonstrated the best balance between density, stiffness, and closed-cell morphology. The sandwich structure composed of an XPS core and hybrid carbon/glass epoxy skins showed adequate mechanical performance and was validated through the fabrication of a functional prototype. The results contribute to the systematization of material selection for surfboards, reducing empirical decision-making and strengthening the technical foundation for composite development in this field.

Keywords: composites; sandwich structure; surfboards; polymeric materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Surfistas havaianos e as primeiras pranchas de surfe conhecidas, <i>Olo</i> e <i>Alaia</i> . Adaptado de Marcus (2010).....	13
Figura 2 - Evolução do design e dos materiais das pranchas de surfe ao longo dos anos. Adaptado de Oggiano (2017).....	16
Figura 3 - Componentes típicos de pranchas de surfe e os materiais mais utilizados. Adaptado de Crameri <i>et al.</i> (2023), Oliveira (2019) e Sheppard (2018).....	18
Figura 4 - Padrões comuns de trama de tecidos (<i>plain weave</i> , <i>twill weave</i> e <i>satin weave</i>) e tecidos unidirecionais. Adaptado de Greb <i>et al.</i> (2018).....	23
Figura 5 – Etapas do processo de fabricação da prancha de surfe. Adaptado de Zimmermann (2024).....	25
Figura 6 - Tecnologia CNC aplicada à fabricação de pranchas de surfe. Adaptado de Barcelos (2018).....	27
Figura 7 - Imagem fotográfica do dispositivo utilizada para análise de resistência à compressão transversal dos compósitos com estrutura sanduíche.....	34
Figura 8 - Modos de falhas mais comuns observados nos ensaios de compressão transversal (ASTM C364/C64-07).....	34
Figura 9 - Metodologia do desenvolvimento. Fonte: Autor (2025).	35
Figura 10 - Imagens de microscopia óptica dos tecidos de reforço utilizados: (a) aramida (plano), (b) carbono (sarjado), (c) vidro (plano), (d) aramida/carbono (plano), (e) aramida/vidro (sarjado), (f) carbono/vidro (plano), (g) algodão, (h) linho e (i) juta. Fonte: Autor (2025)	39
Figura 11 - Imagem fotográfica dos compósitos produzidos com resina epoxídica e tecidos de: (a) aramida, (b) carbono, (c) vidro, (d) aramida/carbono, (e) aramida/vidro, (f) carbono/vidro, (g) algodão, (h) linho e (i) juta. Fonte: Autor (2025)	39
Figura 12 - Curvas tensão–deformação obtidas nos ensaios de tração dos compósitos estudados. “P” representa amostras produzidas com poliéster e “E” com epóxi.....	41
Figura 13 - Módulo de armazenamento (E') (a, b, c), módulo de perda (E'') (d, e, f) e fator de amortecimento ($\tan \delta$) (g, h, i) obtidos por análise dinâmico-mecânica (DMA) dos compósitos estudados.	50
Figura 14 - Imagens fotográficas e micrografias obtidas por MEV das espumas poliméricas: (a) PU, (b) EPS, (c) XPS, (d) PET, (e) PVC e (f) distribuição de tamanho de célula.	58
Figura 15 - Imagens fotográficas de corpos de prova produzidos do compósito com estrutura sanduíche, sendo (a) uma camada de tecido e (b) duas camadas de tecido.	60
Figura 16 - Fluxograma das etapas de confecção do protótipo de prancha de surfe: a) Molde da prancha no bloco bruto, b) Corte do bloco, c) Corte do <i>tail</i> e do <i>nose</i> , d) Marcação e confecção das bordas, e) Shape completo, f) Furação para copinho de encaixe das quilhas, g) Processo de fixação do copinho, h) Tecido híbrido de carbono/vidro pronto para laminação, i) Aplicação da resina epóxi, j) Processo de cura e k) Resultado final: protótipo pronto	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas utilizadas como reforço em materiais compósitos, incluindo densidade, resistência à tração e módulo de elasticidade. Adaptado de Ursache <i>et al.</i> (2024), Sayam (2026) e Hull e Clyne (2019). ..	20
Tabela 2 - Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração dos compósitos produzidos, incluindo as análises estatísticas (teste t e ANOVA/Tukey).	44
Tabela 3 - Resultados obtidos por meio da análise dinâmico-mecânica (DMA) para os compósitos estudados	50
Tabela 4 - Propriedades mecânicas de resistência à compressão de diferentes espumas poliméricas	54
Tabela 5 - Propriedades mecânicas de resistência à flexão e resiliência ao ressalto de diferentes espumas poliméricas.	56
Tabela 6 - Densidade, teor de vazios, diâmetro médio do tamanho de célula e densidade celular das espumas.	59
Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos compósitos com estrutura sanduíche compósitos de 1 e 2 camadas de tecido híbrido.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANOVA – *Analysis of Variance* (Análise de Variância)
- CAD – *Computer-Aided Design* (Projeto Assistido por Computador)
- CF – *Carbon Fiber* (Fibra de Carbono)
- CFC – Clorofluorocarbonos
- CNC – *Computer Numerical Control* (Controle Numérico Computadorizado)
- CO₂ – Dióxido de carbono
- COV – Compostos Orgânicos Voláteis
- DMA – Análise dinâmico-mecânico
- E-glass* – *Electrical Glass* (Fibra de Vidro Elétrica)
- EPP – *Expanded Polypropylene* (Polipropileno Expandido)
- EPS – Poliestireno Expandido
- FH – *Flax/Hemp* (Híbrido Linho/Cânhamo)
- GF – *Glass Fiber* (Fibra de Vidro)
- HM – *High Modulus* (Alto módulo)
- HS – *High Strength* (Alta resistência)
- HSD – *Honest Significant Difference* (Teste de Tukey – Diferença Honestamente Significativa)
- MDI – Methylene Diphenyl Diisocyanate (Isocianato de Metileno Diphenil)
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- MO – Microscopia Óptica
- NCFs – *Noncrimp Fabrics* (Tecidos Não Crimpados)
- PET – Poli(tereftalato de etileno)
- PS – *Polystyrene* (Poliestireno)
- PU – Poliuretano
- PUR – *Polyurethane* (Poliuretano)
- PVC – Poli(cloreto de vinila)
- SEM – *Scanning Electron Microscopy* (Microscopia Eletrônica de Varredura)
- S-glass* – *Strength Glass* (Fibra de Vidro de Alta Resistência)
- SHT – *Super High Tensile Strength* (Super alta resistência à tração)
- TDI – Toluene Diisocyanate (Isocianato de Tolileno)
- UPR – Resina Poli(éster) insaturada

VOCs – *Volatile Organic Compounds* (Compostos Orgânicos Voláteis)

XPS – poliestireno extrusado

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área da micrografia (cm^2)
- a_i – Constantes do teste de Shapiro–Wilk
- b – Largura do corpo de prova (mm)
- E' – Módulo de armazenamento (MPa)
- E'' – Módulo de perda (MPa)
- M – Ampliação da micrografia
- MSwithin – Quadrado médio dentro dos grupos (ANOVA)
- Nf – Densidade celular ($\text{células} \cdot \text{cm}^{-3}$)
- n – Número de células por micrografia
- Pmax – Força máxima antes da falha (N)
- q – Estatística do teste de Tukey
- t – Espessura do corpo de prova (mm)
- $\tan \delta$ – Fator de perda (E''/E')
- Vf – Teor de vazios (fração volumétrica de vazios)
- W – Estatística do teste de Shapiro–Wilk
- x_i – Valor individual da amostra
- \bar{x} – Média amostral
- \bar{x}_i, \bar{x}_j – Médias amostrais dos grupos i e j
- α – Nível de significância
- ρ_f – Densidade do compósito expandido ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
- ρ_p – Densidade do polímero sólido ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
- σ – Resistência máxima à compressão transversal (MPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DAS PRANCHAS DE SURFE.....	13
3.2 ESTRUTURA SANDUÍCHE EM PRANCHAS DE SURFE	17
3.3 MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZADOS NA PRANCHA DE SURFE.....	18
3.3.1 Núcleo de espuma polimérica	19
3.3.2 Fibras de reforço	20
3.3.3 Resinas poliméricas termofixas	23
3.4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PRANCHAS DE SURFE	24
3.4.1 Fabricação de espumas por CNC	26
3.5 PROBLEMAS COMUNS EM PRANCHAS DE SURFE	27
3.6 ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL E USO DE MATERIAIS DE FONTES RENOVÁVEIS NA FABRICAÇÃO DE PRANCHAS	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 MATERIAIS	30
4.2 MÉTODOS.....	31
4.2.1 Fabricação dos compósitos	31
4.2.2 Preparação dos corpos de prova	31
4.2.3 Caracterizações	32
4.2.4 Análise estatística	35
5. RESULTADOS	38
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS <i>SKINS</i> (COMPÓSITOS - REFORÇOS E RESINAS).....	38
5.1.1 Morfologia dos tecidos e aspecto visual dos compósitos	38
5.1.2 Propriedades mecânicas	40
5.1.3 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)	46
5.2 ANÁLISE DOS DIFERENTES NÚCLEOS DE ESPUMAS POLIMÉRICAS	52
5.2.1 Propriedades mecânicas	52

5.2.2 Análise morfológica das espumas.....	57
5.3 COMPÓSITO COM ESTRUTURA SANDUÍCHE E CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO	60
5.4 RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MECÂNICOS E A ESCOLHA DA CONFIGURAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	62
6. CONCLUSÃO.....	64
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A evolução das pranchas de surfe tem sido marcada pelo desenvolvimento e aplicação de materiais compósitos, que possibilitam maior desempenho, leveza e durabilidade. A prática do surfe, que teve origem nas antigas culturas polinésias (SCHULTZ, 2009), experimentou avanços tecnológicos significativos nas últimas décadas, especialmente com a introdução de estruturas de compósitos contendo um núcleo de baixa densidade revestido por compósitos constituídos de camadas rígidas de fibras e resinas. Esses avanços permitiram a produção de pranchas mais ágeis, estáveis e adaptáveis às diversas condições do mar, atendendo às necessidades dos surfistas modernos (SCHULTZ, 2009; GIBSON; WARREN, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2012).

Os materiais compósitos utilizados na fabricação de pranchas de surfe são, geralmente, compostos por um núcleo de espuma, como poliuretano (PU) ou poliestireno expandido (EPS), reforçados por fibras de vidro ou carbono e cobertos por resinas termofixas, como poliéster ou epóxi. A estrutura sanduíche resultante confere às pranchas uma excelente relação resistência/peso, o que é fundamental para o desempenho nas ondas. Por exemplo, o núcleo de espuma fornece fluabilidade e distribuição de carga, enquanto as camadas externas, compostas por fibras e resinas, garantem resistência mecânica, flexibilidade e proteção contra impactos e a exposição à água (CRAMERI *et al.*, 2023; TUWAIR *et al.*, 2015; MINES, 1997).

A escolha dos materiais compósitos para pranchas de surfe afeta diretamente características como flexibilidade, rigidez e durabilidade. A utilização de espumas de baixa densidade, como o EPS, aliada à resina epóxi, resulta em pranchas mais leves e com maior fluabilidade, além de menor absorção de água. Já os reforços com fibras de vidro e carbono proporcionam maior rigidez e resistência a deformações, e são fundamentais para a manobrabilidade e a estabilidade da prancha. Além disso, a configuração do compósito permite ajustar propriedades como a flexibilidade e a distribuição da rigidez, características essenciais para otimizar o desempenho em diferentes estilos de surfe e tipos de onda (CRAMERI *et al.*, 2023; TUWAIR *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, a demanda por pranchas mais leves, ágeis e personalizáveis impulsionou a pesquisa e a aplicação de materiais compósitos avançados na indústria do surfe. Técnicas como a laminação a vácuo e a inclusão de fibras de alta performance, como aramida e carbono, tem sido exploradas para aumentar a resistência mecânica sem comprometer a flexibilidade e a leveza das pranchas. Além disso, a crescente preocupação com a

sustentabilidade tem incentivado a busca por compósitos ecologicamente corretos, como o uso de fibras naturais e resinas à base de fontes renováveis, contribuindo para a redução do impacto ambiental da produção de pranchas de surfe.

Com a evolução do surfe ao longo das últimas décadas, observa-se que a seleção de materiais para a confecção de pranchas ainda ocorre, em grande parte, de maneira empírica. Frequentemente, a escolha dos materiais está associada à percepção subjetiva do surfista durante o uso ou à experiência prática do *shaper* responsável pela fabricação, sem que haja, necessariamente, uma correlação sistemática com parâmetros físico-mecânicos mensuráveis. Nesse contexto, identifica-se uma lacuna quanto à quantificação e à compreensão técnica do desempenho dos materiais empregados, especialmente no que se refere às suas interações estruturais e comportamento em serviço.

Diante desse cenário, torna-se essencial avaliar de forma abrangente os materiais compósitos utilizados em pranchas de surfe e suas interações em estruturas sanduíche, contribuindo para o desenvolvimento de pranchas com melhor desempenho e maior vida útil, além de explorar alternativas sustentáveis para a fabricação de pranchas no contexto atual.

Além do avanço científico e tecnológico na área de materiais compósitos, esta pesquisa encontra-se alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU), que visa promover a inovação e o desenvolvimento industrial. Ao investigar o desempenho mecânico e estrutural de diferentes configurações de materiais aplicados à fabricação de pranchas de surfe, o presente estudo contribui para o fortalecimento de soluções tecnológicas mais eficientes no setor produtivo esportivo

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os materiais utilizados em compósitos com estrutura sanduíche aplicados em pranchas de surfe, a fim de compreender seu desempenho mecânico e sustentabilidade para a fabricação de pranchas de alta performance.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os diferentes tipos de núcleos (espumas) e materiais de reforço (fibras) utilizados em pranchas de surfe e sua influência nas propriedades mecânicas, físicas e na durabilidade das pranchas de surfe;
- Investigar o impacto da estrutura sanduíche nas propriedades mecânicas das pranchas de surfe, considerando diferentes combinações de núcleos e reforços;
- Explorar o uso de fibras de fontes renováveis;
- Desenvolver um protótipo (prancha) com base na seleção de materiais estudados neste projeto de pesquisa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos e o panorama atual do conhecimento relacionados ao desenvolvimento de pranchas de surfe com estrutura sanduíche. São abordados a evolução histórica dos materiais empregados, os princípios estruturais associados aos compósitos sanduíche, os principais materiais utilizados (núcleos, fibras e resinas), os processos de fabricação e as alternativas voltadas à redução do impacto ambiental.

3.1 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DAS PRANCHAS DE SURFE

O surfe possui origens nas tradições das antigas ilhas da Polinésia, com registros históricos que remontam a vários séculos. Embora seja difícil estabelecer datas precisas para o início da prática, descrições formais da atividade aparecem no século XVIII, nos diários de viagem de James Cook e James King, em 1779, quando este último registrou pela primeira vez a prática do surfe no Havaí sob a ótica europeia. As pranchas utilizadas nessa época eram fabricadas artesanalmente a partir de madeiras nativas, como *ulu*, *koa* e *wiliwili*, e variavam desde os modelos longos e pesados conhecidos como *olo*, destinados à realeza, até as pranchas menores e mais ágeis, chamadas *alaia* (SCHULTZ, 2009; WESTWICK; NEUSHUL, 2013). A representação desses primeiros praticantes e dos modelos tradicionais de pranchas pode ser observada na Figura 1.



Figura 1 - Surfistas havaianos e as primeiras pranchas de surfe conhecidas, *Olo* e *Alaia*. Adaptado de Marcus (2010).

Esses primeiros modelos consistiam essencialmente em pranchas maciças, sem curvatura longitudinal (*rocker*) e sem a presença de quilhas. O processo de fabricação envolvia

o entalhe e o polimento da madeira, seguido da aplicação de óleos vegetais como forma de selagem. As pranchas do tipo *alaia* são frequentemente apontadas como precursoras diretas do surfe moderno, pois permitiram o desenvolvimento da prática em pé sobre a prancha e a realização de manobras mais dinâmicas (OGGIANO, 2017; GIBSON; WARREN, 2014; BOOTH, 1999).

Com o avanço da prática esportiva, tornou-se evidente que o material da prancha exercia influência decisiva sobre o desempenho do surfista. As primeiras tentativas de construção com materiais alternativos, como jangadas de palha e madeiras menos densas, mostraram-se limitadas devido à baixa rigidez estrutural e à elevada absorção de água, que resultava em aumento significativo de peso e perda de desempenho. Até aproximadamente a década de 1920, pranchas maciças de madeira ainda predominavam, mas suas limitações mecânicas e de durabilidade impulsionaram a busca por novas soluções construtivas (ZIMMERMANN *et al.*, 2024).

Na década de 1930, a introdução da madeira balsa representou um avanço importante, permitindo uma redução expressiva do peso das pranchas. Nesse mesmo período, começaram a surgir alterações geométricas relevantes, como o afinamento das extremidades e a introdução das primeiras quilhas, que aumentaram significativamente a estabilidade direcional e a manobrabilidade. Contudo, a transformação mais marcante ocorreu no final da década de 1940, com a introdução da fibra de vidro e das resinas poliméricas, possibilitando a fabricação de pranchas com geometrias mais complexas e melhor controle das propriedades mecânicas (ZIMMERMANN *et al.*, 2024; CRAMERI *et al.*, 2023).

Na década de 1950, o surgimento dos núcleos de espuma de poliuretano (PU) marcou uma nova era para o surfe. Esses materiais sintéticos permitiram a produção de pranchas significativamente mais leves, com melhor repetibilidade geométrica e desempenho hidrodinâmico superior. A partir desse momento, consolidou-se o conceito moderno de prancha composta por um núcleo leve revestido por uma “pele” resistente de compósito polimérico reforçado com fibras (GIBSON; WARREN, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2012).

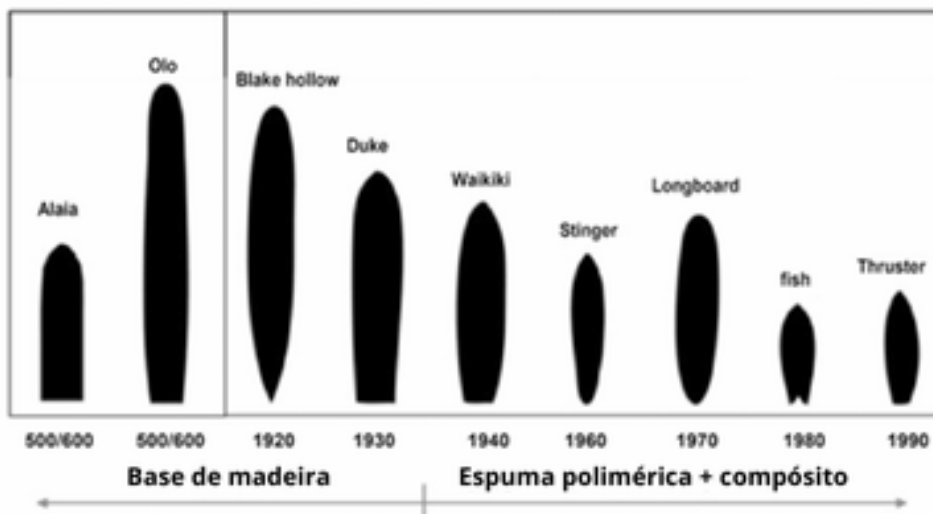
Ao longo das décadas seguintes, o *design* das pranchas continuou a evoluir, tanto em termos geométricos quanto em termos de materiais. Foram introduzidas variações no formato do fundo, no perfil longitudinal (*rocker*), nas bordas (*rails*) e nas configurações de quilhas, permitindo a adaptação das pranchas a diferentes tipos de ondas, estilos de surfe e níveis de habilidade dos praticantes. Paralelamente, figuras importantes da história do surfe contribuíram

de maneira decisiva para a consolidação do *shortboard* moderno e para a incorporação de princípios hidrodinâmicos ao projeto das pranchas (WESTWICK; NEUSHUL, 2013; WARSHAW, 2003).

Atualmente, existem diversos modelos comerciais de pranchas, como *longboards*, *shortboards*, *fish*, *funboards*, *guns* e *hybrids*, cada um otimizado para condições específicas de uso. Essa diversidade reflete não apenas a evolução do esporte, mas também o amadurecimento da engenharia de materiais aplicada ao surfe (OLIVEIRA, 2019; ZIMMERMANN *et al.*, 2024).

A Figura 2 apresenta a evolução histórica do design das pranchas de surfe, desde os modelos havaianos tradicionais até as configurações modernas, evidenciando a transição de estruturas em base de madeira para sistemas em espuma polimérica associada a compósitos, bem como os principais tipos comerciais atualmente utilizados.

Pranchas de surfe havaianas antigas



Principais tipos de pranchas de surfe modernas

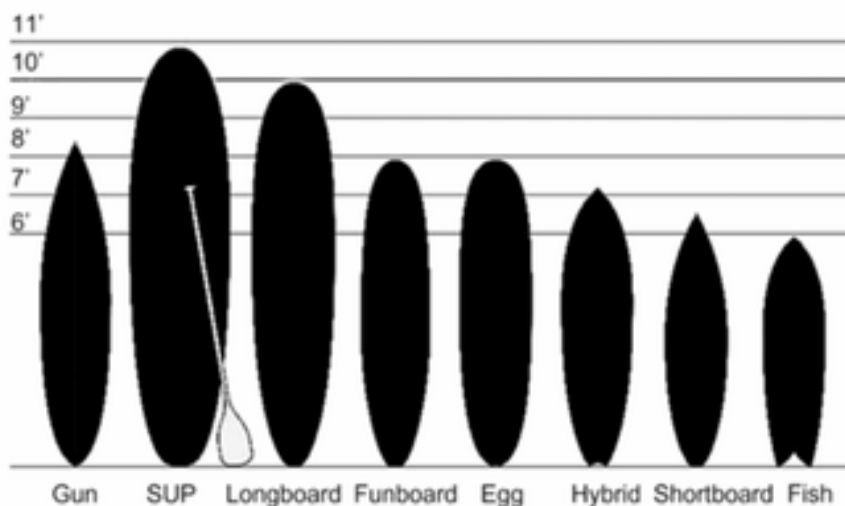


Figura 2 - Evolução do design e dos materiais das pranchas de surfe ao longo dos anos. Adaptado de Oggiano (2017).

Além do aspecto esportivo, o surfe tornou-se uma indústria global de grande relevância econômica. O mercado mundial movimenta bilhões de dólares anualmente, sendo as pranchas responsáveis por uma parcela significativa desse valor. Apesar disso, observa-se que, do ponto de vista científico e tecnológico, a engenharia aplicada às pranchas de surfe ainda constitui um campo relativamente recente, com número limitado de estudos sistemáticos quando comparado a outros setores esportivos (ROMANIN *et al.*, 2021; ZIMMERMANN *et al.*, 2024).

3.2 ESTRUTURA SANDUÍCHE EM PRANCHAS DE SURFE

As pranchas de surfe modernas são convencionalmente construídas a partir de um núcleo de espuma de baixa densidade, que é pré-moldado, cortado (seja manualmente ou por máquinas robóticas) e, em seguida, revestido com fibras e resina. Esse processo ainda é dominante na indústria do surfe hoje, com mais de setecentas e cinquenta mil pranchas sendo produzidas a cada ano (JOHNSTONE, 2011). Embora algumas pranchas ainda sejam fabricadas em madeira, a vasta maioria das pranchas atualmente utilizadas é feita de materiais compósitos, com estruturas sanduíche. Esses produtos consistem em duas ou mais camadas de materiais com características físicas, químicas e mecânicas diferentes, proporcionando vantagens em termos de custo, leveza, resistência mecânica e praticidade. Geralmente consistem em um núcleo poroso (ou espuma polimérica) e faces altamente rígidas de compósitos laminados, o que confere a esses materiais um excelente equilíbrio entre desempenho mecânico e baixa densidade (CRAMERI *et al.*, 2023; SHEPPARD, 2018; JOHNSTONE, 2011).

Os materiais do núcleo costumam ser feitos de um material mais barato ou de menor densidade, com menor resistência mecânica do que as estruturas rígidas das faces externas, mas proporcionam uma distribuição eficaz de carga e aumentam o momento de inércia, o que reduz as tensões. Essa estrutura sanduíche promove um aumento na espessura com ganho de peso mínimo. Portanto, o núcleo atua como uma base volumétrica do produto, com as camadas externas (películas) suportando a maior parte das cargas mecânicas de flexão e compressão. Os compósitos sanduíche têm fornecido soluções para os desafios de peso e resistência à flexão em vários setores, como o mercado de pranchas de surfe (KHAN *et al.*, 2020).

Os compósitos à base de polímeros termofixos, reforçados com fibras, são frequentemente utilizados como materiais de revestimento para esses compósitos sanduíche, devido ao seu excelente equilíbrio entre propriedades mecânicas, resistência ambiental/durabilidade e baixo peso (CRAMERI *et al.*, 2023). A Figura 3 apresenta os principais componentes das pranchas de surfe modernas, destacando os elementos estruturais da configuração sanduíche. Esses componentes incluem o núcleo, responsável por fornecer leveza e volume, as fibras/resinas que revestem o núcleo para garantir rigidez e resistência, e a longarina, que distribui as forças ao longo da prancha.

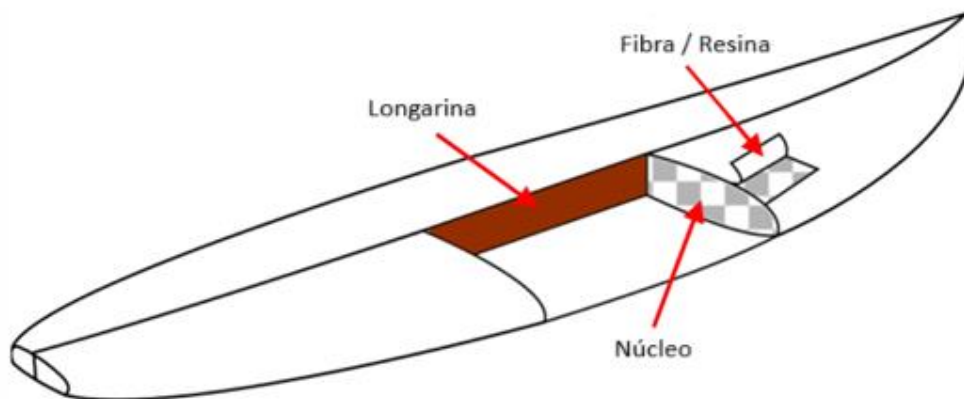


Figura 3 - Componentes típicos de pranchas de surfe e os materiais mais utilizados. Adaptado de Crameri *et al.* (2023), Oliveira (2019) e Sheppard (2018).

3.3 MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZADOS NA PRANCHA DE SURFE

A evolução dos materiais compósitos tem sido um fator crucial para o desempenho das pranchas. Os compósitos baseados em resinas poliéster e epóxi, reforçados com fibras sintéticas, como vidro e carbono, dominam o mercado devido à sua combinação de custo-benefício e propriedades mecânicas superiores. Fibras naturais, como juta e linho, também estão sendo investigadas como alternativas sustentáveis, embora enfrentem desafios quanto à absorção de água e durabilidade em ambientes marinhos.

3.3.1 Núcleo de espuma polimérica

Historicamente, as primeiras pranchas de surfe utilizavam materiais de origem vegetal, como madeiras sólidas, sendo a madeira balsa uma das primeiras a promover uma redução significativa no peso das pranchas. Atualmente, a balsa é considerada um biomaterial leve com excelente resistência específica e capacidade de absorção de energia (MA *et al.*, 2021). No entanto, sua alta flexibilidade e absorção de água limitam seu uso em pranchas de alto desempenho. Alternativamente, a cortiça tem sido empregada, principalmente para fins decorativos ou combinada com materiais mais rígidos, devido ao seu menor impacto ambiental (CRAMERI *et al.*, 2023; CASTRO *et al.*, 2010; SARGIANIS *et al.*, 2012).

Entre as espumas sintéticas, o poliuretano (PU) e o poliestireno expandido (EPS) são os principais materiais utilizados. Por décadas, os núcleos de PU dominaram o mercado, sendo reforçados por *stringers* de madeira para maior rigidez longitudinal. No entanto, o fechamento de fábricas, como a Clark Foam, e regulações mais rigorosas sobre a toxicidade do PU impulsionaram a adoção do EPS, que oferece vantagens como maior fluatuabilidade, propriedades mecânicas compatíveis e menor permeação de água (CRAMERI *et al.*, 2023). Apesar de ser mais barato e reciclável, o EPS requer resinas epóxi, uma vez que é incompatível com resinas poliéster, o que pode elevar os custos (KHAN *et al.*, 2020).

As espumas de PU variam amplamente em suas propriedades mecânicas e morfologias celulares, permitindo a produção de materiais com características personalizadas, como flexibilidade ou rigidez. A densidade típica do PU para pranchas varia entre 25 e 40 kg/m³, sendo 36 kg/m³ a mais comum (WANG; CROSKY, 1997). Recentemente, o uso de PU à base de MDI tem substituído o TDI, resultando em menores emissões de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e melhorando a segurança no manuseio, embora os desafios de reciclagem e descarte permaneçam (WANG; CROSKY, 1997; JOHNSTONE, 2011).

Por outro lado, o EPS apresenta densidades que variam de T4 (14 kg/m³) a T6 (27,5 kg/m³), permitindo ajustar o seu desempenho mecânico. No entanto, devido à sua estrutura não reticulada, é mais suscetível a danos térmicos em ambientes quentes (GHOSHAL *et al.*, 2023). Outro material é o poliestireno extrudado (XPS), com densidades entre 27,5 e 48 kg/m³, que oferece menor absorção de água e maior resistência mecânica. Contudo, assim como o EPS, o XPS também é sensível ao calor (TURNER, 2020).

3.3.2 Fibras de reforço

Atualmente, as fibras sintéticas mais utilizadas no desenvolvimento de materiais compósitos para pranchas de surfe são as de vidro, carbono e aramida, com estudos também explorando o uso de fibras de boro, basalto, polipropileno e polietileno (CRAMERI *et al.*, 2023; THOMPSON, 2021; BATISTA *et al.*, 2023). As fibras de vidro e carbono são as mais comuns na produção de pranchas, sendo a fibra de vidro do tipo *E-glass* frequentemente utilizada para revestir o núcleo de espuma nas pranchas (CRAMERI *et al.*, 2023).

As fibras de carbono são reconhecidas por sua alta resistência à tração e rigidez, embora seu alto custo, decorrente do processo de fabricação complexo, seja um fator limitante. Por outro lado, as fibras de vidro oferecem uma alternativa mais barata, mas com resistência e rigidez inferiores. Dentre as variedades de fibra de vidro, a do tipo S, ou *S-glass*, apresenta 30% mais resistência e 15% mais rigidez em comparação com a *E-glass*, tornando-a uma opção mais eficiente em termos de desempenho e redução de peso (ZIMMERMANN *et al.*, 2014; GREB *et al.*, 2018).

A Tabela 1 apresenta valores típicos de densidade, resistência à tração e módulo de elasticidade para fibras naturais e sintéticas comumente empregadas em compósitos estruturais. Esses parâmetros são fundamentais para compreender o desempenho mecânico dos materiais reforçados, especialmente em aplicações como pranchas de surfe, onde a relação rigidez/peso é determinante.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas utilizadas como reforço em materiais compósitos, incluindo densidade, resistência à tração e módulo de elasticidade. Adaptado de Ursache *et al.* (2024), Sayam (2026) e Hull e Clyne (2019).

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Algodão	~1,51 - 1,6	~287 - 597	~5,5 - 12,6
Juta	~1,3 - 1,45	~393 - 773	~13 - 26,5
Linho	~1,50 - 1,53	~962 - 1800	~46 - 96
E-Glass	~2,54 - 2,6	~3000 - 4000	~70 - 76
Aramida	~1,44 - 1,47	~2900 - 3800	~60 - 143
Carbono (SHT - HS/HM)	~1,7 - 2	~1000 - >6000	~40 - 950

Observa-se que as fibras sintéticas, como vidro, aramida e carbono, apresentam resistência à tração e módulo elástico significativamente superiores às fibras naturais. Entretanto, as fibras naturais apresentam menor densidade, o que pode ser vantajoso do ponto de vista de sustentabilidade e leveza. Dessa forma, a seleção do reforço depende do equilíbrio entre desempenho mecânico, custo, peso e impacto ambiental, sendo comum a adoção de estratégias de hibridização para otimizar essas propriedades.

A fibra de basalto surge como uma alternativa às fibras de vidro ou carbono, sendo produzida a partir de rocha vulcânica densa e fundida. Comparada à fibra de vidro, a fibra de basalto oferece melhor desempenho em altas temperaturas e resistência mecânica superior, além de ser mais acessível financeiramente que as fibras de carbono. A fibra de basalto é naturalmente resistente aos raios UV e mantém sua integridade física em condições extremas de calor e estresse (TAIEH *et al.*, 2023; YUVARAJ *et al.*, 2014; HASAN *et al.*, 2021).

No contexto dos materiais compósitos, as fibras são responsáveis por grande parte da carga aplicada. Suas propriedades específicas determinam diretamente a rigidez e a resistência do material, podendo ser ajustadas por meio da orientação das fibras durante a fabricação. As fibras utilizadas, geralmente em forma de bobinas ou *roving*, podem ser transformadas em reforços contínuos como mantas, tecidos e não tecidos, ou tranças, com as mantas de fibra curta sendo as mais comuns na fabricação de pranchas (GREB *et al.*, 2018).

As mantas de fibras feitas a partir de *roving* cortado são compostas por fibras curtas distribuídas de maneira aleatória, enquanto as mantas de filamento contínuo oferecem camadas de fibras contínuas compactadas, oferecendo uma resistência melhorada. As mantas de tecido trançado são populares devido à alta qualidade de superfície que podem proporcionar nas partes visíveis das pranchas, mas podem ter propriedades mecânicas reduzidas devido à presença de ondulações nas fibras (GREB *et al.*, 2018; PETRULIS, 2012).

Além disso, as fibras não crimpadas, do inglês *non crimp fibers* (NCFs), são uma alternativa, onde as fibras não se entrelaçam, resultando em melhores propriedades mecânicas. No entanto, a produção de NCFs exige maiores investimentos e elas são menos moldáveis do que os tecidos trançados (GREB *et al.*, 2018). Já as malhas trançadas apresentam alta resistência à delaminação, mas suas propriedades mecânicas podem ser comprometidas devido ao efeito do *crimp*.

A possibilidade de hibridização de fibras, combinando diferentes tipos de materiais, pode resultar em compósitos com propriedades termomecânicas superiores. Isso permite a

criação de novos materiais, combinando os benefícios de diferentes fibras naturais e sintéticas, como vidro/linho, linho/cânhamo, ou carbono/vidro, para reduzir custos e aumentar o desempenho do material (TAIEH *et al.*, 2023; DARIE-NITA *et al.*, 2022; AYDIN *et al.*, 2022).

Estudos indicam que o número de camadas, o ângulo de orientação e o tipo de tecido são fatores cruciais para otimizar as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos, sendo uma solução interessante para pranchas de surfe que exigem uma combinação de leveza, resistência e durabilidade (AYDIN *et al.*, 2022). Além disso, experimentos com pranchas de surfe usando EPS como núcleo, resina epóxi e fibras de carbono, vidro e PET reciclado, demonstraram que a densidade do núcleo impacta diretamente nas propriedades mecânicas, com maior densidade de espuma resultando em melhor flexibilidade e resistência (CRAMERI *et al.*, 2023).

Existe uma ampla variedade de tecidos tramados; entretanto, as tramas básicas mais comumente utilizadas em tecidos de camada única são planos (*plain weave*), sarjados (*twill weave*) e cetim (*satín weave*), as quais apresentam número reduzido de interseções entre os fios. Uma vantagem importante para aplicações em pranchas de surfe é a elevada qualidade superficial obtida nas partes aparentes quando se utilizam esses tecidos, além da alta qualidade do produto final e da facilidade de processamento manual. Entretanto, entre as desvantagens destacam-se a redução das propriedades mecânicas devido à presença de ondulações (*crimp*) nos fios, que podem comprometer a eficiência na transferência de cargas (GREB *et al.*, 2018; PETRULIS, 2012).

A Figura 4 apresenta os principais padrões de trama empregados em tecidos de reforço, bem como a configuração de tecidos unidirecionais.

	Esquema	Fibra de vidro	Fibra de carbono
Plain Weave			
Twill Weave			
Satin Weave			
UD-fabric			

Figura 4 - Padrões comuns de trama de tecidos (*plain weave*, *twill weave* e *satin weave*) e tecidos unidirecionais. Adaptado de Greb *et al.* (2018)

3.3.3 Resinas poliméricas termofixas

As resinas desempenham um papel fundamental na construção e laminação de pranchas de surfe, sendo responsáveis por unir o tecido de fibra de vidro ao núcleo de espuma (geralmente

EPS ou PU) e proporcionar uma camada protetora para a prancha. Existem dois tipos principais de resinas utilizadas na fabricação de pranchas: resinas poliéster e epóxi.

As resinas poliéster (também chamadas de UPR - resina poliéster insaturada) são amplamente utilizadas devido à sua acessibilidade e facilidade de aplicação. Elas são compostas principalmente por propilenoglicol ou anidrido ftálico e monômero de estireno. Essa resina é conhecida por curar rapidamente quando misturada com um catalisador e fornecer um acabamento durável. No entanto, as resinas poliéster tendem a ser mais quebradiças e menos resistentes ao impacto em comparação com outras opções de resina (DARIE-NITA *et al.*, 2022; ORNAGHI *et al.*, 2022; OGGIANO; PANHUIS, 2020).

As resinas epóxi (poliepóxidos) contêm grupos epóxi e são mais caras, mas oferecem propriedades mecânicas superiores, como maior resistência, melhor flexibilidade e resistência ao impacto. Além disso, as resinas epóxi apresentam melhor aderência a uma variedade de materiais, o que pode melhorar a durabilidade e o desempenho da prancha. Embora as resinas epóxi exijam mais cuidado no manuseio e na mistura, elas são preferidas para pranchas de alto desempenho devido às suas características superiores (DARIE-NITA *et al.*, 2022; ORNAGHI *et al.*, 2022; OGGIANO; PANHUIS, 2020).

Na produção das pranchas, são aplicadas duas camadas de resina: uma contendo *gel coat* como base estrutural primária, e a outra sendo uma camada de lixamento misturada com um agente de acabamento (somente para UPR, geralmente 5% do volume de UPR), produzindo um material mais duro que pode ser lixado. Além disso, uma terceira camada, o *gloss coat*, pode ser aplicada para fins estéticos e para melhorar o desempenho estrutural da prancha.

3.4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PRANCHAS DE SURFE

A fabricação de pranchas de surfe pode ser dividida em quatro etapas principais: usinagem (ou modelagem), laminação, acabamento e pintura. Inicialmente, o formato da prancha é esculpido manualmente a partir de um bloco de espuma previamente fornecido pelo fabricante. O profissional responsável por essa etapa, denominado *shaper*, define as dimensões finais, o contorno, o *rocker* e o perfil das bordas, realizando cortes longitudinais e transversais no núcleo de espuma com o auxílio de ferramentas como plainas e lixadeiras (BARCELOS *et al.*, 2018; GREB *et al.*, 2018).

Durante o processo de modelagem do núcleo, ocorre a geração de resíduos sólidos e poeira provenientes da remoção de material. Na etapa de laminação, a prancha é estruturada

por meio da aplicação de tecidos de fibras de reforço impregnados com resinas termofixas sobre sua superfície. A primeira camada de reforço é aplicada juntamente com a resina, etapa conhecida como *glassing*, em referência ao uso tradicional de fibra de vidro na construção das pranchas. Camadas subsequentes, como o *hot coat* (revestimento quente) e o *gloss coat* (camada de brilho), são aplicadas com o objetivo de selar a superfície, melhorar o acabamento superficial e conferir maior uniformidade e estética ao produto final (BARCELOS *et al.*, 2018; GREB *et al.*, 2018).

As quilhas, responsáveis pela estabilização hidrodinâmica e controle direcional da prancha, são produzidas separadamente, geralmente a partir de compósitos similares aos utilizados no revestimento estrutural. O conjunto dessas etapas assegura não apenas o desempenho mecânico e hidrodinâmico da prancha, mas também sua qualidade estética e durabilidade (NGO *et al.*, 2010).

As principais etapas do processo de fabricação da prancha de surfe, desde a produção do blank até o acabamento final, estão representadas na Figura 5.

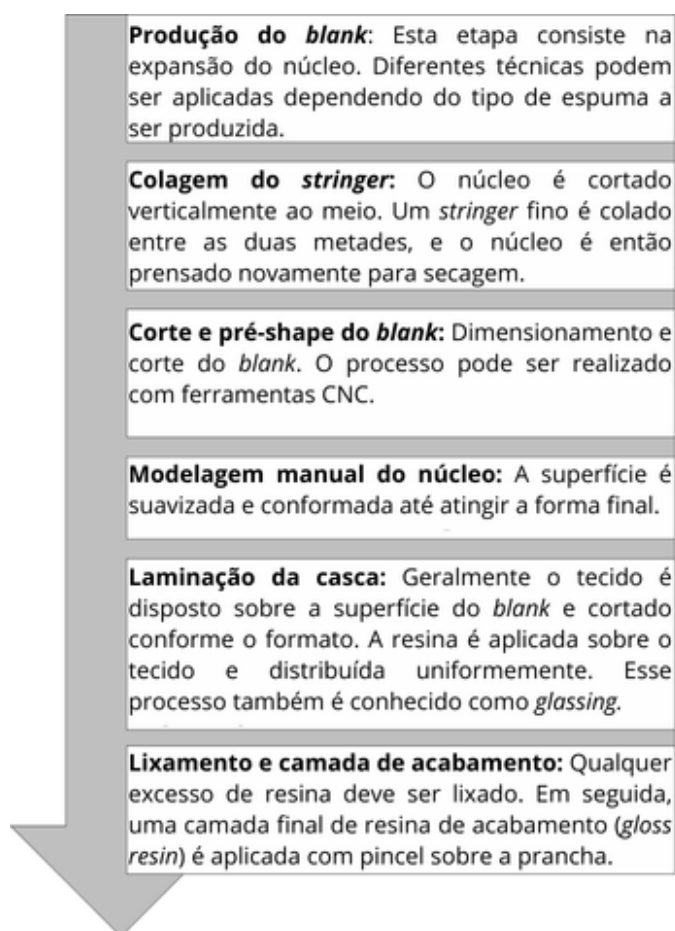


Figura 5 – Etapas do processo de fabricação da prancha de surfe. Adaptado de Zimmermann (2024).

3.4.1 Fabricação de espumas por CNC

Uma disrupção significativa na fabricação de pranchas de surfe nos últimos anos tem sido a adoção de ferramentas de projeto assistido por computador (CAD) e da modelagem robótica por meio de sistemas CNC (*Computer Numerical Control*), permitindo que fabricantes ampliem sua participação no mercado do surfe.

Essa tecnologia possibilita aos *shapers* a produção de pranchas mais leves, mais duráveis e com maior nível de personalização de *design*. Com o uso de máquinas CNC, a produção passou de um processo artesanal para um modelo com maior reprodutibilidade, garantindo consistência geométrica entre as peças produzidas (BARCELOS *et al.*, 2018). O processo manual de *shape*, embora artístico, é demorado e suscetível a problemas relacionados à simetria longitudinal e à repetibilidade. Em contraste, a automação minimiza essas limitações, embora o alto custo de aquisição de fresadoras CNC ainda represente um desafio (SIERRA *et al.*, 2006).

A produção de pranchas de surfe iniciou-se como um processo essencialmente artesanal. Os *shapers* necessitavam de tempo considerável para modelar a espuma utilizando lixas de diferentes granulações e aplicando múltiplas etapas de acabamento. Apesar da habilidade e precisão desses profissionais, alcançar o nível de exatidão proporcionado pelas máquinas CNC no processo de *pré-shape* representava um desafio significativo.

A introdução das máquinas CNC na fabricação de pranchas teve como objetivo inicial melhorar a produtividade e a qualidade. Atualmente, esses equipamentos tornaram-se predominantes na modelagem de pranchas com núcleo de PU e EPS. Um dos principais benefícios da fabricação digital é que os equipamentos CNC podem ser programados para produzir peças consistentes diretamente a partir de modelos digitais, como exposto na figura 6. Isso permite que modelos idênticos, ou suas variações personalizadas, sejam reproduzidos fielmente em diferentes locais ao redor do mundo, sem a necessidade de maquinário altamente especializado adicional.

Além disso, como o *shape* por CNC constitui um processo de fabricação unitário, o custo de produção de peças personalizadas ou únicas tende a ser inferior quando comparado à produção em massa tradicional. As principais vantagens do uso de equipamentos CNC na modelagem de núcleos de espuma para pranchas de surfe incluem (MIELKE *et al.*, 2022; KIM *et al.*, 2014):

- Precisão: As máquinas CNC permitem alcançar detalhes complexos e medidas exatas que são difíceis de reproduzir de forma consistente por métodos tradicionais de modelagem manual;
- Velocidade: Uma vez programadas, as máquinas CNC podem produzir pranchas mais rapidamente do que o *shape* manual, reduzindo o tempo de produção e aumentando a capacidade produtiva;
- Controle de qualidade: A precisão proporcionada pela usinagem CNC minimiza erros e melhora a qualidade e o desempenho geral das pranchas, contribuindo para uma melhor experiência do surfista;
- Inovação: A tecnologia CNC permite que shapers e fabricantes explorem novos formatos, designs e materiais, ampliando os limites de desempenho e estética.

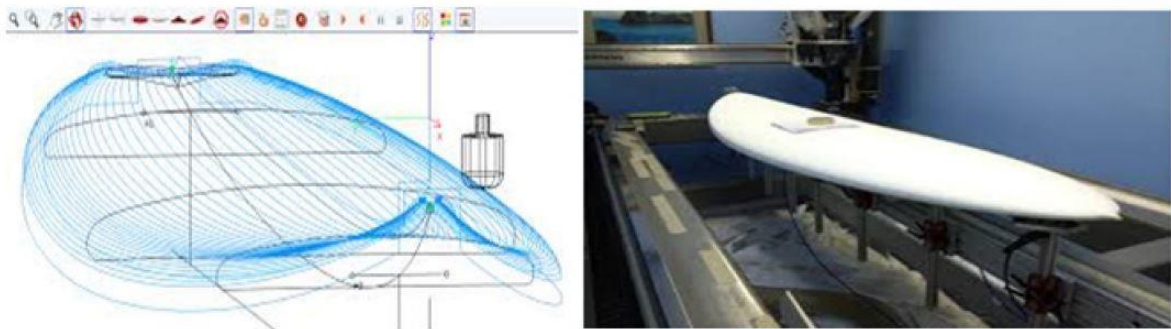


Figura 6 - Tecnologia CNC aplicada à fabricação de pranchas de surfe. Adaptado de Barcelos (2018).

3.5 PROBLEMAS COMUNS EM PRANCHAS DE SURFE

Alguns problemas frequentemente observados em pranchas de surfe incluem:

- Rachaduras: geralmente aparecem nas bordas, nariz e cauda. Essas rachaduras podem ser causadas por impactos leves durante o transporte, como ao passar de uma costa para outra, ou por exposição excessiva ao sol, que gera um gradiente térmico causando expansão e compressão (ORNAGHI *et al.*, 2022; THE SURFBOARD BOOK, 2013);
- Amarelamento: ocorre devido à deterioração da resina e da espuma quando expostas à luz UV e ao calor, resultando em uma coloração amarelada, o que é uma preocupação estética para os surfistas. Mesmo com aditivos de filtro UV nas fibras de vidro, o amarelamento ainda pode acontecer, especialmente quando a espuma é exposta diretamente (ORNAGHI *et al.*, 2022; THE SURFBOARD BOOK, 2013);

- Delaminação: ocorre quando o calor separa a cola e a fibra de vidro da espuma. Esse problema é mais comum em pranchas de resina epóxi do que em pranchas de poliéster. Para minimizar a delaminação, recomenda-se armazenar as pranchas em locais frescos e protegidos do sol (ORNAGHI *et al.*, 2022; THE SURFBOARD BOOK, 2013);
- Danos na caixa de quilha e quebras: podem ser causados por ondas fortes que forçam os surfistas a navegar sobre rochas, recifes ou areia dura. Se uma força assimétrica ou desigual for aplicada, a fibra de vidro e a cola podem se soltar, e a espuma pode se amassar ou quebrar (ORNAGHI *et al.*, 2022; THE SURFBOARD BOOK, 2013).

3.6 ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL E USO DE MATERIAIS DE FONTES RENOVÁVEIS NA FABRICAÇÃO DE PRANCHAS

A fabricação de pranchas de surfe tem gerado impactos ambientais significativos ao longo dos anos. Desde 1958, as pranchas têm sido predominantemente fabricadas com espuma de PU, um material amplamente utilizado na indústria, mas que libera grandes quantidades de CO₂ durante sua produção, além de outros gases que contribuem para o efeito estufa. O uso de clorofluorocarbonos (CFCs) no passado agravava ainda mais esse impacto. As fibras de vidro, que provêm da areia e não causam grandes problemas ambientais, são tratadas com metais pesados, como cromo, tornando-as tóxicas para a saúde humana. A produção da pele da prancha envolve a combinação de fibra de vidro com resina poliéster, que utiliza solventes corrosivos e cancerígenos (como o estireno), liberando compostos orgânicos voláteis (COVs) que irritam as vias respiratórias, a pele e os olhos, além de contribuírem para a poluição do ar (ZIMMERMANN *et al.*, 2024).

Em comparação, pranchas fabricadas com espuma EPS e resina epóxi geram menores quantidades de COVs. Estudos mostram que, em relação às resinas poliéster, as resinas epóxi liberam 75% menos COVs, reduzindo em dois terços a quantidade liberada na atmosfera. No entanto, o processo de produção de uma prancha de surfe ainda resulta em desperdício de 50% a 70% do material, o que é um problema ambiental significativo, já que muitos dos resíduos são tóxicos, inflamáveis ou de decomposição indefinida (ORNAGHI *et al.*, 2022).

Buscando alternativas mais ecológicas, Johnstone (2011) testou materiais naturais como substitutos para as fibras de vidro, espumas de PU e resinas poliéster, mas os resultados indicaram que as propriedades mecânicas desses materiais não são compatíveis com os materiais tradicionalmente usados em pranchas de surfe. No entanto, outros estudos têm

explorado o uso de materiais como o *cork* expandido (cortiça), que pode substituir as espumas à base de petróleo, apresentando uma redução significativa no impacto ambiental das pranchas, com redução de 62,8% na pegada ecológica do compósito (CORREIA *et al.*, 2022).

Outras opções de materiais de fonte renováveis estão surgindo, como fibra de linho e bioepóxi, que substituem a fibra de vidro e a resina poliéster tradicionais, mas ainda enfrentam desafios quanto à resistência mecânica e ao peso. As fibras naturais, como linho, cânhamo e bambu, estão sendo estudadas para uso em pranchas de surfe devido à sua alta relação resistência-peso e credenciais de sustentabilidade, embora a absorção de água ainda seja um problema devido à natureza hidrofílica dessas fibras (MICHELENA *et al.*, 2016; HAWARY *et al.*, 2023; ISLAM *et al.*, 2022).

A introdução de PUs *biobased* está ganhando força, substituindo os materiais petroquímicos com alternativas renováveis derivadas de óleos vegetais, como o óleo de rícino e o óleo de girassol, entre outros (ARISTRIS *et al.*, 2021; RAHIMI *et al.*, 2023). Essas alternativas não só reduzem o impacto ambiental como também oferecem resistência, fluabilidade e propriedades de amortecimento, sendo promissoras para o futuro das pranchas de surfe. Além disso, a cortiça se destaca como um material ecológico que melhora a rigidez longitudinal da prancha e é resistente à água e vibrações, eliminando a necessidade de vidro e tornando o produto mais leve e sustentável (OGGIANO; PANHUIS, 2020; CORREIA *et al.*, 2022; VARTIAINEN, 2019).

Estudos realizados por Correia *et al.* (2022) indicaram uma redução de 24% nas emissões de CO₂ ao utilizar materiais como cortiça expandida, resina epóxi e tecido de fibra de linho, mostrando que a escolha dos materiais na fabricação de pranchas pode reduzir significativamente seu impacto ambiental.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e os procedimentos experimentais adotados na fabricação e caracterização dos compósitos estruturais com configuração sanduíche, visando aplicação em pranchas de surfe. São descritos os materiais empregados nas *skins* (tecidos de fibras e resinas termofixas) e nos núcleos de espuma polimérica, bem como os processos de laminação e preparação dos corpos de prova.

Também são detalhados os métodos de caracterização mecânica, termo-mecânica e morfológica, incluindo ensaios de tração, flexão, compressão, análise dinâmico-mecânica (DMA) e análises por microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), que fundamentaram a avaliação do desempenho das diferentes configurações estudadas.

4.1 MATERIAIS

As matrizes poliméricas utilizadas foram uma resina epóxi base resultante da reação da Epicloridrina com Bisfenol-A (grau 4006) e seu endurecedor à base de amina ciclo alifática (grau 5000), bem como uma resina poliéster insaturada ortoftálica (Arazyn 2514) com iniciador peróxido de metil etil cetona (MEKP Butanox M-50), todas fornecidas pela empresa Redelease / Redecenter Ltda (Brasil). Segundo os fabricantes, a resina epóxi apresenta média viscosidade e alta transparência, sendo indicada para laminação manual, enquanto a resina poliéster apresenta cura rápida, viscosidade média e proteção UV.

Os reforços utilizados foram fibras sintéticas e naturais, na forma de tecidos bidirecionais. As fibras sintéticas incluíram vidro, carbono e aramida, além de combinações híbridas dessas fibras (carbono/aramida, carbono/vidro e aramida/vidro). As fibras de vidro (200 g/m²), carbono (200 g/m²) e aramida (210 g/m²) foram fornecidas pela empresa Texiglass Indústria e Comércio Têxtil (Brasil). Os tecidos híbridos de carbono/aramida (165 g/m²) e aramida/vidro (200 g/m²) foram fornecidos pela Barracuda Advanced Composites (Brasil), enquanto o tecido híbrido de carbono/vidro (160 g/m²) foi fornecido pela Texiglass (Brasil). As fibras naturais utilizadas foram algodão (126 g/m²), linho (150 g/m²) e juta (200 g/m²), da empresa Cia dos Tecidos Ltda (Brasil), sendo empregadas sem a realização de tratamento superficial prévio

Os materiais de núcleo (espumas poliméricas) avaliados foram poliuretano (PU), poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudado (XPS), poli(cloreto de vinila) (PVC) e poli(tereftalato de etileno) (PET). As espumas de PET (Divinycell PN100) e PVC (Divinycell H100) foram fornecidas pela Barracuda Advanced Composites (Brasil). As espumas de EPS

foram fornecidas pela empresa Isopack Indústria de EPS Ltda (Brasil) e as espumas de PU pela empresa Rhyno Foam (Brasil). As espumas foram utilizadas sem qualquer processamento adicional, sendo apenas cortadas nas dimensões necessárias para os ensaios.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Fabricação dos compósitos

Placas de compósitos representativas das “skins” de pranchas de surfe foram produzidas por meio da técnica de laminação manual (*hand lay-up*). Os tecidos de fibra foram cortados em dimensões aproximadas de $150 \times 200 \text{ mm}^2$ e laminados sobre uma base revestida com silicone, a fim de facilitar a desmoldagem após a cura. Foram utilizados dois tecidos por laminado, mantendo-se uma fração mássica aproximada fibra:resina de 40:60. As placas obtidas apresentaram espessuras finais entre aproximadamente 1,0 e 1,4 mm.

A resina epóxi foi misturada ao endurecedor na proporção mássica de 2:1, enquanto a resina poliéster foi misturada ao iniciador MEKP na proporção de 98:2, conforme especificações dos fabricantes. Após a impregnação manual dos tecidos, os laminados foram curados por 48 h à temperatura ambiente (aproximadamente $23 \text{ }^\circ\text{C}$), sob condições controladas de umidade. Todas as placas foram produzidas simultaneamente, sob as mesmas condições de processamento. Após a cura, os corpos de prova foram obtidos por corte em serra de fita.

4.2.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova dos compósitos foram cortados a partir das placas laminadas, de acordo com as dimensões exigidas por cada ensaio mecânico e termo-mecânico. Para os ensaios de tração, foram preparados corpos de prova com dimensões aproximadas de $250 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1,2 \text{ mm}$. Para os ensaios de análise dinâmico-mecânica (DMA), foram utilizados corpos de prova retangulares com dimensões aproximadas de $35 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times \sim 1 \text{ mm}$.

As espumas poliméricas foram apenas cortadas, sem preparação adicional. Para os ensaios de compressão, foram utilizados corpos de prova com dimensões de $25 \times 50 \times 50 \text{ mm}$. Para os ensaios de flexão, foram utilizados corpos de prova com dimensões de $200 \times 25 \times 25 \text{ mm}$. Para o ensaio de resiliência por *ball rebound*, foram utilizados corpos de prova com dimensões de $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}$.

4.2.3 Caracterizações

A morfologia das fibras e das espumas foi avaliada por microscopia óptica (MO), utilizando um microscópio ZEISS Axio Scope A1, e por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um equipamento JEOL JSM-6390LV. As amostras de espuma foram previamente metalizadas com ouro em um equipamento Quorum Q156R-ES. As áreas de seção transversal das espumas foram analisadas para determinação da morfologia celular. Para cada material, foram selecionados quatro pontos da amostra para contagem das células e determinação do tamanho médio das células por meio do *software* ImageJ. A densidade celular foi calculada a partir das Equações (1) e (2).

$$Vf = \left(1 - \left(\frac{\rho f}{\rho p} \right) \right) \quad (1)$$

$$Nf = \left(\frac{nM^2}{A} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{1}{1-Vf} \right) \quad (2)$$

Em que: Vf é o teor de vazios; ρf é a densidade do compósito expandido ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); ρp é a densidade do polímero ou do compósito ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); Nf é a densidade celular (número de células por cm^3); n é o número de células por micrografia; A é a área da micrografia (cm^2); e M é a ampliação da micrografia.

A análise dinâmico-mecânica (DMA) dos compósitos foi realizada em um equipamento Q800 DMA da *TA Instruments*, no modo *single cantilever*. Foram obtidos o módulo de armazenamento (E'), o módulo de perda (E'') e o fator de perda ($\tan \delta$). Os ensaios foram realizados em modo não isotérmico, na faixa de temperatura de 30 a 170 °C, com taxa de aquecimento de 3 °C/min, amplitude de deformação de 0,1% e frequência de 1 Hz.

Os ensaios de tração dos compósitos foram realizados de acordo com a norma ASTM D3039, utilizando uma máquina universal de ensaios EMIC DL10000. Foram ensaiados sete corpos de prova de cada material, à velocidade de 2 mm/min, até a ruptura. O comprimento útil (*gauge length*) foi de 150 mm. Foram determinados a resistência à tração, o módulo elástico e a deformação na ruptura, sendo os resultados expressos como valores médios.

A densidade volumétrica das espumas foi determinada pela razão entre massa e volume, de acordo com a norma ASTM D3574-11(A), utilizando cinco amostras de cada material.

Os ensaios de compressão das espumas foram realizados conforme a norma ASTM D1621-16, em uma máquina universal de ensaios EMIC DL10000, com velocidade de ensaio

de 2,5 mm/min. Foram utilizados cinco corpos de prova de cada material, sendo determinada a tensão necessária para reduzir a espessura do corpo de prova em até 80% da espessura inicial.

Os ensaios de flexão das espumas foram realizados de acordo com a norma ASTM D790-17, utilizando corpos de prova com dimensões de $200 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$, velocidade de ensaio de 1 mm/min e vão de apoio de 100 mm.

A resiliência das espumas foi avaliada pelo ensaio de *ball rebound*, conforme a norma ASTM D3574, utilizando um equipamento Maqtest. O ensaio consistiu na queda de uma esfera de aço de 16 mm de diâmetro e 16,7 g de massa a partir de uma altura de 500 mm, sendo registrada a altura de ressalto. Cada amostra foi testada cinco vezes para garantir a repetibilidade dos resultados.

A análise de flexão de 3 pontos nos compósitos com estrutura sanduíche foi realizada segundo orientações da norma ASTM c393/c393m-20. O teste de resistência à flexão das espumas foi realizado utilizando corpos de prova de $200 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$, com velocidade de ensaio de 1 mm/min e distância entre os apoios de 100 mm.

A análise de compressão transversal dos compósitos com estrutura sanduíche foi realizado segundo norma ASTM C364/C64M-07) utilizando um dispositivo adaptado (Figura 7) em uma máquina universal de ensaios EMIC DL10000. A resistência máxima a compressão transversal (σ) foi calculada segundo a Equação 3. A análise foi realizada em quintuplicata com corpos de prova de dimensões 200 mm x 50 mm x 25 mm.

$$\sigma = \frac{P_{max}}{[b \times t]} \quad (3)$$

Em que: σ é resistência máxima à compressão transversal (MPa), P_{max} é força final antes da falha (N); b é a largura da amostra (mm); t é a espessura do corpo de prova (mm).

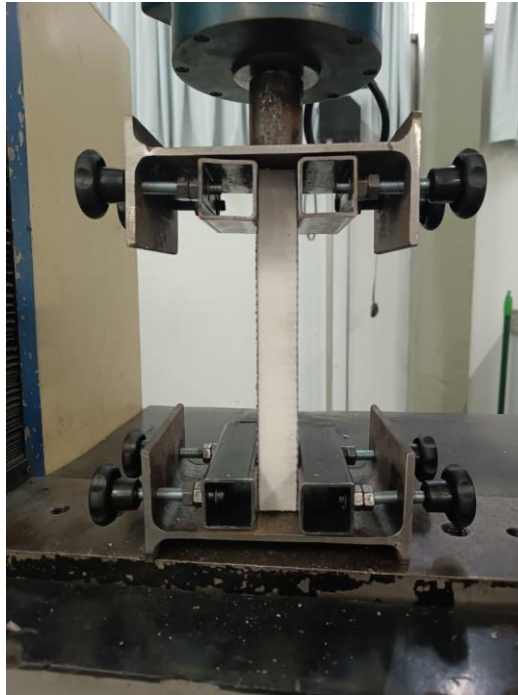


Figura 7 - Imagem fotográfica do dispositivo utilizada para análise de resistência à compressão transversal dos compósitos com estrutura sanduíche.

Segundo a norma, pode-se observar cinco modos de falhas aceitáveis e um não aceitável para a validação deste ensaio. A Figura 8 representa os modos de falhas, classificados segundo norma ASTM.

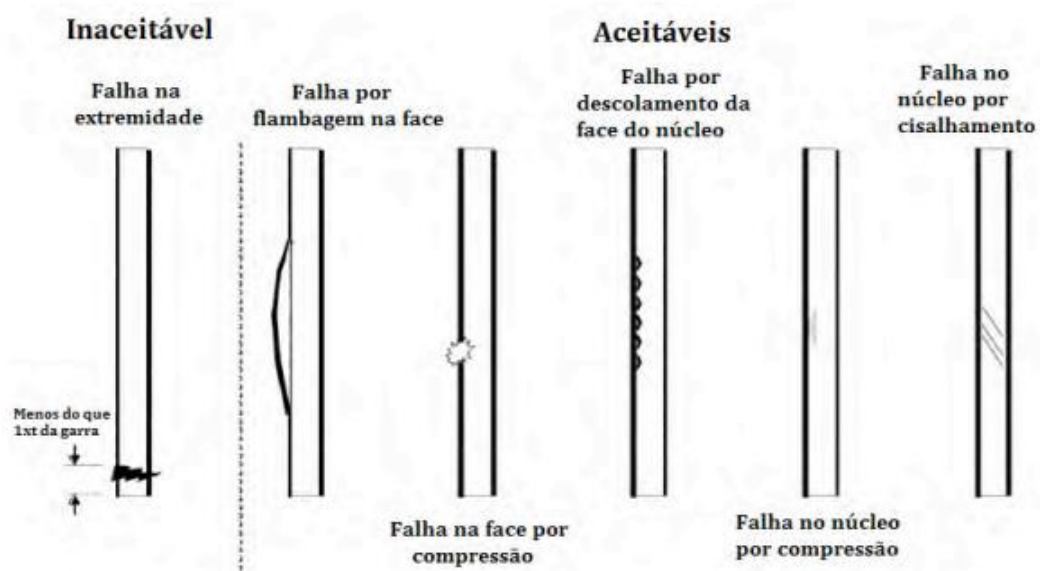


Figura 8 - Modos de falhas mais comuns observados nos ensaios de compressão transversal (ASTM C364/C64-07).

A representação dos mecanismos de deformação e falha são:

- Falha por flambagem nas faces (*facesheet buckling failure*), com descolamento da face do núcleo;
- Falha por compressão na face (*facesheet compressive failure*), com falha em alguma das faces;
- Falha por deslocamento da face do núcleo;
- Falha do núcleo por compressão (*core compression failure*);
- Falha do núcleo por cisalhamento.

A Figura 9 apresenta as atividades da metodologia realizadas:

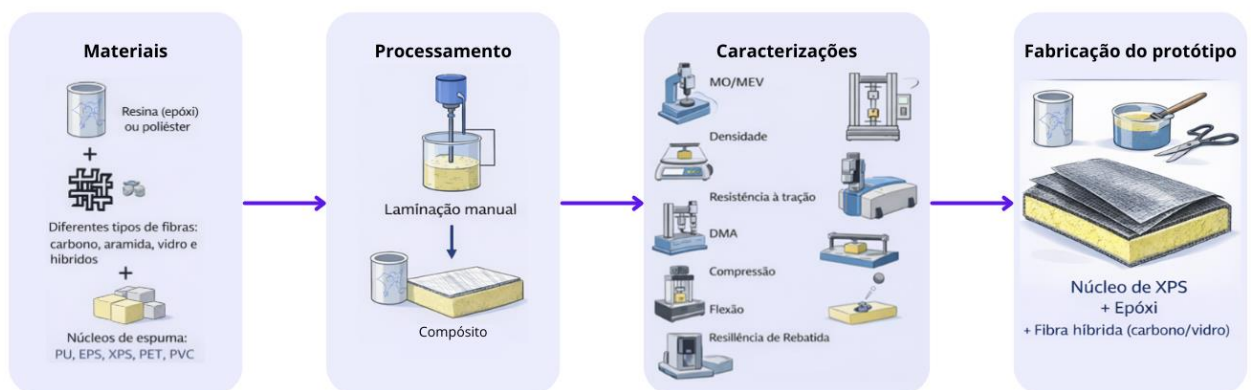


Figura 9 - Metodologia do desenvolvimento. Fonte: Autor (2025).

4.2.4 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o *software* GraphPad Prism, versão 5.0. As variáveis quantitativas foram expressas na forma de média e desvio padrão. O nível de significância adotado foi de $\alpha = 0,05$, correspondente a um intervalo de confiança de 95%. A normalidade da distribuição dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro–Wilk, de acordo com a Equação (4):

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

onde: $x(i)$ são os valores amostrais ordenados, \bar{x} é a média amostral, e a_i são constantes derivadas dos valores esperados das estatísticas de ordem de uma distribuição normal padrão e de sua matriz de covariância.

O teste de Shapiro–Wilk foi utilizado para verificar se a distribuição dos dados se aproximava de uma distribuição normal, considerando-se as seguintes hipóteses: hipótese nula (H_0): a variável de interesse provém de uma população com distribuição normal; hipótese alternativa (H_1): a variável de interesse não provém de uma população com distribuição normal. O teste fornece a estatística W , associada a um valor de p . Quando $p \leq \alpha$, a hipótese nula foi rejeitada, indicando que os dados diferem estatisticamente de uma distribuição normal; quando $p > \alpha$, a hipótese nula não foi rejeitada, indicando que os dados não diferem estatisticamente de uma distribuição normal. Todos os testes de Shapiro–Wilk foram realizados no *software* GraphPad Prism, que fornece automaticamente o valor de p a partir do valor calculado de W .

A comparação entre as médias das variáveis quantitativas para mais de dois grupos foi realizada por meio da análise de variância de uma via (ANOVA), seguida do teste *post hoc* de Tukey quando observada diferença estatisticamente significativa. Para a comparação entre duas médias, foi utilizado o teste t de *Student* para amostras independentes.

O teste *post hoc* de Tukey, também conhecido como *Tukey's Honest Significant Difference* (HSD), foi utilizado após a obtenção de um resultado estatisticamente significativo na ANOVA de uma via, com o objetivo de identificar quais pares de médias diferiram significativamente entre si. Esse teste é particularmente útil na comparação de múltiplas categorias de uma variável qualitativa, como, por exemplo, diferentes tipos de fibras.

O teste calcula a diferença mínima entre médias considerada estatisticamente significativa utilizando a distribuição do alcance q . A estatística do teste para a comparação entre duas médias \bar{x}_i e \bar{x}_j é dada pela Equação (5):

$$q = \frac{|\bar{x}_i - \bar{x}_j|}{\sqrt{\frac{MS_{within}}{n}}} \quad (5)$$

onde: \bar{x}_i e \bar{x}_j são as médias amostrais dos grupos i e j ; MS_{within} é o quadrado médio dentro dos grupos (estimativa combinada da variância obtida pela ANOVA); n é o número de observações por grupo (assumido igual ou aproximado); e q segue a distribuição do alcance studentizado.

Os valores de p resultantes foram obtidos a partir dessa distribuição e ajustados para comparações múltiplas. As diferenças foram consideradas estatisticamente significativas

quando o valor calculado de q excedeu o valor crítico para o nível de significância adotado, o número de grupos e os graus de liberdade correspondentes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização dos materiais utilizados na fabricação dos compósitos estruturais com configuração sanduíche, visando a aplicação em pranchas de surfe. São abordadas as propriedades mecânicas, termomecânica e morfológicas dos diferentes tipos de compósitos utilizados nas *skins* (laminados de fibra de reforço e resina termofixa) e núcleos (espumas estruturais), bem como os resultados dos ensaios complementares realizados com placas laminadas de uma e duas camadas, que subsidiaram a definição do sistema mais adequado para a fabricação do protótipo.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS *SKINS* (COMPÓSITOS - REFORÇOS E RESINAS)

5.1.1 Morfologia dos tecidos e aspecto visual dos compósitos

A Figura 10 mostra as micrografias obtidas por microscopia óptica (MO) dos tecidos utilizados na produção dos compósitos encontrados na camada externa (*skin*) da prancha de surfe. A Figura 11 apresenta uma imagem fotográfica dos compósitos produzidos com matriz epoxídica (os compósitos produzidos com poliéster insaturado apresentam características visuais semelhantes). Todos os tecidos analisados possuem orientação bidimensional. Os híbridos de vidro, aramida, carbono/aramida e carbono/vidro apresentam trama do tecido tipo plano (*plain weave*), enquanto os tecidos de carbono e híbridos de aramida/vidro possuem ligamento tipo sarjado (*twill weave*). Entre as fibras vegetais, o tecido de juta apresentou maior espaçamento entre os filamentos. É importante destacar que há uma ampla variedade de configurações e padrões de tecidos empregados na fabricação de pranchas de surfe. Neste estudo, os materiais analisados representam exemplos prontamente disponíveis em uma fábrica de pranchas de surfe, contudo, não constituem uma lista exaustiva.

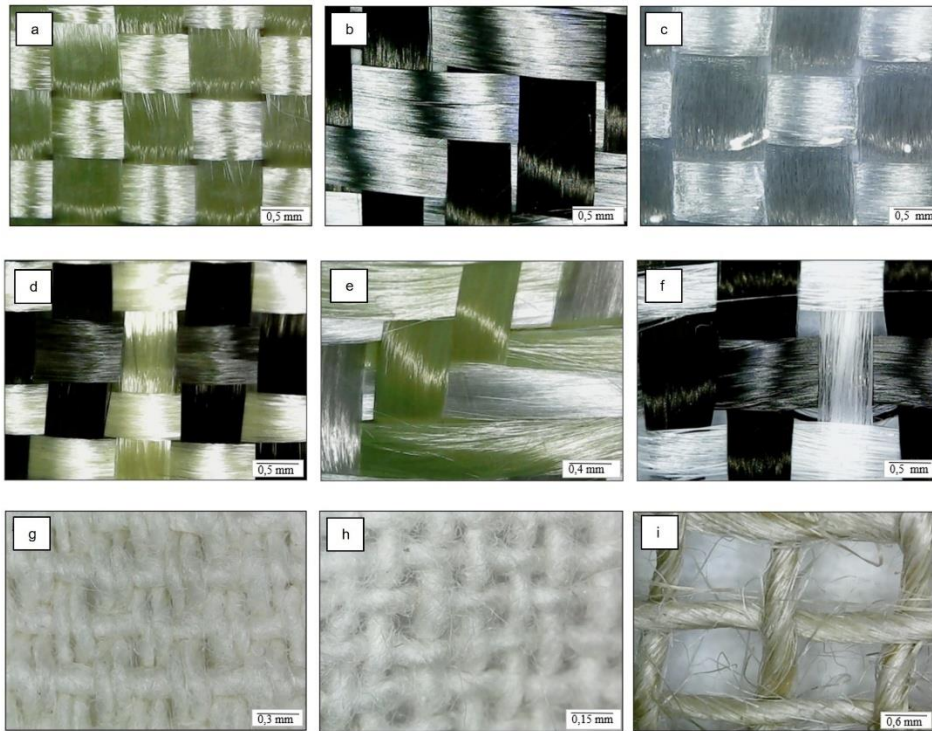


Figura 10 - Imagens de microscopia óptica dos tecidos de reforço utilizados: (a) aramida (plano), (b) carbono (sarjado), (c) vidro (plano), (d) aramida/carbono (plano), (e) aramida/vidro (sarjado), (f) carbono/vidro (plano), (g) algodão, (h) linho e (i) juta. Fonte: Autor (2025)



Figura 11 - Imagem fotográfica dos compósitos produzidos com resina epoxídica e tecidos de: (a) aramida, (b) carbono, (c) vidro, (d) aramida/carbono, (e) aramida/vidro, (f) carbono/vidro, (g) algodão, (h) linho e (i) juta. Fonte: Autor (2025)

O tipo de trama têxtil utilizado em compósitos poliméricos termofixos reforçados com fibras, tipicamente plano ou sarjado, tem impacto no desempenho mecânico, na impregnação da resina e na processabilidade do material final. Tecidos planos, caracterizados por um padrão

apertado de entrelaçamento “por cima e por baixo”, oferecem alta estabilidade dimensional e melhor resistência ao cisalhamento interlaminar devido ao alto grau de ondulação (*crimp*) e à densa interligação entre as fibras. No entanto, apresentam menores resistências à tração e à flexão, pois a ondulação das fibras reduz a eficiência da transferência de carga. Em contraste, tecidos sarjados, com padrão diagonal e menor ondulação, proporcionam melhores propriedades à tração e à flexão, maior resistência à fadiga e ao impacto, além de melhor conformabilidade (drapeabilidade), sendo mais adequados para geometrias complexas e aplicações em que a estética superficial é importante. Ainda assim, a estrutura mais solta dos tecidos sarjados pode torná-los mais suscetíveis à delaminação sob determinadas condições de carregamento (DALFI *et al.*, 2021; MIRDEHGHAN, 2021).

5.1.2 Propriedades mecânicas

A Figura 12 apresenta os gráficos de tensão-deformação obtidos na análise de resistência à tração dos compósitos produzidos, sendo os resultados determinados a partir da média de quatro corpos de prova para cada configuração avaliada. De modo geral, o comportamento de todas as curvas é semelhante, diferindo apenas nos valores de resistência à tração e deformação. Os materiais compósitos não apresentaram uma progressão gradual de formação de trincas, pois as amostras sofreram fratura catastrófica logo após o primeiro indício significativo de falha. A curva tensão-deformação não mostra descontinuidades que possam estar associadas a danos prévios, sugerindo o início abrupto da falha. O mesmo comportamento foi observado por Rios-Soberanis *et al.* (2012), que investigaram o comportamento mecânico de uma resina epoxídica reforçada com manta e tecido de fibra de vidro. Os autores identificaram três modos de falha: (i) delaminação inicial na interface fibra–matriz, independente da geometria do tecido; (ii) propagação de trincas transversais levando à fratura final; e (iii) ruptura súbita na ocorrência da primeira trinca principal, sem danos visíveis prévios. Jones e Pickett (2005) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos têxteis e constataram que compósitos termofixos reforçados apresentam comportamento elástico linear até a falha; contudo, há indícios de que materiais de matriz termofixa também podem sofrer escoamento por cisalhamento, fenômeno igualmente observado nas amostras avaliadas neste trabalho.

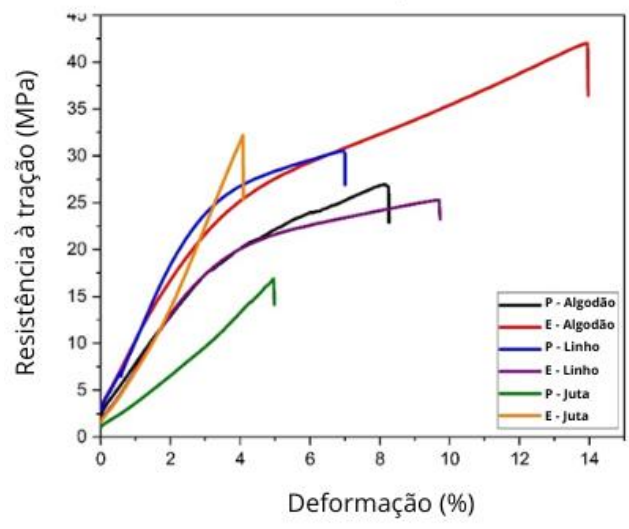
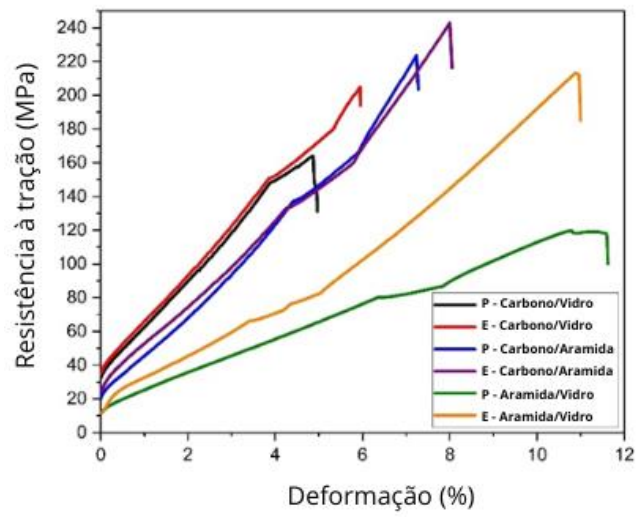
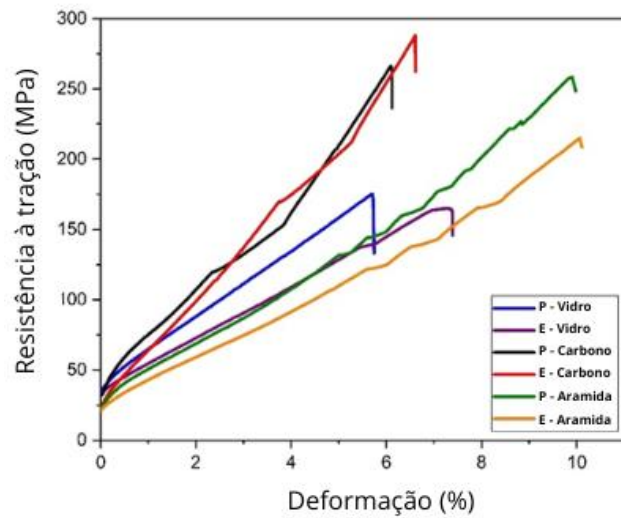


Figura 12 - Curvas tensão–deformação obtidas nos ensaios de tração dos compósitos estudados. “P” representa amostras produzidas com poliéster e “E” com epóxi.

A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas médias (\pm desvio padrão) e as análises estatísticas correspondentes. Foi adotado nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Para a comparação entre matrizes (epóxi e poliéster) em cada tipo de reforço, foi aplicado o teste t de Student para amostras independentes. Já para a comparação entre diferentes reforços dentro de cada matriz, utilizou-se ANOVA de uma via seguida de teste post hoc de Tukey.

Valores de p inferiores a 0,05 indicam que a matriz polimérica exerceu influência estatisticamente significativa sobre a propriedade analisada para aquele sistema específico.

Considerando a resistência à tração, os menores valores foram obtidos para os compósitos reforçados com fibras vegetais, independentemente da matriz utilizada. Os resultados variaram entre 14 MPa (linho/poliéster) e 42 MPa (algodão/epóxi), evidenciando desempenho mecânico inferior quando comparado às fibras sintéticas. Para as fibras sintéticas, híbridas ou não, os valores de resistência foram substancialmente superiores, alcançando 283 MPa para carbono/epóxi e 260 MPa para carbono/poliéster.

Considerando o módulo elástico, foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as matrizes epóxi e poliéster para os compósitos reforçados com aramida ($p = 0,009$), aramida/vidro ($p = 0,005$) e juta ($p < 0,001$). Para a fibra de aramida, o módulo foi superior na matriz poliéster (3971 MPa) em comparação à epóxi (2428 MPa). Já para o sistema aramida/vidro, o módulo elástico foi maior quando utilizada a matriz epóxi (2322 MPa) em relação à poliéster (1279 MPa). De forma semelhante, a fibra de juta apresentou módulo mais elevado na matriz epoxídica (452 MPa) do que na de poliéster (321 MPa). Para os demais reforços, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas quanto ao módulo elástico em função da matriz utilizada. Novamente, para ambas as resinas, as fibras sintéticas apresentaram módulo elástico superior em comparação às vegetais, devido à sua estrutura molecular controlada e à possibilidade de ajuste de propriedades durante a fabricação (Elfaleh *et al.*, 2023).

Com relação à deformação no ensaio mecânico, apenas as fibras de aramida/vidro, algodão e linho apresentaram significância estatística entre as diferentes resinas utilizadas na matriz. Para todas elas, o compósito produzido com resina epóxi apresentou maior alongamento do que aquele produzido com resina poliéster. As demais fibras não mostraram significância estatística segundo os critérios adotados. Para ambas as resinas utilizadas, fibras sintéticas e vegetais apresentaram valores semelhantes de alongamento percentual.

Em uma revisão sobre as propriedades de tração de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, Ku *et al.* (2011) apresentaram diferentes valores de resistência à tração para distintos tipos de compósitos. Os autores discutem a influência do tipo, comprimento e orientação das fibras, bem como o papel da interface fibra/matriz na determinação da resistência e do módulo de tração. A revisão também destaca os efeitos de tratamentos químicos superficiais voltados a melhorar a adesão interfacial e a eficiência na transferência de tensões. Embora os compósitos de fibras naturais geralmente apresentem desempenho mecânico inferior em relação aos sintéticos, oferecem vantagens significativas como baixa densidade, menor custo e benefícios ambientais, o que sustenta seu potencial em aplicações automotivas, na construção civil e em bens de consumo. De modo geral, os valores de resistência à tração de compósitos reforçados com fibras naturais aumentam com o incremento do teor de fibras até atingir um valor máximo, a partir do qual tendem a decair. Por outro lado, é amplamente aceito que os valores do módulo de elasticidade aumentam progressivamente com o aumento do teor de fibras. Em contraste, alguns pesquisadores relataram tendência oposta, atribuindo a discrepância a fatores como incompatibilidade entre matriz e fibras, processos de fabricação inadequados e degradação das fibras.

Ramachandran *et al.* (2025) investigaram a resistência à tração de compósitos baseados em fibras sintéticas e naturais, incluindo fibra de carbono (CF), fibra de vidro não tecida (GF), híbrido CF+GF (H1), linho+cânhamo (FH) e híbrido linho+cânhamo+CF+GF (H2), todos fabricados com 10 camadas via *vacuum bagging* e *hand lay-up*. A CF apresentou o melhor desempenho (550 MPa), seguida por H1 (~500 MPa) e GF (~450 MPa). Em contraste, os compósitos naturais FH (~150 MPa) e H2 (~200 MPa) apresentaram menor resistência, devido principalmente à fraca interação fibra–matriz e à hibridização subótima. A incorporação de fibras sintéticas em H2 aumentou a rigidez e a resistência, indicando que o empilhamento alternado entre fibras naturais e sintéticas pode mitigar as limitações mecânicas dos reforços de origem vegetal. No entanto, a limitada transferência de carga e o arrancamento de fibras sob tensão restringiram o desempenho máximo dos híbridos naturais.

De maneira consistente com esses achados, os resultados demonstram que a maior parte dos compósitos reforçados com fibras sintéticas apresentou elevada resistência à tração e baixa sensibilidade estatística ao tipo de matriz, ao passo que os sistemas com fibras naturais evidenciaram maior dependência da resina empregada. Esse comportamento pode ser atribuído à natureza polar e hidrofílica das fibras vegetais, que tende a reduzir a compatibilidade

interfacial com matrizes poliméricas predominantemente hidrofóbicas. A menor adesão fibra-matriz compromete a eficiência de transferência de carga, limitando o desempenho mecânico global do compósito (MATHEL *et al.*, 2025).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração dos compósitos produzidos, incluindo as análises estatísticas (teste t e ANOVA/Tukey).

Fibra	Resina termofixa (média + desvio padrão)		p [†] -Valor
	Epóxi	Poliéster	
Resistência à tração (MPa)			
Vidro	178 ± 25 ^{a,d}	176 ± 43 ^{a,c}	0,927
Carbono	283 ± 64 ^b	260 ± 23 ^b	0,481
Aramida	225 ± 54 ^{a,b}	272 ± 35 ^b	0,138
Carbono/vidro	197 ± 27 ^{a,d}	162 ± 35 ^a	0,123
Carbono/aramida	254 ± 42 ^{a,b}	222 ± 25 ^{b,c}	0,182
Aramida/vidro	202 ± 36,31 ^{a,b}	141 ± 41 ^a	0,036
Algodão	42 ± 12 ^c	29 ± 1,06 ^d	< 0,001
Linho	26 ± 1 ^c	14 ± 0,50 ^d	< 0,001
Juta	33 ± 2 ^c	19 ± 2,45 ^d	< 0,001
p [‡] -valor	< 0,001	< 0,001	
Módulo elástico (MPa)			
Vidro	2424 ± 183 ^{a,b}	2587 ± 832 ^{a,d}	0,680
Carbono	4672 ± 1878 ^a	5101 ± 272 ^b	0,627
Aramida	2428 ± 783 ^{a,b}	3971 ± 652 ^{a,b}	0,009
Carbono/vidro	5074 ± 235 ^a	3662 ± 838 ^c	0,273
Carbono/aramida	5196 ± 254 ^a	4854 ± 1477 ^b	0,802
Aramida/vidro	2322 ± 417 ^{a,b}	1279 ± 432,0 ^c	0,005
Algodão	373 ± 34,4 ^b	307 ± 56 ^e	0,055
Linho	285 ± 14,0 ^b	579 ± 386 ^e	0,127
Juta	452 ± 24,5 ^b	321 ± 28 ^e	< 0,001
p [‡] -valor	< 0,001	< 0,001	
Deformação (%)			
Vidro	7,8 ± 0,8 ^a	7,4 ± 1,8 ^{a,c}	0,648
Carbono	7,8 ± 1,2 ^a	6,6 ± 0,8 ^{a,c,d}	0,192
Aramida	10,8 ± 0,6 ^b	10,6 ± 1,2 ^{b,e}	0,679
Carbono/vidro	5,4 ± 0,6 ^{c,e}	5,4 ± 0,9 ^{a,d}	0,921
Carbono/aramida	6,8 ± 0,878 ^{a,c}	6,4 ± 1,6 ^{a,f}	0,671
Aramida/vidro	11,0 ± 0,9 ^b	13,2 ± 1,7 ^e	0,039
Algodão	14,3 ± 1,0 ^d	8,2 ± 0,7 ^{c,e,f}	< 0,001
Linho	9,5 ± 1,0 ^{a,b}	6,6 ± 1,0 ^{c,d}	0,002
Juta	4,3 ± 0,5 ^e	4,6 ± 1,9 ^d	0,760
p [‡] -valor	< 0,001	< 0,001	

† Valor obtido após a aplicação do teste t de Student para amostras independentes; ‡ Valores obtidos após a aplicação do teste ANOVA de uma via; ^{a,b,c,d,e,f} Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas após a aplicação do teste post hoc de Tukey (p ≤ 0,05);

Diversos estudos sugerem que a resina epóxi apresenta melhor desempenho em comparação à resina poliéster (CAVALCANTI *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2021; THAKUR *et al.*, 2021; DE OLIVEIRA *et al.*, 2017). Essa conclusão, contudo, não foi evidente nas amostras estudadas, já que os grupos de compósitos produzidos com ambas as resinas e reforçados com diferentes fibras sintéticas apresentaram propriedades mecânicas semelhantes. Apenas no grupo de amostras produzidas com fibras naturais essa diferença foi perceptível, com destaque para a resina epóxi em relação à poliéster.

Nos compósitos produzidos neste trabalho, considerando o processo de fabricação via *hand lay-up* e a alta fração volumétrica de fibras, é possível afirmar que as fibras foram as principais responsáveis pelas propriedades mecânicas de resistência à tração. As matrizes utilizadas (epóxi ou poliéster) desempenham papel secundário, atuando na transferência de carga entre as fibras, na proteção contra o ambiente e na manutenção da geometria do compósito. É importante salientar que, na análise mecânica uniaxial de tração, a resposta é fortemente dominada pelas características das fibras, que são os elementos mais rígidos do compósito. Nos compósitos reforçados com fibras vegetais, cuja natureza é mecanicamente inferior às fibras sintéticas, o efeito da matriz polimérica foi mais pronunciado.

Ao observar os dados e comparar o efeito do tipo de reforço, nota-se que a fibra de carbono (em ambas as resinas poliméricas) apresentou o melhor desempenho em resistência à tração, seguida pelas fibras de aramida e carbono/aramida. As composições híbridas, com misturas de fibras (especialmente carbono/aramida), podem se aproximar do desempenho das fibras puras de carbono, oferecendo potencial para otimização do custo-benefício ou de outras propriedades combinadas, como peso, tenacidade e custo.

As fibras vegetais, apesar do apelo ecológico e da possibilidade de uso na fabricação de pranchas de surfe, não conseguem desempenhar a mesma função de reforço que as fibras sintéticas. Através da análise mecânica de tração, é possível classificar os compósitos quanto ao tipo de reforço na seguinte ordem de desempenho: carbono > carbono/aramida \approx aramida > carbono/vidro > vidro > aramida/vidro > algodão > juta > linho.

O desempenho mecânico das pranchas de surfe é amplamente determinado pela integridade estrutural e pelo comportamento dos materiais que compõem sua *skin*. Essa camada tem papel crucial na distribuição de tensões, na resistência a impactos e na rigidez e flexibilidade necessárias para a manobrabilidade, durabilidade e desempenho hidrodinâmico.

A prancha precisa ser altamente resistente, mas não excessivamente rígida, pois perderia sua capacidade de flexão. Um compósito com baixa rigidez à flexão pode resultar em deformação excessiva, reduzindo o controle, enquanto *skins* muito rígidas podem parecer pouco responsivas ao surfista (CRAMERI *et al.*, 2023).

5.1.3 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

Os valores de módulo de armazenamento (E') (Figuras 13a–c), módulo de perda (E'') (Figuras 13d–f) e tan delta (Figuras 13g–i) de todos os compósitos são apresentados a seguir. A Tabela 3 mostra os valores de módulo de armazenamento em duas temperaturas distintas (região vítrea e estado elastomérico), enquanto a temperatura de transição vítrea é apresentada para o módulo de perda e para o tan delta. Para melhor compreensão dos resultados de DMA, as três propriedades analisadas serão discutidas separadamente.

5.1.3.1 Módulo de armazenamento (E')

De modo geral, o módulo de armazenamento segue o mesmo comportamento para todos os compósitos: um platô inicial (estado vítreo), uma queda acentuada da curva (região de transição vítrea) e, em seguida, um novo platô (estado elastomérico). As principais diferenças estão nos valores de E' ao longo da curva, na extensão do platô inicial e na diferença de módulo entre os estados vítreo e elastomérico.

Ferry *et al.* (1961) afirmam que para polímeros não reforçados, os valores de E' na região vítrea dependem principalmente do empacotamento das cadeias e das forças intermoleculares. Para polímeros reforçados (compósitos e nanocompósitos), o comportamento nesta região varia. Normalmente, em compósitos contendo fibras sintéticas, observam-se maiores valores de módulo para fibras mais resistentes e com o aumento do teor de fibras; já para compósitos reforçados com fibras vegetais (e nanocompósitos), os valores tendem a ser mais próximos entre si (AROWOLO *et al.*, 2024; ORNAGHI *et al.*, 2022; JAYANARAYANAN *et al.*, 2017). Em todos os casos, à medida que a fração de reforço aumenta, o número de cadeias poliméricas conectadas diminui.

Se o reforço for mais rígido (como no caso de fibras sintéticas), ele atua como ponto de ancoragem estável, restringindo o movimento molecular; se for mais flexível (como no caso de fibras vegetais), o movimento molecular não é restringido conforme a temperatura aumenta, e os valores passam a depender principalmente da matriz (Schneider *et al.*, 2023; Papageorgiou

et al., 2017). Além disso, quanto menor o diâmetro da fibra e maior o seu comprimento, maior tende a ser o efeito de reforço (VIZUREANU *et al.*, 2025).

A Figura 13a representa os compósitos contendo fibras de vidro, carbono e aramida em matrizes epóxi e poliéster. Um comportamento semelhante foi observado na literatura para diferentes reforços e matrizes. Ornaghi *et al.* (2015) estudaram a análise dinâmico-mecânica de compósitos de poliéster reforçados com 23%, 29% e 38% em volume de fibra de sisal. Foi observado módulo de armazenamento de aproximadamente 3000 MPa na região vítrea para todos os compósitos, com diferenças significativas na região elastomérica (200, 800 e 1100 MPa, conforme o teor de fibra de sisal). Os autores afirmam que o comportamento elástico das fibras e a interface fibra/matriz têm impacto mínimo na região vítrea; entretanto, a presença de fibras causa grande variação na região elastomérica (diferença que tende a diminuir para teores de reforço acima de 30% em volume). Esse fenômeno está associado a alterações no movimento dinâmico das cadeias poliméricas, refletindo diretamente nas propriedades mecânicas.

Nos compósitos contendo fibra de carbono como reforço (P-carbono e E-carbono), foram obtidos os maiores valores (Tabela 3) na região vítrea (35 °C), seguidos pelos compósitos com fibras de aramida e vidro. A matriz polimérica não influenciou significativamente os resultados, apesar de serem esperados valores ligeiramente maiores para os compósitos epoxídicos do que para os de poliéster, a principal influência foi o tipo de fibra. A resistência das fibras segue a tendência: carbono > aramida > vidro.

O platô inicial (da região vítrea até o início da transição vítrea, determinado pela queda acentuada da curva) não seguiu um padrão: E-aramida e E-carbono apresentaram valores menores em comparação aos demais compósitos, que mostraram resultados semelhantes entre si. Os valores de E' no estado elastomérico seguem a mesma tendência mencionada, o que significa que a “perda de propriedade” durante a transição ocorre de forma proporcional em todos os compósitos estudados.

Nos compósitos híbridos (Figura 13b), os valores médios foram mais homogêneos entre si. Não houve melhora substancial nos valores de E' nem no platô, porém a diferença entre o módulo nas regiões vítrea e elastomérica é menor em comparação aos compósitos contendo apenas um tipo de fibra. Essa diferença reduzida é atribuída ao maior coeficiente de reforço dos compósitos híbridos.

Em termos práticos (considerando o uso em pranchas de surfe), os compósitos operam em temperaturas próximas ao início da região vítrea, onde os valores de módulo são mais estáveis; portanto, a diferença entre as regiões vítrea e elastomérica pode ser desprezível.

Por fim, os compósitos contendo fibras naturais (Figura 13c) apresentaram valores de E' pelo menos três vezes menores que os demais. É esperado que compósitos vegetais apresentem módulo de armazenamento inferior na região vítrea em comparação aos sintéticos. Nota-se, contudo, que o platô na região vítrea se estende em faixa de temperatura semelhante à dos compósitos sintéticos, indicando que os valores de E' são mais influenciados pelo tipo de fibra, enquanto a estabilidade térmica é determinada pela matriz polimérica.

Considerando o uso em pranchas de surfe, pode-se afirmar que a região vítrea (Tabela 3 – 35 °C) é a mais relevante para comparação dos materiais no estado elastomérico. Certos tecidos sintéticos permitem moldar compósitos com maior rigidez, especialmente os contendo carbono, enquanto materiais reforçados com fibras de vidro ou aramida, bem como híbridos vidro/aramida, mostram-se opções promissoras para pranchas de uso geral ou iniciante, devido à rigidez intermediária. Isso justifica o uso difundido da fibra de vidro, que apresenta menor custo relativo e ampla disponibilidade comercial quando comparada à fibra de aramida.

5.1.3.2 Módulo de perda (E'') e tan delta

A energia dissipada na forma de calor durante o ciclo de deformação é denominada módulo de perda (E'') (Figuras 13d–f). Quanto maior o E'' , menor o E' e vice-versa; assim, o pico máximo de E'' coincide com a taxa máxima de queda do módulo de armazenamento, deslocado levemente para temperaturas mais altas. Materiais capazes de armazenar mais energia na região vítrea dissipam também mais energia na região de transição vítrea.

Quando uma tensão externa é aplicada ao sistema, as cadeias moleculares absorvem essa tensão e retêm grande parte dela. Com o aumento da temperatura, a energia interna do sistema cresce, e mais cadeias atuam cooperativamente para dissipar a energia recebida (FERRY, 1961). Essa dissipação ocorre por movimento de reptação (semelhante ao movimento de cobras ou vermes) e envolve certo número de espinhas dorsais das cadeias poliméricas. Em determinado momento, esse movimento é suficiente para afastar as cadeias entre si, e a energia armazenada é rapidamente dissipada. Visualmente, observa-se uma diminuição em E' e um aumento em E'' . Fenomenologicamente, há maior volume livre disponível para o movimento das moléculas e menor restrição imposta pelas cadeias vizinhas (TEJEDOR; RAMÍREZ, 2019).

Para Mohanraj *et al.* (2025) o pico máximo é proporcional à quantidade de energia recebida no estado vítreo, enquanto a largura do pico está relacionada à homogeneidade estrutural do compósito. De acordo com a Tabela 3, não foi observada tendência entre os valores de pico em Tg para os compósitos estudados. Como o platô observado em E' não se alterou significativamente, é esperado que o pico máximo também siga essa estabilidade. Após o pico máximo, os valores diminuem, pois as cadeias poliméricas deixam de armazenar energia e a perda como calor se torna constante.

O comportamento do tan delta (Figuras 13g–i) é semelhante ao do E'', tanto na forma das curvas quanto na descrição, mas os valores de pico são deslocados para temperaturas mais altas, já que tan delta é a razão E''/E'. Diferentemente dos valores de E'', aqui os compósitos com resina poliéster apresentaram valores mais altos que os de resina epóxi, embora os resultados não tenham seguido uma tendência clara entre os tipos de reforço.

Para aplicações em pranchas de surfe, a temperatura de transição vítrea (tan delta máximo) é um indicador-chave da capacidade do compósito de manter sua rigidez com o aumento da temperatura. Assim, deve-se evitar expor a prancha a condições que ultrapassem essa temperatura de transição, que pode ser considerada como referência para a temperatura de serviço do material.

Os valores de Tg obtidos a partir do módulo de perda e do tan delta situam-se entre 50 e 60 °C, mostrando-se independentes do tipo de reforço utilizado. Estudos similares relatam Tg variando entre 60 e 100 °C, dependendo do tipo de matriz polimérica (poliéster ou epóxi). Essa semelhança está relacionada ao fato de que o movimento molecular depende fortemente das características da matriz, enquanto os valores de módulo de armazenamento são mais influenciados pelo tipo e teor de fibra (ORNAGHI *et al.*, 2015; KUMAR *et al.*, 2025; DHANAPAL *et al.*, 2025; ISHTIAQ *et al.*, 2024; PARVIZI *et al.*, 2025).

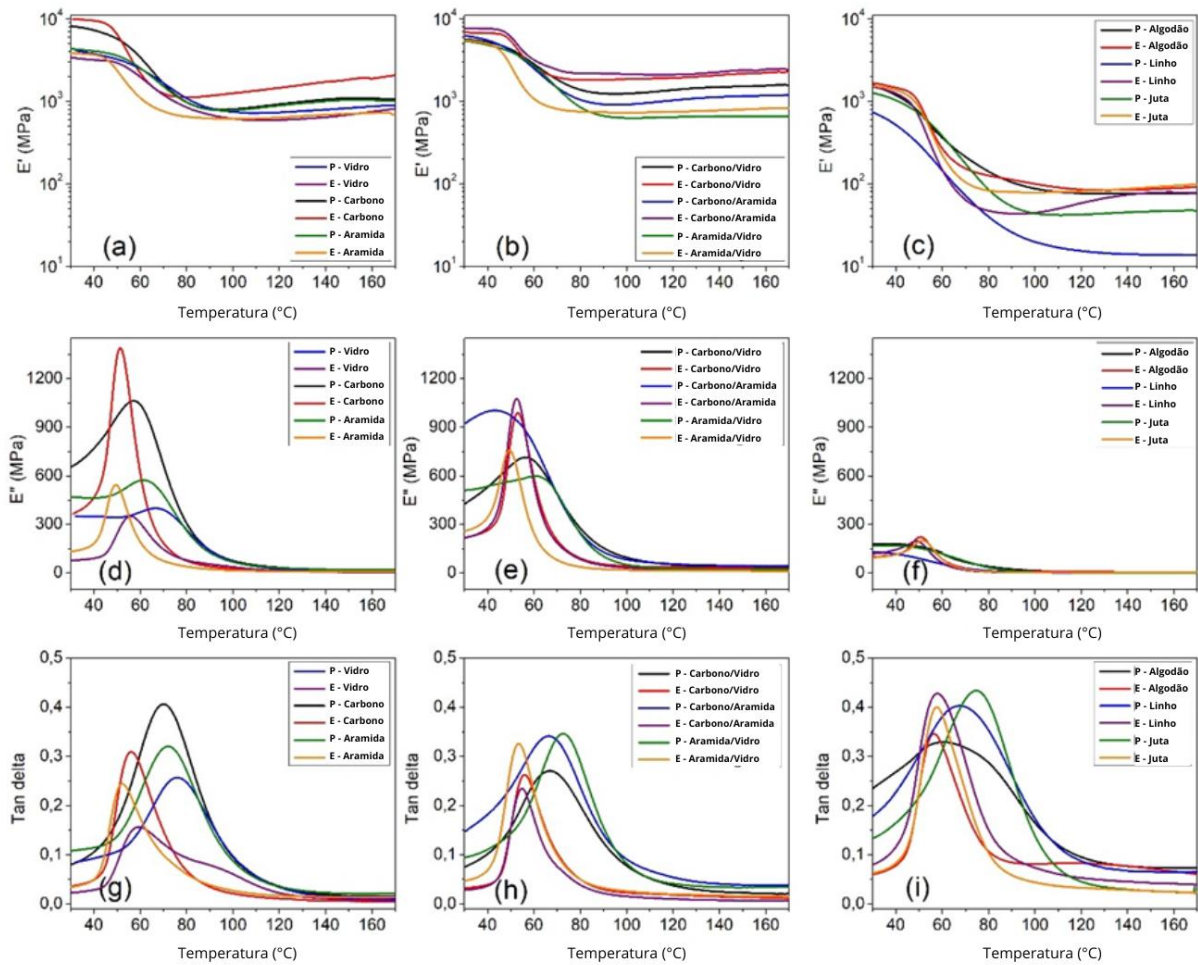


Figura 13 - Módulo de armazenamento (E') (a, b, c), módulo de perda (E'') (d, e, f) e fator de amortecimento ($\tan \delta$) (g, h, i) obtidos por análise dinâmico-mecânica (DMA) dos compósitos estudados.

Tabela 3 - Resultados obtidos por meio da análise dinâmico-mecânica (DMA) para os compósitos estudados

Fibra	Resina termofixa	
	Epóxi	Poliéster
	E' (MPa) - 35 °C	
Vidro	3258	3981
Carbono	9755	7787
Aramida	3759	4198
Carbono/vidro	6774	5475
Carbono/aramida	7618	5917
Aramida/vidro	5313	5149
Algodão	1571	1375
Linho	1388	628
Juta	1466	1158

E' (MPa) - 150 °C		
Vidro	688	828
Carbono	1841	1096
Aramida	705	1038
Carbono/vidro	2162	1520
Carbono/aramida	2387	1155
Aramida/vidro	796	661
Algodão	86	76
Linho	78	14
Juta	91	46
T _g (°C) - obtida a partir do módulo de perda		
Vidro	56	67
Carbono	51	57
Aramida	49	62
Carbono/vidro	53	56
Carbono/aramida	52	43
Aramida/vidro	49	61
Algodão	50	~36
Linho	52	~30
Juta	49	~35
T _g (°C) - obtida a partir do tan delta		
Vidro	59	76
Carbono	56	70
Aramida	52	72
Carbono/vidro	56	67
Carbono/aramida	55	66
Aramida/vidro	54	73
Algodão	56	63
Linho	58	67
Juta	58	75

A periodicidade multinível é uma característica estrutural comum em compósitos naturais. Para alcançar uma modelagem eficiente e precisa de fenômenos dinâmicos transientes relacionados a materiais ou estruturas multiescala, seria vantajoso integrar o método de homogeneização computacional com o método explícito de elementos finitos, conforme mencionado por Gao *et al.* (2025) e Liu *et al.* (2025), promovendo uma compreensão aprofundada que explique os mecanismos subjacentes ao desempenho entre diferentes materiais. Métodos tradicionais de homogeneização conseguem tratar com sucesso o comportamento de estruturas periódicas uniformes, porém enfrentam dificuldades para

representar de forma eficaz o desempenho de estruturas hierárquicas multiescala. Essa abordagem é promissora e pode ser utilizada em estudos futuros.

Fazendo uma conexão direta com a prática do surfe, a DMA revelou diferenças significativas entre as matrizes epóxi e poliéster no que diz respeito ao comportamento viscoelástico dos compósitos usados como *skins* de prancha. Os compósitos à base de epóxi exibiram valores maiores do módulo de armazenamento (E'), indicando uma estrutura mais rígida e maior eficiência na transferência de energia durante deformações cíclicas. Essa característica confere às pranchas em epóxi uma resposta mais rápida e precisa, resultando em maior velocidade e melhor desempenho em manobras que exigem reatividade e controle da flexão. A menor razão de amortecimento ($\tan \delta$) e a amplitude reduzida da curva observadas nesses sistemas refletem menor dissipação de energia, o que se traduz em uma recuperação elástica mais imediata, aumentando a sensibilidade e a resposta da prancha às variações de carga aplicadas pelo surfista.

Em contraste, os compósitos produzidos com resina poliéster apresentaram valores mais altos de $\tan \delta$ e curvas mais largas, indicando maior capacidade de dissipação de energia ocorrendo de forma mais lenta, produzindo assim uma resposta mais amortecida e gradual. Essa característica resulta em pranchas com *flex* (capacidade da prancha se curvar) mais suave e uma sensação de navegação mais equilibrada, favorecendo a estabilidade e o conforto do usuário, especialmente em mar agitado ou em pranchas de maior volume. A maior perda viscoelástica observada em sistemas poliéster proporciona uma resposta mais lenta à deformação, tornando o comportamento da prancha mais previsível e tolerante a variações de técnica. Portanto, o comportamento dinâmico medido pela DMA confirma que a resina epóxi é mais adequada para projetos voltados à reatividade e desempenho em manobras, enquanto a resina poliéster mantém sua relevância em configurações orientadas à estabilidade e suavidade durante a navegação.

5.2 ANÁLISE DOS DIFERENTES NÚCLEOS DE ESPUMAS POLIMÉRICAS

5.2.1 Propriedades mecânicas

As Tabelas 4 e 5 apresentam as propriedades mecânicas de resistência à compressão e à flexão, respectivamente, para diferentes núcleos de espumas poliméricas. Os dados estatísticos correspondentes também estão incluídos. A avaliação mecânica das espumas de PU, EPS, XPS, PET e PVC fornece informações essenciais para sua integração como núcleos em pranchas de surfe revestidas por sistemas laminados, nos quais o equilíbrio entre peso, rigidez,

resistência ao impacto e desempenho à flexão influencia diretamente a qualidade da navegação, a durabilidade e a processabilidade.

Para aplicação em pranchas de surfe, o resultado de compressão em baixa deformação (Tabela 4) é o mais relevante, uma vez que, se o núcleo perder sua forma física, perde também sua função estrutural. Na resistência à compressão a 10 % de deformação, observou-se o seguinte aumento:

EPS < PU < XPS < PET < PVC.

Notavelmente, o PVC apresentou os maiores valores de resistência à compressão ($1,7 \pm 0,4$ MPa) e o maior módulo elástico em compressão (55 MPa), evidenciando sua adequação em aplicações estruturais que envolvem altas cargas. Em contrapartida, o EPS apresentou os menores valores tanto de módulo elástico em compressão quanto de resistência à compressão.

Ramsteiner *et al.* (2001) estudaram o comportamento de deformação de espumas com células fechadas de PS, células abertas de melamina e células com perfurações nas lamelas em PUR. Os autores afirmam que espumas com células abertas apresentam menor rigidez e resistência em comparação às espumas com células fechadas. Em espumas de células fechadas, o alongamento das lamelas sob tração é mais eficiente na sustentação de tensões do que o dobramento que ocorre sob compressão. O padrão de deformação além do ponto de escoamento, durante a compressão, é não uniforme. Em espumas anisotrópicas, a resistência e rigidez na direção do alongamento das células são maiores do que aquelas medidas perpendicularmente a essa direção. À medida que a espuma se aproxima do limite de compressão, o ar preso nas células fechadas começa a ser expulso. A destruição das células ocorre de forma heterogênea, sendo a densidade um fator determinante na resistência à compressão das espumas.

Chakravarty (2010) revisou o comportamento de compressão de diversas espumas poliméricas, incluindo EPP, PS, PU, elastômeros e epóxi, testadas em diferentes densidades e taxas de deformação. O estudo destacou que as células das espumas geralmente apresentam morfologias hexagonais ou circulares irregulares, com distribuição uniforme. As principais conclusões indicam que: (i) um platô prolongado de tensão corresponde a um colapso celular aumentado e a maior absorção de energia; (ii) o encruamento por deformação reflete o processo de densificação, levando a um comportamento semelhante ao de sólidos e à perda de integridade; (iii) a resistência à compressão aumenta com a taxa de deformação e com a densidade, sendo esta o fator dominante; (iv) a absorção de energia é favorecida por maiores

taxas de deformação e densidades; (v) Temperaturas ambientais elevadas amolecem as espumas, reduzindo resistência e capacidade de absorção de energia; (vi) a microestrutura influencia fortemente a resposta mecânica, espumas de mesma densidade, mas com arquiteturas distintas, podem apresentar diferentes resistências e capacidades de absorção.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas de resistência à compressão de diferentes espumas poliméricas

Amostra de Espuma	Resistência à compressão a 10% de deformação (MPa)	Resistência à compressão a 40% de deformação (MPa)	Resistência à compressão a 70% de deformação (MPa)	Módulo elástico em compressão (MPa)
PU	0,15 ± 0,01 ^a	0,30 ± 0,03 ^a	0,46 ± 0,01 ^a	4,82 ± 0,20 ^a
EPS	0,08 ± 0,01 ^a	0,15 ± 0,01 ^b	0,31 ± 0,04 ^b	1,79 ± 0,03 ^a
XPS	0,30 ± 0,02 ^a	0,37 ± 0,01 ^c	0,75 ± 0,02 ^c	12 ± 2 ^b
PET	0,85 ± 0,07 ^b	1,36 ± 0,05 ^d	2,47 ± 0,10 ^d	23,6 ± 1,5 ^c
PVC	1,7 ± 0,4 ^c	2,27 ± 0,04 ^e	3,27 ± 0,06 ^e	55 ± 6 ^d
p[‡]-valor	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

‡ Valores obtidos após a aplicação do teste ANOVA de uma via; ^{a,b,c,d,e} Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas após a aplicação do teste post hoc de Tukey ($p \leq 0,05$);

A resistência à flexão seguiu a mesma tendência observada para a resistência à compressão: EPS < PU < XPS < PET < PVC (Tabela 5). A resistência à flexão do PVC (6,7 MPa) e seu módulo flexural (148 MPa) superaram amplamente os de todas as demais espumas, confirmando sua superior rigidez sob cargas de flexão. O PET apresentou elevada capacidade de flexão combinada com a maior ductilidade (deformação na ruptura = 11,0 ± 1,9 mm), tornando-o adequado para componentes que exigem um equilíbrio entre resistência e flexibilidade. O XPS, embora mais rígido que o PU e o EPS, exibiu ductilidade limitada (5,6 ± 0,7 mm), indicando fragilidade sob tensão de flexão. Já o PU e o EPS apresentaram menores propriedades de flexão, porém deformação moderada, condizente com seu uso em situações de mitigação de impacto e flexão sob baixas cargas, nas quais a absorção de energia é um fator essencial. O EPS, uma das espumas mais utilizadas na fabricação de pranchas de surfe, oferece

baixa rigidez e densidade reduzida, características vantajosas para pranchas ultraleves. No entanto, sob altas cargas, há risco de compactação excessiva, o que diminui a resposta da prancha e pode ocasionar falhas localizadas nas bordas (*rails*).

Voiconi *et al.* (2014) determinaram as propriedades de flexão de espumas rígidas de PU (em três densidades – 100, 145 e 300 kg/m³) utilizando correlação digital de imagens, e obtiveram módulos de flexão de 25, 40 e 180 MPa à medida que a densidade das espumas aumentava. As respectivas resistências à flexão foram de 1,9, 2,1 e 7,5 MPa. Os autores observaram que a espuma de baixa densidade (100 kg/m³) apresenta espessura de parede variando entre 2,9 e 5,8 µm. Em contraste, a espuma de 145 kg/m³ apresentou uma variação um pouco maior, entre 5,08 e 13,09 µm. Já a espuma de alta densidade (300 kg/m³) apresentou uma variação significativamente superior, entre 18,5 e 41,9 µm. Nesse caso, os poros são separados por uma quantidade maior de polímero sólido, o que tende a aumentar a resistência mecânica.

A rigidez à flexão determina o padrão de flexão da prancha, aspecto crítico para a transferência de energia e a resposta nas manobras, resultantes da ação combinada do surfista e da onda. De modo geral, pode-se afirmar que as espumas de PU e EPS permitem uma flexão acentuada sob a curvatura induzida pelo surfista, contribuindo para uma sensação mais “suave” e um retorno de energia mais gradual. Essas são as espumas mais utilizadas no mercado, devido à ampla faixa de propriedades mecânicas e densidades disponíveis. O XPS aumenta a manobrabilidade nas ondas (melhorando o *snap* e a sustentação nas bordas), reduzindo a torção indesejada em curvas potentes, sendo ideal para pranchas de alto desempenho e modelos *fish*. Contudo, em pranchas maiores, a fratura frágil pode se tornar mais evidente. O PET melhora a resposta, proporcionando um retorno de energia mais rápido, sendo adequado para pranchas voltadas a manobras agressivas. Já o PVC oferece extrema rigidez, minimizando a flexão em pranchas para ondas grandes, onde a estabilidade em altas velocidades é fundamental, embora a rigidez excessiva possa reduzir a sensibilidade da prancha em ondas menores. Os testes de ANOVA e Tukey ($p < 0,001$) confirmam diferenças estatisticamente significativas entre os tipos de espumas para todas as propriedades mecânicas avaliadas.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas de resistência à flexão e resiliência ao ressalto de diferentes espumas poliméricas.

Amostra de espuma	Resistência à flexão (MPa)	Deformação (mm)	Módulo de flexão (MPa)	Resiliência (%)
PU	1,29 ± 0,12 ^a	10,19 ± 1,34 ^{a,e}	26,3 ± 1,0 ^a	20 ± 1 ^a
EPS	0,97 ± 0,10 ^b	8,79 ± 0,9 ^{a,c}	21,82 ± 1,2 ^b	14 ± 1 ^b
XPS	1,45 ± 0,07 ^a	5,55 ± 0,68 ^b	40,50 ± 0,5 ^c	12 ± 1 ^b
PET	2,15 ± 0,03 ^c	11,04 ± 1,89 ^e	44,6 ± 1,9 ^d	5 ± 0,5 ^c
PVC	6,73 ± 0,16 ^d	9,45 ± 0,47 ^{a,e}	148,19 ± 2,2 ^e	4 ± 0,5 ^c
p[‡]-valor	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

‡ Valores obtidos após a aplicação do teste ANOVA de uma via; ^{a,b,c,d,e} Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas após a aplicação do teste post hoc de Tukey ($p \leq 0,05$);

As propriedades mecânicas das espumas poliméricas são, em geral, consequência da natureza do polímero, da densidade aparente e da morfologia celular da espuma. A densidade aparente determina a relação entre as propriedades mecânicas e, juntamente com o polímero que a constitui, é geralmente responsável pela rigidez. Quanto maior a densidade, maior a quantidade de fase sólida, a espessura das paredes nas fronteiras das células e, consequentemente, maior a resistência mecânica. A morfologia, incluindo o tamanho e a quantidade de células, também impacta diretamente as propriedades mecânicas finais da espuma (SARIKA *et al.*, 2025).

Na análise comparativa do teste de *Ball Rebound* realizado nas espumas estruturais avaliadas, observou-se que o comportamento de recuperação elástica é fortemente dependente da rigidez e da densidade dos materiais. As espumas de EPS e PU apresentaram os maiores valores de resiliência superficial, estimados em aproximadamente 20% e 14%, respectivamente, indicando uma capacidade moderada de recuperação após o impacto. Entretanto, enquanto o EPS tende a apresentar uma resposta ligeiramente mais elástica, associada à sua menor densidade e à estrutura celular reduzida, o PU, apesar de ser mais denso e resistente, dissipa parte da energia devido à natureza viscoelástica da matriz polimérica, resultando em menor altura de ressalto. Essa informação é particularmente relevante ao comparar os principais

grupos de pranchas de surfe, nas quais é comum observar maior suscetibilidade à deformação permanente no *deck* das pranchas de PU, causada pela carga compressiva do apoio e do movimento do surfista. Por outro lado, a espumas de XPS exibiu um valor de 12% próximo do valor da espuma de PU, PET e PVC exibiram comportamento visivelmente mais rígido, com valores inferiores a 10%, indicando uma resposta predominantemente amortecida e baixa recuperação perceptível após o impacto.

5.2.2 Análise morfológica das espumas

As imagens das espumas e as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) são apresentadas nas Figuras 14(a–e), juntamente com a distribuição do tamanho das células ilustrada na Figura 14f. A morfologia das células depende do polímero utilizado, do agente expensor, das condições de processamento e do uso de aditivos ou cargas. Em geral, as espumas poliméricas são classificadas em dois tipos principais: espumas de células fechadas e espumas de células abertas.

As espumas de células fechadas apresentam núcleos porosos distintos, isolados entre si, sendo que a fase gasosa de cada célula é completamente independente. Em contraste, as espumas de células abertas são caracterizadas pela interconexão entre as células, com poros distribuídos ao longo de suas fronteiras (EAVES, 2004).

Observa-se que todas as amostras apresentaram estruturas morfológicas compostas por células fechadas. A presença desse tipo de célula nas espumas utilizadas em pranchas de surfe é essencial, pois microfissuras na camada externa poderiam permitir a infiltração rápida de água na estrutura porosa, o que ocorreria caso a morfologia fosse formada por células abertas ou mistas, resultando em aumento de peso e comprometendo a manobrabilidade da prancha. Embora seja possível notar que esses materiais apresentam distribuições de tamanho de célula bastante distintas, estabelecer uma correlação direta entre suas morfologias é um desafio, dada a diferença entre as matrizes poliméricas analisadas.

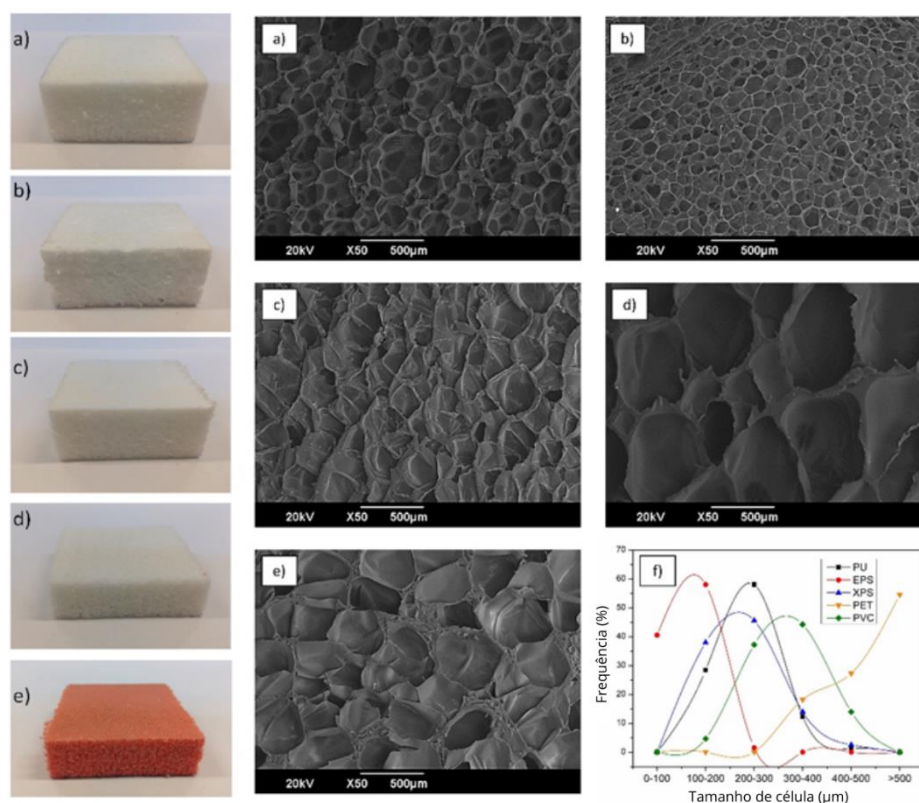


Figura 14 - Imagens fotográficas e micrografias obtidas por MEV das espumas poliméricas: (a) PU, (b) EPS, (c) XPS, (d) PET, (e) PVC e (f) distribuição de tamanho de célula.

A Tabela 6 apresenta os valores de densidade, conteúdo de vazios, diâmetro médio das células e densidade celular (N_f) das espumas. De acordo com Zimmermann (2024), as espumas poliméricas apresentam densidades variando entre $1,6$ e $960 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, valores diretamente correlacionados com as propriedades mecânicas. As dimensões e a densidade das células influenciam significativamente as características físicas e mecânicas das espumas.

Em geral, espumas microcelulares (com tamanho de célula variando de 300 a $1 \mu\text{m}$ e densidade celular superior a 10^9 – $10^{12} \text{ células}\cdot\text{cm}^{-3}$) demonstram propriedades mecânicas aprimoradas e densidades mais elevadas, enquanto espumas convencionais (com tamanho de célula acima de $300 \mu\text{m}$ e densidade celular inferior a $10^6 \text{ células}\cdot\text{cm}^{-3}$) oferecem melhor resiliência, isolamento térmico e acústico, além de maior absorção de água. Espumas de célula fina apresentam tamanho de célula entre 10 e $300 \mu\text{m}$ e densidade celular entre 10^6 – $10^9 \text{ células}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Neste estudo, o PET e o PVC apresentaram diâmetros médios de célula correspondentes a espumas convencionais ($627,90 \mu\text{m}$ e $314,08 \mu\text{m}$, respectivamente), enquanto PU, EPS e XPS

apresentaram diâmetros médios característicos de espumas de célula fina (232,27 μm , 109,09 μm e 231,45 μm , respectivamente).

O PET e o PVC também apresentaram os maiores valores de densidade (106,61 e 110,79 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente) e os menores teores de vazios (22,7% e 18,0%, respectivamente), em comparação com PU (61,7%), EPS (71,2%) e XPS (59,2%). Essa combinação de maior densidade e menor conteúdo de vazios reflete diretamente nas melhores propriedades mecânicas observadas, conforme já discutido nos resultados dos núcleos de espumas poliméricas.

Para as espumas PU, EPS e XPS, sua aplicação geralmente é combinada com *stringers* (reforços longitudinais), a fim de proporcionar maior resistência mecânica (ZIMMERMANN *et al.*, 2024; MAHBOUBIZADEH *et al.*, 2024; DUBEY *et al.*, 2024).

A densidade celular (N_f) apresentou valores típicos de espumas convencionais para todas as amostras e não demonstrou correlação direta com os valores reportados na literatura, como mencionado anteriormente.

Tabela 6 - Densidade, teor de vazios, diâmetro médio do tamanho de célula e densidade celular das espumas.

Amostra	Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Teor de vazios (%)	Diâmetro médio do tamanho de célula (μm)	N_f (células.cm^{-3})
PU	41,4 \pm 2,18 ^a	61,7	232,27 \pm 60,41 ^a	1,87 \times 10 ⁻⁸
EPS	28,08 \pm 1,11 ^b	71,2	109,09 \pm 29,67 ^b	8,36 \times 10 ⁻⁸
XPS	40,80 \pm 0,25 ^a	59,2	231,45 \pm 66,45 ^a	1,73 \times 10 ⁻⁸
PET	106,61 \pm 1,24 ^c	22,7	627,90 \pm 170,21 ^c	3,45 \times 10 ⁻⁶
PVC	110,79 \pm 0,98 ^d	18,0	314,08 \pm 76,32 ^d	2,11 \times 10 ⁻⁷
p[‡]-valor	< 0,001		< 0,001	

‡ Valores obtidos após a aplicação do teste ANOVA de uma via; ^{a,b,c,d,e} Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas após a aplicação do teste post hoc de Tukey ($p \leq 0,05$);

5.3 COMPÓSITO COM ESTRUTURA SANDUÍCHE E CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO

A Figura 15 apresenta imagens fotográficas dos compósitos com estrutura sanduíche produzidos, os quais representam a combinação de núcleo de XPS e faces (*skins*) constituídas por compósito à base de resina epóxi reforçada com tecido híbrido de carbono/vidro. Foram avaliadas duas configurações distintas, contendo uma e duas camadas de tecido de reforço, com o objetivo de analisar a influência do número de camadas no desempenho mecânico do compósito com estrutura sanduíche.

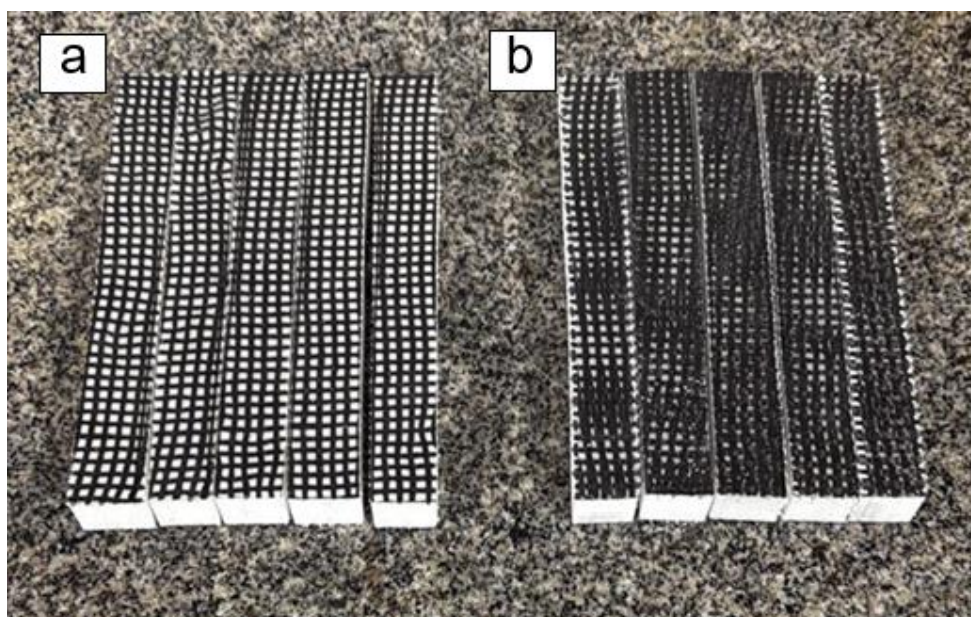


Figura 15 - Imagens fotográficas de corpos de prova produzidos do compósito com estrutura sanduíche, sendo (a) uma camada de tecido e (b) duas camadas de tecido.

A Tabela 7 apresenta as propriedades mecânicas de resistência a flexão e compressão uniaxial dos compósitos com estrutura sanduíche.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos compósitos com estrutura sanduíche compósitos de 1 e 2 camadas de tecido híbrido.

Amostra	Tensão de flexão (MPa)	Deformação (mm/mm)	Tensão de compressão transversal (MPa)	Deformação na compressão transversal (mm)
1 camada	4,03 ± 0,39	0,70 ± 0,06	0,908 ± 0,05	3,38 ± 1,09
2 camadas	3,85 ± 0,20	1,10 ± 0,04	1,70 ± 0,14	4,83 ± 0,82

Os resultados apresentados na Tabela 7 evidenciam a influência do número de camadas de tecido híbrido carbono/vidro no comportamento mecânico dos compósitos com estrutura sanduíche, particularmente nos ensaios de flexão e compressão transversal.

Em relação à resistência à flexão, observa-se que os compósitos com uma e duas camadas de tecido apresentaram valores próximos, sendo de $4,03 \pm 0,39$ MPa e $3,85 \pm 0,20$ MPa, respectivamente. Essa pequena variação indica que, para o sistema avaliado, o aumento do número de camadas de reforço nas *skins* não resultou em ganhos representativos de resistência à flexão. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, em estruturas sanduíche, a resposta à flexão é fortemente influenciada pelas propriedades do núcleo e pela distância entre as faces, enquanto incrementos moderados na rigidez das *skins* nem sempre se traduzem em aumentos proporcionais da resistência flexural. Comparativamente aos dados apresentados na Tabela 5, onde para a espuma de XPS é reportado valor de resistência a flexão de 1,45 MPa, observa-se que a inserção de camadas de compósitos promoveu um aumento significativo na resistência do material.

Por outro lado, os resultados de resistência à compressão transversal demonstram um efeito mais pronunciado do número de camadas de tecido. O compósito com duas camadas apresentou resistência à compressão transversal de $1,70 \pm 0,14$ MPa, valor superior ao observado para a configuração com uma camada ($0,908 \pm 0,05$ MPa). Esse comportamento indica que o aumento da espessura e da rigidez das *skins* contribuiu para uma melhor distribuição das tensões compressivas e para uma maior restrição da deformação do núcleo de XPS. Além disso, a maior deformação observada na compressão transversal para o sistema com duas camadas sugere uma maior capacidade de absorção de energia antes da falha, característica relevante para aplicações sujeitas a carregamentos localizados.

De modo geral, os resultados indicam que o aumento do número de camadas de tecido híbrido carbono/vidro exerce influência mais significativa no desempenho à compressão transversal do que na resistência à flexão. No entanto, observa-se que as diferenças entre as duas configurações avaliadas são, em sua maioria, moderadas, resultando em um desempenho mecânico global semelhante.

5.4 RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MECÂNICOS E A ESCOLHA DA CONFIGURAÇÃO DO PROTÓTIPO

A escolha da configuração do compósito utilizada na confecção do protótipo de prancha de surfe considerou não apenas o desempenho mecânico, mas também aspectos relacionados à viabilidade prática e econômica do sistema. Embora os compósitos com duas camadas de tecido híbrido carbono/vidro apresentem, em alguns casos, valores ligeiramente superiores de resistência mecânica, as diferenças observadas em relação à configuração com uma camada não se mostraram suficientemente expressivas para justificar o aumento no custo de fabricação associado ao uso de uma camada adicional de reforço.

Em particular, os resultados de resistência à flexão apresentaram valores muito próximos para ambas as configurações, indicando desempenho similar nesse modo de carregamento. Embora a resistência à compressão transversal tenha sido superior para o sistema com duas camadas, a configuração com uma camada apresentou valores compatíveis com as exigências estruturais esperadas para aplicações em pranchas de surfe, considerando as solicitações típicas durante o uso, como carregamentos distribuídos, apoio dos pés do surfista e impactos com a água.

Dessa forma, a configuração com uma camada de tecido híbrido carbono/vidro foi selecionada para a confecção do protótipo, por representar um equilíbrio adequado entre desempenho mecânico e custo de fabricação. A adoção de duas camadas implicaria um aumento significativo no consumo de materiais e, conseqüentemente, no custo final da prancha, sem que isso resultasse em ganhos proporcionais de desempenho estrutural. Assim, a escolha adotada reflete uma abordagem de projeto orientada à otimização, na qual se busca atender aos requisitos mecânicos com o menor custo possível, aspecto fundamental para a viabilidade de aplicações reais no contexto da fabricação de pranchas de surfe.

O protótipo de prancha de surfe foi confeccionado a partir dos materiais selecionados nas etapas anteriores, sendo o núcleo constituído de XPS e as *skins* formadas por compósito à base de resina epóxi reforçada com tecido híbrido de carbono e vidro, em configuração de uma camada de tecido. O modelo adotado para o protótipo foi do tipo *funboard*, escolhido por apresentar geometria intermediária e adequada para a avaliação do comportamento estrutural do sistema sanduíche em condições representativas de uso. A Figura 16 apresenta o fluxograma ilustrando as principais etapas envolvidas na confecção do protótipo de prancha de surfe.

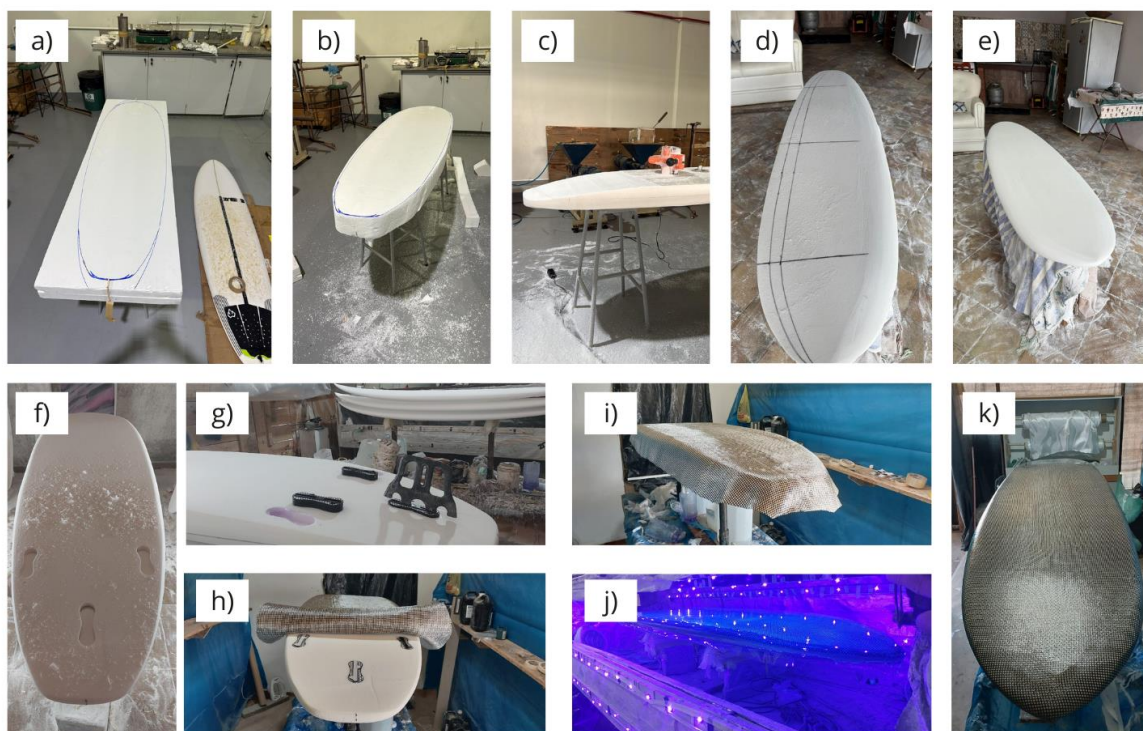


Figura 16 - Fluxograma das etapas de confecção do protótipo de prancha de surfe: a) Molde da prancha no bloco bruto, b) Corte do bloco, c) Corte do *tail* e do *nose*, d) Marcação e confecção das bordas, e) Shape completo, f) Furação para copinho de encaixe das quilhas, g) Processo de fixação do copinho, h) Tecido híbrido de carbono/vidro pronto para laminação, i) Aplicação da resina epóxi, j) Processo de cura e k) Resultado final: protótipo pronto

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que as propriedades mecânicas dos compósitos são fortemente influenciadas tanto pelo tipo de fibra quanto pela matriz polimérica empregada. De maneira geral, os compósitos reforçados com fibras sintéticas apresentaram maiores valores de resistência à tração e módulo elástico quando comparados aos reforçados com fibras vegetais. As fibras naturais, embora apresentem menor desempenho mecânico, mostraram-se sensíveis à escolha da matriz, sendo observada melhora significativa de resistência à tração quando associadas à resina epóxi, indicando melhor interação interfacial nesse sistema.

No que se refere às espumas poliméricas utilizadas como núcleo, observou-se tendência crescente de resistência mecânica na ordem EPS < PU < XPS < PET < PVC. Embora PET e PVC tenham apresentado os maiores valores de resistência à compressão e à flexão, esses materiais também apresentaram maiores densidades, o que impacta diretamente o peso final da prancha. O XPS destacou-se como alternativa intermediária, apresentando equilíbrio entre densidade reduzida, rigidez adequada e morfologia celular fechada, características relevantes para aplicações em pranchas de surfe, nas quais leveza e estabilidade estrutural são fatores determinantes.

A análise morfológica confirmou que todas as espumas avaliadas apresentam estrutura de células fechadas, condição essencial para minimizar a absorção de água e preservar a integridade estrutural do núcleo. O XPS apresentou morfologia homogênea e teor de vazios intermediário, contribuindo para desempenho mecânico compatível com a aplicação proposta.

Na avaliação do compósito com estrutura sanduíche utilizando núcleo de XPS e *skins* de epóxi reforçadas com tecido híbrido carbono/vidro, verificou-se que o aumento do número de camadas de reforço promoveu melhora na resistência à compressão transversal, enquanto os valores de resistência à flexão permaneceram próximos entre as configurações analisadas. Apesar do desempenho ligeiramente superior da configuração com duas camadas, a opção por uma camada de tecido híbrido mostrou-se tecnicamente adequada, considerando o equilíbrio entre desempenho mecânico e viabilidade econômica, sendo esta a configuração adotada na confecção do protótipo.

A fabricação do protótipo de prancha de surfe do tipo *funboard*, utilizando núcleo de XPS e *skin* em compósito epóxi reforçado com tecido híbrido carbono/vidro em configuração de uma camada, demonstrou a aplicabilidade prática dos materiais selecionados, evidenciando a coerência entre os resultados experimentais obtidos e as decisões de projeto adotadas.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a investigação sobre a modificação superficial de fibras naturais, visando otimizar a adesão interfacial fibra/matriz e ampliar o desempenho mecânico dos compósitos, bem como realizar estudos de durabilidade em ambiente marinho, incluindo envelhecimento acelerado, exposição à radiação UV e análise de fadiga, de modo a simular condições reais de uso. Sugere-se ainda a otimização da arquitetura dos laminados e da densidade dos núcleos poliméricos, aliada à modelagem numérica da estrutura sanduíche, permitindo prever o comportamento estrutural da prancha sob diferentes solicitações. Adicionalmente, estudos voltados à avaliação do ciclo de vida dos materiais e ao monitoramento estrutural de protótipos em condições reais de surfe podem contribuir para o avanço tecnológico e sustentável no desenvolvimento de pranchas de surfe.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. A. B.; AMARAL, F.; TADEI, M.; LUCIANO, R.; VOLCOV, T.; BISPO, W. A evolução histórica da prancha de surf e seu aperfeiçoamento tecnológico. *Lecturas: Educación Física y Deportes*, v. 17, 2012. Disponível em: <http://www.efdeportes.com/efd169/a-evolucao-historica-da-prancha-de-surf.htm>.
- ARISTRI, M. A.; LUBIS, M. A. R.; ISWANTO, A. H.; FATRIASARI, W.; SARI, R. K.; ANTOV, P.; GAJTANSKA, M.; PAPADOPOULOS, A. N.; PIZZI, A. Bio-based polyurethane resins derived from tannin: source, synthesis, characterisation, and application. *Forests*, v. 12, p. 1516, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12111516>.
- AROWOLO, M.; AZOTI, W.; CASTANIÉ, B. Comparative study of the thermomechanical properties of natural fiber reinforced thermoplastic composites: a structural application for quadcopter design. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, v. 32, n. 7, p. 1425–1446, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2364067>.
- ATES, M.; KARADAG, S.; EKER, A. A.; EKER, B. Polyurethane foam materials and their industrial applications. *Polymer International*, v. 71, p. 1157–1163, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.6441>.
- AYDIN, M. R.; ACAR, V.; CAKIR, F.; GÜNDOĞDU, Ö.; AKBULUT, H. Comparative dynamic analysis of carbon, aramid and glass fiber reinforced interply and intraply hybrid composites. *Composite Structures*, v. 291, p. 115595, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115595>.
- BARCELOS, R. L.; MAGNAGO, R. F.; LERIPIO, A. A. Analysis of the technological impact on industry and its effects on waste production and disposal: a case study of the surfboard manufacturing industry. *Ciência e Natura*, v. 40, p. 49, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X31540>.
- BATISTA, A. C. M. C.; TINÔ, S. R. L.; NÓBREGA, S. H. S. da; et al. Physical and mechanical characterizations of hybrid twill fabrics carbon/glass and carbon/aramid. *Fibers and Polymers*, v. 24, p. 2439–2449, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00244-2>.
- BOOTH, D. Surfing: the cultural and technological determinants of a dance. *Culture, Sport, Society*, v. 2, n. 1, p. 36–55, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1080/14610989908721828>.
- CASTRO, O.; SILVA, J. M.; DEVEZAS, T.; SILVA, A.; GIL, L. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials and Design*, v. 31, p. 425, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.039>.
- CAVALCANTI, D.; BANEIA, M.; NETO, J.; LIMA, R. Comparative analysis of the mechanical and thermal properties of polyester and epoxy natural fibre-reinforced hybrid composites. *Journal of Composite Materials*, v. 55, n. 12, p. 1683–1692, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998320976811>.

- CHAKRAVARTY, U. K. An investigation on the dynamic response of polymeric, metallic, and biomaterial foams. *Composite Structures*, v. 92, n. 10, p. 2339–2344, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.02.013>.
- CORREIA, J. M. D.; SERRA, G. F.; SOUSA, R. J. A.; PEREIRA, A. B.; FERNANDES, F. A. O. Expanded (black) cork for the development of an eco-friendly surfboard: environmental impact and mechanical properties. *Sustainability*, v. 14, n. 2, p. 668, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14020668>.
- CRAMERI, S.; STOJCEVSKI, F.; USMA-MANSFIELD, C. An experimental investigation of the mechanical performance of EPS foam core sandwich composites used in surfboard design. *Polymers*, v. 15, p. 2703, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15122703>.
- DALFI, H. K.; YOUSAF, Z.; SELVER, E.; POTLURI, P. Influence of yarn hybridisation and fibre architecture on the compaction response of woven fabric preforms during composite manufacturing. *Journal of Industrial Textiles*, v. 51, n. 3_suppl, p. 5062S–5085S, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/15280837211024256>.
- DARIE-NITA, R. N.; RAPA, M.; FRACKOWIAK, S. Special features of polyester-based materials for medical applications. *Polymers*, v. 14, n. 5, p. 951, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14050951>.
- DE OLIVEIRA, C. G.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D. Comparison between tensile behavior of epoxy and polyester matrix composites reinforced with eucalyptus fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 6, n. 4, p. 406–410, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.002>.
- DUBEY, D.; SINGH, S. P.; BEHERA, B. K. Additive manufacturing of fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Materials Science*, v. 59, p. 12219–12256, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09925-6>.
- EAVES, D. *Handbook of polymer foams*. Shrewsbury: Rapra Technology Limited, 2004. ISBN 9781847350541.
- ELFALEH, I.; ABBASSI, F.; HABIBI, M.; et al. A comprehensive review of natural fibers and their composites: an eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, v. 19, p. 101271, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>.
- FERRY, J. D.; MYERS, H. S. Viscoelastic properties of polymers. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 108, n. 7, p. 142C, 1961.
- GAO, T.; LIU, K.; MA, Q.; et al. Unveiling the mechanics of micro-LPBF manufactured hierarchical composites: a novel FE2-nested homogenisation approach. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 20, n. 1, e2456693, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2025.2456693>.

GHOSHAL, T.; PARMAR, P. R.; BHUYAN, T.; BANDYOPADHYAY, D. Polystyrene foams: materials, technology, and applications. In: *Polymeric foams: fundamentals and types of foams*. Washington: ACS Publications, 2023. p. 121–141. DOI: <https://doi.org/10.1021/bk-2023-1439.ch006>.

GIBSON, C.; WARREN, A. Making surfboards: emergence of a trans-Pacific cultural industry. *Journal of Pacific History*, v. 49, n. 1, p. 1–25, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223344.2013.858439>.

GREB, C.; LENZ, C.; LENGERSDORF, M.; GRIES, T. Fabrics for reinforcement of engineering composites. In: *Engineering of high-performance textiles*. [S.l.]: Elsevier, 2018. p. 489–512. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101273-4.00019-6>.

GRIJÓ, P. E.; PRIM, E. C. C. Produção ecológica de pranchas de surfe: utopia ou realidade. In: *XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão & II INOVARSE*. Rio de Janeiro, 2014.

HASAN, K. M. F.; HORVÁTH, P. G.; APÁR, T. Potential fabric-reinforced composites: a comprehensive review. *Journal of Materials Science*, v. 56, n. 26, p. 14381–14415, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06177-6>.

HAWARY, O. E.; BOCCARUSSO, L.; ANSELL, M. P.; DURANTE, M.; PINTO, F. An overview of natural fiber composites for marine applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, p. 1076, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11051076>.

HULL, D.; CLYNE, T. W. *An introduction to composite materials*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781139050586>.

ISHTIAQ, S.; SALEEM, M. Q.; NAVEED, R.; HARRIS, M.; KHAN, S. A. Glass–carbon–Kevlar fiber reinforced hybrid polymer composite (HPC): part (A) mechanical and thermal characterization for high GSM laminates. *Composites Part C: Open Access*, v. 14, p. 100468, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100468>.

ISLAM, M. Z.; SARKER, M. E.; RAHMAN, M. M.; et al. Green composites from natural fibers and biopolymers: a review on processing, properties, and applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 41, n. 13–14, p. 526–557, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/07316844211058708>.

JAYANARAYANAN, K.; RASANA, N.; MISHRA, R. K. Dynamic mechanical thermal analysis of polymer nanocomposites. In: THOMAS, S.; THOMAS, R.; ZACHARIAH, A. K.; MISHRA, R. K. (ed.). *Thermal and rheological measurement techniques for nanomaterials characterization*. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 123–157. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46139-9.00006-2>.

JOHNSTONE, J. Flexural testing of sustainable and alternative materials for surfboard construction, in comparison to current industry standard materials. *Plymouth Student Scientist*, v. 4, n. 1, p. 109–142, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10026.1/13929>.

- JONES, I. A.; PICKETT, A. K. Mechanical properties of textile composites. In: *Design and manufacture of textile composites*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005. p. 292–329. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845690823.292>.
- KHAN, T.; ACAR, V.; AYDIN, M. R.; et al. A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores. *Polymer Composites*, v. 41, p. 2355–2400, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.25543>.
- KIM, Y.-H.; LEE, J.-W.; PARK, C.-W.; PARK, S.-J. Thermal characteristics of hybrid composites for application to surfboard. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, v. 28, n. 4, p. 351–355, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5574/KSOE.2014.28.4.351>.
- KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAIYAKOOP, N.; TRADA, M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.010>.
- KUMAR, S. A.; THAKUR, A.; SOMVANSHI, K. S.; KESARWANI, S.; ARIF, M.; BEDI, R. State-of-the-art study on pineapple, coir, and banana fiber-reinforced composites: mechanical, thermal, and durability performance. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1177/07316844251378390>.
- KUMAR, S.; PRASAD, L.; PATEL, V. K.; et al. Physical and mechanical properties of natural leaf fiber-reinforced epoxy polyester composites. *Polymers*, v. 13, n. 9, p. 1369, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13091369>.
- LIU, K.; TIAN, L.; GAO, T.; WANG, Z.; LI, P. An explicit D-FE2 method for transient multiscale analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 285, p. 109808, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109808>.
- MA, Q.; REJAB, M. R. M.; SIREGAR, J. P.; GUAN, Z. A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, v. 55, n. 18, p. 2513, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998321990734>.
- MAHBOUBIZADEH, S.; SADEQ, A.; ARZAQI, Z.; ASHKANI, O.; SAMADOGLI, M. Advancements in fiber-reinforced polymer (FRP) composites: an extensive review. *Discover Materials*, v. 4, p. 22, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00091-9>.
- MARCUS, B. *The surfing handbook: mastering the waves for beginning and amateur surfers*. 1. ed. Minneapolis: MVP Books, 2010.
- MATHEL, V.; SHAZED, A.; GUO, X.; BERTLING, K.; RAKIĆ, A. D.; HEITZMANN, M. T.; VANDI, L. J. Wood/PHAs biocomposites with mechanical properties comparable to conventional plastics: model-based prediction and experimental validation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 194, p. 108916, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108916>.

- MICHELENA, A. H.; GRAHAM-JONES, J.; SUMMERSCALES, J.; HALL, W. Eco-friendly flax fibre/epoxy resin/composite system for surfboard production. In: *Natural fibres: advances in science and technology towards industrial applications*. 2016. p. 267–277. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_20.
- MIELKE, H. G.; COSTA, H. L.; AMADO, F. D. R.; AMARAL, F. A. D. Surface metrology as a tool in surfboard manufacturing to assess machinability of expanded polystyrene blanks via CNC milling. *Surface Topography: Metrology and Properties*, v. 10, p. 044008, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/2051-672X/aca494>.
- MINES, R. Product case studies for polymer composite sandwich beam construction. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, v. 27, n. 2, p. 126–143, 1997. DOI: <https://doi.org/10.7227/IJMEE.27.2.4>.
- MIRDEHGHAN, S. A. Fibrous polymeric composites. In: *Engineered polymeric fibrous materials*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021. p. 1–58.
- MOHANRAJ, C. M.; RAMESHKUMAR, R.; MARIAPPAN, M.; et al. Recent progress in fiber reinforced polymer hybrid composites and its challenges: a comprehensive review. *Journal of Natural Fibers*, v. 22, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2495911>.
- NGO, T. T.; HALL, J. M.; KOHL, J. G.; PERRY, L. A. Green surfboards: investigation of product biodegradability at end of life. *Sports Technology*, v. 3, n. 3, p. 181–191, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/19346182.2011.564282>.
- OGGIANO, L. Numerical comparison between a modern surfboard and an alaiá board using computational fluid dynamics (CFD). In: *Proceedings of the 5th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support (icSPORTS 2017)*. p. 75–82. DOI: <https://doi.org/10.5220/0006488400750082>.
- OGGIANO, L.; PANHUIS, M. Modern surfboards and their structural characterization: towards an engineering approach. *Proceedings*, v. 49, p. 65, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2020049065>.
- OLIVEIRA, Á. S. *Design sustentável em pranchas de surfe: propondo diretrizes para a produção e uso de pranchas ecoefetivas*. 2019. Dissertação (Graduação/Trabalho de Conclusão) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/50831>.
- O'NEILL, M. *The surfboard book: how design drives performance*. Australia: McCagh O'Neill Pty, 2013.
- ORNAGHI, H. L.; NEVES, R. M.; MONTICELI, F. M.; THOMAS, S. Dynamic mechanical analysis of hybrid epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 139, n. 18, e52078, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.52078>.

ORNAGHI, H. L.; ZATTERA, A. J.; AMICO, S. C. Dynamic mechanical properties and correlation with dynamic fragility of sisal reinforced composites. *Polymer Composites*, v. 36, n. 1, p. 161–166, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.22925>.

PAPAGEORGIOU, D. G.; KINLOCH, I. A.; YOUNG, R. J. Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, v. 90, p. 75–127, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>.

PARVIZI, P.; JALILIAN, M.; DEARN, K. D. Comparison of mechanical and physical behaviors of carbon/basalt/epoxy hybrid composite rod with carbon/glass/epoxy hybrid composite rod used in ACCC conductor core. *Polymer Composites*, v. 46, n. 6, p. 5773–5787, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.29329>.

PETRULIS, D. The influence of fabric construction and fibre type on textile durability: woven, knitted and nonwoven fabrics. In: ____ (org.). *Understanding and improving the durability of textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 3–30. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097644.1.3>.

RAHIMI, A.; FARHADIAN, A.; GUO, L.; AKBARINEZHAD, E.; SHARIFI, R.; IRAVANI, D.; VARFOLOMEEV, M. A. Bio-based and self-catalyzed waterborne polyurethanes as efficient corrosion inhibitors for sour oilfield environment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 123, p. 170–186, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.03.033>.

RAMACHANDRAN, K.; KHAN, M.; PERERA, R. A. T.; JAYASEELAN, D. Tensile and flexural behavior of synthetic and hybrid natural fiber composites for lightweight applications. *Polymer Composites*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.29781>.

RAMSTEINER, F.; FELL, N.; FORSTER, S. J. P. T. Testing the deformation behaviour of polymer foams. *Polymer Testing*, v. 20, n. 6, p. 661–670, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00090-8).

RIOS-SOBERANIS, C. R.; CRUZ-ESTRADA, R. H.; RODRIGUEZ-LAVIADA, J.; PEREZ-PACHECO, E. Study of mechanical behavior of textile reinforced composite materials. *Dyna*, v. 79, n. 176, p. 115–123, 2012.

ROMANIN, A.; ENGLISH, S.; FURNESS, J.; SMITH, K. K.; NEWCOMER, S.; NESSLER, J. Surfing equipment and design: a scoping review. *Sports Engineering*, v. 24, p. 21, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12283-021-00358-x>.

SARGIANIS, J.; KIM, H. I.; SUHR, J. Natural cork agglomerate employed as an environmentally friendly solution for quiet sandwich composites. *Scientific Reports*, v. 2, p. 493, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep00403>.

SARIKA, P. R.; ALSUWAIDI, H. R. B.; ALHAJERI, R. S. A.; ALHAMMADI, S. A.; ALJASMI, M. J.; NANCARROW, P. ZnO nanoparticle-reinforced lignin-phenol-

formaldehyde foam: formulation, optimization and properties. *Reactive and Functional Polymers*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106500>.

SAYAM, S. Natural fibers in sustainable materials: extraction technologies, fiber modification, and performance–sustainability relationships. *RSC Advances*, v. 16, p. 10495–10537, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5ra09029f>.

SCHNEIDER, B.; ORNAGHI, H. L. JR.; MONTICELI, F. M.; et al. Effect of the graphene quantum dot content on the thermal, dynamic-mechanical, and morphological properties of epoxy resin. *Polymers*, v. 15, p. 4531, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15234531>.

SCHULTZ, T. C. *The surfboard cradle-to-grave life cycle assessment of a common surfboard: epoxy vs. UPR*. 2009. Thesis – University of California, Berkeley, 2009.

SHEPPARD, B. Understanding the parts of a surfboard. *Surf Nation*, 2018. Disponível em: <https://www.surfnation.com.au/blogs/news/understanding-the-parts-of-a-surfboard>.

SIERRA, E.; SOLABERRIETA, E.; MINGUEZ, R.; BARRENETXEA, L.; BELAUSTEGIGOITIA, B.; LARRAKOETXEA, I. A university-company project: design of a new surfboards digital modelling process. In: *21st International Conference on Geometry and Graphics*. Salvador, 2006.

SLAVOVA, G.; DONEVA, Y. Cork as a renewable and recyclable material and the possibility to use a circular production model for various cork products. In: *16th International Scientific Conference WoodEMA*. Prague, 2023. p. 46–51.

TAIEH, N. K.; KHUDHUR, S. K.; FAHAD, E. A. A.; ZHOU, Z.; HUI, D. High mechanical performance of 3-aminopropyl triethoxy silane/epoxy cured in a sandwich construction of 3D carbon felts foam and woven basalt fibers. *Nanotechnology Reviews*, v. 12, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0519>.

TEJEDOR, A. R.; RAMÍREZ, J. Reptation of active entangled polymers. *Macromolecules*, v. 52, n. 22, p. 8788–8792, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b01994>.

THAKUR, A. K.; KAVITI, A. J.; ASEER, J. R. Comparative studies on mechanical performance of epoxy and polyester hybrid composites with jute and glass layers. *Materials Science Forum*, v. 1045, p. 226–230, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1045.226>.

THOMPSON, K. Innovations in surfboard manufacturing technologies from COBRA International. *Reinforced Plastics*, v. 65, n. 2, p. 87–93, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.repl.2021.02.011>.

TURNER, A. Foamed polystyrene in the marine environment: sources, additives, transport, behavior, and impacts. *Environmental Science & Technology*, v. 54, p. 10411–10420, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03221>.

TUWAIR, H.; HOPKINS, M.; VOLZ, J.; et al. Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam cores and ribs. *Composites Part B: Engineering*, v. 79, p. 262, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.023>.

URSACHE, S.; CERBU, C.; HADAR, A. Characteristics of carbon and Kevlar fibres, their composites and structural applications in civil engineering—a review. *Polymers*, v. 16, p. 127, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16010127>.

VARTIAINEN, N. *The new wave of sustainable surf industry*. 2018. Disponível em: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/144563/Thesis%20Noora%20Vartiainen%20final.pdf>.

VIZUREANU, P.; PRUTEANU, A.; FIERASCU, R. C.; BALTATU, M. S.; PIETRUSIEWICZ, P.; SANDU, A. V.; NABIALEK, M. Evolution and prospects of epoxy materials: from traditional to advanced. 2025. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1012225>.

VOICONI, T.; LINUL, E.; MARŞAVINA, L.; SADOWSKI, T.; KNEĆ, M. Determination of flexural properties of rigid PUR foams using digital image correlation. *Solid State Phenomena*, v. 216, p. 116–121, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.216.116>.

WALSH, J.; KIM, H. I.; SUHR, J. Low velocity impact resistance and energy absorption of environmentally friendly expanded cork core-carbon fiber sandwich composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 101, p. 290–296, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.05.026>.

WANG, J. Q.; CROSKY, A. G. Strengthening of thin skinned foam cored sandwich panels. In: *Materials Research 96 – Conference Proceedings*. Brisbane, Australia: The Institute of Metals and Materials Australasia Ltd., p. 132–135.

WARSHAW, M. *The encyclopedia of surfing*. Orlando: Harcourt, 2003.

WESTWICK, P.; NEUSHUL, P. *The world in the curl: an unconventional history of surfing*. New York: Random House, 2013.

YUVARAJ, M.; RAJMOHAN, M.; NAVEEN, G.; MOHANRAJ, S. Mechanical characterisation of basalt based composite materials. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, v. 6, p. 70–76, 2014.

ZIMMERMANN, M. V. G.; ALMEIDA, M. K.; PONSONI, L. V.; SALAZAR, M. S.; ROMANZINI, D.; BORSOI, C.; ORNAGHI, H.; KRZYZANOWSKI, P.; PANHUIS, M. Advances in composite materials for surfboard manufacturing—A review. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 142, e56488, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.56488>.

ZIMMERMANN, M. V. G.; TURELLA, T. C.; SANTANA, R. M. C.; ZATTERA, A. J. The influence of wood flour particle size and content on the rheological, physical, mechanical and morphological properties of EVA/wood cellular composite. *Materials and Design*, v. 57, p. 660–666, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.010>.