



Tatiana Barbosa de Andrade

**Avaliação Metrológica na Seleção de Compósitos de
Fibras Naturais para Absorção da Energia de Impacto em
Capacetes Motociclísticos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Instrumentação e Medição: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Dr. Elcio Cruz de Oliveira

Rio de Janeiro
Maio de 2024



Tatiana Barbosa de Andrade

**Avaliação Metrológica na Seleção de Compósitos de Fibras
Naturais para Absorção da Energia de Impacto em Capacetes
Motociclísticos**

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

Prof. Dr. Elcio Cruz de Oliveira

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Dr. Daniel Ramos Louzada

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Profa. Dra. Elisabeth Costa Monteiro

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de maio de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Tatiana Barbosa de Andrade

Graduação em Engenharia de Produção pela UNESA (Universidade Estácio de Sá) em 2020. Atualmente mestrando do Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI) pela PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Andrade, Tatiana Barbosa de

Avaliação metrológica na seleção de compósitos de fibras naturais para absorção da energia de impacto em capacetes motociclísticos / Tatiana Barbosa de Andrade; orientador: Elcio Cruz de Oliveira. – 2024.

71 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2024.

Inclui bibliografia

1. Metrologia - Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação - Teses. 3. Metrologia. 4. Absorção de impacto. 5. Capacete de motocicleta. 6. Fibra natural. 7. Análise estatística. I. Oliveira, Elcio Cruz de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. III. Título.

CDD 389.1

Dedico este trabalho à memória de minha mãe, Severina, e de meu filho, Pedro Henrique. Eles permanecerão eternamente em meu coração.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela força e sabedoria concedidas durante toda a minha jornada, por sempre iluminar meu caminho e por colocar em minha vida pessoas que me apoiaram a alcançar meus objetivos.

À minha família, ao meu companheiro Bruno Ferreira de Lima e ao meu filho Bruno Felipe de Andrade de Lima, expresso minha mais profunda gratidão por seu amor incondicional e apoio inabalável em todas as minhas aspirações acadêmicas e pessoais. Eles foram minha fonte de inspiração e motivação ao longo desta jornada.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Elcio Cruz de Oliveira, cuja expertise, paciência e profundo entendimento foram fundamentais para o meu desenvolvimento e progresso nesta pesquisa. Sua orientação foi essencial não apenas na condução da pesquisa, mas também na redação desta dissertação.

Agradeço também ao Msc. Edilvando Pereira Eufrásio, chefe da Divisão de Produtos (DIPRO) do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e à Msc. Rosana Medeiros Moreira, Coordenadora de Engenharia de Produtos e Processos (COENG), pelo suporte contínuo e recursos fornecidos para esta pesquisa.

Um especial agradecimento à equipe técnica do LAENP, em particular a Rubem Samuel Silva dos Santos, Valcemar de Oliveira Junior e Agemar de Paula Filho, cujo apoio foi crucial durante os experimentos.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-graduação em Metrologia, e ao coordenador do curso, Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa, pela orientação e apoio. Também agradeço à equipe técnica e administrativa do PósMQI, Márcia Ribeiro e Felipe Coimbra, pelo apoio administrativo.

Aos meus colegas da PUC-Rio, agradeço pelas discussões técnicas e motivadoras que enriqueceram significativamente minha jornada acadêmica ao longo deste período.

Ao Instituto Nacional de Tecnologia – INT e à comissão de pós-graduação do Instituto, expresso minha gratidão pelo incentivo e pela permissão para comparecer às aulas e desenvolver os trabalhos propostos durante o período do curso.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Andrade, Tatiana Barbosa; Oliveira, Elcio Cruz; **Avaliação Metrológica na Seleção de Compósitos de Fibras Naturais para Absorção da Energia de Impacto em Capacetes Motociclísticos**. Rio de Janeiro 2024. 71p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo deste estudo foi comparar o teste de absorção de impacto em compósitos reforçados com fibras naturais às espumas de PU em substituição ao tradicional poliestireno expandido EPS em capacetes para motociclistas, item de segurança essencial, que tem como principal função mitigar a gravidade das lesões cranianas em acidentes. Este estudo teve como principal motivação a utilização do PU devido as suas propriedades mecânicas adaptáveis e por um processo simplificado de mistura, que torna viável a incorporação de fibras naturais como coco, sisal e bagaço de cana, em sua matriz, frente aos crescentes desafios ambientais e à necessidade urgente de sustentabilidade. A metodologia adotada incluiu a formulação de compósitos em proporções de fibras naturais selecionadas, variando de 5 a 15 % seguida pela realização de testes de absorção de energia de impacto. A avaliação metrológica usou ferramentas paramétricas e não-paramétricas para a comparação dos resultados da absorção de energia de impacto entre os compósitos de PU puro e aqueles reforçados com as fibras naturais selecionadas. Os resultados obtidos demonstraram uma melhoria significativa na absorção de energia de impacto ao se usar compósitos de PU reforçados com fibras naturais. Por fim, conclui-se que a adição de fibras naturais ao PU pode substituir o EPS, visto que, metrologicamente, não houve prejuízo na absorção de energia de impacto, além da contribuição para a responsabilidade ambiental.

Palavras-chave

Absorção de impacto; capacete de motocicleta; fibra natural; análise estatística.

Abstract

Andrade, Tatiana Barbosa; Oliveira, Elcio Cruz de (Advisor). **Metrological Evaluation in the Selection of Natural Fiber Composites for Impact Energy Absorption in Motorcycle Helmets.** Rio de Janeiro, 2024. 71p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The purpose of this study was to compare the impact absorption test of fiber-reinforced composites with natural fibers to expanded polyurethane (PU) foams as a substitute for traditional expanded polystyrene (EPS) in motorcycle helmets, an essential safety item whose primary function is to mitigate the severity of cranial injuries in accidents. This study was principally motivated by the use of polyurethane (PU) due to its adaptable mechanical properties and a simplified mixing process, which enables the incorporation of natural fibers such as coconut, sisal, and sugarcane bagasse into its matrix, in response to the growing environmental challenges and the urgent need for sustainability. The methodology employed included the formulation of composites in varying proportions of selected natural fibers, ranging from 5 to 15 %, followed by the execution of impact energy absorption tests. The metrological evaluation utilized parametric and non-parametric tools to compare the impact energy absorption results between pure PU composites and those reinforced with selected natural fibers. The results demonstrated a significant improvement in impact energy absorption when using PU composites reinforced with natural fibers. In conclusion, the addition of natural fibers to PU can replace EPS; since, metrologically, there was no detriment to impact energy absorption, in addition to contributing to environmental responsibility.

Keywords

Impact absorption; motorcycle helmet; natural fiber; statistical analysis.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Contextualização	14
1.2. Caracterização do problema	17
1.3. Objetivos: Geral e Específicos	18
1.4. Estrutura da dissertação	19
2. Fundamentação Teórica	21
2.1 Fundamentos teóricos associados ao capacete para ocupantes de motocicletas	21
2.2. Fundamentos teóricos relacionados ao preenchimento de proteção de capacete para ocupantes de motocicletas	23
2.3. Fundamentos teóricos associados aos normativos para ensaio de absorção de impacto em capacete para ocupantes de motocicletas.	24
2.4. Fundamento e Métodos da ABNT NBR 7471 para o Ensaio de Absorção de Impacto em Capacetes	25
2.4.1 Estrutura para o ensaio	25
2.4.2 Procedimento de ensaio	28
3. Seleção e Formulação de Fibras Naturais	32
3.1. Fundamentos teóricos associados as fibras naturais	32
3.1.1. Fundamentos teóricos associados à fibra de coco	33
3.1.2. Fundamentos teóricos associados à fibra de Sisal	36
3.1.3. Fundamentos teóricos associado ao bagaço de cana de açúcar.	38
3.2. Fundamentos teóricos associado ao Poliuretano	39
4. Métodos Experimentais e Análise Metrológica em Ensaio de Impacto de Materiais Compósitos	41
4.1. Detalhamento da Formulação dos Compósitos de Fibras Naturais	41
4.1.1. Materiais para formulação dos compósitos	41

4.1.2. Metodologia para a formulação dos compósitos.	43
4.1.3. Aplicação do Ensaio de Absorção de Energia nos compósitos formulados.	45
4.2. Métodos estatísticos adotados na avaliação dos resultados experimentais do ensaio de absorção de impacto	47
4.2.1. Teste de normalidade dos dados	48
4.2.2. Identificação e tratamento de <i>Outliers</i>	50
4.2.2.1. Critério de <i>Chauvenet</i>	51
4.2.2.2. Intervalo Interquartil (IQR)	52
4.2.3. Intervalo de confiança	52
5. Resultados Experimentais	54
5.1. Resultados do ensaio de absorção de impacto	54
5.2. Teste de <i>Shapiro-Wilk</i> para a avaliação da normalidade dos resultados do ensaio de impacto	55
5.3. Testes estatísticos paramétricos e não paramétricos para a identificação de <i>outliers</i>	56
5.3.1 Aplicação do Critério de <i>Chauvenet</i>	56
5.3.2. Aplicação do teste não paramétrico de intervalo interquartil (IQR)	58
5.4. Implementação do Intervalo de Confiança para a comparação dos resultados de absorção e impacto dos compósitos com as fibras naturais.	59
6. Considerações finais e recomendações	62
7. Referências Bibliográficas	65
8. Anexo A – Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Metrologia - 2024	71

Lista de Figuras

Figura 1 – Componentes do capacete motociclístico	22
Figura 2 – Esquema do equipamento do ensaio de impacto	26
Figura 3 – Superfície de impacto: (I) plana e (II) hemisférica	26
Figura 4 – Localização para a instalação do acelerômetro	28
Figura 5 – Capacete com os pontos de impacto marcados	29
Figura 6 – Dinâmica de impacto típica de uma cabeça de ensaio Tipo A.	30
Figura 7 – Área plantada de coqueiros nas regiões brasileiras	34
Figura 8 – Cascas de coco descartadas no ambiente	35
Figura 9 – Planta de sisal (a) e fibra de sisal (b)	36
Figura 10 – Os municípios do território do sisal na Bahia	37
Figura 11 – Tratamento das fibras naturais	42
Figura 12 – Compósitos em fase de cura	44
Figura 13 – Máquina de ensaios de impacto vertical	46
Figura 14 – (a) Acelerômetro triaxial e (b) Centro de gravidade da cabeça padrão	46
Figura 15 – Esquema dos processos estatísticos	48
Figura 16 – Identificação de <i>outliers</i>	57
Figura 17 – Resultados do IQR na amostra de sisal com proporção de 10 %	58
Figura 18 – Comparação dos resultados de absorção de impacto	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Especificações das cabeças de impacto	27
Tabela 2 – Resultado comparativo da safra 2022/2023 para 2023/2024	38
Tabela 3 – Resultados do teste de absorção de impacto nos compósitos	54
Tabela 4 – Resultados do teste de <i>Shapiro-Wilk</i>	55
Tabela 5 – Resultados da média e desvio padrão para o cálculo do Critério de <i>Chauvenet</i>	56
Tabela 6 – Resultados do cálculo do Critério de <i>Chauvenet</i>	57
Tabela 7 – Teste de normalidade no conjunto de dados reajustado do compósito com 10 % de sisal	58
Tabela 8 – Resultados do Intervalo de Confiança nos conjuntos de dados dos diferente compósitos	59

Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior
CGCRE	Coordenação Geral de Acreditação
COENG	Coordenação de Engenharia em Produtos
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMBRAPII	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EPS	Poliestireno Expandido
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
Ipea	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IQR	Intervalo Interquartil
LAENP	Laboratório de Ensaio em Produtos
OAC	Organismo de Avaliação da Conformidade
ONU	Organização das Nações Unidas
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
PU	Poliuretano
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
PVC	Policloreto de Vinila
RBLE	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio

“Não importa o que aconteça, continue a nadar.”

(Walters Graham)

1.

Introdução

A necessidade de proteção para motociclistas é reconhecida e sustentada por estudos nas áreas de saúde e segurança, evidenciando os benefícios significativos no uso de equipamentos de proteção individual. Essa compreensão fundamenta a legislação vigente, que torna obrigatório o uso de capacetes, visando mitigar os riscos associados à condução de motocicletas e salvaguardar a vida e a integridade física dos usuários [1, 2].

O capacete, destinado aos ocupantes de motocicletas, representa proteção essencial para motociclistas e seus passageiros, devido a sua função principal, que é atenuar a severidade das lesões cranianas em caso de acidentes. Os componentes-chave para essa proteção incluem o casco externo e, principalmente, o preenchimento interno. Este último é frequentemente fabricado a partir de Poliestireno Expandido (EPS), devido ao seu desempenho na absorção da energia de impacto [3, 4].

Diante disso, este estudo se concentra na exploração de um compósito alternativo ao EPS, visando não apenas equivaler ou superar sua eficácia na absorção de energia de impacto, mas também promover a integração de práticas sustentáveis por meio da utilização de fibras naturais como reforço mecânico. Mediante a aplicação de técnicas para coleta e tratamento de dados, o estudo propõe uma avaliação metrológica para a comparação dos resultados de absorção de energia de impacto frente aos pilares da eficiência, economicidade e sustentabilidade.

1.1.

Contextualização

O Brasil destaca-se de forma preocupante no contexto global de segurança viária, ocupando a quinta posição no *ranking* mundial de vítimas de trânsito, o que reflete a grave situação da mobilidade urbana e da segurança dos usuários das vias

no país. De acordo com a edição especial temática do boletim Radar, número 67, publicado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), revela-se que o país registra cerca de 22 mortes por 100 mil habitantes, uma estatística alarmante que coloca o Brasil atrás apenas de nações com populações significativamente maiores, como Índia, China, Estados Unidos e Rússia. Notavelmente, mais de um terço dessas fatalidades são atribuídas a acidentes envolvendo motociclistas, evidenciando a vulnerabilidade deste grupo de usuários no trânsito [5].

As lesões cranianas, particularmente os traumatismos cranianos, representam causas significativas de incapacidades decorrentes de acidentes de trânsito, e representam um sério desafio para a saúde pública no Brasil. Pesquisas conduzidas no país apontam que cerca de um quarto das internações hospitalares por acidentes de trânsito são devidas a casos com prognóstico de sequelas físicas de longa duração. Tal dado ressalta a severidade e a complexidade das consequências associadas a tais lesões [6].

A segurança dos ocupantes de motocicletas é um elemento crucial nas estratégias de prevenção de acidentes fatais e lesões de alta gravidade. Sendo assim, o emprego adequado de capacetes é uma medida de segurança essencial, conforme apontado pela Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS). Os dados apontados pela OPAS ressaltam a eficácia dos capacetes na mitigação de riscos associados à condução de motocicletas, indicando uma redução significativa de 42 % no risco de mortes e de 69 % no risco de lesões graves entre os usuários que aderem ao uso adequado de capacetes motociclísticos [1].

Em 1997, a legislação brasileira, por meio da lei nº 9.503, instituiu a obrigatoriedade do uso de capacetes por motociclistas, uma medida reforçada pela Resolução Nº 940, promulgada em 28 de março de 2022 pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). A resolução consolida a exigência do uso de capacetes para condutores e passageiros de motocicletas, motonetas, ciclomotores, triciclos e quadriciclos motorizados em via pública. Além disso, determina de forma mandatória que os capacetes devem atender aos padrões estabelecidos pela Norma ABNT NBR ISO 7471, que especifica os requisitos de desempenho e métodos de ensaio para capacetes e viseiras destinados a motociclistas e ocupantes de veículos similares. É importante ressaltar que os ensaios de conformidade devem ser conduzidos por laboratórios integrantes da Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE), que possuem acreditação da Coordenação Geral de Acreditação

(CGCRE) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Este marco regulatório não apenas reflete o compromisso do país com a elevação dos padrões de segurança para motociclistas e passageiros, mas também estabelece um protocolo rigoroso de certificação e qualidade para equipamentos de proteção individual, assegurando sua eficácia na proteção dos usuários das vias públicas [2, 7].

A Norma ABNT NBR ISO 7471 define o ensaio de absorção de impacto como um procedimento para validar a eficácia dos capacetes para usuários de motocicletas e veículos similares. Esse ensaio é essencial para assegurar que o capacete possui a capacidade de minimizar significativamente as forças de impacto que poderiam, de outra forma, ser transmitidas à cabeça do usuário durante um acidente [8].

Apesar da diversidade de modelos de capacetes disponíveis no mercado, seus componentes fundamentais e finalidades permanecem consistentes, centrando-se na proteção do usuário. O desempenho protetivo de um capacete é determinado por dois elementos essenciais: a carcaça exterior, que é rígida, e o forro interior, que é flexível. Tradicionalmente, o forro dos capacetes é produzido utilizando o EPS, reconhecido por sua leveza e pelas propriedades mecânicas adequadas para a absorção de energia de impacto. Entretanto, ao atuar nas situações de impacto o EPS sofre deformação que compromete seu desempenho. Além disso, a característica não biodegradável do EPS representa um desafio ambiental considerável [9, 10, 11, 12].

A crescente preocupação com os impactos ambientais gerados pelos resíduos plásticos derivados do petróleo tem impulsionado a busca por alternativas naturais e sustentáveis. Este movimento em direção à sustentabilidade incentiva a exploração de materiais naturais, visando diminuir a dependência de recursos não renováveis e reduzir os impactos ambientais associados à produção e ao descarte desses produtos poluentes [13].

Nesse cenário, as fibras naturais surgem como possíveis soluções para atender aos requisitos de absorção de impacto, baixa densidade, economicidade e sustentabilidade. Essas fibras, disponíveis em abundância no território brasileiro, destacam-se não apenas pelas suas notáveis propriedades mecânicas e pelo excelente custo-benefício, mas também pelas suas características sustentáveis, especialmente no que tange à valorização de resíduos gerados por indústrias. Esta

abordagem está em consonância o objetivo 12.2 de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que preconiza a utilização eficiente dos recursos naturais [14, 15, 16].

Neste contexto, a seleção adequada de fibras naturais para aplicação em compósitos representa um campo promissor para o desenvolvimento de forros de capacetes motociclísticos. Para tanto, é essencial uma análise dos requisitos de desempenho mecânico associados a sua aplicação. As ferramentas estatísticas desempenham um papel fundamental nesta análise, possibilitando uma avaliação sistemática e detalhada dos compósitos de fibra natural em termos de sua capacidade de absorção de energia de impacto. A avaliação metrológica permite identificar qual fibra oferece o melhor desempenho mecânico.

Esta dissertação de mestrado em Metrologia dedicou-se a explorar os conceitos fundamentais e as aplicações da avaliação metrológica, apresentando os resultados de uma investigação empírica sobre a eficácia da absorção da energia de impacto por diferentes fibras naturais, proporcionando *insights* valiosos para possíveis inovações no *design* de capacetes para ocupantes de motocicletas.

1.2.

Caracterização do problema

A necessidade de identificar materiais substitutos menos poluentes para a fabricação de capacetes de motociclistas tornou-se premente, especialmente considerando as implicações ambientais associadas ao uso generalizado do EPS. Este último, derivado principalmente do estireno, um subproduto do petróleo, apresenta significativas preocupações ambientais devido ao seu elevado consumo e limitada capacidade de reciclagem. Além disso, a dependência de um único material impulsiona a busca por alternativas mais sustentáveis. Portanto, emerge como questão fundamental desta dissertação:

- Como a avaliação metrológica pode auxiliar na comparação da eficácia na absorção de impacto entre compósitos de PU reforçados com fibras naturais?

Esta pergunta visa investigar a viabilidade de fibras naturais como reforço em compósitos de PU, explorando seu potencial para melhorar a segurança em

equipamentos de proteção individual, enquanto se alinha às diretrizes de sustentabilidade ambiental.

1.3.

Objetivos: geral e específicos

A pesquisa tem como objetivo geral avaliar a eficácia de compósitos de PU reforçados com fibras naturais na absorção de impacto para capacetes motociclísticos, levando em consideração as normas e regulamentos aplicáveis e enfocando a sustentabilidade dos materiais empregados. A avaliação metrológica servirá como base para a análise comparativa desses compósitos.

Para alcançar este objetivo geral, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- Discutir as contribuições de referenciais conceituais e normativos aplicáveis à absorção de energia de impacto em capacetes motociclísticos, identificando conceitos-chave e diretrizes normativas que fundamentam a avaliação dos compósitos;
- Selecionar o referencial teórico e metodológico mais apropriado para o projeto de capacetes destinados a motociclistas, considerando as práticas mais eficazes na modelagem e desenvolvimento de compósitos;
- Estabelecer os critérios para a formulação dos compósitos utilizando os diferentes tipos de fibras naturais, com ênfase em seu potencial para absorção de energia de impacto. Explorar e definir as abordagens mais promissoras a serem consideradas na fase de aplicação, visando atender aos requisitos normativos;
- Realizar os ensaios de absorção de impacto nos compósitos desenvolvidos, seguindo os procedimentos e referenciais escolhidos, para determinar a eficácia dos materiais desenvolvidos;
- Demonstrar como a avaliação metrológica pode ser empregada para destacar diferenças significativas na absorção de energia de impacto entre os compósitos testados, enfatizando a sua importância; e
- Identificar subsídios provenientes dos resultados do estudo empírico que possam ser aplicados nos projetos da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e/ou Rota 2030, visando contribuir para o

desenvolvimento de novos materiais para proteção em capacetes de motocicletas. Além disso, apresentar sugestões para a revisão da Norma ABNT NBR 7471, com base nas análises realizadas no estudo.

1.4.

Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por seis capítulos que abordam temas relacionados à seleção de compósitos para absorção de energia de impacto em capacetes para ocupantes de motocicletas. Por meio da identificação e contextualização de lacunas na literatura científica especializada, esta dissertação contribui para a segurança dos usuários de motocicletas e fornece informações relevantes para a comunidade científica e operadores do sistema.

Este Capítulo 1 estabeleceu o cenário para a investigação, enfatizando a importância dos capacetes para a segurança dos motociclistas e as consequências das lesões cranianas. Em seguida, apresentou a lacuna científica, especialmente no que tange o uso de materiais sustentáveis para a absorção de impacto, e delineou os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta uma abordagem detalhada sobre capacetes para motociclistas, com foco especial nos materiais de preenchimento utilizados, objeto central deste estudo; descreve os principais tipos de materiais utilizados, suas características e propriedades, bem como os principais métodos de ensaio utilizados para avaliar a eficácia desses materiais na absorção de energia de impacto. O objetivo deste capítulo é fornecer uma base teórica para o estudo empírico.

O Capítulo 3 aborda a seleção das fibras naturais (coco, sisal e bagaço de cana), com base em propriedades mecânicas e os critérios de sustentabilidade. Os critérios de formulação dos compósitos são detalhados para a fase aplicada da dissertação, visando otimizar a absorção de energia de impacto em capacetes, enquanto se considera a viabilidade ambiental.

No Capítulo 4, descreve-se a metodologia do estudo empírico, abordando desde a formulação dos compósitos até a execução dos testes de absorção de impacto. Detalham-se a estrutura e as funcionalidades do Laboratório de Ensaio em Produtos do INT, enfatizando as técnicas experimentais e a metodologia metrológica utilizada para análise de dados. Além disso, são especificados os

equipamentos empregados nos ensaios e os critérios adotados para a avaliação dos resultados. Descreve-se cada etapa do processo para garantir a confiabilidade e validade dos dados obtidos.

No capítulo 5, é demonstrada a aplicabilidade da avaliação metrológica com a comparação dos dados coletados durante a fase experimental da pesquisa. Esta seção prossegue com uma discussão sobre como os resultados obtidos se alinham aos objetivos e hipóteses formuladas nesta pesquisa.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões do estudo, correlacionando-as com os objetivos propostos. Além disso, este capítulo fornece diretrizes para investigações futuras, e também sugere recomendações destinadas para o aprimoramento de projetos de capacetes. Adicionalmente, realça as contribuições para futuras revisões da Norma ABNT NBR ISO 7471:2015, enfatizando como os *insights* adquiridos podem influenciar positivamente as práticas normativas. Por fim, discute-se uma série de questões emergentes identificadas ao longo desta dissertação, delineando áreas promissoras para investigação subsequente e aprofundamento.

2.

Fundamentação teórica

Neste capítulo, delineiam-se os princípios teóricos fundamentais sobre capacetes para motociclistas. São discutidas em profundidade suas especificidades estruturais, dando particular ênfase ao preenchimento que oferece proteção. Adicionalmente, é vital entender a atual regulamentação que direciona os procedimentos de teste para a absorção de energia durante impactos. Esta seção visa proporcionar uma compreensão ampla e detalhada sobre esses temas essenciais na segurança dos usuários de motocicletas.

2.1.

Fundamentos teóricos associados ao capacete para ocupantes de motocicletas

No início do século XX, com a popularização das motocicletas, emergiu a demanda por equipamentos de proteção adequados. Os primeiros capacetes, inspirados em bonés de couro utilizados por aviadores, eram predominantemente adotados em corridas e frequentemente acompanhados de óculos. Entretanto, sua principal função era proporcionar conforto, e pouco contribuíam para a proteção efetiva contra impactos. Com a evolução do entendimento das exigências biofísicas da cabeça e o aprimoramento de técnicas de avaliação de lesões, os capacetes passaram por significativas transformações. Identificou-se a necessidade de um revestimento externo robusto para distribuir eficazmente a força de impactos, reduzindo áreas de pressão concentrada e, conseqüentemente, a chance de lesões cranianas. Paralelamente, os progressos na área de ciência dos materiais tiveram um papel decisivo no aperfeiçoamento destes instrumentos de segurança [4].

Na atualidade, o capacete, particularmente para motociclistas e condutores de veículos similares, transcende uma simples medida preventiva, consolidando-se

como um pilar central na segurança no trânsito. Sua estrutura e design são meticulosamente concebidos para proteger o usuário, minimizando ou mesmo prevenindo danos severos resultantes de acidentes viários. Segundo a norma brasileira ABNT NBR 7471, esta peça é categorizada como "capacete de proteção", reiterando sua primordial função: salvaguardar e mitigar o risco de traumas na cabeça, rosto e pescoço dos usuários em situações de sinistro [8].

Em acidentes envolvendo motocicletas ou bicicletas, predominam dois mecanismos de lesão cerebral: o impacto direto e a aceleração-desaceleração. Durante colisões, é comum que os ocupantes sejam lançados para longe do veículo. Nesta situação de impacto com o solo, a movimentação da cabeça é abruptamente interrompida, enquanto o cérebro continua seu movimento até colidir com a parede interna do crânio, resultando em danos que variam desde simples concussões até lesões fatais. Essas lesões, seja por impacto direto ou por aceleração-desaceleração, podem ser classificadas em abertas ou fechadas, sendo as fechadas as mais prejudiciais. Sendo assim, os capacetes emergem como uma defesa adicional, atenuando algumas das lesões cerebrais traumáticas mais graves. Eles têm como objetivo diminuir o risco de danos graves, atenuando os efeitos de uma colisão. Funcionam nas frentes de desaceleração e distribuição de impacto, bem como fornecem uma barreira mecânica. A atuação dessas frentes é garantida pela interação dos quatro componentes essenciais desse equipamento de proteção, que incluem: o casco, o preenchimento de proteção, o preenchimento de conforto e o sistema de retenção. Essa estrutura é detalhada na Figura 1 [17].

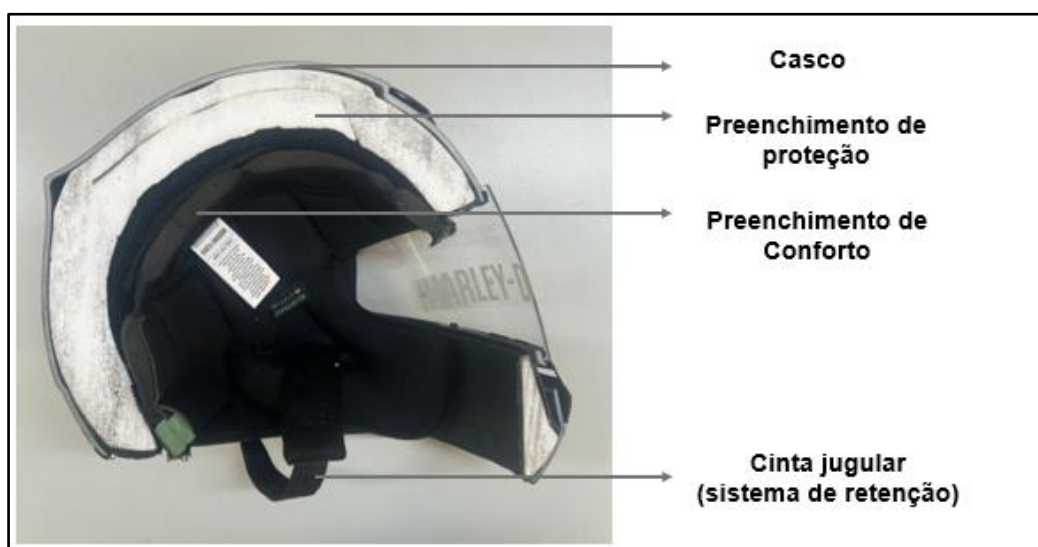


Figura 1 - Componentes do capacete motociclístico.

As funções desses quatro componentes são: (i) o casco, que distribui a energia do impacto e protege contra a penetração de objetos pontiagudos; (ii) o preenchimento de proteção, que atua na redução da força exercida sobre o crânio e da aceleração experimentada pela cabeça; (iii) o preenchimento de conforto, que assegura um ajuste confortável do capacete à cabeça do usuário; e (iv) o sistema de retenção, que mantém o capacete firmemente fixado à cabeça, impedindo que se solte em situações de impacto [4].

Embora os capacetes não possam prevenir todos os tipos de lesões, sua correta utilização e projeto adequado são fundamentais para minimizar a gravidade das lesões cerebrais traumáticas, contribuindo significativamente para a segurança dos usuários de veículos de duas rodas.

2.2.

Fundamentos teóricos relacionados ao preenchimento de proteção em capacete para ocupantes de motocicletas.

O preenchimento de proteção nos capacetes, essencialmente o revestimento interno, assume uma função primordial na garantia da segurança do usuário. Este preenchimento é projetado para absorver a energia remanescente de impactos, atuando como um mecanismo de mitigação. Embora o casco do capacete atenuie inicialmente essa energia, servindo como a primeira linha de defesa, é o preenchimento que desempenha um papel vital durante a colisão. Submetido à compressão no momento do impacto, ele expande a distância e estende o tempo de desaceleração da cabeça, potencializando a capacidade do capacete de dissipar a energia cinética decorrente da colisão. Esse processo resulta na redução significativa da carga transferida ao crânio, validando assim a importância e eficácia protetora do preenchimento em capacetes [13].

O poliestireno expandido (EPS), um termoplástico originário do petróleo e do gás natural, popularmente conhecido como isopor, é comumente utilizado em equipamentos de proteção individual pela sua capacidade de dissipar energia de impacto durante colisões, bem como sua baixa densidade, características que o tornam adequado para forros de capacetes. Além disso, o EPS destaca-se pelo seu isolamento térmico, resistência à água e à ação de uma variedade de substâncias químicas, reforçando sua aplicabilidade em diversos contextos de segurança.

Contudo, a reciclagem do EPS enfrenta barreiras substanciais, com métodos existentes que variam de recuperação energética a processos mecânicos e químicos, cada um limitado por questões econômicas e logísticas, refletindo a ausência de um sistema de reciclagem eficaz e estruturado. A fabricação e descarte do EPS são etapas que, segundo análises de ciclo de vida, acarretam elevados impactos ambientais, particularmente em termos de Potencial de Aquecimento Global, com a fase de produção apresentando-se como a mais crítica. Tais efeitos complicadores salientam a importância de uma revisão criteriosa do uso do EPS, com o intuito de reduzir a pegada ambiental associada a este material comum nos produtos de segurança [17, 18, 19].

2.3.

Fundamentos teóricos associados aos normativos para ensaio de absorção de impacto em capacete para ocupantes de motocicletas.

As regulamentações técnicas são elementos cruciais para a garantia da segurança dos capacetes de motociclistas. Normas como a *Regulation No. 22: Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and their visors for drivers and passengers of motor cycles and mopeds* - UN/ECE 22.06 [20] e a *Federal Motor Vehicle Safety Standards* - DOT FMVSS 218 [21], juntamente com a norma brasileira ABNT NBR 7471 [8], definem os padrões para ensaios de segurança. Essas normas são alinhadas em seus métodos de ensaio, principalmente no que diz respeito ao ensaio de absorção de impacto, o qual é realizado por meio da prática de queda livre do capacete, reproduzindo as condições reais de um acidente. Este teste é essencial para verificar a capacidade do capacete de amortecer impactos, um indicador chave da proteção oferecida ao usuário [8, 20, 21].

No contexto nacional, a ABNT NBR 7471 [8] é uma norma baseada na ECE R22:2000 [20], uma diretriz internacional. Elaborada para atender às demandas do contexto brasileiro, esta norma estabelece critérios abrangentes para a avaliação de capacetes de motociclistas, incluindo, mas não se limitando à capacidade de absorção de impacto, resistência à penetração e eficácia do sistema de retenção. A formulação da ABNT NBR 7471 visa fornecer um padrão de referência confiável e robusto, apto a orientar a avaliação de capacetes dentro das particularidades do trânsito e das exigências técnicas e econômicas do Brasil [8].

2.4.

Requisitos e Métodos da ABNT NBR 7471 para o Ensaio de Absorção de Impacto em Capacetes

A ABNT NBR 7471 estabelece as metodologias e os requisitos para o ensaio de absorção de impacto, visando simular as condições extremas enfrentadas pelo capacete em uma situação de real de acidente. Com isso, visa garantir que os capacetes comercializados sejam capazes de oferecer proteção eficaz contra impactos [8].

2.4.1.

Estrutura para o ensaio

O equipamento necessário para condução do ensaio inclui componentes essenciais como uma superfície de impacto rigidamente fixada a uma base maciça, uma cabeça de ensaio metálica equipada com um acelerômetro tridimensional, um sistema de medição conectado ao acelerômetro, um suporte para a cabeça de ensaio com o capacete devidamente instalado, e um sistema que permita guiar o suporte em queda livre. A Figura 2 apresenta o esquema detalhado deste equipamento [8].

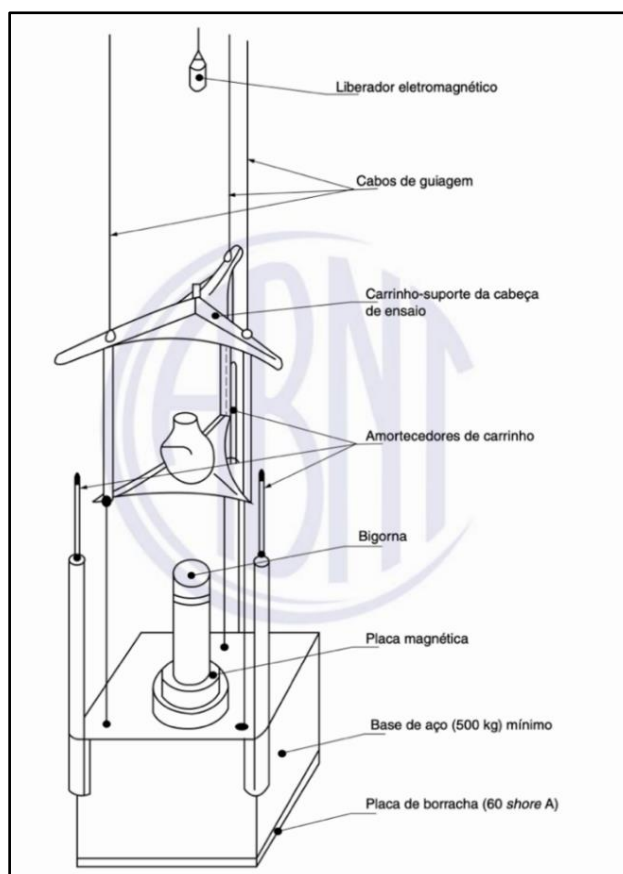


Figura 2 - Esquema do equipamento do ensaio de impacto.

As superfícies de impacto utilizadas no ensaio são de dois tipos: uma superfície plana de aço, com face de impacto circular e diâmetro é de (130 ± 3) mm; e uma superfície hemisférica de aço, com uma face de impacto de raio de (50 ± 2) mm. Essas superfícies estão localizadas no esquema apresentado na Figura 2, na área designada como bigorna [8]. A exatidão dos parâmetros dessas superfícies é garantida por meio de verificações periódicas realizadas pelo laboratório de ensaio [22]. A representação visual dessas superfícies está demonstrada na Figura 3.

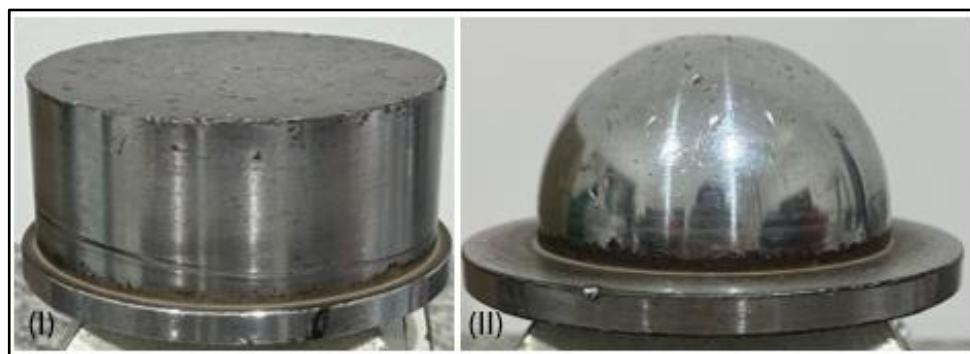


Figura 3 – Superfícies de impacto: (I) plana e (II) hemisférica.

A base deve ser construída com aço, concreto, ou uma combinação desses materiais, possuindo uma massa mínima de 500 kg para evitar deformações significativas durante o ensaio. É crucial que nenhum componente da base ou da superfície de impacto apresente frequência de ressonância que possa distorcer as medições [8].

Para a execução dos ensaios, é fundamental a utilização das cabeças de teste. Elas são fabricadas preferencialmente com ligas de magnésio, como a liga K-1 A com 0,7 % de zircônio, garantindo estabilidade com frequências de ressonância superiores a 3000 Hz. As especificações detalhadas dessas cabeças de teste estão apresentadas na Tabela 1 [8].

Tabela 1 – Especificações das cabeças de impacto

Cabeça de ensaio		
Símbolos	Circunferência (cm)	Massa (kg)
A	50	$3,1 \pm 0,10$
E	54	$4,1 \pm 0,12$
J	57	$4,7 \pm 0,14$
M	60	$5,6 \pm 0,16$
O	62	$6,1 \pm 0,18$

Cada cabeça de ensaio é projetada para permitir a instalação precisa de um acelerômetro tridimensional próximo a seu centro de gravidade, permitindo medições precisas das forças de impacto durante os ensaios. O acelerômetro deve ser capaz de suportar uma aceleração máxima de 2000 G (nesta dissertação, o símbolo G será utilizado para representar a aceleração da gravidade, $9,80665 \text{ m/s}^2$) sem danificar-se, e sua massa não pode exceder 50 g [8]. A Figura 4 ilustra a cabeça de ensaio juntamente com o local para a instalação do acelerômetro.



Figura 4 – Localização para a instalação do acelerômetro.

O sistema móvel que suporta a cabeça de ensaio deve ser projetado de maneira que suas características não interfiram na medição da aceleração do centro de gravidade da cabeça de ensaio. Além disso, deve ser ajustável o suficiente para permitir que qualquer ponto desejado para teste seja posicionado verticalmente acima do centro da bigorna [8].

2.4.2.

Procedimento de ensaio

Os capacetes são testados na condição em que são comercializados. Para a execução completa do ensaio, são necessárias três unidades de capacete que constituem a amostra. Cada capacete é submetido a quatro ou seis impactos, distribuídos em diferentes regiões do casco: frontal (pontos B e B1), lateral (pontos X e X1), e traseira (pontos P e P1). Esses pontos são definidos com bastante rigor metrológico e devem manter distâncias específicas entre si e em relação às bordas do capacete. A figura 5 apresenta um capacete com os pontos de impacto marcados [8].



Figura 5 – Capacete com os pontos de impacto marcados.

A seleção da cabeça de ensaio é determinada pelo tamanho do capacete a ser testado, conforme especificado na Tabela 1. Em casos de capacetes com dimensões entre dois tamanhos padronizados, utiliza-se a cabeça de ensaio menor mais próxima. Adicionalmente, o capacete deve ser adequadamente posicionado na cabeça de ensaio, e o sistema de retenção ajustado para assegurar a eficácia máxima durante o teste [8].

O ensaio consiste na liberação do conjunto formado pela cabeça e capacete de uma altura definida, de modo que o ponto de impacto marcado no capacete atinja a superfície de impacto a uma velocidade $(7 \pm 0,15)$ m/s para as superfícies planas e $(6 \pm 0,15)$ m/s para as superfícies hemisféricas [8]. Considerando a conversão de energia potencial gravitacional em energia cinética, pode-se escrever

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = m \cdot G \cdot h \quad (1)$$

onde m representa a massa, v é a velocidade, G é a força da gravidade, e h a altura. Dessa forma, a altura h necessária para alcançar a velocidade desejada no impacto é calculada por:

$$h = \frac{v^2}{2 \cdot G} \quad (2)$$

Ou seja, para $v = 7$ m/s, $h = 2,5$ m; e para $v = 6$ m/s, $h = 1,84$ m. A figura 6 representa a dinâmica tipicamente ocorrida em uma cabeça de impacto do tipo A, portanto com 3,1 kg de massa nominal, sem capacete, desde a liberação de $h = 2,5$ m até o impacto com uma superfície plana.

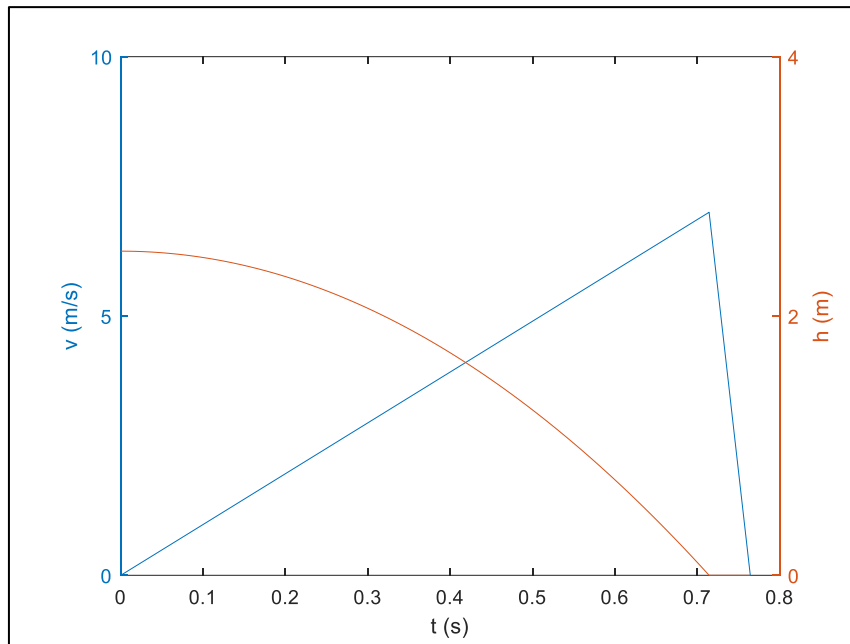


Figura 6: Dinâmica de impacto típica de uma cabeça de ensaio do Tipo A.

Na Figura 6, a reta azul representa a velocidade da cabeça de teste, aumentando desde 0 m/s (na altura máxima de 2,5 m, como indicado na reta azul) até o valor máximo de 7 m/s (na altura mínima de 0 m, ao atingir a superfície plana). A curva vermelha rapidamente decrescente após o instante de velocidade máxima é a rápida desaceleração sofrida pela cabeça de teste. Supondo que esta desaceleração ocorra em um intervalo muito curto de 1 ms, ter-se-ia uma distância de desaceleração de somente $d = 7$ mm, e pode-se inverter a equação (3) para estimar a desaceleração como

$$a = \frac{v^2}{2 \cdot d} . \quad (3)$$

Para $v = 7$ m/s e $d = 7$ mm, ter-se-ia $a = 3500 \text{ m/s}^2 = 357 G$, uma desaceleração extremamente elevada. Ao se acrescentar o capacete com o revestimento de proteção adequado, aumenta-se a distância de desaceleração de modo a diminuir a desaceleração a níveis adequados.

Assim, a medição de desempenho nos ensaios de absorção de impacto é determinada pela resultante da máxima desaceleração registrada pelo acelerômetro acoplado à cabeça de ensaio. Esta não deve exceder 300 G em qualquer instante e deve manter-se abaixo de 150 G por períodos superiores a 5 ms. Esses limites são fundamentais para assegurar que o capacete ofereça o nível de proteção necessário [8].

A norma ABNT NBR 7471 também caracteriza de maneira detalhada as condições para o ensaio de capacetes, abrangendo a preparação e condicionamento deles, que podem envolver sua exposição a variações de temperatura e umidade. Este procedimento é essencial para assegurar que os capacetes sejam avaliados sob condições similares às que seriam encontradas em uso real.

Portanto, essa norma técnica desempenha um papel fundamental na regulamentação dos requisitos de segurança para capacetes motociclísticos no Brasil, bem como, estabelece os critérios para e orientam os fabricantes e os órgãos reguladores, de forma a garantir que os capacetes ofereçam o nível de proteção necessário e que os fabricantes mantenham a integridade na produção e no fornecimento de equipamentos de segurança.

3.

Seleção e Formulação de Fibras Naturais: Enfoques em Sustentabilidade e Propriedades Mecânicas

Este Capítulo aprofunda-se na análise das fibras naturais, fundamentando sua escolha não apenas pelas qualidades mecânicas superiores, mas também pelo seu alinhamento com práticas ambientais sustentáveis. Este segmento da dissertação tem como intuito expor o contraste entre o uso tradicional de polímeros baseados em petróleo e o crescente interesse em materiais biodegradáveis e menos impactantes ao meio ambiente.

Além disso, o capítulo se detém na sinergia entre as fibras naturais e o poliuretano (PU), um polímero que, pela sua natureza versátil, tem se mostrado uma matriz excepcional para a incorporação desses reforços orgânicos. Assim, consolida a discussão sobre as fibras naturais e sua aplicação em compósitos com PU, estabelecendo o quadro teórico para a exploração subsequente de suas propriedades e benefícios. A análise trazida a seguir oferece uma perspectiva teórica, e reflete sobre como o desenvolvimento de compósitos sustentáveis está intrinsecamente ligado às demandas contemporâneas por tecnologias ambientalmente responsáveis e economicamente viáveis.

3.1

Fundamentos teóricos associados às fibras naturais

As fibras naturais se caracterizam pela sua natureza intrinsecamente fibrosa e pela preservação de sua composição química mesmo após o manuseio, diferenciando-se das fibras sintéticas em diversos aspectos. Economicamente mais acessíveis e com um manuseio simplificado, elas apresentam um conjunto de propriedades mecânicas interessantes. Ademais, sua produção requer um menor consumo energético quando comparada à das fibras sintéticas, contribuindo para a redução do impacto ambiental. A biodegradabilidade é outro atributo vantajoso das

fibras naturais, ressaltando seu alinhamento com práticas de desenvolvimento sustentável e ecoeficiência [23].

No cenário atual de inovação em engenharia e indústria, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais assumem um papel central, espelhando a busca coletiva por soluções mais sustentáveis e ecologicamente responsáveis. O desenvolvimento desses materiais avançados é impulsionado pelo desejo de reduzir impactos ao meio ambiente e maximizar a utilização eficiente dos recursos. As fibras naturais são especialmente valorizadas em aplicações poliméricas devido a sua ampla disponibilidade, baixo custo e capacidade de biodegradação. Tais atributos, aliados às suas propriedades mecânicas robustas, as tornam alinhadas às exigências contemporâneas de sustentabilidade, conferindo-lhes um espaço cada vez maior no mercado global e impulsionando inovações significativas na tecnologia de materiais com foco na sustentabilidade [24, 25].

Na busca por soluções nacionais, o Brasil, destacado por sua vasta biodiversidade e potencial agrícola, apresenta-se como um líder global na produção de recursos naturais renováveis. De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o país mantém cerca de 280 mil hectares destinados ao cultivo de coqueiros, resultando em uma produção anual aproximada de dois bilhões de frutos. Paralelamente, informações da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) indicam que a safra 2022/23 de cana-de-açúcar alcançou uma produção estimada em 610,1 milhões de toneladas, marcando um aumento de 5,4 % em relação ao período anterior. Adicionalmente, ressalta-se que o Brasil, com uma produção de 91,9 mil toneladas de sisal em 2022, consolida-se como o maior produtor mundial desse material, representando 43,1 % do total global [26, 27].

Desse modo, a escolha das fibras de coco, sisal e cana-de-açúcar, provenientes da vasta biodiversidade brasileira, ilustra a utilização eficiente dos recursos naturais renováveis do país. Além disso, a incorporação dessas fibras em compósitos poliméricos almeja melhorar as características mecânicas, como a resistência ao impacto, de modo a promover o alinhamento da tecnologia de materiais com os princípios de sustentabilidade ambiental [28, 29, 30].

3.1.1.

Fundamentos teóricos associados à fibra de coco

No cenário do agronegócio global, o Brasil se destaca pela sua vasta extensão territorial e potencial cultivável, com o coco verde, proveniente da *Cocos nucifera L.*, emergindo como um dos principais produtos agrícolas. Este fruto é especialmente valorizado por sua "água de coco", e sua prevalência nas regiões litorâneas do Nordeste, impactando significativamente tanto na dieta local quanto na economia regional. A produção anual de coco no Brasil é de aproximadamente 2,0 bilhões de unidades, com especial destaque para a região Nordeste, que representa cerca de 80 % da área plantada no país, somando 288 911 hectares. A Figura 7 ilustra a distribuição da área plantada por regiões [27, 31].

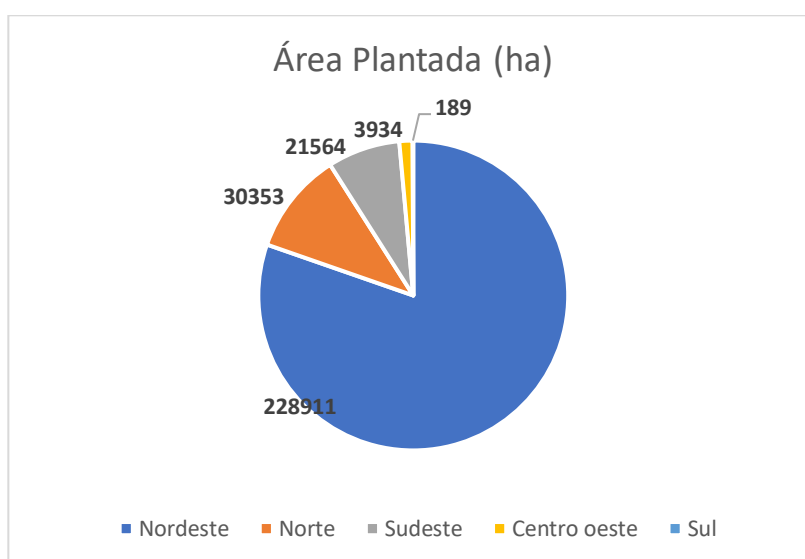


Figura 7 – Área plantada de coqueiros nas regiões brasileiras.

A extensa plantação de coco na região Nordeste resulta em um volume significativo de resíduos agrícolas, estimados em aproximadamente 729 mil toneladas de cascas, 595 mil toneladas de folhas e 243 mil toneladas de inflorescências, totalizando cerca de 1 milhão e 567 mil toneladas de resíduos. Essa produção massiva de resíduos não apenas apresenta desafios ambientais consideráveis, pela sua contribuição para o esgotamento da capacidade de aterros sanitários e a emissão de gases de efeito estufa, mas também representa uma perda de recursos valiosos. Atualmente, negligencia-se o valor agregado que esses materiais podem oferecer à indústria e à agricultura, pois uma grande parcela desses resíduos é subutilizada, sendo frequentemente incinerada nos locais de processamento ou descartada no ambiente, conforme ilustrado na figura 8 [27].



Figura 8 – Cascas de coco descartadas no ambiente.

Este cenário enfatiza a necessidade urgente de reavaliar as práticas de gestão de resíduos e explorar soluções sustentáveis que maximizem o aproveitamento desses recursos naturais, transformando o que atualmente é considerado descarte em matéria-prima para novos produtos e aplicações. O aproveitamento das fibras de coco, derivadas dos resíduos da produção, representa uma solução inovadora que responde tanto aos desafios ambientais quanto às demandas por materiais com propriedades físico-químicas avançadas. Essas fibras encontram aplicabilidade em diversos setores, como na construção civil, na indústria automobilística e aeroespacial, oferecendo alternativas para embalagens, adição em concretos não estruturais, compósitos, misturas asfálticas, mantas de fibra de coco, objetos para jardinagem e componentes automotivos, entre outros [30, 32, 33].

A fibra de coco é caracterizada por sua resistência mecânica e tenacidade, por sua resistência mecânica e tenacidade, propriedades que derivam de sua característica fibrosa distintiva. Sua capacidade de absorver uma quantidade significativa de energia antes da falha, atribuída à sua estrutura microscópica singular e composição lignocelulósica, enfatiza o potencial desta fibra na melhoria do desempenho de compósitos reforçados, alinhando inovação tecnológica com sustentabilidade ambiental [34].

Em conclusão, esta seção destaca a fibra de coco como um exemplo notável de inovação e sustentabilidade no contexto do agronegócio brasileiro. A transformação de resíduos agrícolas em fibras de coco reforça a ideia de que práticas agrícolas sustentáveis e o aproveitamento integral dos recursos naturais não apenas mitigam desafios ambientais, mas também criam oportunidades econômicas substanciais. A integração dessas fibras em diversos setores industriais revela seu potencial como uma alternativa viável aos materiais sintéticos, oferecendo uma solução que alinha resistência mecânica superior, leveza e biodegradabilidade.

3.1.2.

Fundamentos teóricos associados à fibra de Sisal

A planta de sisal, também conhecida como *Agave sisalana*, é uma espécie predominante nas regiões tropicais, de distribuição global. As fibras obtidas das folhas desta planta são conhecidas pela sua notável heterogeneidade em propriedades físico-químicas e mecânicas, como diâmetro, comprimento e resistência à tração, que podem variar significativamente mesmo dentro de uma única folha. A figura 9 mostra a planta de sisal e sua fibra após extração [35, 36].



Figura 9 – Planta de Sisal (a) e fibra de sisal (b).

O sisal foi introduzido no município de Santaluz, situado na região sisaleira da Bahia, por volta de 1910. No entanto, sua exploração comercial só começou a partir do final da década de 1930. Atualmente, esta região, que abrange uma área de 21 256 km² e engloba 20 municípios, produz cerca de 140 mil toneladas de sisal

por ano, correspondendo a 90 % da produção nacional. Isso a estabelece como a principal produtora de sisal do país, destacando sua significativa relevância econômica e agrícola para a região e para o Brasil [37]. A figura 10 apresenta uma visão dos municípios do território do sisal no estado da Bahia [38].

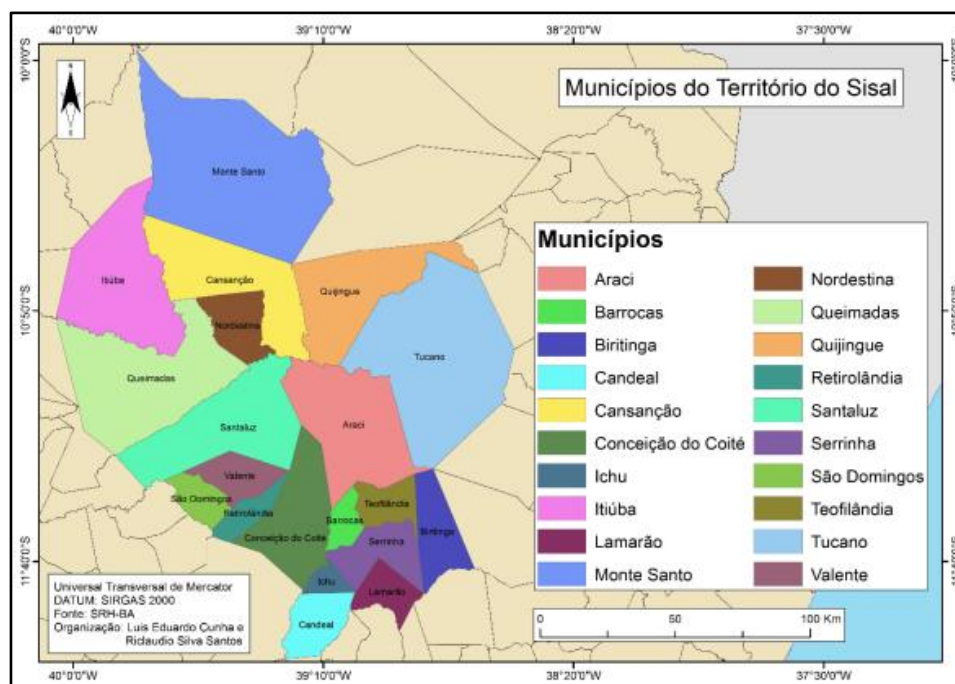


Figura 10 – Os municípios do território do sisal na Bahia.

O sisal encontra uso em uma variedade de aplicações, desde a fabricação de cordas e artesanato até a produção de papel e têxteis. Devido à sua alta resistência mecânica e disponibilidade abundante, a fibra de sisal também é cada vez mais considerada como um substituto sustentável para as fibras sintéticas em compósitos poliméricos comerciais, refletindo uma crescente preferência por materiais renováveis [39].

Contudo, a utilização da fibra de sisal em compósitos enfrenta desafios relacionados à sua propensão à absorção de umidade. Este fator pode induzir ao inchaço da fibra, afetando negativamente a resistência mecânica e a durabilidade dos compósitos. Portanto, para otimizar o desempenho da fibra de sisal como reforço, é essencial um tratamento de superfície, como a alcalinização, que promova a compatibilidade e adesão entre a fibra e a matriz polimérica, garantindo uma interação interfacial mais efetiva [40, 41].

3.1.3.

Fundamentos teóricos associado ao bagaço de cana de açúcar.

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), pertencente à família das Poaceae, é amplamente reconhecida como um dos pilares da agricultura latino-americana. O Brasil destaca-se como o principal produtor global, seguido pela Índia e China, desempenhando um papel preponderante no mercado agrícola internacional. A magnitude da indústria sucroalcooleira brasileira é refletida na sua expressiva participação no mercado de exportação de açúcar, responsável por mais de 30 % das transações globais nos últimos anos e gerando significativas receitas cambiais [23, 42].

Historicamente, a produção de cana-de-açúcar no Brasil demonstra crescimento exponencial, ultrapassando a marca de 700 milhões de toneladas a partir de 2010, com uma expansão notável da área colhida, que dobrou de tamanho ao longo do início do século XXI. Notavelmente, a safra 2023/2024 registrou uma produção recorde de 713,2 milhões de toneladas, conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), representando um aumento de 16,8 % em comparação com o ciclo anterior. O levantamento também mostra um crescimento modesto de 0,5 % na área colhida, totalizando 8,33 milhões de hectares, e um aumento de 16,2 % na produtividade, que passou de 73 655 kg/ha para 85 580 kg/ha. A tabela 2 apresenta os resultados comparativo com a safra de 2022/2023 [42, 43].

Tabela 2 – Resultado comparativo da safra 2022/2023 para 2023/2024

Período	Área (mil ha)	Variação (%)	Produtividade (kg/ha)	Variação (%)	Produção (mil ha)	Variação (%)
2022/2023	8 293	0,5 %	73 655	16,2 %	610 805	16,8 %
2023/2024	8 334		85 580		713 214	

O bagaço da cana-de-açúcar, derivado do processo de extração do suco da cana, é um material lignocelulósico com potencial para ser utilizado como carga em compósitos poliméricos. A estrutura deste resíduo agrícola, caracterizada por uma casca externa robusta e uma medula interna macia, tem atraído a atenção tanto do

meio acadêmico quanto do setor industrial. Sua valorização como recurso renovável para a fabricação de materiais compósitos é impulsionada por atributos como acessibilidade econômica, leveza, biodegradabilidade e disponibilidade em larga escala. Essas propriedades conferem ao bagaço da cana-de-açúcar um status de material sustentável e renovável altamente promissor para aplicações inovadoras em diversos campos da engenharia e tecnologia [44, 45].

As fibras de bagaço de cana-de-açúcar são intrinsecamente hidrofílicas, ou seja, absorvem a umidade do ambiente, o que resulta em inchaço e deterioração das suas propriedades mecânicas. Para mitigar tais problemas, diversas técnicas de modificação química têm sido exploradas. Processos como alcalinização, tratamento com permanganato de potássio, acetilação, silanização, benzoilação, tratamento com acetona e acrilação alteram os grupos polares das fibras, conferindo-lhes características hidrofóbicas e melhorando sua compatibilidade com matrizes poliméricas. Essas modificações facilitam a formação de compósitos mais estáveis e duradouros, conforme documentado na literatura científica, destacando-se como estratégias eficazes para superar as barreiras de integração das fibras naturais em aplicações de engenharia [46].

3.2.

Fundamentos teóricos associado ao Poliuretano

Os poliuretanos (PUs) são polímeros sintéticos, obtidos através da reação de policondensação entre os grupos hidroxila dos polióis e os grupos isocianato dos diisocianatos, formando as ligações uretânicas características. Esta reação exotérmica pode ser ajustada para produzir PUs com uma ampla variação em rigidez, densidade e flexibilidade, dependendo da composição dos reagentes e das condições de reação. A estrutura final dos PUs resulta da combinação entre a mistura dos reagentes, a polimerização e a subsequente expansão, o que define as propriedades mecânicas e físicas essenciais dos materiais produzidos [47].

Este polímero multifacetado destaca-se pela sua versatilidade, sendo um substituto eficiente para uma ampla variedade de materiais tradicionais, graças a suas excepcionais propriedades mecânicas, térmicas e químicas. Adequado para uma variedade de aplicações em setores como construção civil, medicina, automotivo, aeroespacial e têxtil, o PU beneficia-se constantemente de avanços em

seus métodos de processamento. Esses avanços permitem a produção de formas com várias densidades e rigidezes, tornando o PU valioso em aplicações que exigem materiais com resistência ao impacto, dureza e elasticidade. Além disso, suas propriedades de resistência à umidade, ao desgaste e à corrosão consolidam sua posição como um material de pesquisa em alta e de grande relevância no campo dos compósitos avançados [48].

A versatilidade do PU é amplificada pela sua capacidade de integrar aditivos e enchimentos, os quais aprimoram suas propriedades mecânicas e térmicas através das interações interfaciais entre as fibras e a matriz polimérica. Essa capacidade confere ao PU uma aplicabilidade extensa em diversos setores industriais, beneficiando-se de sua viscoelasticidade, que lhe proporciona rigidez enquanto permite a dissipação de energia por meio de perdas friccionais. Além disso, o emprego de enchimentos naturais pode promover a fabricação de espumas de PU mais sustentáveis, mantendo suas propriedades mecânicas intactas e potencializando a sustentabilidade dos processos industriais [49].

A indústria do PU, historicamente dependente de recursos petrolíferos, enfrenta desafios substanciais quanto ao impacto ambiental associado à produção e ao descarte desses materiais. No entanto, avanços significativos na tecnologia de reciclagem já permitem a reutilização de resíduos de PU para a fabricação de compósitos reciclados em sua totalidade. A implementação dessas práticas de reciclagem representa um avanço considerável em direção à economia circular, sublinhando a capacidade de tais métodos de diminuir a dependência de matérias-primas virgens e reduzir a pegada ecológica no setor de polímeros. Esta evolução não só minimiza os impactos ambientais associados ao PU, como também destaca o potencial de inovação sustentável dentro da indústria de polímeros [50].

4.

Métodos Experimentais e Análise Metrológica em Ensaios de Impacto de Materiais Compósitos

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia adotada no estudo empírico, que abrange desde a formulação dos compósitos até a sua avaliação por meio de ensaios de absorção de impacto. É detalhada a infraestrutura do Laboratório de Ensaio em Produtos do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), com ênfase nas metodologias experimentais implementadas e na descrição dos instrumentos de ensaio empregados, bem como os critérios metrológicos seguidos para assegurar a confiabilidade dos resultados. Também se discute o enfoque metrológico adotado na análise dos dados coletados, uma etapa fundamental que assegura uma interpretação adequada das informações obtidas. Este capítulo estabelece, portanto, a base experimental essencial para apoiar as conclusões da pesquisa, permitindo uma compreensão detalhada do comportamento dos compósitos quando submetidos a condições de ensaio controladas.

4.1.

Detalhamento da Formulação dos Compósitos de Fibras Naturais

4.1.1.

Materiais para formulação dos compósitos

As fibras de bagaço de cana-de-açúcar foram adquiridas por meio de doações de feirantes locais, possibilitando o uso eficiente de resíduos agrícolas que, de outra maneira, seriam descartados. Paralelamente, as fibras de coco e sisal foram compradas em lojas especializadas em materiais de construção e jardinagem.

As fibras foram submetidas a um tratamento alcalino para aumentar sua afinidade e adesão à matriz polimérica, além de remover lignina, substâncias cerosas e outras impurezas presentes em sua superfície. O procedimento consistiu na imersão das fibras em uma solução de hidróxido de sódio PA a 10 % m/v, da

marca VETEC, sob agitação de 1300 rpm durante 15 minutos, utilizando um agitador mecânico com faixa de velocidade de 170 a 2000 rpm. Após este tratamento, as fibras foram lavadas com água destilada até alcançarem um pH neutro, verificado com uma fita para teste com faixa de medição 0 a 14 pH da marca MQuant®. Em seguida, as fibras foram secas a 70 °C por 24 horas em uma câmara digital de secagem e esterilização, assegurando a remoção total da umidade. Finalmente, as fibras foram moídas em um moinho de facas tipo *Willey* com quatro facas e peneiradas com um agitador de peneiras eletromagnético, utilizando peneiras de *mesh* de 10 mm, para garantir uma granulometria uniforme, crucial para a formulação dos compósitos [40, 41, 45, 46]. A figura 11 ilustra as etapas do processo de tratamento alcalino.



Figura 11 – Tratamento das fibras naturais: (a) Estabilização com água destilada; (b) Remoção da umidade.

O PU utilizado no projeto foi adquirido da empresa AVIPOL, que fornece o material em dois componentes separados: parte A, que contém o polioli, e parte B, que contém o isocianato. Para a moldagem dos compósitos, foram utilizados tubos de policloreto de vinila (PVC) com 100 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, enquanto folhas de acetato foram empregadas para vedar a base dos moldes de PVC, garantindo a correta formação dos compósitos durante o processo de cura.

4.1.2

Metodologia para a formulação dos compósitos.

A formulação dos compósitos com fibras naturais foi conduzida um seguindo o método descrito a seguir como um passo a passo:

i. Preparação do laboratório

O ambiente foi controlado por ar-condicionado ajustado para manter a temperatura constante de 22 °C, seguindo a condição de temperatura ambiente estipulada pela norma ABNT NBR 7471 para o ensaio de condicionamento, que define a faixa de 25 °C ± 5 °C. A temperatura foi verificada com um termo-higrômetro digital, que possui uma faixa de medição de -10 °C a 60 °C. Para a pesagem de proporções dos componentes, empregou-se uma balança analítica digital com capacidade de até 210 g [8].

ii. Proporções dos materiais:

Para a formulação dos compósitos foram adotadas as especificações técnicas do fabricante, que recomendam uma proporção de 1:1 de poliol para isocianato. A expansão esperada do material é de 20 vezes o volume inicial, e a densidade (d) especificada é de 1,3 g/cm³. O cálculo do volume necessário para a formulação baseou-se nas dimensões do tubo de PVC utilizado como molde, com 100 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, convertidos para 10 cm e 1 cm, respectivamente.

O volume do tubo cilíndrico, V , foi calculado pela seguinte fórmula:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h, \text{ onde } d \text{ é o diâmetro e } h \text{ a espessura, resultando em}$$

$$V = \pi \cdot (5 \text{ cm})^2 \cdot 1 \text{ cm} = 78,54 \text{ cm}^3.$$

iii. Com o volume calculado, o volume inicial (V_i) é determinado ao dividir-se 78,54 cm³ pelo fator de expansão, resultando em um volume inicial de 3,93 cm³. Assim a massa inicial (M_i) é obtida por $M_i = V_i \cdot d$ resultando em 5,11 g.

iv. Separação dos componentes:

Para a formulação da espuma, os componentes poliol e isocianato foram distribuídos de acordo com a massa inicial calculada, sendo

cada componente separado na proporção de aproximadamente 2,56 g.

As diferentes fibras tratadas foram separadas nas seguintes proporções: 5 % correspondendo a 0,25 g, 10 % a 0,51 g, e 15 % a 0,76 g.

v. Moldagem dos compósitos:

A fibra natural tratada foi adicionada ao polioli, procedendo com a mistura manual. Posteriormente, o isocianato foi adicionado à mistura, dando prosseguimento ao processo de homogeneização para assegurar a distribuição uniforme na matriz polimérica. A mistura foi então vertida nos moldes de PVC, selados na base com placas de acetato. Foram formulados dez compósitos para cada tipo e proporção de fibra.

vi. Tempo de Cura:

Os compósitos foram mantidos em cura por um período de 48 horas no laboratório, com a temperatura mantida dentro das especificações, para assegurar a polimerização completa e a integridade estrutural dos materiais. Este período é essencial para alcançar a configuração final desejada dos compósitos. A figura 12 apresenta os compósitos no processo de cura.



Figura 12 – Compósitos em fase de cura.

4.1.3

Aplicação do Ensaio de Absorção de Energia nos compósitos formulados

O Instituto Nacional de Tecnologia (INT) é um Organismo de Avaliação da Conformidade (OAC), acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação (CGCRE) do INMETRO desde 1984. A acreditação inclui uma diversidade de escopos, destacando-se os ensaios para capacetes e viseiras destinados a condutores e passageiros de motocicletas e similares. Tais testes são conduzidos no Laboratório de Ensaios em Produtos (LAENP), que é pioneiro neste campo de atuação especializado.

Para a execução dos ensaios de absorção de impacto nos compósitos, foram empregados os equipamentos e procedimentos descritos a seguir:

- Máquina de ensaios de impacto vertical, modelo MAU 1006 produzida pela AD Engineering, como ilustrado na Figura 13. Este equipamento, equipado com um sistema computacional integrado, registra os resultados das velocidades de ensaio, a aceleração do conjunto capacete-cabeça, medida em G , e a duração do impacto, expressa em milissegundos (ms).



Figura 13 - Máquina de ensaios de impacto vertical.

- Cabeça padrão de ensaio de impacto do tipo O, com circunferência de 62 cm, para simular a condição mais crítica devido à sua maior massa ($6,1 \text{ kg} \pm 0,18 \text{ kg}$).
- Acelerômetro triaxial piezelétrico, marca PCB, modelo 339B10, equipado com amplificador, fonte de alimentação e três filtros passa-baixa com frequência de corte em 2 kHz, com sensibilidade nominal de $1 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$. Este dispositivo é posicionado no centro de gravidade da cabeça padrão de ensaio, conforme ilustrado na Figura 14.

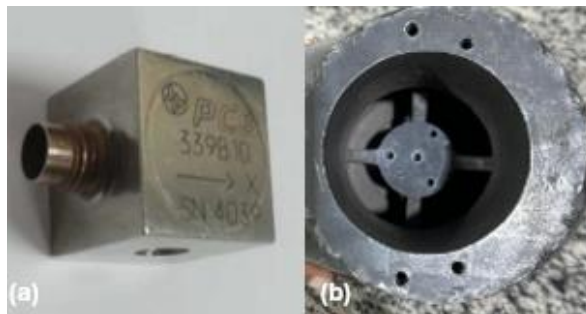


Figura 14 – (a) Acelerômetro triaxial (b) Centro de gravidade da cabeça padrão.

- Base padrão com superfície de impacto constituída por aço, apresentando uma face plana e circular com um diâmetro de (130 ± 3) mm.
- A altura padrão de 50 cm, utilizada em comparações interlaboratoriais, é medida a partir do ponto P, localizado no topo traseiro da cabeça de ensaio. A velocidade final de 3,13 m/s é calculada por $v = \sqrt{2Gh}$, onde G representa a aceleração devido à gravidade, aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$, e h é a altura em metros, correspondendo a 0,50 m.

Os compósitos foram submetidos ao ensaio de impacto de maneira aleatória, a fim de definir parâmetros apropriados para a análise estatística subsequente. Cada compósito foi posicionado sobre a base plana padrão da máquina de ensaio MAU 1006. A cabeça de ensaio é liberada de maneira controlada pelo sistema computacional da máquina de impacto. Dada a natureza destrutiva do ensaio, cada amostra foi submetida a um único impacto no ponto P, conforme ilustrado na Figura 5. Esse procedimento garante que a integridade de cada teste reflita a capacidade de absorção de impacto do material testado. Após a conclusão de todos os testes, os resultados foram coletados, organizados e armazenados em uma planilha do *Microsoft Excel* para as análises subsequentes.

4.2.

Métodos estatísticos adotados na avaliação dos resultados experimentais do ensaio de absorção de impacto

Alguns métodos estatísticos foram adotados para a análise metrológica dos resultados experimentais do teste de absorção de impacto nos compósitos. A figura 15 esquematiza a sequência de processos analíticos que fundamentam esta análise, começando pela avaliação da normalidade da distribuição dos dados, seguindo para o tratamento de valores discrepantes (*outliers*) e concluindo com o cálculo de análise de diferenças entre grupos. Estes procedimentos asseguram a validade estatística e a relevância dos dados obtidos, viabilizando assim uma comparação criteriosa entre os diversos compósitos testados.

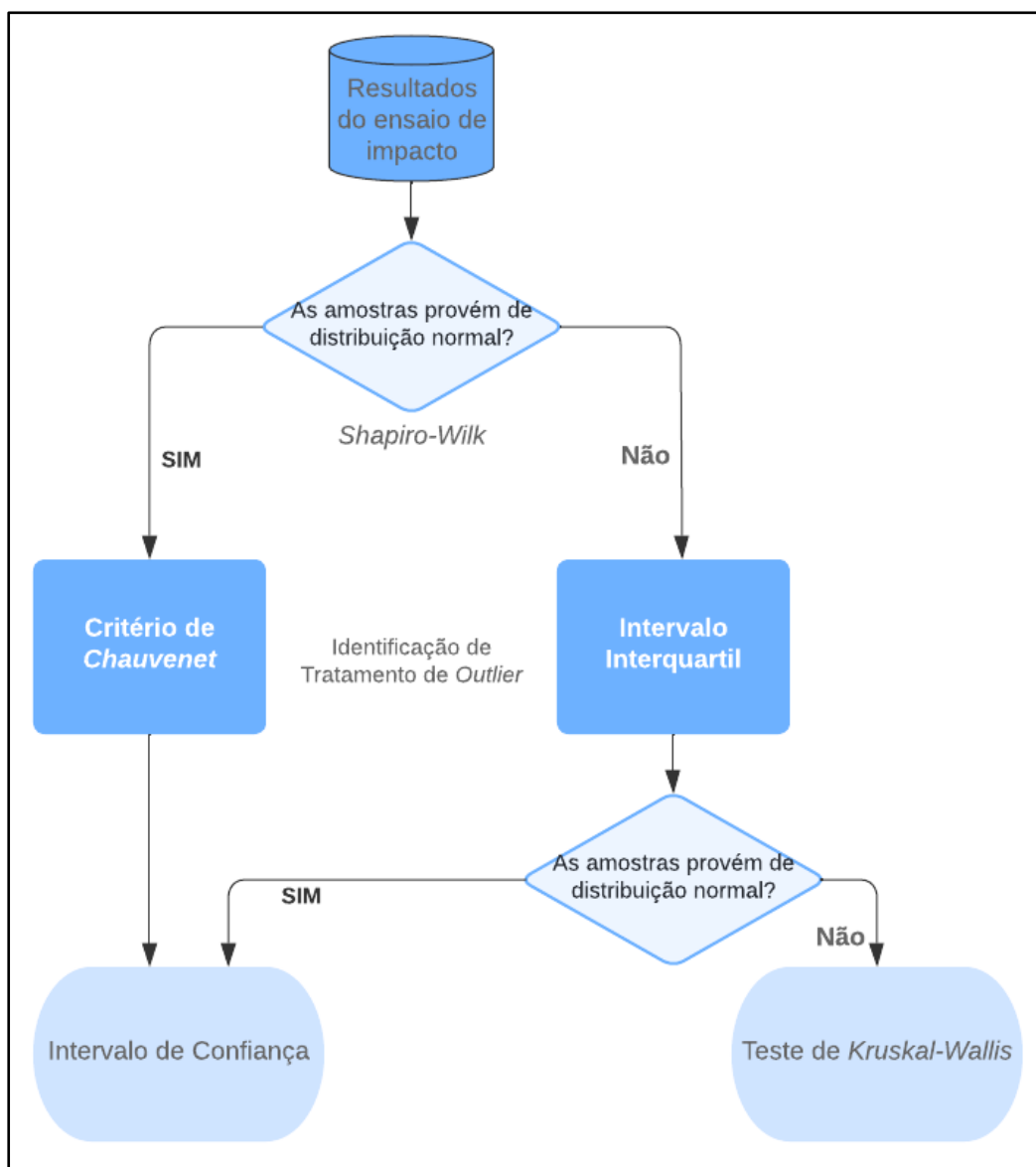


Figura 15 - Esquema dos processos estatísticos.

4.2.1.

Teste de normalidade dos dados

Na estatística, a distribuição normal ou Gaussiana é um modelo de probabilidade que descreve a distribuição simétrica de um conjunto de dados em torno de um valor médio, caracterizando-se por sua forma de sino quando representada graficamente. Esta distribuição é definida pela sua média, mediana e moda coincidentes, o que significa que a maioria dos dados tende a se agrupar em torno do centro da distribuição. Em contrapartida, a não normalidade é evidenciada quando um conjunto de dados não segue esta distribuição normal, o que pode ser atribuído a diversas razões inerentes ao fenômeno observado. As causas da não

normalidade podem incluir assimetrias, presença de valores discrepantes (*outliers*), ou uma concentração de observações em determinados intervalos, divergindo do comportamento esperado para uma distribuição normal [51, 52].

Os testes de normalidade constituem métodos inferenciais estatísticos que objetivam averiguar se um conjunto de dados segue ou não uma distribuição normal. Esses métodos utilizam variados pressupostos e algoritmos para avaliar a adequação dos dados ao modelo gaussiano. Dentre esses métodos, o teste de *Shapiro-Wilk* é amplamente reconhecido por sua eficácia em amostras pequenas, geralmente com menos de 50 observações, devido à sua alta sensibilidade na identificação de desvios da normalidade nessas condições de dados [52, 53].

O teste de *Shapiro-Wilk*, desenvolvido por Shapiro e Wilk em 1965, é uma metodologia estatística utilizada para avaliar a normalidade de uma distribuição de dados. Este teste verifica a hipótese nula de que uma amostra provém de uma distribuição normalmente distribuída. O valor W , resultante desse teste, serve como um indicador da normalidade dos dados. Por outro lado, um valor de significância p maior que 0,05 permite a não rejeição da hipótese nula, indicando que os dados podem ser considerados como provenientes de uma distribuição normal [54, 55].

Para analisar uma amostra deve-se seguir os seguintes passos:

- (i) Formulação das hipóteses;
 H_0 : Há evidência estatística de que os dados provêm de uma distribuição normal.
 H_1 : Não há evidência estatística de que os dados provêm de uma distribuição normal.
- (ii) Determinar o nível de significância;
 Estabelecer o nível de significância (α), que para este estudo $\alpha = 0,05$. Este valor corresponde a uma confiança de 95 %.
- (iii) Preparação dos Dados;
 Ordenar os n resultados da amostra: $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$
 Calcular a média ($\bar{x}$).
- (iv) Cálculo dos componentes do teste;
 Calcular a soma dos quadrados dos desvios (s) em relação à média amostral, de acordo com a equação (4) abaixo:

$$s = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

Calcular a constante (a_i), determinada a partir dos valores esperados dos quantis de uma distribuição normal e da matriz de covariância associada, conforme fórmula (2) a seguir:

$$a_i = \frac{V^{-1} \cdot m}{\sqrt{m^t \cdot V^{-1} \cdot m}} \quad (5)$$

Sendo que

V : representa a matriz de covariância,

m : representa o vetor dos valores esperados das estatísticas de ordem dos dados amostrais de uma distribuição normal padrão;

t : representa a transposta de um vetor. No caso de m^t , refere-se à transposta do vetor m .

(v) Cálculo da estatística de teste (W):

$$W_{calculado} = \frac{(\sum(a_i \cdot x_i))^2}{s} \quad (6)$$

(vi) Tomada de decisão.

Rejeitar H_0 se o valor de $W_{calculado}$ for menor que o valor crítico para $\alpha = 0,05$.

4.2.2.

Identificação e Tratamento de *Outliers*

Dados discrepantes, ou *outliers*, referem-se a observações que diferem significativamente do restante da amostra. Essas discrepâncias podem decorrer tanto da variabilidade intrínseca dos dados quanto de erros associados ao processo de coleta, inserção ou transmissão dos dados. A identificação desses *outliers* é crucial e geralmente realizada por meio de métodos estatísticos específicos, que

auxiliam na decisão de como tratar tais dados — removendo-os ou mantendo-os na análise, conforme apropriado.

A metodologia para detecção de *outliers* varia de acordo com a distribuição dos dados. Para dados que seguem uma distribuição normal, métodos paramétricos, como o Teste de *Dixon*, *Grubbs* ou o critério de *Chauvenet*, são comumente utilizados. Por outro lado, para dados que não se enquadram numa distribuição normal, recorre-se a métodos não paramétricos, como o Intervalo Interquartil (IQR), para identificar e tratar esses valores discrepantes.

Neste estudo, para a análise de amostras que seguem uma distribuição normal, é empregado o método de *Chauvenet* para a detecção de *outliers*. Para amostras que não assumem distribuição normal, o método do Intervalo Interquartil (IQR) é utilizado. Essa abordagem permite adaptar as técnicas de identificação de dados discrepantes conforme a natureza estatística das amostras, garantindo uma análise mais precisa e adequada às características dos dados coletados [56, 57].

4.2.2.1.

Critério de *Chauvenet*

O Critério de *Chauvenet* é uma técnica estatística empregada para identificar e excluir valores atípicos em conjuntos de dados que seguem uma distribuição normal.

O procedimento para a aplicação do Critério de *Chauvenet* na identificação de *outliers* em um conjunto de dados é detalhado a seguir:

- (i) Calcular a média aritmética ($\bar{x}$) e o desvio padrão (s) do conjunto de dados;
- (ii) Identificar os valores extremos (mínimo e máximo) dentro do conjunto de dados;
- (iii) Calcular a diferença $|d_i| = |x_i - \bar{x}|$ de cada um desses valores extremos em relação à média aritmética;
- (iv) Determinar o valor estatístico de r , sendo r a razão entre desvio absoluto da observação da média $|x_i - \bar{x}|$ e o desvio padrão da amostra (s);
- (v) Estabelecer o valor tabelado para o número de graus de liberdade (gl) do conjunto de dados, onde $gl = n - 1$;
- (vi) Com base nesse critério, uma medida deve ser rejeitada se $|d_i| > d_{ch}$, onde d_{ch} é o limite de *Chauvenet*, definido por (7):

$$P_o = \int_{-\infty}^{-d_{ch}} G(n) d_n + \int_{+d_{ch}}^{+\infty} G(n) d_n = \int_{-d_{ch}}^{+d_{ch}} G(n) d_n = \frac{1}{2n} \quad (7)$$

sendo $G(n)$ a função Gaussiana.

De forma simplificada, uma medida pode ser considerada um *outlier* se a probabilidade de ocorrer um desvio específico for menor que $1/2n$.

Consequentemente, o critério estabelece que uma medida x_i deve ser eliminada se o valor de r calculado pela Equação (7) exceder o valor crítico correspondente ao número de graus de liberdade [58, 59].

Neste estudo, ao identificar valores discrepantes, optou-se por excluí-los da análise para assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos.

4.2.2.2.

Intervalo interquartil (IQR)

O Intervalo Interquartil (IQR) é uma técnica empregada para a identificação de *outliers* em conjuntos de dados que não seguem uma distribuição normal. Esta metodologia utiliza o princípio dos quartis, identificando como *outliers* aqueles pontos que se situam acima ou abaixo de 1,5 vezes o valor do IQR.

Na organização sequencial dos dados, o primeiro quartil (Q_1) corresponde ao valor abaixo do qual 25 % dos pontos de dados estão situados, enquanto o terceiro quartil (Q_3) representa o valor abaixo do qual se encontram 75 % das observações, sendo o IQR a diferença entre Q_3 e Q_1 .

Consequentemente, os dados considerados fora dos limites estabelecidos pelas seguintes equações são classificados como potenciais *outliers*:

$$\text{Limite inferior} = Q_1 - 1,5 \times (Q_3 - Q_1) \quad (8)$$

$$\text{Limite superior} = Q_3 + 1,5 \times (Q_3 - Q_1) \quad (9)$$

O coeficiente de valor 1,5, fator multiplicador utilizado nesta técnica, influencia diretamente na sensibilidade da detecção de *outliers*, balanceando entre a rejeição e a aceitação de valores atípicos verdadeiros [60].

4.2.3

Intervalo de confiança

Os intervalos de confiança são fundamentais ao lidar com estimativas derivadas de amostras, pois refletem a incerteza associada a essas estimativas, oferecendo uma faixa de valores dentro da qual o verdadeiro valor do parâmetro estatístico é esperado estar com uma certa probabilidade, como 95 % ou 99 %. Esses intervalos são particularmente úteis em análises estatísticas e podem ser adaptados para uso em situações em que as premissas tradicionais de normalidade e de grandes amostras não são satisfeitas.

Neste estudo, adotou-se o método do intervalo de confiança com um nível de significância de 95 %, o que permitiu uma avaliação correta da precisão das médias amostrais. Com um tamanho de amostra menor que 30 em cada conjunto e assumindo uma distribuição normal, utilizou-se a distribuição *t* de *Student* para a determinação dos valores críticos. O erro padrão (*SE*) das estimativas foi calculado com base no desvio-padrão das amostras, ajustado pelo tamanho da amostra, conforme a fórmula:

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Onde:

SE, é o erro padrão;

σ é o desvio padrão amostral;

n é nº de amostras.

Os intervalos de confiança foram então definidos pela fórmula: $\bar{x} \pm t \times SE$, onde $\bar{x}$ é a média da amostra, *t* é o valor crítico da distribuição *t* de *Student*, considerando *n-1* graus de liberdade, para o nível de confiança desejado, e *SE* é o erro padrão.

Resultados Experimentais

5.1.

Resultados do teste de absorção de impacto

Inicialmente, a Tabela 3 apresenta de forma sistemática os resultados dos testes de impacto realizados nos compósitos formulados com poliuretano (PU) puro, bem como nos compósitos reforçados com fibras naturais de cana, coco e sisal nas proporções de 5 %, 10 % e 15 %. Para os compósitos de fibra de sisal a 15%, foram ensaiadas 30 amostras, para uma análise estatística preliminar do comportamento dos dados. Esses resultados fornecem uma base comparativa para avaliar o desempenho de cada compósito em termos de absorção de impacto, destacando a influência das diferentes proporções e tipos de fibras incorporadas na matriz polimérica.

Tabela 3 – Resultados do teste de absorção de impacto nos compósitos

Tipo Proporção	PU 0 %	Cana 5 %	Coco 5 %	Sisal 5 %	Cana 10 %	Coco 10 %	Sisal 10 %	Cana 15 %	Coco 15 %	Sisal 15 %		
Amostras	65,99	51,86	52,19	68,02	64,12	48,70	53,82	65,36	66,45	68,22	58,33	62,97
	65,30	61,72	64,27	69,50	58,81	64,74	75,40	62,66	63,81	56,90	49,84	56,60
	56,72	59,04	54,94	65,28	58,00	58,44	56,12	67,15	71,30	59,72	71,82	74,92
	65,47	58,41	61,16	70,08	62,77	63,93	62,24	71,70	61,55	71,68	83,20	57,35
	76,79	59,86	58,73	63,10	65,99	65,53	55,24	64,87	77,42	60,70	63,78	58,82
	86,44	64,61	55,47	80,45	60,14	60,11	57,41	61,42	75,61	77,52	64,17	65,42
	65,72	66,71	61,81	63,86	67,00	58,65	62,12	63,07	57,08	54,73	67,39	57,41
	78,86	60,81	49,59	61,28	62,00	59,49	59,87	61,74	66,72	54,78	64,78	52,19
	78,50	58,26	59,13	61,28	69,22	54,78	61,05	57,90	57,11	52,35	59,62	68,14
	73,78	56,35	61,54	68,11	63,29	54,23	56,85	96,53	65,24	53,72	65,65	58,10
Resultados expressos em $g (\times 9,8 \text{ m/s}^2)$												

Os dados apresentados na Tabela 3 são classificados como independentes e não emparelhados, demonstrando a ausência de correlação entre as medições efetuadas nos distintos compósitos. Esta independência é fundamental para a escolha de procedimentos estatísticos adequados, de forma a assegurar que as estimativas realizadas para cada grupo de compósito sejam avaliadas de forma objetiva, sem interferências diretas entre as amostras.

A análise da normalidade dos dados é crucial, pois ela orienta a escolha adequada entre testes estatísticos paramétricos e não paramétricos para a análise subsequente. Para esse fim, os resultados apresentados na Tabela 1 foram submetidos ao teste de *Shapiro-Wilk*. Os resultados desse teste, indicando a presença ou ausência de normalidade, direcionam a seleção do tipo de análise estatística a ser empregada.

5.2.

Teste de *Shapiro-Wilk* para a avaliação da normalidade dos resultados do teste de impacto.

Para a execução do teste de *Shapiro-Wilk*, foi empregado o *software R-Studio*, amplamente reconhecido por sua capacidade de realizar análises estatísticas robustas. A determinação da normalidade da distribuição foi baseada nos valores-*p* obtidos durante os testes.

Para este fim, foram estabelecidas as seguintes hipóteses:

- H_0 : Os dados apresentam uma distribuição normal.
- H_1 : Os dados não apresentam uma distribuição normal.

Segundo o critério estabelecido, a hipótese nula, que assume que os dados seguem uma distribuição normal, é aceita quando o *p*-valor excede 0,05. Os resultados obtidos, como mostrado na Tabela 4, fornecem informações cruciais sobre a aderência dos dados ao pressuposto de normalidade.

Tabela 4 – Resultados do teste de Shapiro-Wilk

Proporção	Tipo de fibra	P-valor	Resultado
0 %	PU	0,575	Não rejeita a hipótese nula
5 %	Cana	0,929	Não rejeita a hipótese nula
	Coco	0,655	Não rejeita a hipótese nula

	Sisal	0,086	Não rejeita a hipótese nula
10 %	Cana	0,940	Não rejeita a hipótese nula
	Coco	0,605	Não rejeita a hipótese nula
	Sisal	0,018	Rejeita a hipótese nula
15 %	Cana	0,238	Não rejeita a hipótese nula
	Coco	0,588	Não rejeita a hipótese nula
	Sisal	0,238	Não rejeita a hipótese nula
Nível de significância = 95 %			

Os resultados exibidos na Tabela 4 foram submetidos a uma análise estatística, adotando um nível de significância de 95 %. Observou-se a rejeição da hipótese nula (H_0) para o conjunto de dados correspondente a 10 % de fibra de sisal, demonstrando que estes dados não são provenientes de uma distribuição normal. Em contraste, para os demais conjuntos de dados, a hipótese nula não foi rejeitada, o que implica que estes podem ser considerados como seguindo uma distribuição normal. Conhecendo a distribuição de cada conjunto de dados, os métodos apropriados para o tratamento de *outliers* são aplicados.

5.3.

Testes estatísticos paramétricos e não paramétricos para a identificação de *outliers*

5.3.1

Aplicação do Critério de *Chauvenet*

Para os conjuntos que demonstram uma aproximação à distribuição normal, o Critério de *Chauvenet* é empregado como técnica de tratamento para os dados paramétricos. Os resultados da aplicação deste critério são exibidos na Tabela 5 e foram processados utilizando o *Microsoft Excel*.

Tabela 5 – Resultados da média e desvio padrão para o cálculo do Critério de *Chauvenet*

Tipo	PU	Cana	Coco	Sisal	Cana	Coco	Cana	Coco	Sisal
Proporção	0 %	5 %			10 %		15 %		
Média ($\bar{x}$)	71,36	59,76	57,88	67,10	63,13	58,86	67,24	66,23	62,36
Desvio padrão (s)	8,92	4,16	4,69	5,70	3,60	5,25	10,94	6,95	7,99

O valor crítico definido pelo Critério de *Chauvenet*, para um nível de significância $P_0 = 0,05$ em um teste bicaudal, é de 2,39 para um conjunto de 30 amostras. Este valor é aplicável para a amostra com adição de 15 % de sisal. Para as demais amostras, onde os conjuntos são compostos por 10 dados, o valor crítico aplicado é de 1,96. A tabela 6 detalha os resultados obtidos nos cálculos realizados para a identificação dos *outliers*. Complementarmente, a figura 16 ilustra esses dados, facilitando a identificação e compreensão dos valores discrepantes.

Tabela 6 – Resultados do cálculo do Critério de *Chauvenet*

Tipo Proporção	PU 0 %	Cana 5 %	Coco 5 %	Sisal 5 %	Cana 10 %	Coco 10 %	Cana 15 %	Coco 15 %	Sisal 15 %
Máximo	86,44	66,71	64,27	80,45	69,22	65,53	96,53	77,42	83,20
Mínimo	56,72	51,86	49,59	61,28	58,00	48,70	57,90	57,08	49,84
Diferença (máx)	15,08	6,95	6,39	13,35	6,09	6,67	29,29	11,19	20,84
Diferença (mín)	14,64	7,90	8,29	5,82	5,13	10,16	9,34	9,15	12,52
Valor estatístico (r) (máx)	1,69	1,67	1,36	2,34	1,69	1,27	2,68	1,61	2,61
Valor estatístico (r) (mín)	1,64	1,90	1,77	1,02	1,43	1,93	0,85	1,32	1,57
Valor tabelado (P_0)	1,96								2,39

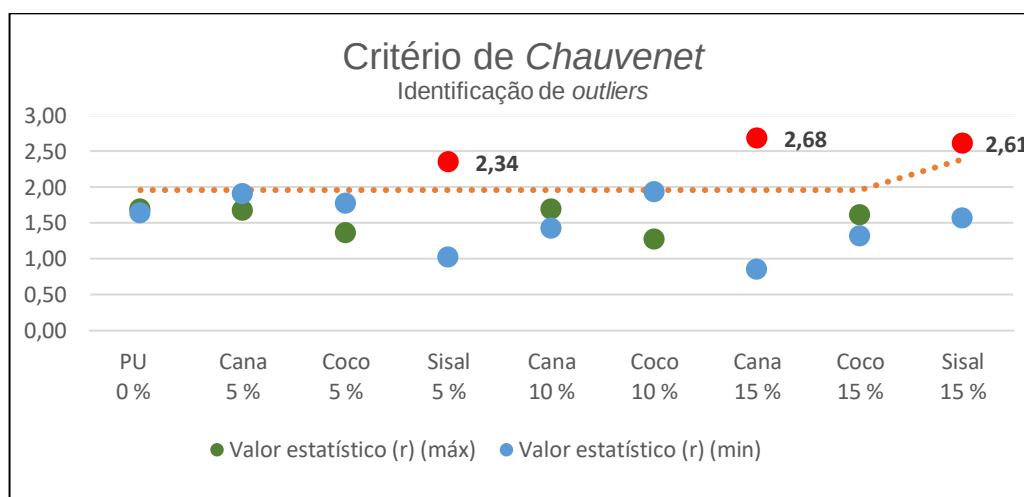


Figura 16 – Identificação de *outliers*.

Na figura 16, foram identificados *outliers* nos conjuntos de dados dos compósitos de sisal nas proporções de 5 % e 15 % e no compósito de cana na proporção de 15 %. Esses *outliers* são indicados pelos pontos vermelhos que excedem o valor tabelado (P_0), representado pela linha pontilhada. Esses valores

discrepantes foram excluídos das análises para assegurar a integridade estatística e a precisão dos resultados.

5.3.2

Aplicação do teste não paramétrico de intervalo interquartil (IQR)

O método do Intervalo Interquartil (IQR) foi aplicado ao conjunto de amostras dos compósitos com adição de 10 % de sisal, utilizando o *software R-Studio*, após a rejeição da hipótese nula no teste de *Shapiro-Wilk*. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 17.

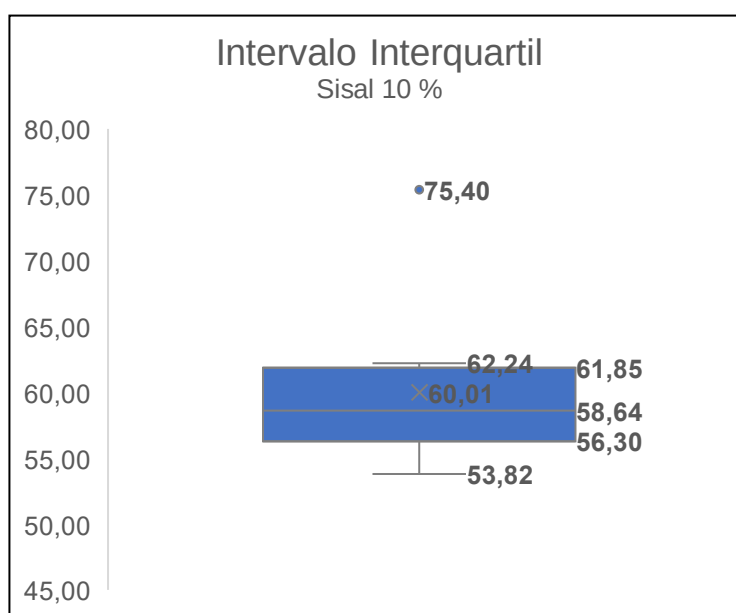


Figura 17 – Resultados do IQR na amostra de sisal com proporção de 10 %.

Conforme ilustrado na figura 17, identificou-se o valor de 75,40 como *outlier* no conjunto de compósitos com 10 % de sisal. Para garantir a precisão das interpretações e conclusões, esse valor discrepante foi removido das análises subsequentes. Posteriormente, o conjunto de dados ajustado foi submetido ao teste de *Shapiro-Wilk* no *Software R-Studio*, cujo resultado é detalhado na tabela 5.

Tabela 7 – Teste de normalidade no conjunto de dados reajustado do compósito com 10 % de sisal

Proporção	Tipo de fibra	P-valor	Resultado
10 %	Sisal	0,9245	Não rejeita a hipótese nula

O teste de *Shapiro-Wilk* aplicado ao conjunto de dados ajustado, não rejeitou a hipótese nula, sugerindo que agora este conjunto segue uma distribuição normal. Esse resultado confirma a normalidade de todos os conjuntos de dados analisados. Com essa validação estatística, pode-se avançar para a análise comparativa entre os diferentes compósitos formulados. Para tal será empregado o método estatístico dos Intervalos de Confiança para a avaliação das diferenças entre os grupos.

5.4.

Implementação do Intervalo de Confiança para a comparação dos resultados de absorção e impacto dos compósitos com as fibras naturais.

No início deste segmento da análise, após a remoção dos valores discrepantes e a confirmação de que todos os dados seguem uma distribuição Gaussiana, procedeu-se à comparação dos diferentes compósitos por meio do método do intervalo de confiança. Para este fim, utilizou-se o *Microsoft Excel* para o cálculo. Devido ao tamanho amostral de cada conjunto ser inferior a 30, adotou-se a distribuição *t* de *Student* para determinar os valores críticos. O erro padrão (*SE*) foi calculado a partir do desvio padrão da amostra, ajustado pelo número de amostras, conforme descrito nas fórmulas apresentadas no item 4.2.3, com um nível de significância de 95 %.

Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 8, que detalha os intervalos de confiança para cada conjunto de compósitos. Além disso, a Figura 10 ilustra visualmente esses intervalos, facilitando a comparação entre os materiais estudados. Esta organização visual e numérica garante uma interpretação clara e direta dos resultados.

Tabela 8 – Resultados do Intervalo de Confiança nos conjuntos de dados dos diferente compósitos

Proporção	Compósito	Média	Desvio padrão	Tamanho amostral	Intervalo de confiança
0 %	PU	71,35	8,92	10	6,38

5 %	Cana	59,76	4,16	10	2,97
	Coco	57,88	4,69	10	3,36
	Sisal	65,61	3,43	9	2,64
10 %	Cana	63,13	3,59	10	2,57
	Coco	58,86	5,25	10	3,76
	Sisal	58,30	3,11	9	2,39
15 %	Cana	63,98	3,93	9	3,02
	Coco	66,22	6,95	10	4,97
	Sisal	61,64	7,07	29	2,69

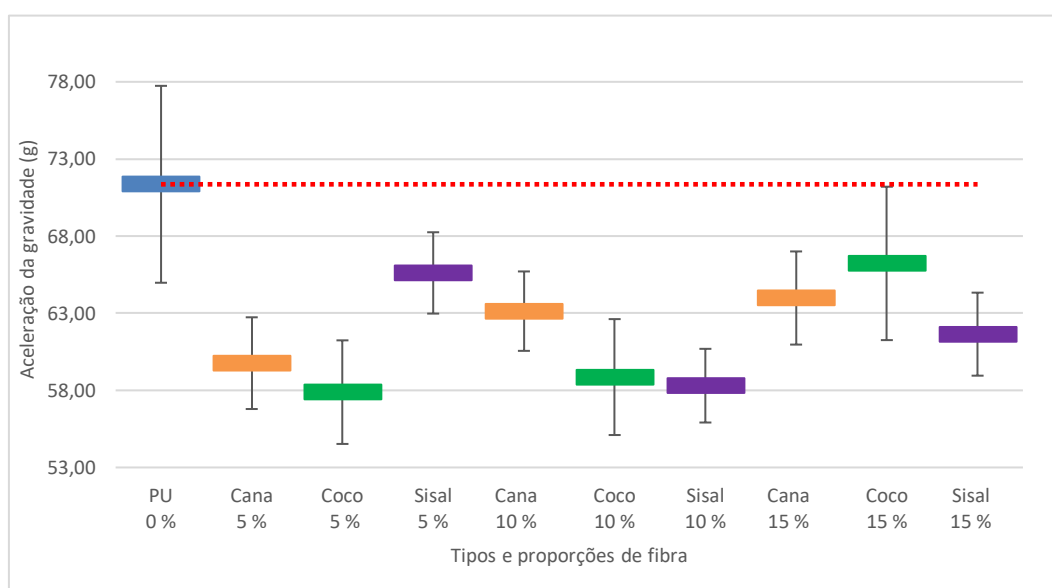


Figura 18 – Comparação dos resultados de absorção de impacto.

Na análise gráfica ilustrada na Figura 18, identificam-se diferenças significativas no desempenho entre o protótipo de PU puro e os compósitos reforçados com fibras naturais. A linha pontilhada demarca o desempenho do PU puro e serve como referência para avaliar superioridade nos resultados abaixo deste limiar.

Os compósitos com fibras naturais adicionadas apresentaram um desempenho superior em relação ao PU puro, que registrou a maior média e variabilidade. Especificamente, os compósitos reforçados com fibra de sisal mostraram uma consistência notável, com variabilidade mínima nos resultados obtidos, evidenciando uma resposta consistente e previsível. A proporção de 5 % exibiu uma média de desempenho que superou o limite de desempenho estabelecido, enquanto a proporção de 15 % foi satisfatória. Notavelmente, a proporção de 10 % de sisal

destacou-se, oferecendo o melhor desempenho entre as amostras, indicando que essa concentração pode ser mais vantajosa para esta fibra.

Da mesma forma, a fibra de bagaço de cana-de-açúcar também apresentou uma boa variabilidade, destacando-se na proporção de 5 %. As médias para as proporções mais elevadas se mantêm dentro dos limites aceitáveis, mas os intervalos de confiança para essas configurações ficaram acima, apresentando desempenho reduzido em absorção de energia de impacto para as concentrações mais altas.

Comparativamente, a fibra de coco exibiu a maior variabilidade entre as fibras estudadas. As concentrações de 5 % e 10 % mostraram resultados promissores, enquanto a proporção de 15 % teve os piores indicativos tanto em termos de variabilidade quanto de eficácia média, reforçando que menores concentrações são preferíveis para otimizar as propriedades mecânicas desses compósitos.

6.

Considerações finais e recomendações

O presente estudo realizou uma avaliação metrológica sobre a absorção de energia de impacto em compósitos de PU reforçados com fibras naturais destinados a capacetes motociclísticos. A investigação gerou dados quantitativos essenciais que evidenciam as propriedades desses materiais sob condições simuladas de impacto, contribuindo significativamente para a compreensão do comportamento mecânico dos compósitos estudados, alinhando-se assim com o objetivo geral proposto.

Considerando os objetivos específicos, pode-se tecer as considerações a seguir.

O primeiro objetivo específico da presente dissertação abordou as contribuições dos referenciais conceituais e normativos para a absorção de energia de impacto em capacetes motociclísticos, constituindo uma base sólida para a avaliação dos compósitos empregados. A compreensão dos conceitos-chave e das diretrizes normativas mostrou-se crucial para orientar o desenvolvimento dos materiais e garantir a conformidade com os requisitos de desempenho estabelecidos.

No que tange ao segundo objetivo específico, o trabalho focou na seleção do referencial teórico e metodológico apropriado para o desenvolvimento de capacetes destinados a motociclistas. Os componentes estruturais dos capacetes, especialmente o material de preenchimento de proteção, foram examinados detalhadamente, evidenciando sua importância na proteção da cabeça. Adicionalmente, foram discutidos os principais métodos de ensaio empregados para avaliar o desempenho mecânico desses componentes, estabelecendo uma base sólida para futuras investigações.

O terceiro objetivo específico foi atendido ao se definirem os critérios para a formulação de compósitos a partir de uma revisão do estado da arte e das práticas preexistentes na área. Esta abordagem teórica foi fundamental para a fase experimental, permitindo uma análise detalhada das interações entre as fibras naturais e as matrizes poliméricas. A sinergia identificada entre as fibras naturais e o poliuretano (PU) foi particularmente promissora, facilitando a otimização das estratégias de composição e tratamento das fibras para maximizar suas propriedades mecânicas e a compatibilidade com as matrizes poliméricas. Este aprofundamento nos referenciais teóricos e metodológicos não apenas enriqueceu a compreensão das propriedades dos compósitos desenvolvidos, mas também alinhou a tecnologia de materiais com as exigências contemporâneas de sustentabilidade e eficiência mecânica.

Os ensaios de absorção de impacto realizados nos compósitos desenvolvidos, que incorporaram fibras naturais de cana, coco e sisal em diversas proporções, foram essenciais para validar a eficácia dos materiais em termos de desempenho mecânico, cumprindo o quarto objetivo específico.

Relativamente ao quinto objetivo específico, a avaliação metrológica dos compósitos formulados demonstrou que a integração de fibras naturais não apenas reforçou as propriedades mecânicas dos materiais, mas também promoveu o uso de recursos menos impactantes ao meio ambiente. Os dados experimentais detalhados e a análise crítica dos métodos estatísticos de normalidade, tratamento de *outliers* e comparação de dados enriquecem a literatura existente e contribuem para a evolução dos materiais de proteção.

Em resumo, o trabalho confirmou que fibras naturais, como coco, bagaço de cana-de-açúcar e sisal são eficazes como reforços em polímeros, melhorando a absorção de impacto dos compósitos. Observou-se que as fibras de cana e coco tiveram melhor desempenho em baixas proporções, enquanto a fibra de sisal foi mais eficaz em uma proporção média. Essa adoção de fibras naturais fomenta o uso de recursos renováveis e biodegradáveis, alinhando-se com objetivos globais de sustentabilidade, conforme promovido pelo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 da ONU [16].

Finalmente, o sexto objetivo específico foi alcançado com o desenvolvimento de um projeto EMBRAPII com a colaboração de um fabricante de capacetes motociclísticos. Esta colaboração foi estabelecida entre a academia e a indústria,

impulsionada pelos *insights* obtidos ao longo da pesquisa. A aplicabilidade prática dos resultados do estudo não apenas confirmou a viabilidade técnica do uso de compósitos reforçados com fibras naturais, mas também enfatizou a importância de aderir a rigorosos padrões de segurança e desempenho. Além disso, a aplicação dessas descobertas alinha-se diretamente com os objetivos do programa Rota 2030, que incentiva o desenvolvimento de tecnologias avançadas e sustentáveis na indústria automotiva, incluindo o segmento de motocicletas, promovendo a inovação que respeita tanto a segurança quanto a sustentabilidade ambiental.

Para futuras investigações, recomenda-se a realização de estudos comparativos entre os compósitos de fibras naturais e o EPS, um material tradicionalmente utilizado em capacetes motociclísticos. Esta comparação visa avaliar a viabilidade prática e econômica dos compósitos como alternativas sustentáveis, enfocando sua aplicação em larga escala.

Adicionalmente, é essencial conduzir testes de longo prazo para determinar a durabilidade desses materiais. A durabilidade é crucial para validar a eficácia e segurança dos compósitos ao longo do tempo. Tais testes ajudarão a assegurar que os materiais não apenas atendam aos padrões de desempenho no início do uso, mas que também mantenham suas propriedades ao longo de um período prolongado.

Além disso, sugere-se avaliar o ciclo de vida completo das fibras e do produto. Esta análise deverá cobrir desde a extração e processamento das matérias-primas até o descarte do produto, fornecendo uma visão abrangente dos impactos ambientais associados. Este aspecto é fundamental para promover soluções verdadeiramente sustentáveis no desenvolvimento de novos materiais.

Para expandir o alcance das aplicações industriais, os estudos futuros também devem explorar outras áreas onde a sustentabilidade é crítica. A pesquisa deve incluir uma gama mais ampla de fibras naturais e combinações de polímeros, explorando o potencial para desenvolver soluções inovadoras e sustentáveis que transcendam a indústria de proteção pessoal.

7.

Referências bibliográficas

- 1 Segurança no Trânsito; **Organização Pan-Americana de Saúde**. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/topicos/seguranca-no-transito>>. Acesso em 24 nov. 2021.
- 2 BRASIL. Resolução CONTRAN Nº 940 de 28 de março de 2022. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 01 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-contran-n-940-de-28-de-marco-de-2022-390285259>>. Acesso em: 09 ago. 2023.
- 3 ALBAB, S. A. et al. Analysis and Characterization Helm Based on Hyacinth Water Composites. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012045.
- 4 CERNICCHI, A.; GALVANETTO, Ugo; IANNUCCI, L. Virtual modelling of safety helmets: practical problems. **International journal of crashworthiness**, v. 13, n. 4, p. 451-467, 2008.
- 5 Mais de 1/3 das mortes no trânsito envolvem motociclistas. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/9869-mais-de-1-3-das-mortes-no-transito-envolvem-motociclistas>>. Acesso em: 29 fev.2023.
- 6 MALTA, Deborah Carvalho et al. Road traffic injuries and deaths and the achievement of UN Sustainable Development Goals in Brazil: results from the Global Burden of Disease Study, 1990 to 2019. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 55, p. e0261-2021, 2022.
- 7 BRASIL. Lei nº. 9503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código Brasileiro de Trânsito. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503compilado.htm> . Acesso em: 09 ago. 2023.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7471: Veículos rodoviários automotores — Capacete e viseiras para condutores e passageiros de motocicletas e veículos similares — Requisitos de desempenho e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2015.
- 9 KANESALINGAM, Sinnappoo; NAYAK, Rajkishore. **Sustainable Phase Change and Polymeric Water Absorbent Materials**. Springer Singapore, 2020.

- 10 GHOSHAL, Tanusree et al. Polystyrene Foams: Materials, Technology, and Applications. In: **Polymeric Foams: Fundamentals and Types of Foams (Volume 1)**. American Chemical Society, 2023. p. 121-141.
- 11 LI, Shunfeng et al. Impact analysis of a honeycomb-filled motorcycle helmet based on coupled head-helmet modelling. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 199, p. 106406, 2021.
- 12 NADERI, Ali Asghar. Blast resistance of an innovative helmet liner composed of an auxetic lattice structure. **AUT Journal of Mechanical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 45-58, 2022.
- 13 FERNANDES, Fábio AO et al. Helmet design based on the optimization of biocomposite energy-absorbing liners under multi-impact loading. **Applied Sciences**, v. 9, n. 4, p. 735, 2019.
- 14 SHANKARA, R. R.; RADHAKRISHNA, R. K.; RAVIKUMAR, T. Experimental study of the effect of impact energy on open face helmet fabricated using woven bamboo and jute fiber reinforced with epoxy composites, **International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration**, Bengaluru, 18 dez. 2022, Vol 9, P.95.
- 15 NIKMATIN, S, et al. Evaluation of the Performance of Helmet Prototypes Fabricated from Acrylonitrile Butadiene Styrene Composites Filled with Natural Resource, **Materials**, v 12, n. 1, p. 34, 2019.
- 16 Os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil. **Organização das Nações Unidas**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>>. Acesso em 20 Set. 2024.
- 17 WORD HEALTH ORGANIZATION. Helmets: a road safety manual for decision-makers and practitioners. Genebra, 2006.
- 18 KHOSROSHAHI, S. Farajzadeh et al. Response of a helmet liner under biaxial loading. **Polymer Testing**, v. 72, p. 110-114, 2018.
- 19 DESOLE, Maria Pia et al. Life cycle assessment of secondary packaging: Expanded polystyrene versus bioplastic-coated corrugated cardboard. **Sustainable Production and Consumption**, v. 46, p. 11-28, 2024.
- 20 Economic Commission for Europe (ECE). **Regulation No. 22**: Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and their visors for drivers and passengers of motor cycles and mopeds. Genebra, 2020.
- 21 Department of Transportation. **National Highway Traffic Safety Administration. Federal Motor Vehicle Safety Standards**. Motorcycle helmets (49 CFR Part 571.218 - FMVSS 218). Washington, D.C., 2015.
- 22 INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA. Laboratório de Ensaio em Produtos. **Verificação das bases hemisférica, plana e meio-fio para ensaios de impacto em capacetes**. Rio de Janeiro, 2023, v. 05.

- 23 PUYANA-ROMERO, Virginia et al. Characterization and Simulation of Acoustic Properties of Sugarcane Bagasse-Based Composite Using Artificial Neural Network Model. **Fibers**, v. 11, n. 2, p. 18, 2023.
- 24 GANI, Asri et al. The influence of different fiber sizes on the flexural strength of natural fiber-reinforced polymer composites. **Results in Materials**, v. 21, p. 100534, 2024.
- 25 BOSQUETTI, Matheus et al. Analysis of the mechanical strength of polymeric composites reinforced with sisal fibers. **Journal of Natural Fibers**, 2019.
- 26 Produção de cana chega a 610,1 milhões de toneladas na safra 2022/23 com melhora na produtividade nas lavouras. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4977-producao-de-cana-chega-a-610-1-milhoes-de-toneladas-na-safra-2022-23-com-melhora-na-produtividade-nas-lavouras>>. Acesso em: 21 mar. 2024.
- 27 Coco. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco>>. Acesso em: 21 mar. 2024.
- 28 OLHAN, Sandeep et al. Mechanical, thermal, and viscoelastic behavior of sisal fibre-based structural composites for automotive applications: Experimental and FEM analysis. **Composite Structures**, v. 322, p. 117427, 2023.
- 29 SRINIVASAN, N. P. et al. Experimental investigation on no fines concrete by addition of natural fibres. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2023. p. 03019.
- 30 GIRALDELLI, Mariana Aparecida et al. Propriedade da Fibra de Coco: Uma Revisão Sistemática. **UNICIÊNCIAS**, v. 24, n. 1, p. 34-38, 2020.
- 31 FRANÇA, Richard Antony Barbosa et al. EXTRAÇÃO DE FIBRAS DE COCO PARA APLICAÇÃO EM MATERIAIS DE ENGENHARIA. **Revista Univap**, v. 22, n. 40, p. 610-610, 2016.
- 32 CHAVES, Yago Soares et al. Babassu Coconut Fibers: Investigation of Chemical and Surface Properties (*Attalea speciosa*.). **Polymers**, v. 15, n. 19, p. 3863, 2023.
- 33 DAMFEU, J. C.; MEUKAM, P.; JANNOT, Yves. Modeling and measuring of the thermal properties of insulating vegetable fibers by the asymmetrical hot plate method and the radial flux method: Kapok, coconut, groundnut shell fiber and rattan. **Thermochimica Acta**, v. 630, p. 64-77, 2016.
- 34 MUCSI, Zsuzsanna Mária et al. Fabrication and characterization of lignocellulosic coconut and energy reed straw-reinforced methylene diphenyl diisocyanate-bonded sustainable insulation panels. **Construction and Building Materials**, v. 414, p. 134992, 2024.

- 35 GEBRETSADIK, Tesfamariam Teklu et al. Characterization and Comparative Insights on Agave Americana and Agave Sisalana Leaf Fibers for High-Performance Applications. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 2, p. 2246648, 2023.
- 36 SAHU, Parul; GUPTA, M. K. Sisal (Agave sisalana) fibre and its polymer-based composites: a review on current developments. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 36, n. 24, p. 1759-1780, 2017.
- 37 Sisal. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/atividades-economicas/cultivos/sisal>>. Acesso em: 8 abr. 2024.
- 38 SILVA, Luis Eduardo Cunha; DOS SANTOS, Ana Rocha. O Estado e o território de identidade do sisal na Bahia (BA): Conflitos da política territorial. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 6, n. 1, p. 80-103, 2019.
- 39 ABEBAYEHU, Seyoum Getaneh; ENGIDA, Adam Mekonnen. Preparation of biocomposite material with superhydrophobic surface by reinforcing waste polypropylene with sisal (Agave sisalana) fibers. **International Journal of Polymer Science**, v. 2021, p. 1-15, 2021.
- 40 TEKLU, Tesfamariam; WANGATIA, Lodrick M.; ALEMAYEHU, Esayas. Effect of surface modification of sisal fibers on water absorption and mechanical properties of polyaniline composite. **Polymer Composites**, v. 40, n. S1, p. E46-E52, 2019.
- 41 BEKELE, Abera E.; LEMU, Hirpa G.; JIRU, Moera G. Experimental study of physical, chemical and mechanical properties of enset and sisal fibers. **Polymer testing**, v. 106, p. 107453, 2022.
- 42 A cana de Açúcar. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/visao-de-futuro/trajetoria-do-agro/desempenho-recente-do-agro/cana-de-acucar>>. Acesso em: 9 abr. 2024.
- 43 CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, v. 11, n. 4 abril 2024.
- 44 ZAFEER, Mohd Khalid et al. Mechanical characteristics of sugarcane bagasse fibre reinforced polymer composites: a review. **Cogent Engineering**, v. 10, n. 1, p. 2200903, 2023.
- 45 DEV, Pulla Kapil; BALAJI, Chinthaginjala; GURUSIDESWAR, S. Material characterization of sugarcane bagasse/epoxy composites for drone frame material. **Materials Today: Proceedings**, v. 68, p. 2586-2590, 2022.
- 46 DEVADIGA, Deepa G.; BHAT, K. Subrahmanya; MAHESHA, G. T. Sugarcane bagasse fiber reinforced composites: Recent advances and applications. **Cogent Engineering**, v. 7, n. 1, p. 1823159, 2020.

- 47 GAMA, Nuno V.; FERREIRA, Artur; BARROS-TIMMONS, Ana. Polyurethane foams: Past, present, and future. **Materials**, v. 11, n. 10, p. 1841, 2018.
- 48 AHIRWAR, Deepa et al. A short review on polyurethane polymer composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 3804-3810, 2022.
- 49 HUSAINIE, Syed Muhammad et al. Natural fillers as reinforcement for closed-molded polyurethane foam plaques: Mechanical, morphological, and thermal properties. **Materials Today Communications**, v. 27, p. 102187, 2021.
- 50 GAMA, Nuno et al. PU composites based on different types of textile fibers. **Journal of Composite Materials**, v. 55, n. 24, p. 3615-3626, 2021.
- 51 DE OLIVEIRA, Elcio Cruz; DE MATOS, Ana Carolina Hermógenes. Comparação de diferentes abordagens para avaliação da incerteza de medição na determinação de enxofre em combustíveis. 2020.
- 52 KHATUN, Nasrin et al. Applications of normality test in statistical analysis. **Open Journal of Statistics**, v. 11, n. 01, p. 113, 2021.
- 53 KUNDU, M. G.; MISHRA, S.; KHARE, D. Specificity and sensitivity of normality tests. In: **Proceedings of VI International Symposium on Optimisation and Statistics**. Anamaya Publisher. 2011.
- 54 SHAPIRO, Samuel Sanford; WILK, Martin B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965.
- 55 RAZALI, Nornadiah Mohd et al. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. **Journal of statistical modeling and analytics**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011.
- 56 ZOU, Mingzhe; DJOKIC, Sasa Z. A review of approaches for the detection and treatment of outliers in processing wind turbine and wind farm measurements. **Energies**, v. 13, n. 16, p. 4228, 2020.
- 57 GONÇALVES, Elisabeth Borges; ALVES, Ana Paula Guedes; MARTINS, Paula Alves. Detecção de valores aberrantes em alguns experimentos interlaboratoriais para alimentos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 24, p. e2020273, 2021.
- 58 WEI, Xiong et al. Identification and Processing of Outliers in Data Based on Improved Quantile Method. In: **2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)**. IEEE, 2019. p. 406-410.
- 59 DE OLIVEIRA, Elcio Cruz et al. Comparison of different approaches for detection and treatment of outliers in meter proving factors determination. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 48, p. 29-35, 2016.

- 60 DASTJERDY, Behzad; SAEIDI, Ali; HEIDARZADEH, Shahriyar. Review of applicable outlier detection methods to treat geomechanical data. **Geotechnics**, v. 3, n. 2, p. 375-396, 2023.

8.

Anexo A – Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Metrologia – 2024



Evaluation of impact energy absorption in natural fiber composites

T B Andrade^{1,2,*}, R M Moreira³, E P Eufrazio³, T V Francisco³ and E C Oliveira^{1,3}

¹ Pós MQI, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 22453-900, Brazil

² National Institute of Technology, Rio de Janeiro, 20081-312, Brazil

³ PETROBRAS S.A., Logistics, Operational Planning and Control, Measurement and Product Inventory Management, Rio de Janeiro 20231-030, Brazil

⁴ Graduate Program in Polymer Science and Technology, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 21941-598, Brazil

* Corresponding author: tatiandrade21@gmail.com

Abstract. In response to the increasing concerns about motorcyclists' safety and advancements in the motorcycle industry, this study investigated the potential of natural fibers as a sustainable means to enhance helmet protection. Leveraging statistical tools such as the Shapiro-Wilk test, Chauvenet's criterion, and the Interquartile Range, we compared the impact energy absorption of composites reinforced with natural fibers to that of expanded polyurethane (PU) prototypes. The results, assessed through confidence intervals, indicated that composites reinforced with 5 % sugarcane bagasse, 5 % and 10 % coconut, and 10 % and 15 % sisal demonstrated a notably superior impact absorption performance than pure PU. These insights emphasize the potential of natural fibers in enhancing helmet safety and suggest promising directions for future research into the ideal composite materials for motorcycle helmets a line of inquiry currently in progress.

Keywords: *impact absorption; motorcycle helmet; natural fiber; statistical analysis.*

https://metrologia2023.org.br/?page_id=6624