



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE
TRABALHO DE LICENCIATURA

**Avaliação da Viabilidade Técnica e Ambiental da Produção
de Telhas Sustentáveis Utilizando Resíduos de Plástico,
Areia e Fibra de Coco**

Autor

Frenk Marcos Djate

Supervisor:

Prof. Dr. Joao Chidamoio, Eng.º

Maputo, Outubro de 2025

FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE
TRABALHO DE LICENCIATURA

**Avaliação da Viabilidade Técnica e Ambiental da Produção
de Telhas Sustentáveis Utilizando Resíduos de Plástico,
Areia e Fibra de Coco**

Autor:

Frenk Marcos Djate

Supervisor:

Prof. Dr. Joao Chidamoio, Eng.º

Relatório do Trabalho de Licenciatura apresentado
ao Departamento de Engenharia Química da
Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo
Mondlane, como requisito parcial para a obtenção
do grau de Licenciado em Engenharia do Ambiente.

Maputo, Outubro de 2025

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA _____

Declaro que o estudante _____.

Entregou no dia ____/____/20__ as ____ cópias do seu Trabalho de Licenciatura

com a Referência: _____

intitulado: _____

Maputo, ____ de _____ de 20__

A Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO SOB PALAVRA DE HONRA

Eu, Frenk Marcos Djate, declaro, sob palavra de honra, que o presente relatório, intitulado **Avaliação da Viabilidade Técnica e Ambiental da Produção de Telhas Sustentáveis Utilizando Resíduos de Plástico, Areia e Fibra de Coco**, foi elaborado por mim a partir de trabalhos de campo, pesquisas bibliográficas e análises laboratoriais, e que nunca foi apresentado por nenhum outro autor para a obtenção de grau académico.

Maputo, Outubro de 2025

(Frenk Marcos Djate)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada.

Aos meus queridos pais, Marcos Djate e Felizarda Matola, pelo amor, apoio incondicional e sacrifícios feitos para a concretização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, sabedoria e perseverança durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço profundamente aos meus pais, Marcos Djate e Felizarda Matola, pelo amor, incentivo e apoio incondicional; aos meus irmãos, Cristina Djate e Atrício Djate; ao meu cunhado, Eduardo Culutune; e ao meu sobrinho, Keyson, pelo carinho e motivação ao longo de toda a jornada. Expresso também a minha profunda gratidão a Florencia Mapsanganhe, pelo apoio constante, pelo incentivo e pelas valiosas contribuições que tornaram este trabalho mais significativo.

Registo a minha gratidão ao meu orientador, Prof. Doutor João Chidamoio, Eng.º, pela paciência, dedicação e valiosas orientações, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Eng.º Rodrigues Manjate, ao Eng.º Cuco, Helder e Neves pelo acompanhamento técnico e suporte durante os ensaios laboratoriais no Laboratório de Engenharia de Moçambique.

Registo ainda a minha gratidão aos colegas de percurso na faculdade, Hermínio Nhathuve, Domingos Cumbucane e Ana Alicamo, assim como aos demais colegas, pelo companheirismo, apoio e troca de conhecimentos ao longo desta caminhada académica, bem como a toda a faculdade e aos seus docentes pelo aprendizado e incentivo proporcionados.

Por fim, agradeço a todos que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com incentivo, orientação ou disponibilização de recursos.

RESUMO

O aumento da geração de resíduos plásticos e agro-industriais representa um dos principais desafios ambientais da actualidade. Esta pesquisa analisou a viabilidade técnica e ambiental da produção de telhas sustentáveis a partir de resíduos de plástico PET, areia e fibra de coco, representando uma alternativa para o sector da construção em Moçambique. O estudo foi conduzido por meio da preparação de diferentes formulações de compósito, seguidas de ensaios laboratoriais de absorção de água, carga de ruptura à flexão, inflamabilidade e densidade aparente, bem como da aplicação da análise do ciclo de vida (ACV) com o *software* OpenLCA. Os resultados indicaram que a formulação S2 (50% PET, 40% areia e 10% fibra de coco) apresentou melhor desempenho mecânico (1450 N de carga de ruptura à flexão), menor propagação de chama (6,25 mm/min) e densidade adequada (2,23 g/cm³), mantendo absorção de água reduzida (3,26%). A formulação S1, apesar de menor absorção de água, demonstrou menor resistência e maior inflamabilidade. Na perspectiva ambiental, a ACV evidenciou que a S2 apresenta menores impactos em categoria de Potencial de aquecimento global, formação de ozono fotoquímico e formação material particulado, revelando-se mais vantajosa do que a S1. Conclui-se que a produção de telhas utilizando resíduos de PET, areia e fibra de coco é tecnicamente viável e ambientalmente benéfica, sobretudo na formulação S2, contribuindo para a valorização de resíduos, a redução da poluição plástica e a promoção da economia circular.

Palavras-chave: Telhas sustentáveis; Resíduos plásticos; Fibra de coco; Análise de ciclo de vida.

Abstract

The increasing generation of plastic and agro-industrial waste represents one of the main environmental challenges of today. This research analyzed the technical and environmental feasibility of producing sustainable roofing tiles made from PET plastic waste, sand, and coconut fiber, representing an alternative for the construction sector in Mozambique. The study was conducted through the preparation of different composite formulations, followed by laboratory tests for water absorption, flexural strength, flammability, and apparent density, as well as the application of life cycle assessment (LCA) using the OpenLCA software. The results indicated that formulation S2 (50% PET, 40% sand, and 10% coconut fiber) showed the best mechanical performance (1450 N flexural strength), lower flame propagation (6.25 mm/min), and adequate density (2.23 g/cm³), while maintaining low water absorption (3.26%). Although formulation S1 presented lower water absorption, it exhibited lower strength and higher flammability. From an environmental perspective, the LCA demonstrated that S2 presented lower impacts in the categories of Global Warming Potential, Photochemical Ozone Formation, and Particulate Matter Formation, proving to be more advantageous than S1. It is concluded that the production of roofing tiles using PET, sand, and coconut fiber waste is technically feasible and environmentally beneficial, especially in the S2 formulation, contributing to waste valorization, reduction of plastic pollution, and the promotion of a circular economy.

Keywords: Sustainable roofing tiles; Plastic waste; Coconut fiber; Life cycle assessment.

Índice

RESUMO	v
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problema de pesquisa	2
1.2. Justificativa	2
1.3. Objectivos	4
1.3.1. Objectivo geral	4
1.3.2. Objectivos específicos.....	4
1.4. Metodologia	4
1.5. Estrutura do trabalho.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Sustentabilidade	6
2.2. Materiais e suas classificações.....	7
2.3. Materiais sustentáveis	9
2.3.1. Importância dos materiais sustentáveis no contexto de Moçambique	10
2.4. Resíduos plásticos	11
2.4.1. Classificação de materiais plásticos	11
2.4.2. Polietileno tereftalato (PET).....	13
2.4.3. Produção e gestão global de resíduos plásticos.....	14
2.5. Fibra de coco.....	20
2.6. Areia.....	22
2.6.1. Classificação da areia	23

2.7.	Métodos de Moldagem	24
2.8.	Análise do ciclo de vida (ACV)	25
2.8.1.	Fases da ACV	26
2.8.2.	Método de avaliação de impacto	27
2.8.3.	<i>Software</i> para análise do ciclo de vida	28
2.9.	Quadro legal ambiental em Moçambique	28
3.	PROCEDIMENTO E MÉTODO EXPERIMENTAL	30
3.1.	Materiais e preparação dos materiais	30
3.2.	Desenvolvimento do processo de fabricação das telhas	34
3.2.1.	Variáveis de estudo do processo	34
3.2.2.	Composição das amostras	35
3.2.3.	Procedimento de produção da telha	35
3.3.	Ensaio para avaliação das propriedades físicas e mecânicas	37
3.3.1.	Absorção de água	38
3.3.2.	Ensaio de carga de ruptura à flexão	39
3.3.3.	Ensaio de inflamabilidade	40
3.3.4.	Densidade aparente	41
3.4.	Metodologia de análise de ciclo de vida (ACV)	42
3.4.1.	Definição do escopo e fronteiras do estudo	43
3.4.2.	Análise do inventário do ciclo de vida (AIC)	43
3.4.3.	Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	46
4.	Resultados e Discussão	47
4.1.	Absorção de água	47
4.2.	Ensaio de carga de ruptura à flexão	48
4.3.	Ensaio de inflamabilidade	49

4.4.	Densidade aparente	50
4.5.	Avaliação dos impactos ambientais	51
4.6.	Comparação com telhas convencionais	57
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	59
5.1.	Conclusões	59
5.2.	Recomendações.....	60
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
6.1.	Bibliografia referenciada.....	61
6.2.	Bibliografia consultada.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

PET – Polietileno tereftalato

PS – Poliestireno

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PP – Polipropileno

PVA – Acetato de polivinila

PVC – Policloreto de vinila

ACV – Análise do Ciclo de Vida

AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

OpenLCA – Open Life Cycle Assessment

S1 e S2 – Diferentes proporções das amostras

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

DS – Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

MN – Norma Moçambicana

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

ASTM – American Society for Testing and Materials

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Telha cerâmica utilizada em construções.	9
Figura 2: Família dos polímeros.	12
Figura 3: Símbolos de plásticos.	14
Figura 4: Produção global de plásticos em 2019.	15
Figura 5: Destino de resíduos plásticos em 2019.	16
Figura 6: Ingestão de microplástico.	17
Figura 7: Etapas de processo de reciclagem mecânica.	19
Figura 8: Etapas de processo de reciclagem química.	19
Figura 9: Etapas processo de reciclagem energética.	20
Figura 10: Fibra de coco.	21
Figura 11: Métodos de Moldagem	25
Figura 12: Fases da ACV.	26
Figura 13: Etapa do procedimento experimental para a produção das telhas sustentáveis.	30
Figura 14: Resíduos de garrafas plásticas PET.	31
Figura 15: Fibra de coco	32
Figura 16: Areia antes da peneiração (A) e areia a ser peneirada (B).	32
Figura 17: Molde usado no processo.	33
Figura 18: Processo de produção da telha	37
Figura 19: Imagens representativas da telha produzida.	37
Figura 20: A — Amostras submersas na água, B — Pesagem da amostra, C — Amostras na estufa	39
Figura 21: Momento do ensaio de flexão e prensa utilizada.	40
Figura 22: A — Amostras usadas no ensaio, B — Amostras submetidas à chama41	
Figura 23: A — Amostras para o processo de pesagem, B — Determinação do volume das amostras.	42
Figura 24: Painel de navegação do <i>software OpenLCA</i>	42
Figura 25: Fronteira de análise do ciclo de vida	43
Figura 26: Fluxos de entradas e saídas associados ao processo de fabricação da telha S1.	45

Figura 27: Fluxos de entradas e saídas associados ao processo de fabricação da telha S2.....	45
Figura 28: Painel do método do Impacto	46
Figura 29: Gráfico do índice de absorção de água das telhas S1 e S2	47
Figura 30: Comparação dos limites de carga de ruptura à flexão das telhas S1 e S2...	48
Figura 31: Gráfico que ilustra as taxas médias de inflamabilidade das amostras S1 e S2.....	49
Figura 32: Comparação de densidade aparente das amostras S1 e S2.....	51
Figura 33: Contribuição por cada fase de ciclo de vida na categoria de impacto: aquecimento global.....	52
Figura 34: Comparação das emissões totais para a categoria de potencial de aquecimento global (S1 e S2).....	53
Figura 35: Contribuição por cada fase de ciclo de vida na categoria de material particulado 2.5	54
Figura 36: Comparação das emissões totais para a categoria material particulado (S1 e S2)	55
Figura 37: Contribuição por cada fase de ciclo de vida na categoria de formação de ozono fotoquímico	56
Figura 38: Comparação das emissões totais para a categoria de formação de ozono fotoquímico	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de telhas sustentáveis.	10
Tabela 2: Exemplos de polímeros termoplásticos e termofixos.	13
Tabela 3: Propriedades físicas e químicas de fibra de coco.....	22
Tabela 4: Propriedades da areia.	23
Tabela 5: Categorias para avaliação de impacto ambiental segundo o método <i>ILCD</i> <i>2011 Midpoin</i>	27
Tabela 6: Ferramentas utilizadas no processo experimental	33
Tabela 7: Variáveis de estudo.....	34
Tabela 8: Proporções das amostras.	35
Tabela 9: Síntese comparativa da telha S2 e telhas convencionais.	58

Capítulo I

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento na produção de resíduos sólidos transformou - se em um dos principais obstáculos ambientais que a sociedade enfrenta. Os plásticos tornaram - se uma substância indispensável no uso diário e o seu consumo anual tem aumentado gradualmente nas últimas décadas, principalmente devido as suas características herdadas, como preço acessível, simplicidade na utilização, potencial de produção, durabilidade, leveza e robustez (Omosebi & Noor, 2021).

Conforme com os dados do Programa das Nações Unidas para o Meio - Ambiente (PNUMA), actualmente, as pessoas geram mais de 350 milhões de toneladas de resíduos plásticos anualmente, e a contaminação por plástico em ambientes aquáticos cresceu bastante nos últimos anos, podendo dobrar até o ano de 2030, com repercussões devastadoras na saúde, na economia, na diversidade biológica e no clima. O documento aponta que o plástico é responsável por 85% dos resíduos que entram nos mares e alerta que, até 2040, a quantidade de plástico descartado no oceano vai aumentar por três vezes, chegando a uma taxa anual de 23 a 37 milhões de toneladas. Isso representa aproximadamente 50 kg de plástico para cada metro da costa do mundo (PNUMA, 2021).

Além disso, a indústria agrícola também gera uma quantidade significativa de resíduos, como a fibra de coco, que muitas vezes não recebe um descarte adequado. Segundo (Maia & Dantas, 2005), O emprego de fibras naturais, especialmente de coco, como elemento de reforço em compósitos feitos de plástico oferece várias vantagens quando comparado a outros materiais sintéticos, incluindo boas propriedades mecânicas específicas, capacidade de biodegradação, possibilidade de reciclagem, leveza, baixo consumo energético, custo acessível e criação de postos de trabalho em zonas rurais.

A indústria da construção, um dos sectores que mais utiliza recursos e materiais naturais, busca alternativa para reduzir sua pegada ecológica. Neste contexto, substituir materiais convencionais por resíduos recicláveis parece uma solução viável e inovadora (Tulane & Afonso, 2019). A produção de telhas sustentáveis a partir de

plástico reciclado, areia e fibras de coco pode reduzir o efeito sobre o meio - ambiente e apoiar a economia circular, transformando resíduos em materiais de valor agregado. Essa estratégia não somente contribui para diminuir a quantidade de plásticos descartados em aterros, mas também diminui a dependência de matérias-primas naturais e na diminuição dos poluentes ligados à fabricação tradicional de materiais de construção (Carvalho, 2022).

1.1. Problema de pesquisa

Preocupações crescentes com a gestão de resíduos e a necessidade de inovação na construção civil estão impulsionando o desenvolvimento de materiais alternativos. Entretanto, estudos que avaliam o desempenho técnico de materiais feitos de resíduos plásticos reciclados e fibras naturais ainda são limitados. Portanto, este estudo responderá a seguinte questão:

Até que ponto a produção de telhas de forma sustentável utilizando resíduos plásticos, areia e fibra de coco é viável do ponto de vista técnico e ambiental, além de oferecer um desempenho otimizado para usos na construção civil?

1.2. Justificativa

O descarte inadequado de plásticos e resíduos agro-industriais é um grave problema ambiental, contribuindo para a degradação dos ecossistemas e o acúmulo de materiais não biodegradáveis. Diante desse desafio, a busca por soluções sustentáveis no sector da construção civil surge como uma alternativa viável para minimizar esses impactos, ao mesmo tempo, em que oferece opções mais acessíveis ao mercado da construção civil.

De acordo com (Omosebi & Noor, 2021), a aplicação de resíduos plásticos na produção de concreto é recomendada por dois motivos principais: primeiro, como estratégia para mitigar os problemas ambientais causados pelo descarte desses materiais; em segundo lugar, pela possibilidade de redução dos custos de construção, já que os plásticos descartados estão amplamente disponíveis. Além disso, estudos indicam que a fibra de coco pode melhorar a resistência mecânica de materiais

compósitos (Maia & Dantas, 2005), tornando-se um potencial reforço para produtos sustentáveis.

Os plásticos são comumente usados como materiais de embalagem, mas seus resíduos podem ser usados na área da construção civil como ligantes na produção de diversos produtos de construção, como, azulejos, tijolos, telhas, ladrilhos, blocos, etc. Isso pode reduzir os custos de construção e minimizar a poluição ambiental (Omosebi & Noor, 2021).

Dessa forma, este estudo é fundamentado pela importância de analisar a eficiência técnica e ambiental dessas telhas, determinando sua viabilidade no sector da construção.

1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo geral

- Avaliar a viabilidade técnica e ambiental da produção de telhas sustentáveis.

1.3.2. Objectivos específicos

- Caracterizar os materiais utilizados, suas propriedades físicas e mecânicas relevantes para a produção de telhas;
- Produzir telhas em diferentes proporções de materiais e analisar seu desempenho em ensaios de qualidade;
- Avaliar os impactos ambientais associados ao processo produtivo das telhas por meio da análise do ciclo de vida.

1.4. Metodologia

Este estudo é baseado em uma metodologia que combina abordagens qualitativas e quantitativas. A abordagem qualitativa será usada para revisão de literatura e análise das propriedades dos materiais, enquanto a abordagem quantitativa será aplicada para realizar testes de laboratório, colectar dados experimentais e analisar estatisticamente os resultados.

A pesquisa será estruturada consoante as seguintes etapas:

I. Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica pretende reunir informações sobre o uso de resíduos plásticos reciclados, sustentabilidade na construção civil, propriedades mecânicas dos materiais e impactos ambientais da reciclagem, que serão consultadas nas seguintes fontes: artigos científicos e trabalhos de dissertação disponíveis em bases de dados, como o Google Académico, SciELO e ResearchGate; normas técnicas e regulamentos; relatórios e publicações institucionais.

II. Trabalho de campo

O trabalho de campo será realizado para colectar os materiais necessários e analisar a sua disponibilidade. Os materiais serão recolhidos em centros de reciclagem e locais de descarte, os materiais a serem recolhidos são: resíduos de plásticos PET, areia e fibra de coco.

III. Trabalho de laboratório

A fase laboratorial envolverá a preparação dos materiais, que serão submetidos às etapas de processamento como: lavagem, trituração, secagem e peneiração, serão testadas diferentes proporções de materiais para determinar a melhor composição, a seguida terá o processo de produção das telhas, após a produção, as telhas serão submetidas a testes quantitativos para avaliação de desempenho.

IV. Análise dos resultados

Os resultados serão organizados em tabelas e gráficos para facilitar a interpretação e a comparação entre as diferentes formulações testadas, serão aplicadas técnicas estatísticas, discussão e interpretação dos resultados, conclusões e elaboração de recomendações.

1.5. Estrutura do trabalho

Capítulo 1 – Introdução: fornece a contextualização do tema, estabelece a questão de pesquisa, determina os objectivos, explica a relevância do estudo e apresenta a organização geral do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: explora os conceitos e pesquisas associadas aos materiais empregados, métodos de moldagem e análise do ciclo de vida.

Capítulo 3 – Parte Experimental: descreve os procedimentos de colecta, preparo dos materiais, moldagem, ensaios físicos e mecânicos, e análise ambiental (ACV).

Capítulo 4 – Resultados e Discussão: apresenta os dados obtidos a partir dos testes realizados e interpreta os resultados com base nos critérios técnicos e ambientais.

Capítulo 5 – Considerações Finais: sintetiza os resultados, responde à questão de pesquisa, aponta as limitações e propõe recomendações para estudos futuros.

Capítulo II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade, enquadrado no desenvolvimento sustentável (DS), foi consolidado globalmente a partir das análises realizadas pela Comissão Mundial sobre Meio-Ambiente e Desenvolvimento, instituída em 1983 pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU), para promover o crescimento económico e reduzir a pobreza em diferentes países (Ferreira, 2023).

Este conceito busca harmonizar progresso económico, inclusão social e conservação ambiental, assegurando que a satisfação das necessidades actuais ocorra sem comprometer o bem-estar das futuras gerações.

Em Moçambique, a (Política Nacional do Ambiente , 1995) define os fundamentos para o desenvolvimento sustentável, visando estabelecer um compromisso equilibrado entre o avanço socioeconómico e a preservação ambiental. Esta política visa a eliminação da pobreza e a promoção do bem-estar e das condições de vida da população, conforme os princípios do desenvolvimento sustentável.

Segundo (Yemal & Teixeira, 2011), o desenvolvimento sustentável somente pode ser atingido mediante transformações profundas nos modos de pensar, agir, viver, produzir e consumir. Isso porque a preocupação com as questões ambientais tem ganhado destaque entre as nações em escala global. Nesse contexto, o sector da construção civil sobressai-se como um dos tópicos mais relevantes em debates actuais., devido a sua relevante contribuição para o impacto ambiental.

De acordo com (Bernardo, 2012), a concepção de construções sustentáveis deve priorizar a redução da ocupação de áreas verdes e da produção de resíduos, ao mesmo tempo, em que busca eficiência no uso de água e energia, tanto na fase de construção quanto na de operação. Assim, o sector da construção tem uma responsabilidade maior pelos efeitos que provoca e retorna ao meio-ambiente, sendo, portanto, essencial reavaliar a escolha de materiais e a disposição dos espaços.

De acordo com (Lemos & Frendenberg, 2019) acima de tudo, edificar de maneira sustentável é procurar equilíbrio entre o meio-ambiente e a construção, empregando tecnologias e processos cujo objectivo é reduzir os impactos ambientais. Assim, desde o planeamento até a pós-construção vários aspectos devem ser considerados para atingir a sustentabilidade. Utilização de materiais ecológicos, melhor aproveitamento da luz natural, emprego de energias alternativas e disposição adequada de resíduos são algumas decisões que definem uma construção sustentável.

2.2. Materiais e suas classificações

Materiais em engenharia são as substâncias usadas para criar produtos.

Os materiais de engenharia são classificados em quatro grandes famílias: metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. Essa classificação baseia-se nas suas estruturas internas, ligações químicas e propriedades físicas e mecânicas (Ashby & Jones, 2012).

➤ Materiais metálicos

Os metais são compostos por um ou mais elementos metálicos (como ferro, alumínio, cobre, titânio, ouro e níquel) e, com frequência, também por elementos não metálicos (como carbono, nitrogénio e oxigénio) em quantidades relativamente pequenas. Os átomos nos metais e nas suas ligas estão arrançados de forma altamente ordenada, formando redes cristalinas bem definidas. Do ponto de vista mecânico, esses materiais são rígidos, resistentes e dúcteis, ou seja, podem deformar-se intensamente sem sofrer fractura, o que os torna ideais para aplicações estruturais. Outra característica importante dos metais é a presença de inúmeros electrões livres, que não estão ligados a átomos específicos. Essa estrutura electrónica explica muitas das propriedades típicas dos materiais metálicos: alta condutividade eléctrica e térmica, aparência brilhante quando polidos e, em alguns casos (como o ferro, o cobalto e o níquel), propriedades magnéticas (Callister & Rethwisch, 2016).

➤ Materiais Cerâmicos

Materiais cerâmicos são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos; na maioria das vezes, são óxidos, nitretos e carbonetos. Por exemplo, o

óxido de alumínio (Al_2O_3), o dióxido de silício (SiO_2), o carbeto de silício (SiC), o nitreto de silício (Si_3N_4) e, ainda, aqueles materiais compostos por minerais argilosos (por exemplo, a porcelana), assim como o cimento e o vidro. Em relação ao comportamento mecânico, os materiais cerâmicos são relativamente rígidos e resistentes, além disso, as cerâmicas são tipicamente muito duras. Historicamente, as cerâmicas sempre exibiram extrema fragilidade (ausência de ductilidade) e são altamente susceptíveis à fractura. Os materiais cerâmicos também são tipicamente isolantes à passagem de calor e electricidade e são mais resistentes a temperaturas elevadas e a ambientes severos que os metais e os polímeros.

➤ **Materiais Poliméricos**

Os polímeros incluem as famílias dos materiais plásticos e de borracha. Muitos deles são compostos orgânicos que têm sua química baseada no carbono, no hidrogénio e em outros elementos não metálicos (por exemplo, O, N e Si). Eles têm estruturas moleculares muito grandes, na forma de cadeias, que com frequência possuem uma estrutura composta por átomos de carbono, esses materiais possuem baixas massas específicas, enquanto suas características mecânicas são, em geral, diferentes das características exibidas pelos materiais metálicos e cerâmicos eles não são tão rígidos nem tão resistentes quanto esses outros tipos de materiais, muitos dos polímeros são extremamente dúcteis e flexíveis (plásticos), o que significa serem facilmente conformados em formas complexas. Em geral, quimicamente eles são relativamente inertes, não reagindo em inúmeros de ambientes. Uma das principais desvantagens dos polímeros é sua tendência a amolecer e/ou decompor em temperaturas baixas, o que, em algumas situações, limita seu uso. Têm, também, baixa condutividade eléctrica e não são magnéticos (Callister & Rethwisch, 2016).

➤ **Materiais compósitos**

Os compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais de naturezas distintas, para obter propriedades superiores às de cada componente isolado. Normalmente, compõem-se de uma matriz (fase contínua) e um reforço (fase dispersa).

2.3. Materiais sustentáveis

Materiais sustentáveis são aqueles que minimizam danos ao meio-ambiente durante todas as fases (extração, produção, uso e descarte), promovendo eficiência energética, reciclagem e fontes renováveis (Construtoragigo, 2024). Podem ser divididos em várias categorias: Materiais reciclados (plástico, borracha, vidro, agregados de entulho em concreto reciclado), materiais naturais renováveis (fibra de coco, bambu, madeira), materiais de baixa energia incorporada (terra crua, tijolos solo-cimento) (World Bank Document, 2018)

Telhas são elementos de cobertura utilizados para proteger construções contra intempéries climáticas, como chuva, sol e vento. Elas podem ser feitas de diversos materiais, incluindo cerâmica, betão, metal, vidro e até plástico, como mostrado na figura 1, que apresenta exemplo de telha de cerâmica (Educacivi, 2020).



Figura 1: Telha cerâmica utilizada em construções.

Fonte: **(Reis, 2024)**

De acordo com (Manuel, 2024) As telhas sustentáveis são alternativas ecológicas às telhas tradicionais, produzidas a partir de materiais reciclados ou renováveis. Elas visam reduzir o impacto ambiental da construção civil, oferecendo benefícios como durabilidade, eficiência energética e menor necessidade de manutenção.

Os principais tipos de telhas sustentáveis, suas características e materiais de fabricação estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Tipos de telhas sustentáveis.

Tipo de Telha Sustentável	Características das telhas
Metal	Frequentemente fabricadas com metal novo ou reciclado, e são 100% recicláveis.
Barro	Material natural, abundante e reciclável
Telhado Verde	Feitas de vegetação e planta
Telhas de Material reciclado	Materiais reciclados, como plástico, borracha, fibras, pneus.

Fonte: Adaptado (Manuel, 2024)

2.3.1. Importância dos materiais sustentáveis no contexto de Moçambique

Em Moçambique, a adopção de materiais sustentáveis na construção é essencial por várias razões. O país enfrenta rápida urbanização (grande parte da população mora em assentamentos informais vulneráveis) e elevada exposição a desastres naturais (ciclones, inundações). Segundo a (ONU Habitat, 2022), mais da metade dos moçambicanos vive em habitações precárias que sofrem com as mudanças climáticas.

Materiais locais tradicionais e novas soluções sustentáveis podem aumentar a resiliência dessas edificações. Além disso, Moçambique enfrenta problemas de poluição por resíduos em áreas urbanas e costeiras. Projectos de economia circular no país evidenciam o uso inovador desses resíduos em materiais de construção. Semelhante mente, em outros países africanos, como Burkina Faso, são produzidos blocos a partir de plástico residual e fibras vegetais locais. Estas soluções permitem transformar resíduos plásticos em recursos úteis, reduzindo simultaneamente a extracção de matérias-primas e gerando emprego local (Lemos & Frendenberg, 2019).

2.4. Resíduos plásticos

O mundo está cheio de plásticos, praticamente tudo que você vê e usa diariamente é total ou parcialmente material plástico. Sua televisão, computador, carro, casa, geladeira e muitos outros produtos essenciais utilizam materiais plásticos para tornar sua vida mais fácil e directa. (Maunahan & Adeba, 2021).

O plástico é um dos materiais que faz parte do grupo dos polímeros. Polímeros são substâncias formadas por grandes moléculas. Essas macromoléculas são formadas por cadeias compostas pela repetição de uma unidade fundamental, conhecida como mero. O nome deriva de duas partes: poli (muitos) + mero. O plástico é uma resina derivada do petróleo, sendo este um combustível de origem fóssil, muito poluente pela capacidade de liberação de gases na atmosfera quando da sua queima.

A palavra plástico vem do latim *plastikos*, que se refere a algo que é maleável, moldável e que pode por meio de acções como compressão, tracção e calor dar origem a outros materiais (Couceiro, 2019). O processo de obtenção deste material se dá por polimerização, junção de moléculas menores chamadas de monômeros em maiores chamadas de polímeros.

2.4.1. Classificação de materiais plásticos

Os polímeros podem ser divididos em duas categorias: termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos possuem a capacidade de derreter e solidificar várias vezes, mantendo inalteradas as suas propriedades fundamentais, sendo amplamente recicláveis na indústria do plástico. Por outro lado, os termofixos são polímeros que não podem ser derretidos, uma vez que as suas cadeias moleculares estão firmemente ligadas por meio de ligações cruzadas em malha (Askar & Yaman, 2023).

A figura 2 ilustra a classificação geral dos polímeros, destacando a divisão entre termoplásticos e termofixos, bem como suas subdivisões estruturais.

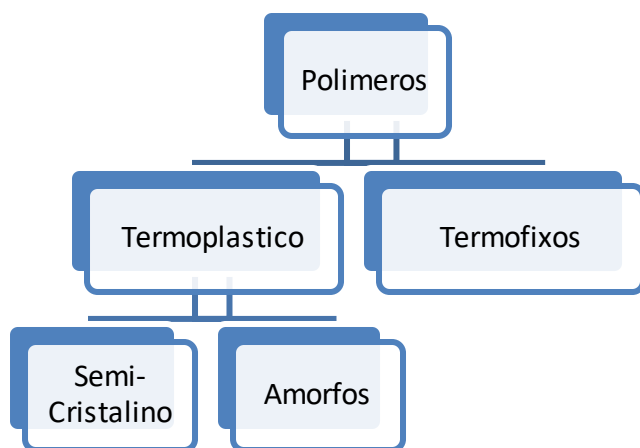


Figura 2: Família dos polímeros.

Fonte: Adaptado (Askar & Yaman, 2023)

2.4.1.1. Polimeros termoplásticos

As propriedades dos materiais termoplásticos incluem: ao aquecer o polímero, este transforma-se num material macio; encontra-se disponível na forma sólida à temperatura ambiente; pode ser reciclado diversas vezes sem perda significativa das suas propriedades fundamentais; é convertível em forma líquida por aquecimento e solidificado novamente por arrefecimento; perde resistência quando aquecido e recupera força através do resfriamento; a fusão ocorre aproximadamente a 150 °C (Parente, 2006).

2.4.1.2. Polimeros termofixos

As propriedades dos materiais termofixos incluem a transformação do polímero em material duro quando sujeito a aquecimento; trata-se de um processo irreversível, não reciclável. O material líquido é convertível em sólido através do aquecimento, mas a inversão não é possível. Em termos de comportamento mecânico, o material ganha resistência com o aquecimento e mantém estabilidade de força durante o arrefecimento. A temperatura de processamento situa-se aproximadamente em 300 °C (Parente, 2006).

Os principais exemplos de polímeros termoplásticos e termofixos estão apresentados na tabela 2.

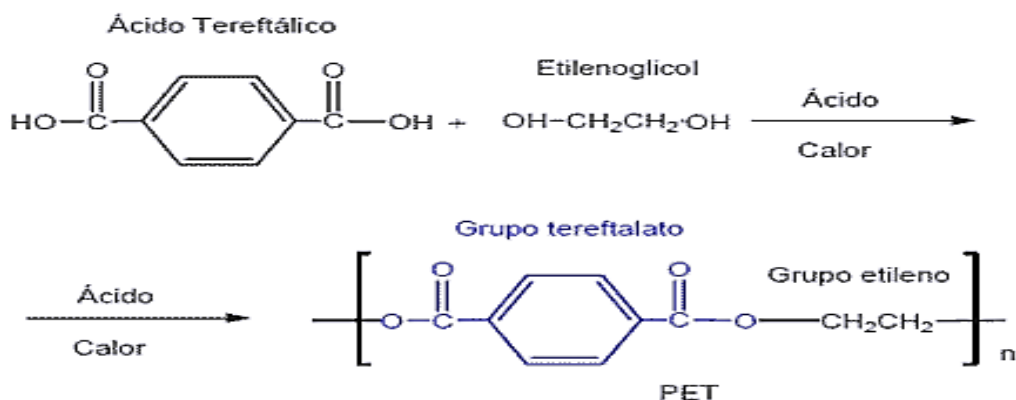
Tabela 2: Exemplos de polímeros termoplásticos e termofixos.

Termoplásticos	Termofixos
Polietileno Tereftalato (PET)	Baquelite
Poliestireno (PS)	Resinas epoxi
Polietileno de alta densidade (PEAD)	Resinas alquídicas
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Formaldeído de ureia
Polipropileno (PP)	Poliuretano
Acetato de polivinila (PVA)	Poliésteres
Policloreto de vinila (PVC)	Resinas melaminicas

Fonte: Adaptado (Parente, 2006).

2.4.2. Polietileno tereftalato (PET)

O polietileno tereftalato (PET) pertence à família dos polímeros termoplásticos semicristalinos, caracterizados pela capacidade de fundir e solidificar repetidamente sob efeito do calor, obtido pela reacção de condensação entre o ácido tereftálico e o etilenoglicol. Equação química 1 apresenta de forma esquemática a reacção responsável para obtenção do PET.



Equação química 1: Reacção de obtenção do PET.

Fonte:(<https://www.tudosobreplasticos.com/materiais/pet.asp>)

Este material apresenta excelente estabilidade química, resistência mecânica e barreira a gases, características que o tornam adequado para aplicações em embalagens alimentares e industriais. Entre as suas propriedades físicas, destacam-se uma massa molar entre 15.000 e 42.000 g/mol, densidade de 1,33 a 1,45 g/cm³, temperatura de fusão de 250 a 270 °C, transparência geralmente clara, baixa permeabilidade a água e oxigénio e estabilidade térmica na faixa anterior à fusão. Além disso, o PET é amplamente reciclável, podendo ser reprocessado diversas vezes sem perda significativa das suas propriedades (Gomes, 2017).

Os plásticos são identificados por meio de símbolos padronizados de reciclagem, que indicam o tipo de polímero. Esses símbolos ajudam consumidores e indústrias a reconhecerem a reciclabilidade de cada produto. A figura 3 apresenta os principais símbolos utilizados na identificação dos diferentes tipos de plásticos.



Figura 3: Símbolos de plásticos.

Fonte:(gestorderesiduosmadrid.es/guia-simbolos-reciclaje-plasticos)

2.4.3. Produção e gestão global de resíduos plásticos

Os resíduos sólidos referem-se a materiais que são descartados resultantes de actividades humanas ou processos naturais, que se apresentam nos estados sólidos. Eles abrangem diferentes tipos de materiais, como plásticos, metais, papel, vidro e restos orgânicos.

Conforme as directrizes legais para a gestão de resíduos (Decreto13/2006), resíduos são materiais ou objectos que são descartados, que se pretendem descartar ou que são obrigados a serem descartados por imposição legal, chamados de lixos.

Desde 1950, estima-se que cerca de 7 mil milhões das 9,2 mil milhões de toneladas de plásticos produzidos tenham-se transformado em resíduos, muitos dos quais foram descartados de forma inadequada, contribuindo para a poluição de solos, rios e oceanos (PNUMA, 2022). Entre 1950 e 2019, a produção mundial de plásticos expandiu-se de aproximadamente 2 milhões para mais de 450 milhões de toneladas. Em 2019, a produção atingiu mais de 400 milhões de toneladas (Mt), conforme ilustrado na figura 4, confirmando a tendência de crescimento exponencial observada nas últimas décadas. Como consequência, são gerados cerca de 350 Mt de resíduos plásticos por ano (Globalplastic, 2022).

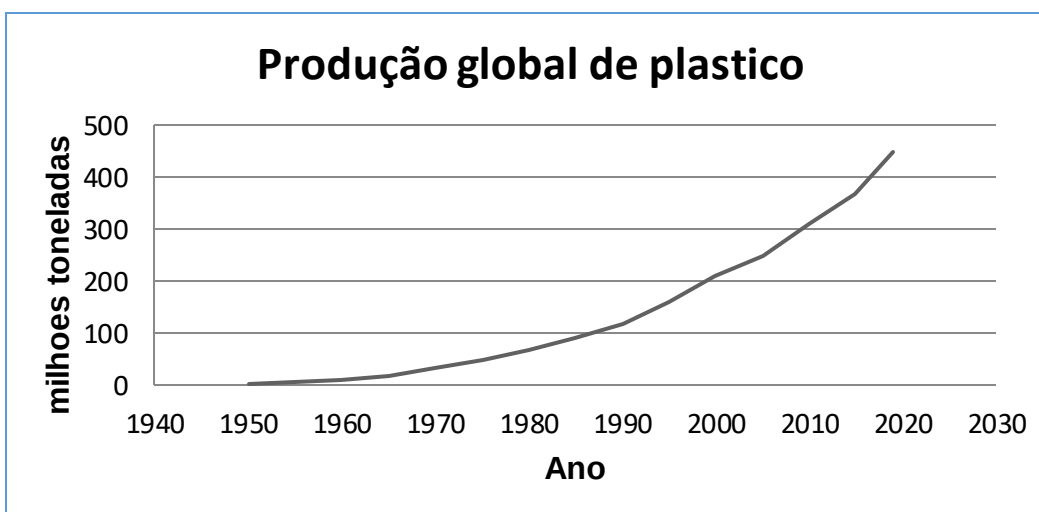


Figura 4: Produção global de plásticos em 2019.

Fonte: Adaptado (**Global plastics production, 2019**).

Apesar desse volume expressivo, a taxa de reciclagem ainda é reduzida. Dados da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) indicam que, em 2019, somente 9% dos resíduos plásticos foram reciclados, enquanto 19% foram incinerados e 50% destinados a aterros, frequentemente não sanitários. O restante, cerca de 22%, foi descartado inadequadamente, em lixeiras a céu-aberto ou directamente no meio natural (figura 5). Esta gestão ineficiente agrava a poluição ambiental: estima-se que entre 19 e 23 Mt de resíduos plásticos vazam anualmente para os ecossistemas aquáticos, dos quais 1 a 2 Mt/ano alcançam os oceanos (aproximadamente 0,5% do total produzido), permanecendo a maioria retida em rios e lagos. (Ritchie & Roser, 2024).

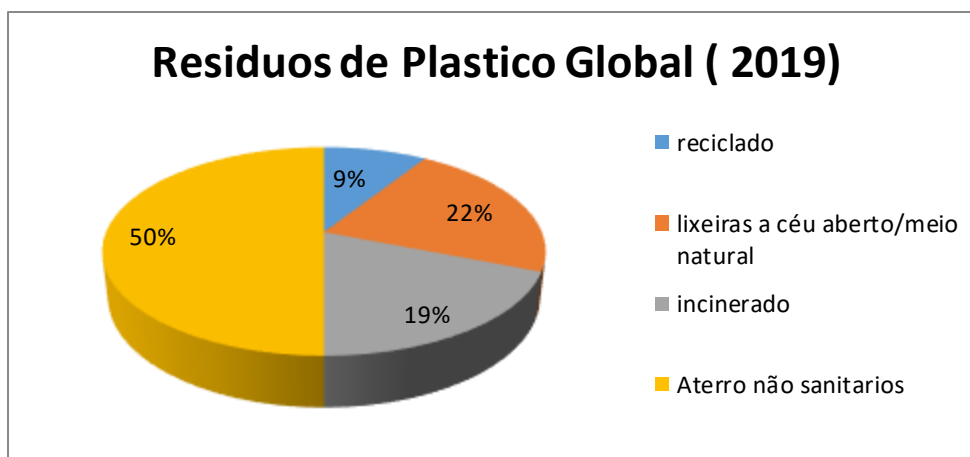


Figura 5: Destino de resíduos plásticos em 2019.

Fonte: Adaptado (Ritchie & Roser, 2024)

2.4.3.1. Geração de resíduos plásticos em Moçambique

No contexto moçambicano, a gestão de resíduos sólidos urbanos enfrenta diversos desafios. Em 2016, o país gerou aproximadamente 2,64 milhões de toneladas de resíduos urbanos, correspondendo a cerca de 85 kg por habitante/ano, dos quais somente 30% foram efectivamente colectados. Na capital, Maputo, a taxa de recolha é relativamente elevada (82%); contudo, esta percentagem representa somente cerca de 6% da população nacional. A reciclagem formal permanece incipiente: até 2017, apenas três cidades, Maputo, Beira e Vilankulo dispunham de programas estruturados de reciclagem, sendo que o volume de resíduos reciclados não ultrapassava 1% do total gerado (Global-recycling.info, 2020).

No caso específico dos resíduos plásticos em Moçambique, estimou-se que em 2010 cada habitante gerava, em média, 15,4 kg de plástico por ano. Contudo, grande parte desse material não é gerida adequadamente: uma fracção significativa termina em lixeiras a céu-aberto, enquanto cerca de 60% é queimado ao ar livre, contribuindo para a poluição atmosférica e riscos à saúde pública. Um estudo conduzido pelo Instituto do Futuro da Universidade de Tóquio (2020) registou a geração de aproximadamente 481.260 toneladas de resíduos plásticos no país. Deste total, apenas 9.482 toneladas foram recicladas, enquanto 315.466 toneladas não chegaram a ser colectadas e 144.378 toneladas, embora colectadas, foram depositadas em lixeiras a céu-aberto.

Em síntese, verifica-se que praticamente todo o plástico colectado tem como destino lixeiras, e somente 0,5% é efectivamente recuperado por meio da reciclagem (Mozambique-sustainable, 2021).

A infra-estrutura pública ainda é muito limitada: faltam aterros sanitários, predomina deposição em áreas abertas, e a colecta formal em áreas rurais e periféricas é quase inexistente. O sector informal desempenha papel crucial: cooperativas e recicladores voluntários recolhem e vendem materiais (PET, PP, etc.), mas em escala restrita.

2.4.4. Consequências da poluição plástica

A poluição plástica gera impactos ambientais, sociais, económicos e de saúde pública, representando um dos principais desafios globais contemporâneos. Esses efeitos são ilustrados na figura 6, que apresenta exemplos de ingestão de microplásticos e queima de resíduos plásticos.

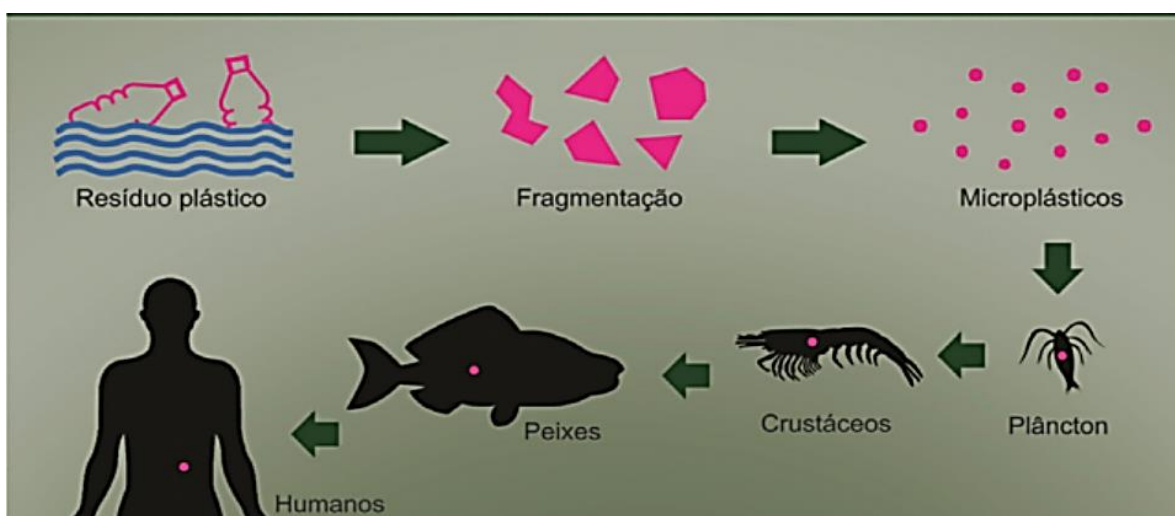


Figura 6: Ingestão de microplástico.

Fonte: (Varga & Silva, 2022)

Ambientais: fragmentos plásticos e microplásticos afectam a fauna terrestre e marinha, alteram as características físico-químicas do solo e contribuem para a degradação dos ecossistemas naturais (Jambeck, 2015).

Saúde humana: ingestão de microplásticos e químicos tóxicos na cadeia alimentar e emissão de gases perigosos na queima de resíduos aumentam riscos de distúrbios hormonais, alergias, doenças respiratórias e cardiovasculares.

Económico-social: a poluição plástica contamina praias e zonas costeiras, impactando negativamente o turismo e reduzindo o valor económico de espécies marinhas

Climático: A produção e o destino dos plásticos estão associados ao uso de combustíveis fósseis, libertando gases responsáveis pelo efeito estufa.

2.4.5. Gestão de resíduos de plásticos

A gestão de resíduos plásticos baseia-se em diversas estratégias complementares, entre as quais se destacam a redução, a reutilização e a reciclagem. A redução do consumo constitui a primeira e mais eficaz medida, incentivando a sociedade a adoptar alternativas mais sustentáveis e a diminuir a dependência de plásticos descartáveis. A reutilização, por sua vez, prolonga o ciclo de vida dos produtos plásticos, retardando a sua disposição final. Já a reciclagem desempenha um papel essencial ao possibilitar a transformação de resíduos plásticos em novos produtos, minimizando a necessidade de extracção de matérias-primas virgens e reduzindo os impactos ambientais associados ao descarte inadequado (Lima, 2009).

2.4.5.1. Classificação da reciclagem de plásticos

A reciclagem de plásticos pode ser classificada em diferentes modalidades, entre as quais se destacam a reciclagem mecânica, a química e a energética.

➤ Reciclagem mecânica

Esse processo ocorre quando o plástico é submetido a várias fases, conforme ilustrado na figura 7, que incluem a separação, trituração, limpeza, secagem, união e reprocessamento, gerando uma mistura que pode ser reutilizada na criação de novos produtos. Esse método também pode envolver a adição de substâncias ao polímero para aumentar suas características finais. (Zanin & Mancin, 2004).

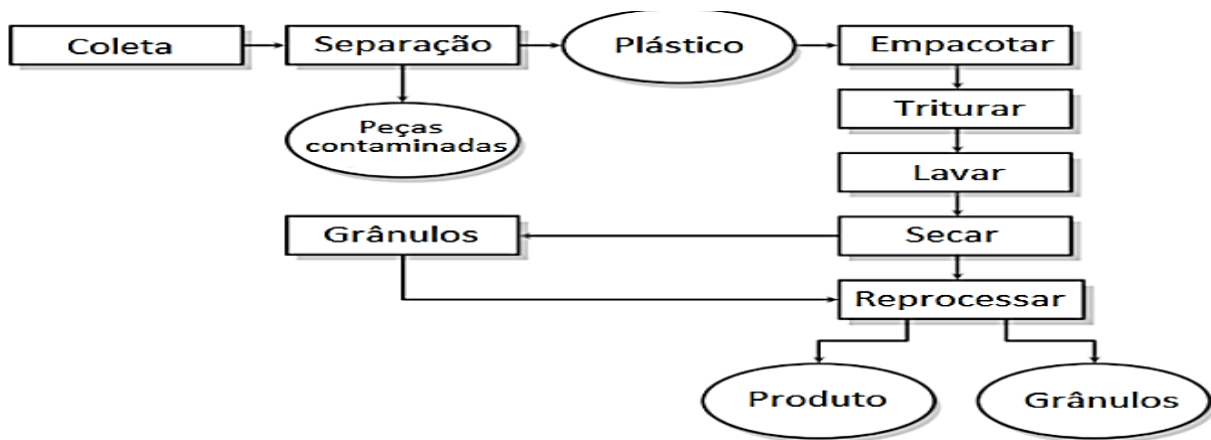


Figura 7: Etapas de processo de reciclagem mecânica.

➤ Reciclagem química

A reciclagem química consiste na transformação dos resíduos plásticos em suas moléculas ou matérias-primas originais por meio de processos químicos ou termoquímicos, conforme ilustrado na figura 8, que incluem pirólise, gaseificação, hidrogenação. Diferente da reciclagem mecânica, que somente funde e remodela os plásticos, a reciclagem química permite recuperar monômeros e compostos básicos que podem ser novamente utilizados na síntese de novos polímeros, mantendo a qualidade do material equivalente ao produzido a partir de fontes fósseis (Zanin & Mancin, 2004).

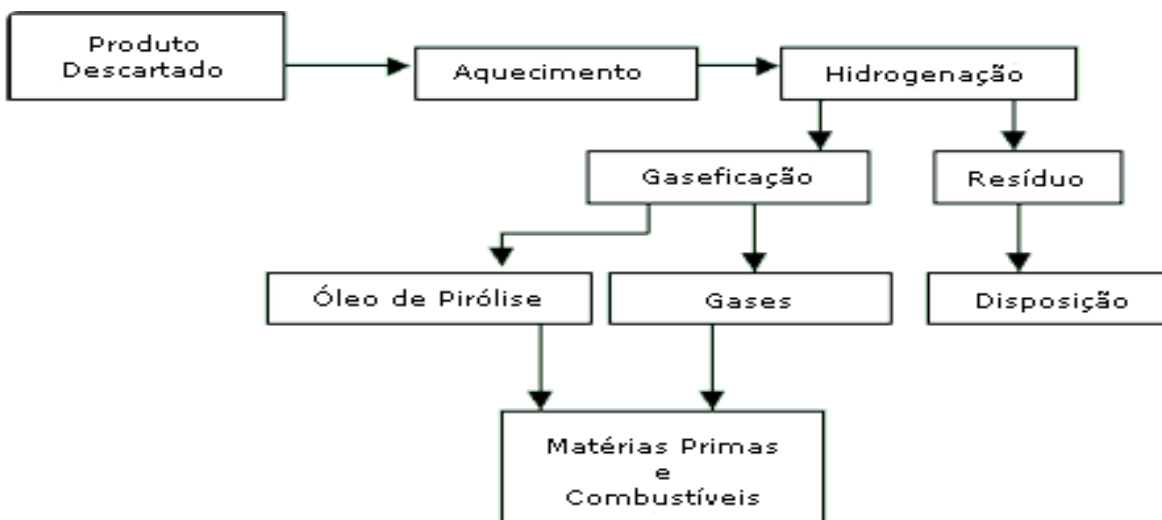


Figura 8: Etapas de processo de reciclagem química.

➤ Reciclagem energética

A reciclagem energética consiste na transformação de resíduos sólidos em energia térmica e/ou eléctrica, por meio de processos como combustão, gaseificação ou pirólise de materiais que não podem ser reutilizados ou reciclados por outros métodos. (Secchi & Argimiro). As principais etapas envolvidas nesse processo estão ilustradas na figura 9.

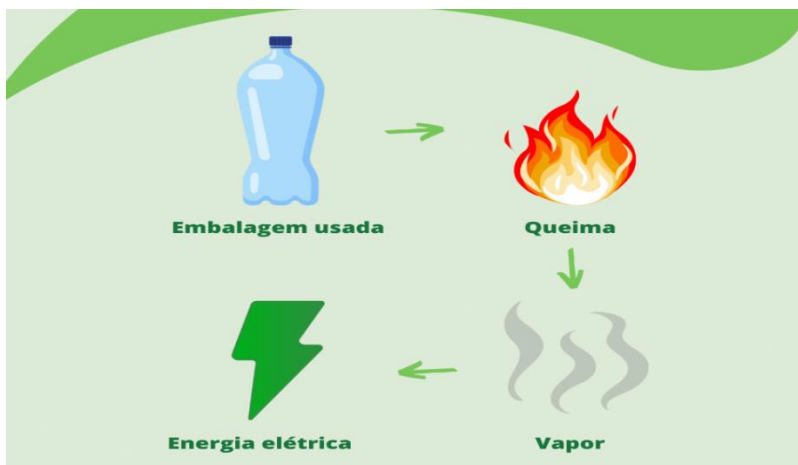


Figura 9: Etapas processo de reciclagem energética.

A economia circular apresenta uma nova abordagem à produção e ao consumo, baseada em princípios como redução de resíduos, maximização do uso de materiais e aumento da eficiência de recursos. Em vez de aderir ao modelo linear tradicional de extracção, uso e descarte de produtos, busca fechar o ciclo dos produtos por meio da reutilização e reciclagem, contribuindo para a redução da exploração de novos recursos e mitigação de impactos ambientais (Borge, 2021).

2.5. Fibra de coco

O emprego de fibras vegetais em substituição às fibras sintéticas constitui uma alternativa de grande relevância por diversos factores. Em primeiro lugar, trata-se de um material biodegradável, contribuindo para a redução da persistência de resíduos no meio-ambiente. Em segundo lugar, as fibras vegetais apresentam custo reduzido em comparação às sintéticas, além de serem um recurso renovável e amplamente disponível. Outro aspecto fundamental é o menor impacto ambiental associado ao seu

ciclo de vida, favorecendo a sustentabilidade no sector de materiais compósitos (Bedin, 2014). Entre as fibras de origem vegetal mais utilizadas destacam-se coco, banana, sisal e algodão, que vêm sendo incorporadas em matrizes poliméricas como elementos de reforço estrutural.

Durante o Verão, o consumo de água de coco em Moçambique é bastante elevado, resultando numa quantidade significativa de resíduos sólidos gerados a partir dos cocos. O fruto do coco é composto por 30% de polpa e 70% de casca em peso. As fibras são destacadas tanto da casca interna quanto da externa do fruto e podem ser extraídas por meio de um processo de reticulação (Rosa, 2019).

A fibra de coco (coir) é um material natural lignocelulósico, pertencente à família dos compósitos naturais, constituído por celulose, hemicelulose e lignina., extraída da casca do fruto do coqueiro, sendo considerada um subproduto agrícola amplamente disponível em regiões tropicais. É utilizada em diversas aplicações devido às suas propriedades físicas e mecânicas favoráveis (Aguiar & Teodoro, 2019). A figura 10 apresenta a aparência típica da fibra de coco utilizada neste estudo.



Figura 10: Fibra de coco.

Fonte: (<https://www.groho.pt/post/quimica-da-fibra-de-coco>)

A fibra de coco apresenta vantagens relevantes, ao ser inodora, não se decompõe facilmente, possui baixa densidade ($0,92 \text{ g/cm}^3$) e elevada resistência mecânica, Segundo (Martinelli & Azevedo, 2023) fibras típicas de coco apresentam resistência à tracção entre 95 e 118 MPa, com alongamento na ruptura variando de 15% a 50%, e módulo de elasticidade em torno de 2 GPa. A massa específica situa-se em,

aproximadamente, 1177 kg/m³, enquanto a condutividade térmica varia entre 0,04 e 0,05 W/m·K.

Do ponto de vista químico, a fibra é rica em lignina (16,2 –45% em peso) e contém 35–47% de celulose, apresentando ainda natureza hidrofílica e sensível à humidade, com teor de humidade típico em torno de 8%. Essas características conferem-lhe elevada durabilidade (decorrente do alto teor de lignina) e boa capacidade de fibrilação.

As propriedades físicas e químicas da fibra de coco, apresentadas na tabela 3, evidenciam suas características mecânicas e químicas que a tornam adequada como material de reforço em compósitos.

Tabela 3: Propriedades físicas e químicas de fibra de coco

Propriedades físicas		Propriedades químicas (%)	
Comprimento da fibra	9 a 33 cm	Celulose	35,0 - 47,0
Diâmetro da fibra	0,5 a 0,6 mm	Hemicelulose	15,0 – 28,0
Densidade	0,92 g/cm ³	Lignina	16,2 – 45,0
Alongamento na ruptura	Alto	Extractivos	3,4 – 4,0
Cor	marrom-escuro	Cinzas	2,7 – 10,2

2.6. Areia

A areia é um material granular composto por fragmentos de rochas e partículas minerais de pequenas dimensões, enquadra-se na família dos materiais cerâmicos, sendo inorgânica, cristalina e quimicamente estável Caracterizada principalmente pelo tamanho das partículas, situando-se entre o cascalho (mais grosseiro) e o lodo (mais fino). Do ponto de vista geotécnico, a areia pode ser considerada também como uma classificação de solo, correspondendo a materiais que apresentam mais de 85% de partículas de areia em massa. A sua composição varia conforme a origem e as condições geológicas locais. Em regiões continentais interiores e não tropicais,

predomina a areia de sílica (SiO_2), geralmente na forma de quartzo. Outro tipo frequente é a areia carbonática, constituída por carbonato de cálcio (CaCO_3), mais comum em regiões costeiras e ambientes marinhos (Maunahan & Adeba, 2021).

As propriedades da areia, apresentadas na tabela 4, evidenciam características fundamentais para a fabricação de compósitos.

Tabela 4: Propriedades da areia.

Propriedade	Descrição
Inércia química	A areia é quimicamente estável, não reagindo com outros componentes da mistura, garantindo a integridade do material ao longo do tempo.
Estabilidade térmica	Resiste a altas temperaturas sem sofrer alterações significativas, essencial durante o processo de queima das telhas.
Distribuição granulometria	Uma granulometria adequada melhora a compactação da massa, resultando em telhas mais densas e resistentes.
Baixa absorção de água	Contribui para a impermeabilidade das telhas, aumentando sua durabilidade em ambientes húmidos.

Fonte: Adaptado (Industrial teste, 2008).

2.6.1. Classificação da areia

As areias podem ser classificadas em finas, médias ou grossas, conforme o diâmetro das partículas. De forma geral, são categorizadas como: fina (0,05 a 0,42 mm), média (0,42 a 2 mm) e grossa (2 a 4,8 mm) (Industrial teste, 2008). A granulometria da areia influencia directamente as propriedades mecânicas e a qualidade final dos compósitos.

A areia fina proporciona uma superfície mais homogénea, mas pode aumentar a porosidade, comprometendo a resistência mecânica. A areia média oferece um equilíbrio entre trabalhabilidade e durabilidade, sendo a mais empregada na produção de compósitos. Já a areia grossa tende a dificultar a compactação da mistura, resultando em produtos com menor resistência e maior rugosidade superficial.

2.7. Métodos de Moldagem

A moldagem é uma etapa essencial no processamento de materiais, sendo responsável por conferir a forma, estrutura e propriedades finais ao produto. A escolha da técnica de moldagem depende do tipo de polímero, da geometria da peça e das condições de processamento (temperatura, pressão e tempo de resfriamento).

Entre os métodos mais utilizados na indústria de polímeros destacam-se: moldagem por injeção, moldagem por compressão, extrusão, moldagem por sopro e laminação (Maunahan & Adeba, 2021).

- Moldagem por compressão: nesse processo a mistura dos materiais é colocada em uma cavidade do molde, sendo então fechada, aplicando-se calor e pressão para dar forma e curar o compósito. Essa técnica é adequada para materiais termoplásticos e compósitos com cargas e fibras (Amaral, 2024).
- Moldagem por extrusão: o material é continuamente empurrado por um parafuso por um orifício calibrado (matriz), adquirindo forma de placa ou perfil longo, que depois é cortado no comprimento desejado. Após a extrusão, o material é resfriado e cortado. É usada na fabricação de tubos, perfis, chapas e fios (Maunahan & Adeba, 2021).
- A moldagem por injeção: nesse método, a matriz plástica é fundida e injectada sob pressão em uma cavidade do molde (Ribeiro, 2018).
- Moldagem por Sopro: Consiste em insuflar ar comprimido em um tubo de polímero aquecido, expandindo-o até encostar nas paredes do molde. Após o resfriamento, o material solidifica, formando recipientes ocos como garrafas e frascos. As ilustrações estão representadas na figura 11.

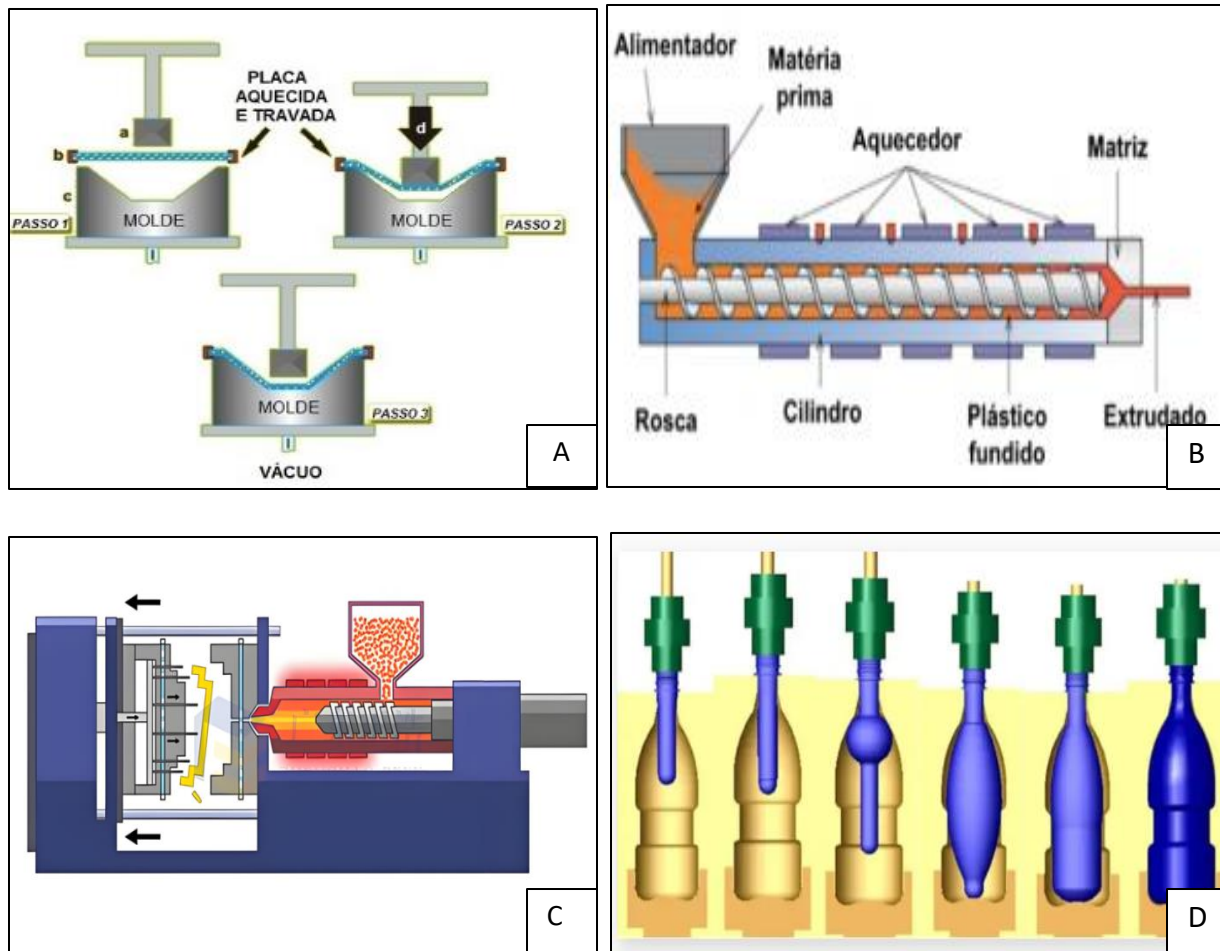


Figura 11: Métodos de Moldagem por A- compressão, B- extrusão, C–injeção e D–Sopro. Fonte: (<https://www.sabinia.com.br/moldagempolimeros>)

2.8. Análise do ciclo de vida (ACV)

ACV é uma técnica que examina as entradas e saídas de um produto durante todo o seu ciclo de vida, com o objectivo de avaliar seus impactos ambientais. (Farias, 2024).

Conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044, a ACV é um método que avalia os impactos ambientais associados a um produto ou serviço em todas as fases de seu ciclo de vida, desde a extracção das matérias-primas, passando pela produção, transporte, uso, até a disposição final ou reciclagem (IBICT, 2022). A norma ISO 14040 estabelece os fundamentos e a estrutura para a condução e relato de estudos de ACV, ao passo que a ISO 14044 fornece os requisitos e recomendações para sua aplicação. (Mansiha & Farret, 2017).

A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta importante para otimizar processos produtivos, apoiar a tomada de decisões estratégicas nas empresas e fortalecer acções de marketing, particularmente no marketing verde, promovendo produtos ambientalmente correto (ISO14004, 2009).

2.8.1. Fases da ACV

O processo de avaliação do ciclo de vida compreende quatro etapas, conforme ilustrado na Figura 12: definição de objectivos e escopo, condução de análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados obtidos. (ISO14040, 2009).

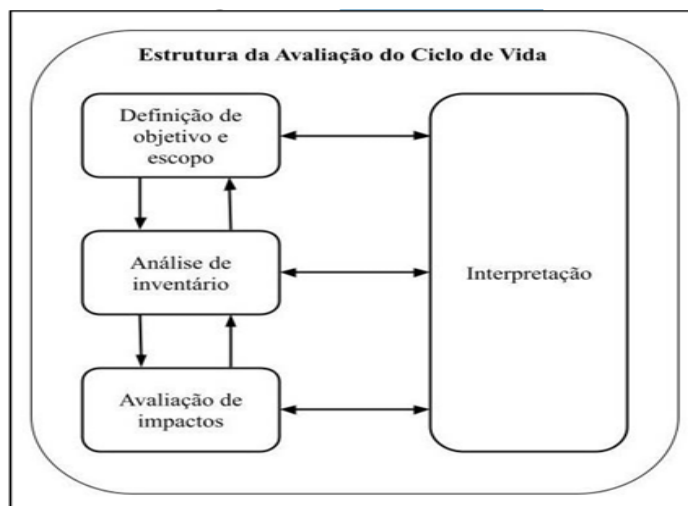


Figura 12: Fases da ACV

Fonte: **(Farias, 2024)**

Definição de objectivo e escopo visa estabelecer as finalidades do estudo, compreender as motivações e identificar o público-alvo, ao passo que o escopo define o sistema de produto, seus limites e a unidade funcional associada.

Análise do inventário do ciclo de vida (ICV) consiste na fase em que são reunidas informações sobre fluxos de massa, energia, resíduos e emissões relevantes ao sistema em estudo.

Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), esta fase analisará os impactos ambientais potenciais do ciclo de vida, ligando os dados do inventário às categorias de

impacto, e estabelecendo indicadores de impacto para quantificar e interpretar os danos ambientais potenciais. (Farias, 2024)

Interpretação do ciclo de vida, neste estágio, os resultados alcançados são reunidos, permitindo assim chegar a uma conclusão acerca dos impactos conforme o objectivo estabelecido previamente.

2.8.2. Método de avaliação de impacto

Existem diversos métodos de avaliação de impacto ambiental desenvolvidos com base em diferentes modelos científicos e abordagens conceituais. Entre os mais utilizados destacam-se o CML, ReCiPe, TRACI, Eco-indicator 99 e o ILCD 2011, cada um com particularidades em termos de categorias de impacto.

O método ILCD 2011 *Midpoint* (*International Reference Life Cycle Data System 2011 Midpoint*) é um método de avaliação de impacto ambiental desenvolvido pela Comissão Europeia, através do *Joint Research Centre (JRC)*. O seu principal objectivo é padronizar e harmonizar as práticas de avaliação de ciclo de vida na União Europeia, promovendo transparência, consistência e comparabilidade entre diferentes estudos ambientais (Bueno & Mendes, 2016).

O método baseia-se numa abordagem de ponto médio, quantificando os potenciais impactos ambientais das emissões e do uso de recursos, antes da conversão em danos finais. Cada categoria de impacto é expressa numa unidade específica, permitindo a comparação entre diferentes fluxos ambientais.

O *ILCD 2011 Midpoint* recomenda a avaliação de 16 categorias de impacto ambiental, das quais são apresentadas na tabela 5.

Tabela 5: Categorias para avaliação de impacto ambiental segundo o método *ILCD 2011 Midpoint*

Categoria de impacto	Unidade	Descrição
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	Potencial de gases de efeito estufa em contribuir para o aquecimento global.
Formação de ozono	kg NMVOC	Formação de ozono troposférico devido

fotoquímico (smog)	eq	à presença de compostos voláteis.
Material particulado (PM2.5)	kg PM2.5 eq	Impacto de partículas que afectam a qualidade do ar e a saúde.
Depleção de recursos abióticos (minerais e fósseis)	kg Sb eq / MJ	Esgotamento de recursos não renováveis.
Uso da água	m ³	Consumo e escassez de água doce em sistemas ambientais.

2.8.3. *Software* para análise do ciclo de vida

O *software* de ACV é utilizado para simplificar a administração operacional em pesquisas dessa natureza. Os estudos de ciclo de vida, em geral, são complicados, ao necessitarem de uma abundância de informações a serem organizadas e requerem bancos de dados de diversos produtos. Utilizar as ferramentas computacionais possibilita melhorar a confiabilidade dos cálculos, das conclusões e das recomendações nas pesquisas. (Gatti, 2022).

O *OpenLCA* é um programa gratuito empregado na avaliação do ciclo de vida, oferecendo diversas funcionalidades e contando com um extenso conjunto de dados. Por ser um *software* de código aberto, qualquer um pode realizar modificações, sendo criado pela *GrenDelta* para a modelagem e análise do *Life Cycle Assessment*, com muitas possibilidades de importação e exportação (OPENLCA, 2024).

2.9. Quadro legal ambiental em Moçambique

Moçambique possui um conjunto estruturado de leis, decretos e regulamentos que orientam a gestão de resíduos sólidos e plásticos, o licenciamento ambiental e a definição de padrões técnicos. A Lei do Ambiente (Lei n.º 20/97) estabelece os princípios gerais de protecção ambiental, enquanto decretos subsequentes detalham a gestão de resíduos urbanos (Decreto n.º 94/2014) e o processo de Avaliação de Impacto Ambiental (Decreto n.º 54/2015). Além disso, as Normas Moçambicanas (NM) incorporam referências internacionais, incluindo requisitos técnicos aplicados a materiais de construção, como as telhas cerâmicas.

Instrumento	Conteúdo principal
Lei nº 20/97, de 1 de Outubro	Estabelece o sistema nacional de gestão ambiental e os princípios de preservação, participação pública e poluição zero; obrigações de avaliação prévia de actividades potencialmente impactantes.
Decreto número 94/2014, de 31 de Dezembro de 2014.	O regulamento sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos atribui responsabilidades aos municípios, define as etapas de colecta, triagem, transporte e disposição final, exige a elaboração de planos municipais de resíduos e estabelece a classificação das diferentes categorias.
Decreto n.º 79 de 28 Dezembro de 2017	Regulamento sobre Responsabilidade Ampliada do Produtor (RAP) e Taxa Ambiental sobre Embalagens: obriga fabricantes e importadores de embalagens a financiar a gestão de seus resíduos, implementando sistemas de colecta e reciclagem pós-consumo.
Decreto n.º 11 de 15 Junho de 2006	Regulamenta a inspecção ambiental, definindo procedimentos de fiscalização e sanções para infracções às normas de protecção ambiental e gestão de resíduos.
NORMA ABNT NBR 15310: 2005	Componentes cerâmicos — Telhas — Terminologia, requisitos e métodos de Ensaio
Constituição da República de Moçambique (2004)	Preconiza o direito de todos a um meio-ambiente equilibrado e saudável e impõe ao Estado a obrigação de garantir a protecção e melhoria da qualidade ambiental.

Capítulo III

3. PROCEDIMENTO E MÉTODO EXPERIMENTAL

Para a efectivação do procedimento experimental, buscou-se desenvolver uma mistura otimizada de resíduos de plástico PET, areia e fibra de coco para a produção de telhas. O objectivo foi obter um compósito com propriedades físicas e mecânicas adequadas para aplicações na construção civil, valorizando resíduos locais e promovendo a economia circular. O estudo foi realizado na da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane (UEM).

As principais etapas do processo são apresentadas na figura 13.

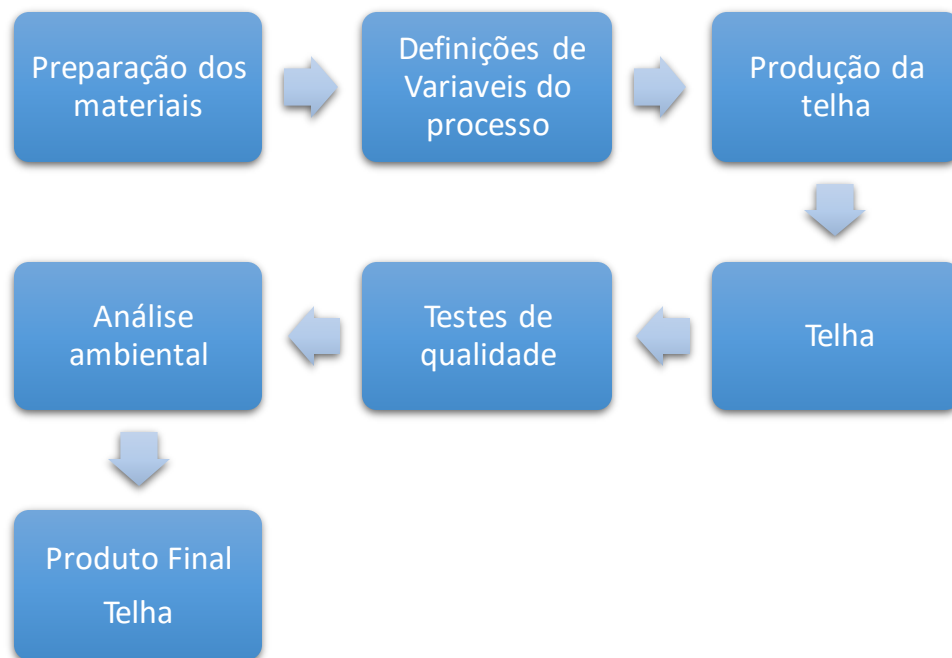


Figura 13: Etapa do procedimento experimental para a produção das telhas sustentáveis.

3.1. Materiais e preparação dos materiais

Nesta etapa procedeu-se à recolha, selecção e preparação dos materiais utilizados na experiência.

3.1.1. Resíduos plásticos

Foi utilizado o plástico PET como principal componente polimérico. Esse material actua como agente ligante, cuja função é envolver e aglutinar os demais constituintes da mistura (areia e fibra), garantindo coesão estrutural, impermeabilidade e resistência química para telha. Além disso, o PET confere leveza, maleabilidade e resistência às intempéries, características desejáveis para materiais destinados à cobertura. Conforme ilustrado na figura 14, foram utilizados resíduos de garrafas plásticas PET como matéria-prima no processo produtivo. Esse processo de fusão possibilita a moldagem térmica sem a necessidade de utilização de cimento.



Figura 14: Resíduos de garrafas plásticas PET

Os resíduos plásticos foram recolhidos em pontos de descarte localizados no bairro das Mahotas, na cidade de Maputo, e na estação de recolha de resíduos plásticos situados no bairro de Hulene, também em Maputo. O plástico PET foi posteriormente cortado em pequenos fragmentos, com dimensões médias entre 1 e 2 cm, a fim de facilitar o processo de fusão. Em seguida, o material foi lavado com água, seco ao ar e armazenado em sacos até o momento de sua utilização.

3.1.2. Obtenção e Preparação da Fibra de Coco

A fibra de coco foi obtida a partir de cascas secas colectadas em centros de venda de coco no mercado do Zimpeto e no mercado informal localizado na paragem Bombas, na Avenida de Moçambique (bairro do Aeroporto).

O processo de preparação da fibra incluiu a remoção manual da casca externa, o desfibramento com martelo, o corte com tesoura até atingir o tamanho desejado

(aproximadamente 3 a 5 cm de comprimento), a secagem ao sol por um período de 1 a 2 dias e, por fim, o peneiramento com rede fina para uniformização da espessura. A fibra de coco actua como reforço natural na mistura, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas do material. Conforme ilustrado na figura 15, apresenta-se a fibra de coco utilizada no processo experimental.



Figura 15: Fibra de coco

3.1.3. Caracterização da areia

A areia foi obtida de um estaleiro de material de construção, foi lavada, seca ao sol e posteriormente peneirada com peneira de malha fina para remover materiais orgânicos e obter uma granulometria desejada, granulometria estimada: menor que 2 mm, conforme ilustrado na figura 16. A areia desempenha a função de material de enchimento, promovendo rigidez, estabilidade dimensional. A presença de areia melhora a distribuição de cargas, reduz a deformação térmica da matriz plástica e contribui para o aumento da dureza superficial e durabilidade da telha.

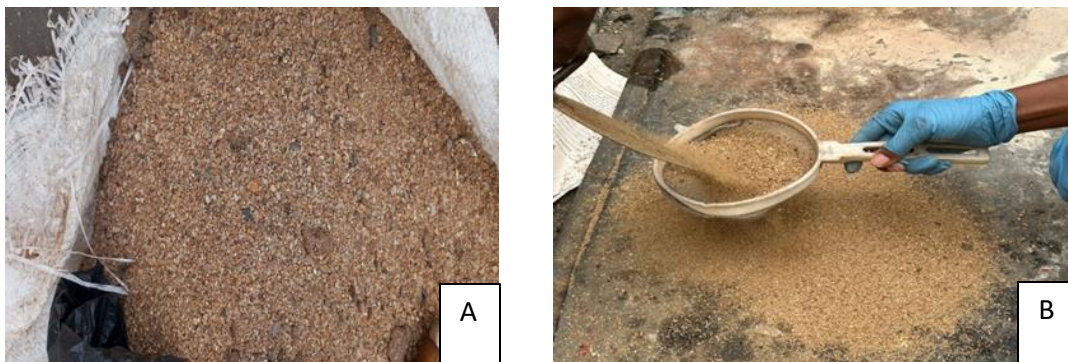


Figura 16: Areia antes da peneiração (A) e areia a ser peneirada (B).

3.1.4. Molde

O molde de ferro fundido utilizado foi projectado e fabricado, adaptado às dimensões de uma telha convencional do tipo colonial (capa e canal), ilustrado na figura 17, com medidas de 42 cm × 32 cm × 3 cm. A estrutura foi confeccionada a partir de chapas de ferro soldadas, apresentando uma abertura superior e uma base removível, o que facilitou tanto o processo de prensagem quanto o desmolde do compósito.



Figura 17: Molde usado no processo

3.1.5. Ferramentas e equipamentos

Para a execução das etapas experimentais, foram empregadas diversas ferramentas e equipamentos. A tabela 6 apresenta as principais ferramentas utilizadas no processo experimental, bem como suas respectivas funções.

Tabela 6: Ferramentas utilizadas no processo experimental

Ferramentas	Função
Molde metálico	Moldar as telhas com formato padronizado.
Tambor metálico	Misturar os materiais durante o processo.
Balança digital	Pesar os materiais
Peneira de rede fina	Uniformizar a areia e a fibra de coco.

Tesoura	Cortar os plásticos reciclados (PET).
Martelo	Quebrar e desfiar as cascas de coco.
Lenha	Fonte de calor do processo.
Termómetro	Monitora a temperatura
Luvras térmicas	Proteger as mãos durante o manuseio.

Fonte: autor

3.2. Desenvolvimento do processo de fabricação das telhas

3.2.1. Variáveis de estudo do processo

Nesta etapa, o processo experimental foi desenvolvido com base na identificação e controle de variáveis que influenciam directamente o desempenho das telhas.

Variáveis independentes (controladas) — São aquelas manipuladas durante o experimento para observar seus efeitos sobre as propriedades finais do produto.

Variáveis dependentes (avaliadas) — São as variáveis que dependem da composição e do processo, e sendo medidas por meio de ensaios.

As variáveis consideradas no presente estudo estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7: Variáveis de estudo

Variáveis independentes	Variáveis dependentes
Proporção dos materiais	Inflamabilidade
Tipo de plástico (PET)	Absorção de água
Tempo e temperatura de fusão	Carga de ruptura à flexão
Tempo de prensagem e resfriamento	Densidade aparente

3.2.2. Composição das amostras

As proporções dos materiais foram definidas por meio de testes exploratórios, com base em estudos similares Inicialmente, conforme apresentado na tabela 8.

Tabela 8: Proporções das amostras.

Amostra	Resíduos de Plástico PET	Areia	Fibra de coco
S1	70%	20%	10%
S2	50%	40%	10%
S3	30%	60%	10%

Com o objectivo de identificar as composições mais adequadas, foram inicialmente produzidas amostras experimentais (S1 a S3) em pequena escala. Essas amostras foram preparadas em corpos de prova reduzidos, para a observação do comportamento da massa quanto a fusão do plástico, incorporação dos agregados, homogeneidade da massa, facilidade de moldagem, textura e consistência após o resfriamento.

Os testes iniciais evidenciaram que a amostra S3 apresentava dificuldades de compactação, excesso de rigidez e difícil de moldar. Após essa triagem, foram seleccionadas as amostras S1 e S2 para continuidade do estudo, com base nos seguintes critérios: amostra S1 apresentou excelente fusão da matriz plástica, distribuição homogênea da fibra, uma massa leve e flexível. Amostra S2 apresentou bom equilíbrio entre rigidez e forma da mistura, mostrou uma boa consistência após resfriamento.

3.2.3. Procedimento de produção da telha

A primeira etapa consiste na preparação do material onde os resíduos plásticos foram limpos, cortados e triturados, a fibra foi desfiada e seca, e a areia foi peneirada para garantir granulometria adequada, a seguir foi efectuada a pesagem e dosagem dos

materiais (plástico, areia e fibra de coco), com base nas proporções previamente definidas. Após essa etapa, o tambor metálico é colocado sobre o fogo (a lenha) para aquecimento por aproximadamente 10 minutos. Em seguida, os pedaços de plástico são adicionados no tambor, onde são deixados derreter por 15 a 20 minutos até atingir um estado lamacento, ou seja, um ponto de fusão onde o plástico adquire textura viscosa, permitindo incorporar os demais componentes. A fusão ocorre gradualmente, com constante observação da temperatura, monitorada com termómetro, mantendo-se entre 250°C a 265 °C. Com o plástico parcialmente derretido, inicia-se a adição progressiva da areia peneirada. A mistura é mexida continuamente com um bastão metálico resistente, para garantir a união completa entre o plástico derretido e os grãos de areia. A mistura deve adquirir um aspecto homogéneo, firme e pegajoso. Assim que a areia estiver bem integrada ao plástico, a fibra de coco previamente desfiada e seca é adicionada em pequenas porções. A mistura é novamente mexida até que todos os materiais estejam bem distribuídos, formando uma massa densa e uniforme.

Antes de verter a mistura no molde metálico, aplica-se óleo de cozinha usado nas paredes internas do molde, facilitando a remoção da peça após o arrefecimento. A massa, ainda quente, é subsequentemente colocada no molde com o uso de uma colher de metal.

Foi aplicado a moldagem por compressão onde a mistura no molde é compactada manualmente, utilizando (bloco de cimento) adaptado para actuar como prensa. A pressão aplicada ajuda a eliminar vazios, uniformizar a espessura da telha. A telha é mantida no molde por cerca de 1 hora, permitindo o arrefecimento natural da massa. Depois desse tempo, o molde é atentamente aberto e a peça é retirada.

A telha desmoldada é deixada em repouso por 24 horas para o arrefecimento completo. Embora o plástico não exija cura química como o cimento, esse período garante estabilização dimensional e evita deformações. Após esse tempo, a telha é inspeccionada visualmente (ver figura 18).

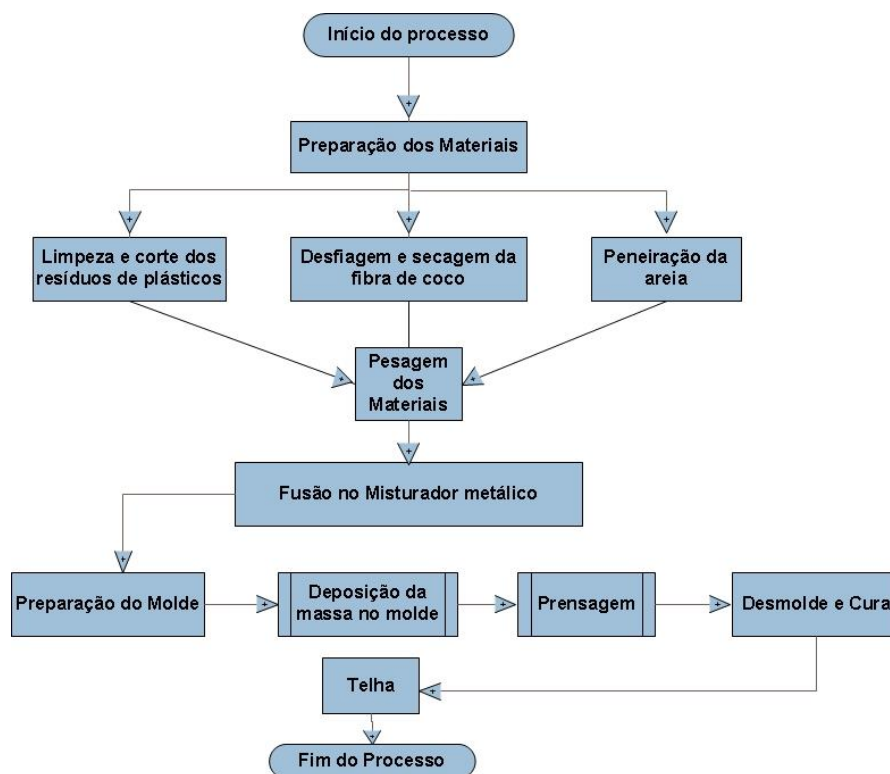


Figura 18: Processo de produção da telha

As imagens a seguir na figura 19, ilustram a telha produzida pelo processo descrito anteriormente, correspondendo ao modelo adaptado da telha colonial (capa e canal).



Figura 19: Imagens representativas da telha produzida.

3.3. Ensaios para avaliação das propriedades físicas e mecânicas

Nesta secção foram realizados ensaios físicos e mecânicos, com o objectivo de analisar as principais propriedades do material. Os ensaios conduzidos foram os seguintes:

3.3.1. Absorção de água

O ensaio de absorção de água visa determinar a capacidade do material em absorver massa de água quando exposto à imersão em água, parâmetro fundamental para avaliar a durabilidade e a resistência à degradação do material. Este ensaio foi conduzido conforme os procedimentos descritos na norma. ABNT NBR 15310,(2005), que trata de telhas cerâmicas, mas cuja metodologia é aplicável a materiais alternativos de cobertura conforme ilustrado na figura 20.

As amostras foram inicialmente recebidas, identificadas e limpas no laboratório para eliminar resíduos superficiais que poderiam interferir na medição. Em seguida, procedeu-se à determinação da massa húmida (M_u). Para isso, as amostras foram colocadas em um recipiente de tamanho adequado, completamente cheio de água em temperatura ambiente, permanecendo submersas durante 24 horas para garantir a saturação completa. Após esse período, as amostras do ensaio foram retiradas da água, em seguida, pesadas em uma balança. O valor obtido foi registado como massa húmida (M_u), expressa em gramas.

Na etapa seguinte, realizou-se a determinação da massa seca (M_s). Os corpos de prova foram levados para uma estufa regulada a 105 °C, permanecendo por 24 horas. Após esse processo, cada amostra foi imediatamente pesada em balança, registando-se o valor obtido como massa seca (M_s), também expressa em gramas. (NBR 15310, 2005).



Figura 20: A — Amostras submersas na água, B — Pesagem da amostra, C — Amostras na estufa Fonte: Autor

Com os valores de M_u e M_s , realizou-se a determinação do índice de absorção de água (AA). O cálculo foi feito segundo a Equação (1):

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (1)$$

Onde: M_u corresponde à massa húmida do corpo de prova e M_s à massa seca, ambas expressas em gramas.

3.3.2. Ensaio de carga de ruptura à flexão

A carga de ruptura à flexão é um parâmetro que expressa a capacidade do material resistir a esforços de dobramento antes de sua ruptura, sendo fundamental para avaliar

o desempenho estrutural e a segurança das telhas em condições reais de uso (Silva, 2019). Este ensaio foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 15310,(2005)

O teste foi conduzido em uma prensa universal Tinius Olsen, equipada com dois apoios inferiores na forma de roletes paralelos, sobre os quais cada corpo de prova foi posicionado de modo a ficar apoiado em suas extremidades. Em seguida, uma carga foi aplicada no centro da telha, por um terceiro rolete superior, incidindo progressivamente até o momento da ruptura. A uma velocidade de 1,5 mm/min, garantindo uniformidade no processo, conforme ilustrado na figura 21.

Durante o ensaio, foi registrado o valor da força máxima (F) no instante de ruptura de cada amostra, expresso em Newtons (N). Esse valor representa o limite máximo de resistência que a telha consegue suportar antes da fractura.



Figura 21: Momento do ensaio de flexão e prensa utilizada. Fonte: autor

3.3.3. Ensaio de inflamabilidade

A inflamabilidade é uma propriedade que avalia o comportamento de um material quando exposto ao fogo, medindo sua taxa de queima. Essa propriedade é especialmente importante em compósitos contendo plásticos, visto que muitos polímeros apresentam elevada combustibilidade.

O ensaio de inflamabilidade foi conduzido conforme os procedimentos da (ASTMD635-14, 2014), amostras foram preparadas com 80 mm de comprimento, cada corpo de prova foi submetido a acção uma chama por cerca de 30 segundos, após a retirada da

chama, mediu-se o comprimento queimado (L) em mm e o tempo de queima (T) em minutos (ilustrado na figura 22). A partir desses dados, a taxa de queima linear (V) foi determinada pela Equação (2):

$$V = 60 \times \frac{L}{T} \quad (2)$$

Onde:

- V = taxa de queima linear (mm/min);
- L = comprimento queimado da amostra (mm);
- T = tempo de queima da amostra (min).

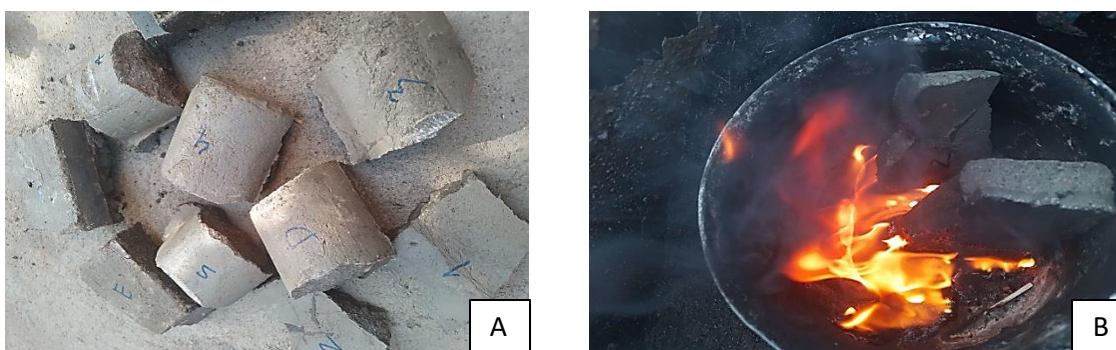


Figura 22: A — Amostras usadas no ensaio, B — Amostras submetidas à chama.
Fonte: Autor

3.3.4. Densidade aparente

Define-se como uma grandeza física obtida a partir da divisão da massa de um corpo de prova pelo seu volume externo. É obtida dividindo-se a massa seca da espécime pelo seu volume externo (V). O volume é calculado pelo método de Arquimedes: submergindo o espécime e medindo o volume no recipiente antes e após de colocar a amostra, ilustrado na figura 23.

A densidade aparente (ρ) é calculada conforme a Equação (3):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_2 - V_1} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3)$$

Onde: m - massa da amostra, V1 - volume recipiente sem a amostra e V2 - volume do recipiente com amostra.

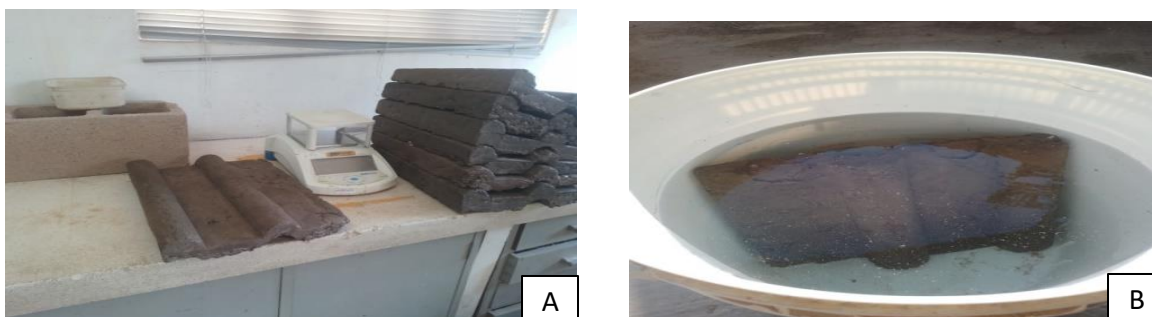


Figura 23: A — Amostras para o processo de pesagem, B — Determinação do volume das amostras.

3.4. Metodologia de análise de ciclo de vida (ACV)

A avaliação do ciclo de vida teve como finalidade examinar os potenciais impactos ambientais relacionados à produção das telhas, abrangendo todas as fases pertinentes do processo produtivo. O desenvolvimento do estudo foi conduzido conforme os princípios e directrizes estabelecidos pelas normas ISO 14040:2006, que tratam da estrutura e fundamentos da ACV, e ISO 14044:2006, que detalham os requisitos e orientações para a sua aplicação.

A modelagem e os cálculos foram realizados utilizando o *software* OpenLCA (versão 2.4.1), ilustrado na figura 24. O programa oferece diversos bancos de dados que podem ser utilizados consoante os objectivos do estudo. O banco de dados seleccionado para esta tarefa foi o banco de dados. “*elcd_bottles_20220715*”, da *European reference life cycle database* que fornece dados referenciais para fluxos de materiais e energia.

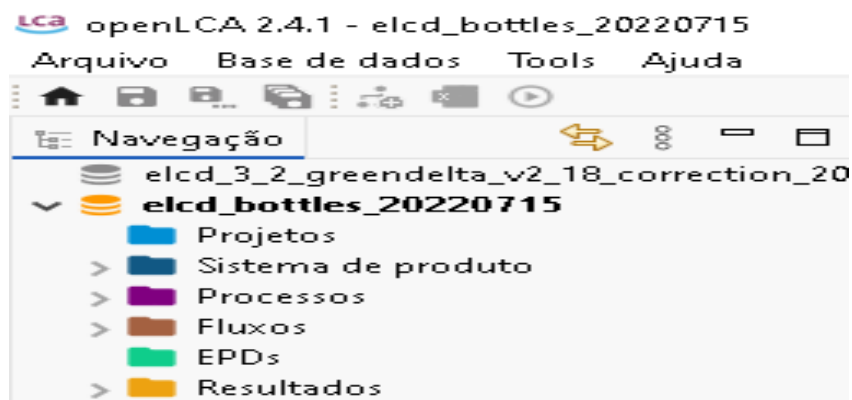


Figura 24: Painel de navegação do *software* OpenLCA

3.4.1. Definição do escopo e fronteiras do estudo

O escopo da ACV abrangeu todas as fases envolvidas no processo de produção das telhas, apresentado na figura 25. A extração e preparação dos materiais, mistura dos componentes até a obtenção do produto final e a fase de uso e descarte final não foram consideradas neste estudo.

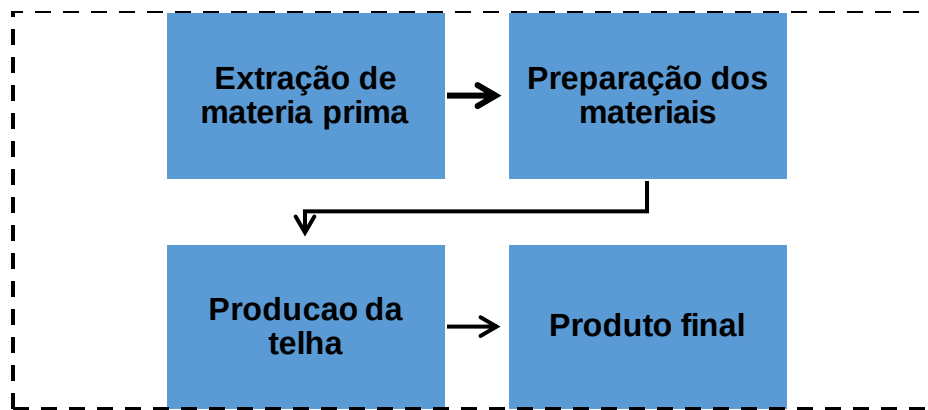


Figura 25: Fronteira de análise do ciclo de vida

A unidade funcional adoptada neste estudo corresponde à produção de uma telha, sendo analisadas duas amostras de formulação: S1: 70% plástico, 20% areia, 10% fibra de coco e S2: 50% plástico, 40% areia, 10% fibra de coco

3.4.2. Análise do inventário do ciclo de vida (AIC)

A fase de inventário é responsável pela identificação e quantificação de todos os fluxos de entrada e saídas relacionadas ao sistema em estudo. O inventário foi construído a partir da recolha de dados primários, medidos directamente durante o processo experimental (quantidades de resíduos de plástico PET, areia, fibra de coco e lenha), e de dados secundários, obtidos na base de dados *ELCD*, utilizados para complementar informações sobre emissões atmosféricas.

Cada fluxo foi devidamente registado e modelado no *software OpenLCA*, respeitando as fronteiras do sistema definidas, conforme apresentado na figura 26 e 27.

Nas entradas, consideraram-se as massas de fibra de coco, resíduos de plástico PET, areia (Sand 0/2) e lenha (Wood).

As emissões, produto final e resíduos gerados durante o processo foram incluídos na secção de saídas do inventário ilustrados na figura 26 e 27, representam fluxos libertados como resultado directo das actividades do sistema, neste caso, da combustão da lenha. No contexto da avaliação do ciclo de vida, os fluxos de entrada correspondem aos recursos consumidos (matérias-primas e energia), enquanto os fluxos de saída representam os produtos, co-produtos, emissões e resíduos formados.

A estimativa das emissões provenientes da combustão da lenha representada na saída do sistema foi realizada com base em factores de emissão disponíveis na literatura e nas bases de dados (*IPCC 2006*). O cálculo seguiu a relação ilustrada na equação 4 proposta pelo *IPCC*:

$$E = A \times FE \quad (4)$$

Onde:

- E é a massa do poluente emitido (kg);
- A é a massa de combustível consumido (kg);
- FE é o factor de emissão (kg de poluente/kg de combustível).

Os factores de emissão adoptados foram:

- Dióxido de carbono (CO_2): 1,7000 kg CO_2 /kg de lenha;
- Monóxido de carbono (CO): 0,0900 kg CO/kg de lenha;
- Material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$): 0,0142 kg $\text{MP}_{2,5}$ /kg de lenha;
- Cinzas de madeira: 2% da massa total da lenha utilizada.

Entradas/Saídas - Producao da telha S1

Entradas

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / re...	Incerteza	Avoided w...	Provedor p...
Fibra de coco		0.95000	kg		none		
Residuos de plastico PET		6.40000	kg		none		Residu...
sand 0/2	Materials production/Ot...	1.80000	kg		none		Sand 0/...
Wood	Production residues in lif...	5.00000	kg		none		Dumm...

Saídas

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / re...	Incerteza	Produto de...	Provedor p...
Telha		1.00000	Item(s)		none		
Carbon dioxide, bioge...	../Emission to air/high p...	8.82400	kg		none		
Carbon monoxide	../Emission to air/high p...	0.45000	kg		none		
Particulates, < 2.5 um	../Emission to air/high p...	0.07120	kg		none		
Wood ashes		0.10000	kg		none		

Figura 26: Fluxos de entradas e saídas associados ao processo de fabricação da telha S1

Entradas/Saídas - Producao da telha S2

Entradas

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / rec...	Incerteza	Avoided wa...	Provedor pa...
Fibra de coco		0.95000	kg		none		
Residuos de plastico PET		4.55000	kg		none		Residuo...
sand 0/2	Materials production/Other...	3.67800	kg		none		Sand 0/2...
Wood	Production residues in life ...	3.00000	kg		none		Dummy...

Saídas

Fluxo	Categoria	Quantidade	Unidade	Custos / rec...	Incerteza	Produto des...	Provedor pa...
Telha		1.00000	Item(s)		none		
Carbon dioxide, biogenic	../Emission to air/high pop...	5.18000	kg		none		
Carbon monoxide	../Emission to air/high pop...	0.27000	kg		none		
Particulates, < 2.5 um	../Emission to air/high pop...	0.04260	kg		none		
Wood ashes		0.06000	kg		none		

Figura 27: Fluxos de entradas e saídas associados ao processo de fabricação da telha S2

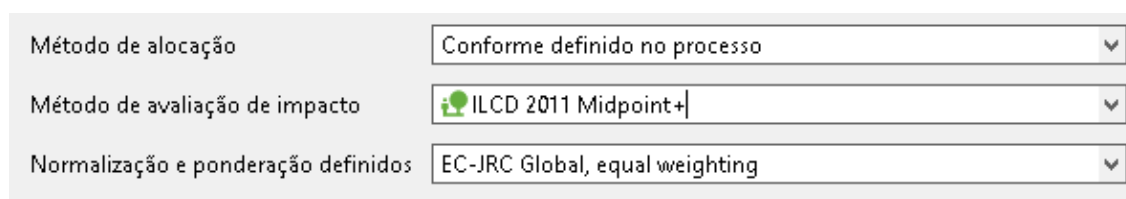
3.4.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A etapa de Avaliação de Impacto do ciclo de vida foi realizada no software OpenLCA, utilizando o método *ILCD 2011 Midpoint*, recomendado pelo *Joint Research Centre (JRC)* da Comissão Europeia. Este método foi escolhido por ser recomendado pela União Europeia e por fornecer um conjunto de impactos bem definidos ao nível de ponto intermediário (midpoint).

Após o registo do inventário das formulações S1 e S2, foi criado no *OpenLCA* um processo de avaliação de impacto para realização do cálculo, no painel de cálculo, apresentado na figura 28, seleccionou-se o método “*ILCD 2011 Midpoint+*”, de seguida foi gerada uma actividade de cálculo, vinculando o processo de produção de cada telha (S1 e S2) ao método *ILCD*.

O *software* executou o cálculo automático dos impactos com base nos fluxos de entrada e saída modelada no inventário, aplicando os factores de caracterização de cada categoria definidos pelo *ILCD*.

Durante o processamento, o *OpenLCA* converteu as emissões específicas (por exemplo, dióxido de carbono, monóxido de carbono e material particulado) em valores equivalentes (kg CO₂ eq, kg PM_{2,5} eq e kg NMVOC eq).



The image shows a software interface for selecting impact assessment parameters. It consists of three rows, each with a label on the left and a dropdown menu on the right. The first row is labeled 'Método de alocação' and has a dropdown menu showing 'Conforme definido no processo'. The second row is labeled 'Método de avaliação de impacto' and has a dropdown menu showing 'ILCD 2011 Midpoint+' with a small green icon to the left of the text. The third row is labeled 'Normalização e ponderação definidos' and has a dropdown menu showing 'EC-JRC Global, equal weighting'.

Método de alocação	Conforme definido no processo
Método de avaliação de impacto	ILCD 2011 Midpoint+
Normalização e ponderação definidos	EC-JRC Global, equal weighting

Figura 28: Painel do método do Impacto

Na sequência, definiram-se as categorias de impacto a serem analisadas:

- Aquecimento global (kg CO₂ eq);
- Formação de material particulado (kg PM_{2,5} eq);
- Formação de ozono fotoquímico (kg NMVOC eq);

Capítulo IV

4. Resultados e Discussão

4.1. Absorção de água

Neste ensaio, foram utilizadas seis amostras de telhas produzidas com diferentes composições. As amostras foram divididas em dois grupos: S1, contendo três corpos de prova com a proporção de 70% PET, 20% areia e 10% fibra de coco; e S2, com três corpos de prova compostos por 50% PET, 40% areia e 10% fibra de coco. Os resultados obtidos encontram-se apresentados no Anexo 1, tabela A1.1.

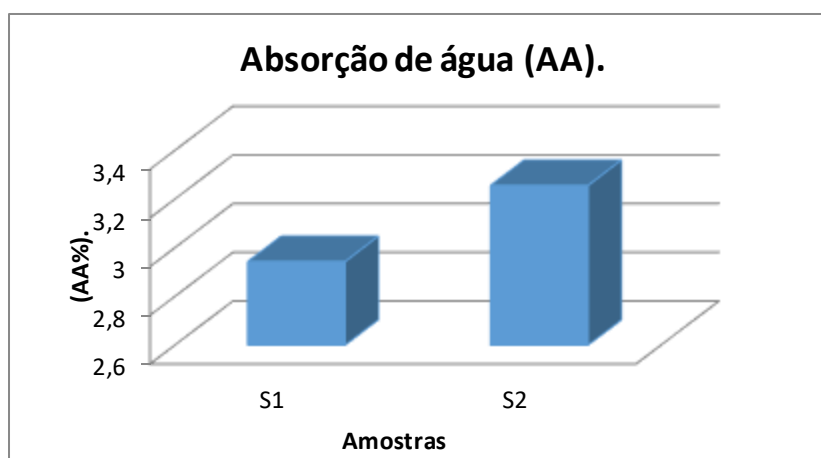


Figura 29: Gráfico do índice de absorção de água das telhas S1 e S2

Conforme apresentado na figura 29, o índice de absorção de água das amostras variou entre as formulações analisadas. As telhas do grupo S1 apresentaram uma absorção média de aproximadamente 2,94%, enquanto as amostras do grupo S2 alcançaram cerca de 3,26%.

Essa diferença pode estar relacionada à maior proporção de areia na composição S2, que tende a aumentar a porosidade do material e, conseqüentemente, a capacidade de absorção de água. Já a formulação S1, com maior teor de resíduos de PET, apresentou uma estrutura mais densa e menos porosa, resultando em menor absorção de água.

Pode-se afirmar que a formulação S1 apresentou melhor desempenho quanto à absorção de água, indicando maior resistência à penetração de. No entanto, ambas as formulações estão nos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 15310, que define o valor máximo admissível de absorção de água para telhas cerâmicas em 20% (ver anexo1 na figura A1.1).

4.2. Ensaio de carga de ruptura à flexão

Foram ensaiadas 10 telhas, divididas em dois grupos: S1 e S2, correspondentes às diferentes formulações de compósito. Os valores de força de ruptura (F) foram registrados no momento da ruptura para cada corpo de prova. Os resultados obtidos encontram-se apresentados no Anexo 1, tabela A1.2.

Os resultados obtidos no ensaio de carga de ruptura à flexão mostram diferenças entre as duas formulações estudadas (S1 e S2). O grupo S1, apresentou valor de força de ruptura média de 1080 N. Já o grupo S2, obteve como resultando médio de cerca de 1450 N. Isso demonstra que a formulação S2 apresentou desempenho superior, suportando em média cerca de 34% a mais de carga antes da ruptura quando comparada a S1, conforme ilustrado na figura 30.

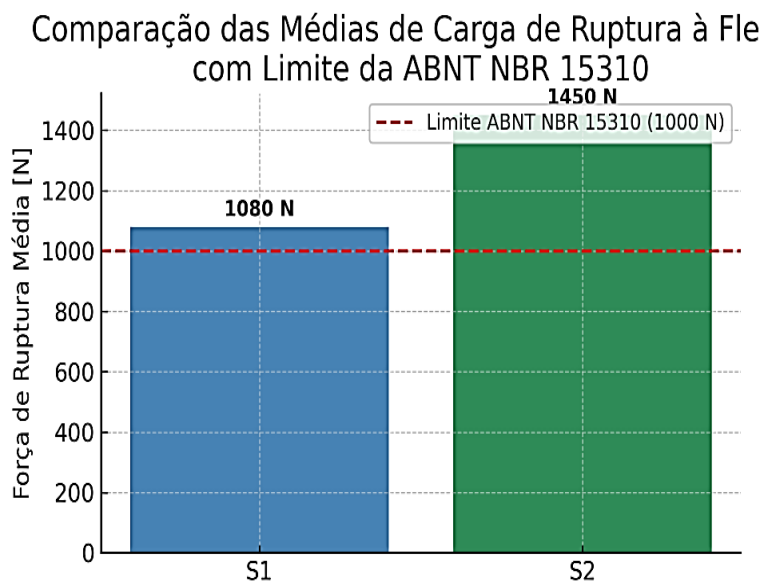


Figura 30: Comparação dos limites de carga de ruptura à flexão das telhas S1 e S2

Esse resultado pode ser explicado pela diferença na proporção dos constituintes da telha. A maior presença de areia em S2 contribuiu para a rigidez estrutural da telha, em contrapartida, a amostra S1, com maior quantidade de plástico (70%), apresentou menor resistência à flexão, visto que a matriz polimérica, embora garanta tenacidade e baixa absorção de água, é mecanicamente menos rígida que a areia. A fibra de coco, presente em igual proporção em ambas as formulações, actua como reforço complementar, contribuindo para retardar a ruptura.

Os resultados obtidos indicam que ambas as amostras apresentaram desempenho compatível com os requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 15310 (ver o anexo1, figura A1.2), que exige valores iguais ou superiores a 1000 N. Dessa forma, conclui-se que, embora ambas as formulações possam ser consideradas aceitáveis, a formulação S2 se destaca como a mais adequada, apresentando maior carga flexão.

4.3. Ensaio de inflamabilidade

O ensaio de inflamabilidade foi realizado em oito amostras, divididas em dois grupos S1 e S2 permitiu avaliar o comportamento da telha quando expostos ao fogo, considerando o comprimento queimado e a taxa de queima. Os resultados obtidos encontram-se apresentados no Anexo 1, tabela A1.3.

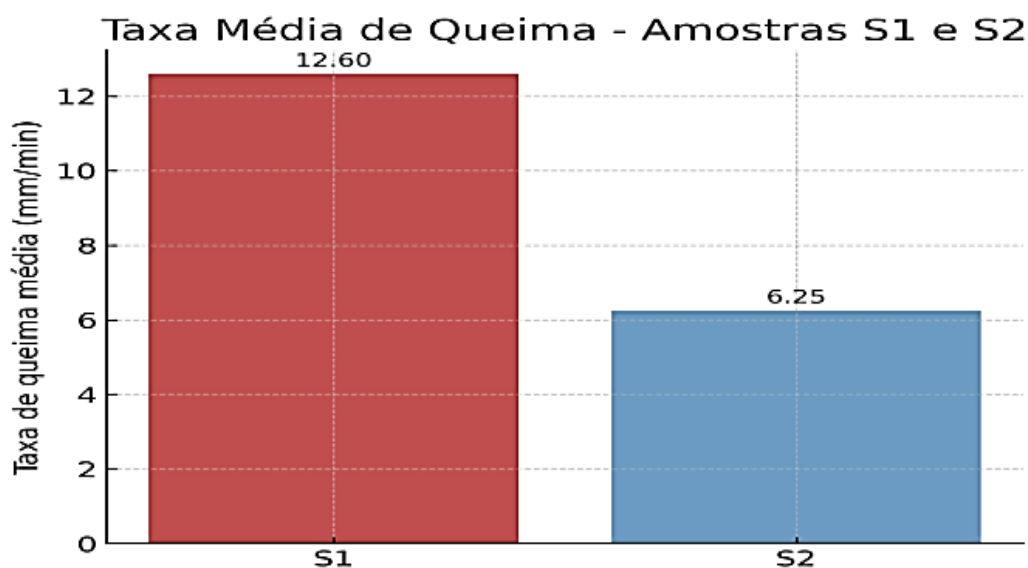


Figura 31: Gráfico que ilustra as taxas médias de inflamabilidade das amostras S1 e S2.

Observa-se na figura 31 que a amostra S1, composta por 70% de plástico, 20% de areia e 10% de fibra, apresentou maior taxa de queima de 12,6 mm/min. Por outro lado, a amostra S2, com menor teor de plástico (50%) e maior proporção de areia (40%), apresentou menor propagação da chama, com comprimento queimado com a taxa média de queima de 6,25 mm/min.

Estes resultados demonstram que o teor de plástica influencia directamente a inflamabilidade, aumentando a velocidade de queima, enquanto a presença de materiais inertes, como a areia, actua como retardante, reduzindo a propagação da chama. A adição de areia à matriz de resíduos plásticos mostrou-se particularmente eficaz, uma vez que os agregados de natureza cerâmica funcionam como barreira térmica retardando a combustão.

4.4. Densidade aparente

O ensaio foi realizado em seis corpos de prova, divididos em dois grupos com diferentes proporções de materiais. O grupo S1 foi constituído por três amostras produzidas com a composição de 70% PET, 20% areia e 10% fibra de coco, enquanto o grupo S2 foi formado por três amostras contendo 50% PET, 40% areia e 10% fibra de coco. O método utilizado baseou-se no princípio de Arquimedes, no qual o volume é obtido a partir do deslocamento de líquido após a imersão do corpo de prova. Calculou-se a densidade aparente dividindo-se a massa seca da amostra pelo volume deslocado.

Os resultados obtidos no ensaio encontram-se apresentados no Anexo 1, tabela A1.4.

Os resultados obtidos, conforme a figura 32, é possível observar a variação da massa específica entre os dois grupos. O grupo S1 apresentou 1,98 g/cm³, enquanto o grupo S2 registou 2,23 g/cm³.

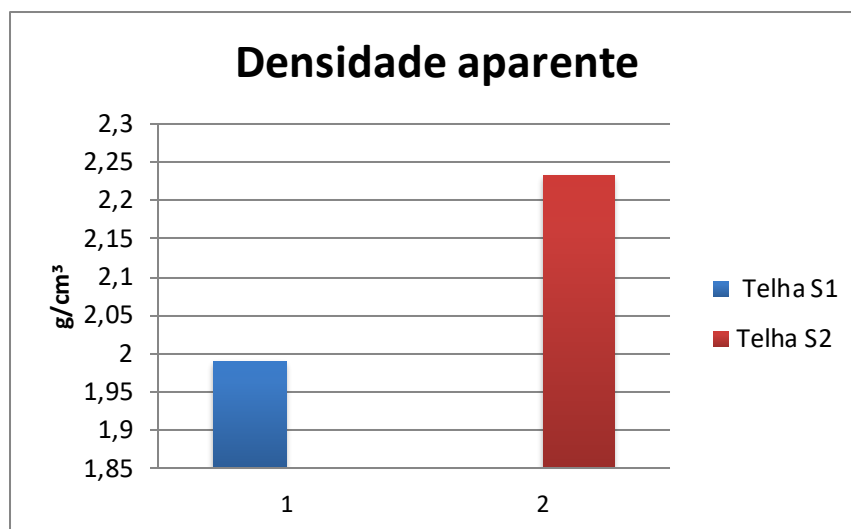


Figura 32: Comparação de densidade aparente das amostras S1 e S2.

Essa diferença representa um acréscimo na densidade aparente dos corpos de prova do grupo S2, resultado atribuído à maior proporção de areia em sua composição, uma vez que este material possui densidade superior à do PET.

De modo geral, os resultados sugerem que a maior proporção de areia contribui para o aumento da densidade aparente, o que pode implicar em melhoria das propriedades mecânicas, embora resulte também em um material mais pesado.

4.5. Avaliação dos impactos ambientais

Nesta fase, são apresentados os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), obtidos a partir da modelagem realizada no *software* OpenLCA.

4.5.1. Categoria de Impacto: Aquecimento Global

Nesta categoria, foram analisadas as contribuições dos processos que compõem o ciclo de vida das telhas para o impacto ambiental associado ao aquecimento global. Os resultados obtidos para a formulação S1 estão apresentados no Anexo 2 na figura A2.1, enquanto os resultados correspondentes à formulação S2 encontram-se no Anexo 3, figura A3.1.

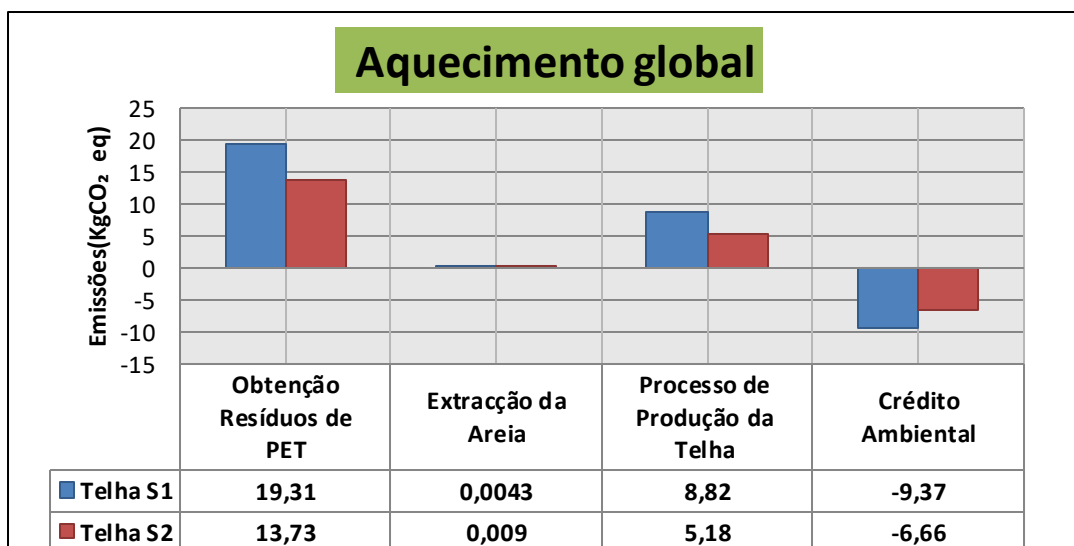


Figura 33: Contribuição por cada fase de ciclo de vida na categoria de impacto: aquecimento global

Conforme apresentado na figura 33, no cenário da telha S1, a fase de obtenção de resíduos de garrafas PET, correspondente à etapa de extração da matéria-prima, foi identificada como a principal fonte de emissões, totalizando 19,31 kg CO₂ eq. O processo de produção da telha apresentou a segunda maior contribuição, com 8,82 kg CO₂ eq, evidenciando que a matriz energética utilizada exerce influência significativa nas emissões totais. Observa-se ainda que o PET presente na formulação gerou emissões relativamente baixas, uma vez que foi apenas derretido e não submetido à combustão. A areia utilizada apresentou contribuição baixa (0,004 kg CO₂ eq devido à natureza mineral do material. Um resultado positivo, que proporcionou um crédito ambiental de – 9,37 kg CO₂ eq. Este benefício decorre da utilização de resíduos plásticos reciclados como matéria-prima.

Ainda segundo a figura 33, a telha S2 mostrou que a maior contribuição está na etapa de obtenção de resíduos de garrafas PET com 13,73kg CO₂ eq, embora inferior ao valor obtido na telha S1, o processo de produção da telha S2, contribuiu com 5,18 kg CO₂ eq, nesta etapa houve uma redução da quantidade de proporção de resíduos de garrafas PET e quantidade de lenha queimada. A areia apresentou impacto praticamente desprezível (0,009 kg CO₂ eq). Como na telha S1, verificou-se um crédito ambiental de - 6,66 kg CO₂ eq associado à valorização de resíduos plásticos

recicladados, reforçando o potencial positivo da telha quanto à mitigação do aquecimento global.

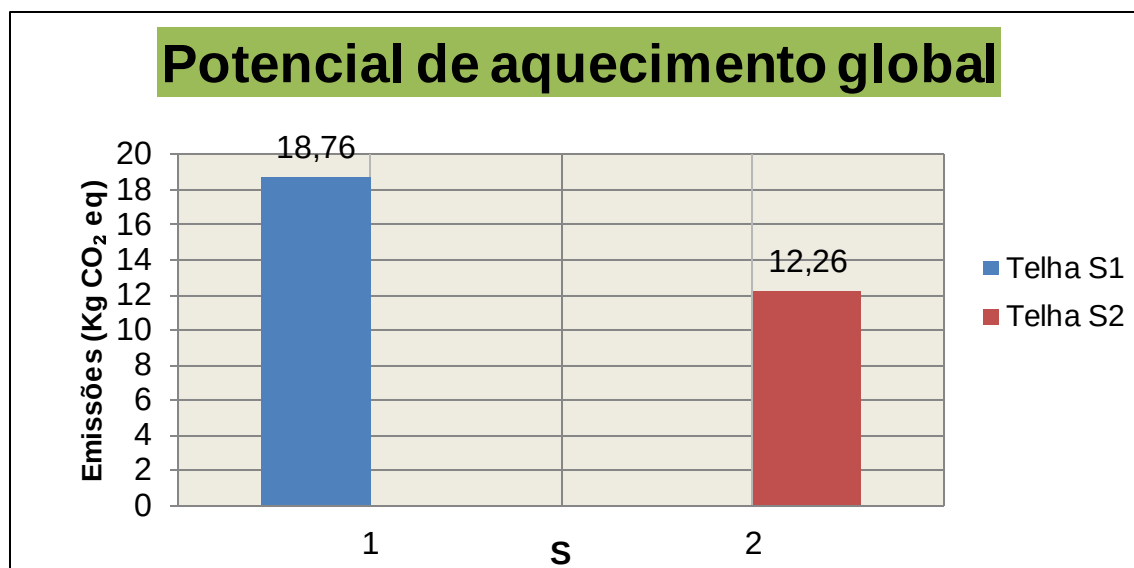


Figura 34: Comparação das emissões totais para a categoria de potencial de aquecimento global (S1 e S2)

Observa-se na figura 34 que o cenário da telha S1 apresenta um impacto global de aproximadamente 18,76 kg CO₂ eq, enquanto o cenário S2 atinge 12,26 kg CO₂ eq. Esse resultado evidencia que o S2 possui um desempenho ambiental superior, com uma redução de cerca de 35% nas emissões totais em relação ao S1

4.5.2. Categoria de Impacto: Material Particulado (PM_{2.5})

Na avaliação desta categoria, os resultados gerados a partir da contribuição dos processos do ciclo de vida foram analisados para ambas as formulações de telhas. Os dados correspondentes à telha S1 encontram-se apresentados no Anexo 2, figura A2.2, enquanto os resultados referentes à telha S2 estão dispostos no Anexo 3, figura A3.2).

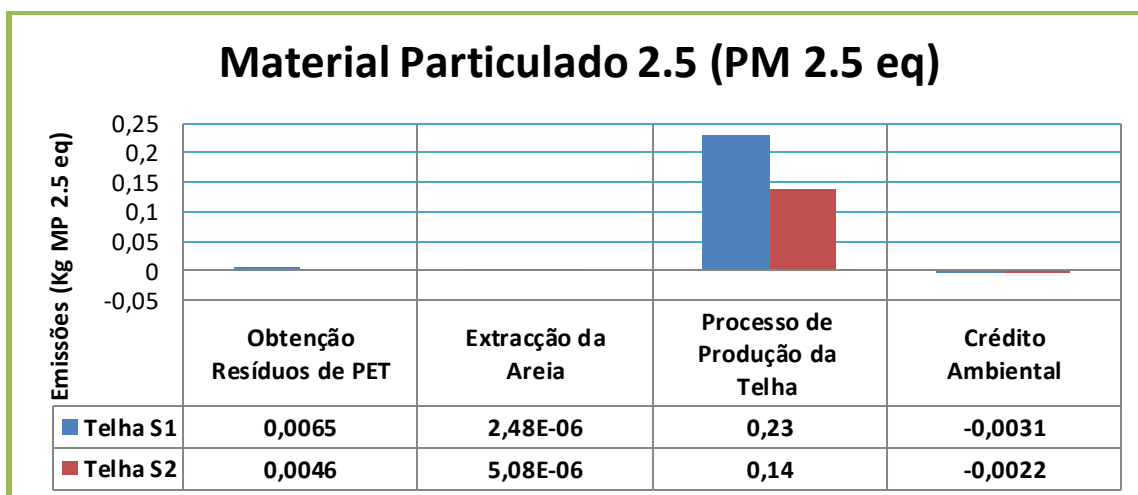


Figura 35: Contribuição por cada fase de ciclo de vida na categoria de material particulado 2.5

Verificou-se na figura 35 que tanto a telha S1 quanto a telha S2 tiveram como principal fonte de impacto o processo produtivo, para a formulação S1, esse processo resultou em emissões de 0,23 kg PM_{2,5} eq, enquanto na formulação S2 o valor foi inferior, 0,14 kg PM_{2,5} eq, isso indica que a menor fracção de resíduos de PET na composição contribuiu para reduzir a carga de poluentes particulados libertados durante a produção. A obtenção de resíduos de PET teve contribuição de $6,5 \times 10^{-3}$ kg PM_{2,5} eq na S1 e $4,6 \times 10^{-3}$ kg PM_{2,5} eq na S2. Já a etapa de extracção areia apresentou valores baixos, de $2,48 \times 10^{-6}$ kg PM_{2,5} eq na S1 e $5,08 \times 10^{-6}$ kg PM_{2,5} eq na S2, um aspecto positivo em ambas as formulações é o crédito ambiental associado à reciclagem do PET, que resultou em reduções de emissões de $-3,1 \times 10^{-3}$ kg PM_{2,5} eq para a S1 e $-2,2 \times 10^{-3}$ kg PM_{2,5} eq para a S2.

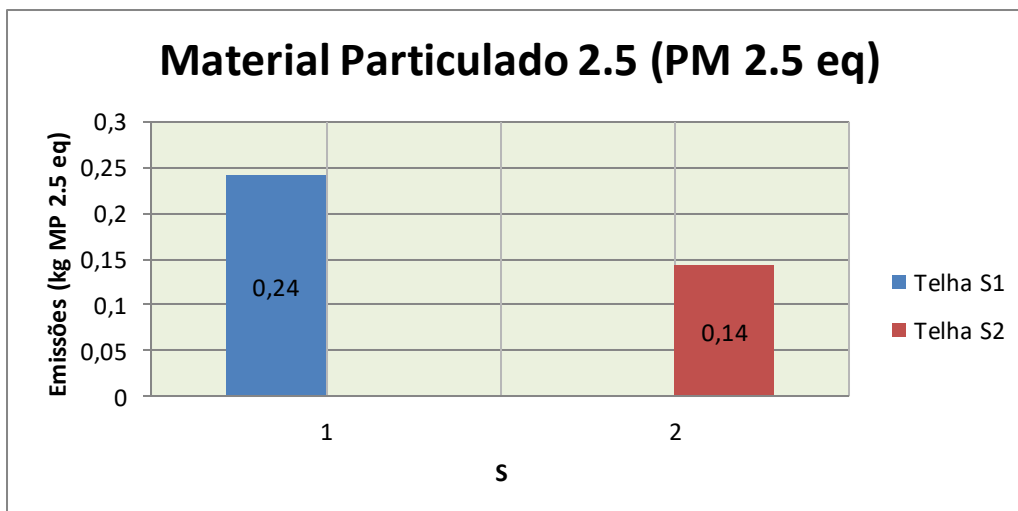


Figura 36: Comparação das emissões totais para a categoria material particulado (S1 e S2)

A figura 36 evidencia que a S1 apresenta emissões totais de material particulado mais elevadas, atingindo aproximadamente 0,24 kg PM_{2,5} eq, enquanto a S2 regista 0,14 kg PM_{2,5} eq. A redução observada pode ser atribuída à menor quantidade de PET utilizada e ao menor consumo energético no processo produtivo, diminuindo emissões associadas à queima de biomassa.

4.5.3. Categoria de Impacto: Formação de ozono fotoquímico

A categoria de formação de ozono fotoquímico, expressa em kg NMVOC eq, foi avaliada para as telhas produzidas. Os resultados obtidos para a telha S1 encontram-se apresentados na figura A2.3 (Anexo 2), enquanto os resultados para a telha S2 estão na figura A3.3 (Anexo 3)

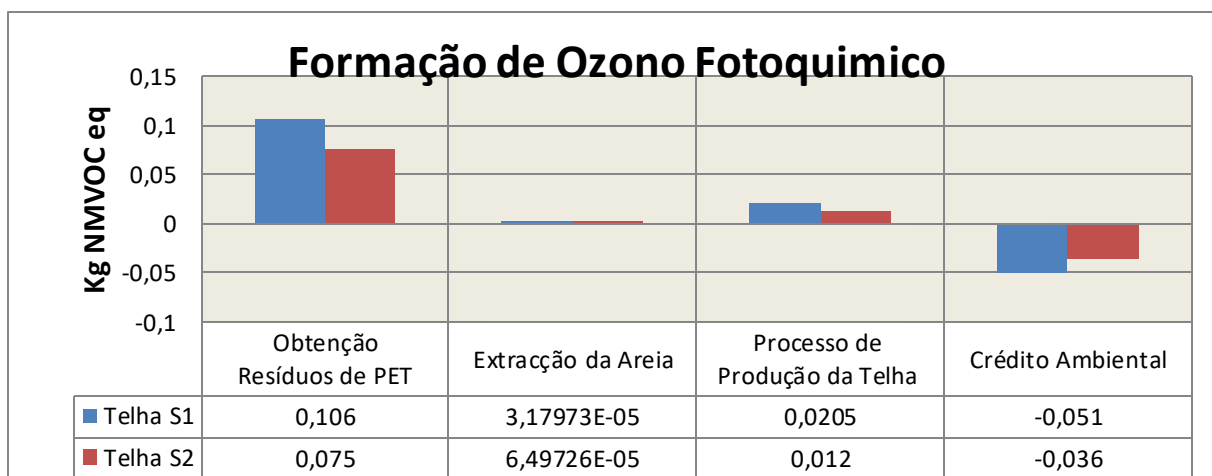


Figura 37: Contribuição por cada fase de ciclo de vida na categoria de formação de ozono fotoquímico

Observa – se na figura 37 que o principal impacto em ambas as formulações estão na fase de Obtenção de resíduos de PET, por ter um elevado consumo energético e emissões de compostos orgânicos voláteis durante esse processo. Para a telha S1, o impacto foi de 0,106 kg NMVOC eq, enquanto para a S2 o valor foi inferior, 0,075 kg NMVOC eq, o processo de produção das telhas apresentou contribuição com 0,0205 kg NMVOC eq na S1 e 0,012 kg NMVOC eq na S2, o crédito ambiental foi de –0,051 kg NMVOC eq na S1 e –0,036 kg NMVOC eq na S2.

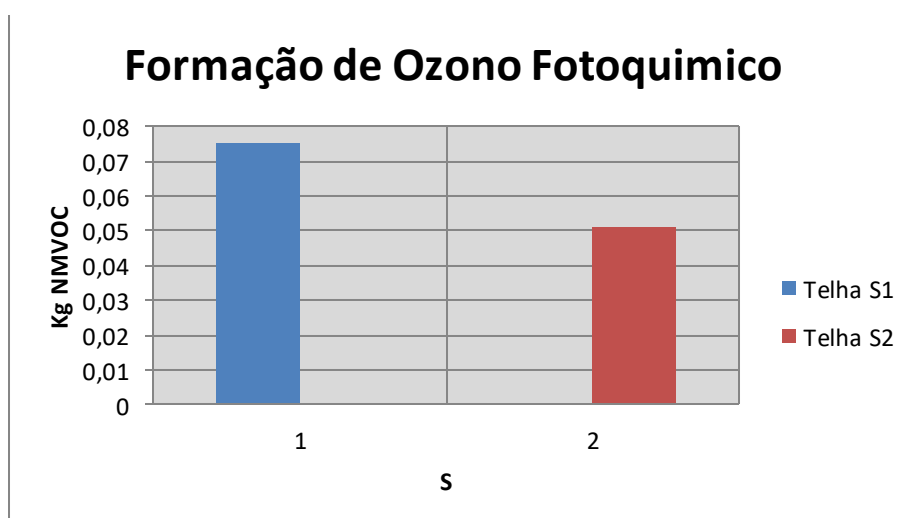


Figura 38: Comparação das emissões totais para a categoria de formação de ozono fotoquímico

A figura 38 mostra que a telha S1 apresenta um impacto total de aproximadamente 0,075 kg NMVOC eq, enquanto a telha S2 apresenta um valor menor, de cerca de 0,050 kg NMVOC eq. Esse resultado representa uma redução de cerca de 33% no impacto total ao adoptar a formulação S2 em relação à S1.

Do ponto de vista técnico, a formulação S1 (70% PET, 20% areia e 10% fibra de coco) apresentou desempenho satisfatório na absorção de água (2,94%), evidenciando baixa porosidade em função do elevado teor de plástico, além de atender ao limite normativo estabelecido pela ABNT NBR 15310. Contudo, obteve menor resistência à flexão (1080 N em média) e maior inflamabilidade (12,6 mm/min), características que reduzem a segurança e a durabilidade estrutural do compósito.

Já a formulação S2 (50% PET, 40% areia e 10% fibra de coco) apresentou resultados superiores em termos de resistência mecânica (1450 N em média), superando em cerca de 34% a formulação S1, além de demonstrar menor propagação de chama (6,25 mm/min), aspecto que contribui para a segurança contra incêndios. Embora sua absorção de água tenha sido ligeiramente superior (3,26%), este valor ainda se manteve amplamente dentro dos limites normativos. Dessa forma, a formulação S2 mostrou-se tecnicamente mais robusta e segura.

Na óptica dos impactos ambientais, a análise de ciclo de vida (ACV) revelou que a formulação S2, demonstrou menores impactos directos em categorias de mudanças climáticas, formação de ozono fotoquímico e material particulado, resultado associado à maior proporção de areia e menor proporção de PET em relação a S1. Conclui-se que a formulação S2 se mostra mais viável tecnicamente e ambientalmente.

4.6. Comparação com telhas convencionais

Para avaliar a viabilidade técnica e ambiental da telha usou-se como base a telha S2 por apresentar melhor desempenho técnico e ambiental em relação a S1, realizou-se uma comparação com os valores de referência normalmente encontrados em telhas convencionais de cerâmica e betão.

Tabela 9: Síntese comparativa da telha S2 e telhas convencionais.

Propriedades	Telha cerâmica	Telha de betão	Telha S2
Absorção de água (%)	$\leq 20\%$	6 – 10%	3,26%
Carga de ruptura à flexão (N)	≥ 1000	1500 – 2000	1450
Densidade (g/cm³)	1,8 – 2,2	2,0 – 2,4	2,3
Inflamabilidade	Material inerte	Material inerte	6,25(mm/min)
Impacto ambiental	Alta emissão	Alta emissão	Reduz resíduos plásticos
Uso de recursos naturais	Depende da extracção de argila;	Elevada extracção de areia e brita; uso elevado de água	Reduz extracção de areia; não utiliza água no processo de produção

A comparação evidencia que a telha S2 apresenta absorção de água muito menor que as telhas convencionais. Em relação à carga de ruptura à flexão, o valor obtido (1450 N) supera o mínimo exigido pela norma para telhas cerâmicas e se aproxima do intervalo encontrado para telhas de betão. Quanto à massa específica, a telha S2 é mais leve que as convencionais. Contudo, no critério de inflamabilidade, observa-se que, por conter PET em sua composição, a telha apresenta propagação de chama, característica inexistente em materiais inertes como cerâmica e betão.

Sob a perspectiva ambiental, a telha S2 se sobressai expressivamente. Enquanto a produção de telhas cerâmicas demanda fornos a temperaturas superiores a 900 °C (com elevada emissão de gases de efeito estufa) e as telhas de betão requerem o uso de cimento (um dos materiais mais intensivos em emissões globais), a formulação S2 apresenta processo produtivo a temperaturas inferiores a 250 °C, com redução significativa de emissões. Além disso, ao incorporar resíduos de PET reciclado, contribui directamente para a mitigação dos efeitos ambientais associados ao descarte incorrectos de plásticos, promovendo ainda a diminuição da extracção de recursos minerais. Consolidando-se como uma alternativa viável e sustentável em relação às telhas convencionais de cerâmica e betão.

Capítulo V

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

O presente trabalho buscou como objectivo avaliar a viabilidade técnica e ambiental da produção de telhas sustentáveis a partir de resíduos de plástico PET, areia e fibra de coco. O estudo demonstrou que os materiais utilizados possuem propriedades e características adequadas para aplicação em telhas, cada um contribuindo de forma específica para a composição: o PET actuou como matriz polimérica, funcionando como ligante, a areia contribuiu para a rigidez estrutural; e a fibra de coco funcionou como reforço natural, melhorando as propriedades mecânicas.

Na etapa experimental, foram produzidas telhas em diferentes proporções, destacando-se as formulações S1 (70% PET, 20% areia, 10% fibra de coco) e S2 (50% PET, 40% areia, 10% fibra de coco). Os ensaios laboratoriais confirmaram que ambas atenderam às exigências normativas da ABNT NBR 15310, porém a formulação S2 apresentou melhor desempenho global: maior resistência à flexão (1450 N), densidade adequada (2,23 g/cm³) e menor propagação de chama (6,25 mm/min). Embora sua absorção de água (3,26%) tenha sido ligeiramente superior à da S1, manteve-se muito abaixo do limite máximo de 20%, garantindo durabilidade.

Sob a óptica ambiental, a ACV revelou que a formulação S2 apresentou menores impactos em todas as categorias avaliadas, incluindo potencial do aquecimento global com 12,26 kg CO₂/kg eq em relação a 18,76 kg CO₂/kg eq de S1, formação de ozônio fotoquímico com 0,050 kg NMVOC eq menor em relação a 0,075 kg NMVOC eq de S1 e material particulado com 0,14 kg PM_{2,5} eq em relação a S1 com 0,14 kg PM_{2,5} eq. Isso se deve à maior proporção de areia, e menor uso de resíduos do plástico PET, cujo processamento está associado a maiores emissões. Isso confirmou que a formulação S2 alia desempenho técnico e benefício ambiental, sendo a alternativa mais sustentável.

A comparação com telhas convencionais de cerâmica e concreto reforça as vantagens da telha desenvolvida, sobretudo pela redução na absorção de água, menor consumo

de recursos naturais e aproveitamento de resíduos plásticos que, de outra forma, seriam descartados inadequadamente. Assim, as telhas propostas contribuem para a mitigação da poluição plástica, para a valorização de resíduos plásticos, agro-industriais e para a promoção da economia circular. A produção de telhas sustentáveis é tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa.

5.2. Recomendações

Recomenda-se, para estudos futuros, a exploração de novos tipos de plásticos e fibras vegetais disponíveis localmente

A análise de custos de produção em escala industrial e a investigação de aditivos que possam melhorar o desempenho a resistência ao fogo das telhas. Também analisar o impacto económico e social nos estudos futuros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1. Bibliografia referenciada

- Aguiar, B., & Teodoro, M. (2019). *Propriedade da fibra de coco: uma revisão sistemática ariana aparecida giraldellia*.
- Amaral, K. (2024). Explorando o processo de moldagem de compósitos: materiais, técnicas e aplicações.
- Ashby, M., & Jones, D. (2012). *An introduction to properties, applications and design*. 4. Ed. Oxford: elsevier.
- Askar, M. K., & Yaman, S. (2023). Utilizing polyethylene terephthalate pet in concrete: a review. *Polymers*.
- Bedin, M. (2014). *Compósito com polietileno de baixa densidade e fibra de coco in natura e modificada*. Campos dos goytacazes.
- Bernardo, A. D. (2012). *Construções sustentáveis*. São Paulo: Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva.
- Borge, M. (2021). *sustentabilidade*. Obtido de a-economia-circular-na-construcao-civil-desafios-e-oportunidades: <https://cte.com.br/blog/sustentabilidade/a-economia-circular-na-construcao-civil-desafios-e-oportunidades/>
- Bueno, C., & Mendes, N. (2016). Sensitivity analysis of the use of life cycle impact assessment methods: a case study on building materials. *Journal of cleaner production*, v.112, n.20.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2016). *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Carvalho, T. M. (2022). *Construção sustentável: novas tecnologias e materiais*. Curitiba: Editora Verde.
- Couceiro, D. C. (2019). *Definição de uma metodologia para extração e quantificação de microplásticos em areia da praia*. Coimbra: Tese (Mestrado) Instituto Politécnico de Coimbra Escola Superior Agrária de Coimbra.

- Educacivi. (13 de outubro de 2020). Obtido de telhas-saiba-tudo-sobre-suas-caracteristicas-e-tipos: <https://educacivil.com/telhas-saiba-tudo-sobre-suas-caracteristica>.
- Farias, A. .. (2024). *Avaliação do ciclo de vida de embalagens pet virgem e pet reciclado*. Florianópolis: Universidade federal de santa catarina.
- Ferreira, T. (2023). *O uso de polímeros reciclados na construção civil: uma proposta de habitação sustentável*. BELÉM: PA-BRASI.
- Gatti, L. (2022). *Análise do ciclo de vida da produção caseira de cerveja artesanal do tipo pilsen*. Ouro Preto 2022: Escola de minas.
- Globalplastic. (2022). *Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2023(in million metric tons)*. Obtido de <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950>,
- Gomes, R. (2017). *Avaliação da despolimerização do politereftalato de etileno (pet) por glicerólise*. São mateus-es: universidade federal do espírito santo.
- Industrial teste. (DEz de 2008). *Cerâmica*. Obtido de substituição de areia de quartzo por finos de gnaiss em massa cerâmica para telha: <https://doi.org/10.1590/s0366-69132008000400016>)
- Jambeck, J. R. (2015). *Plastic waste inputs from land into the ocean*. Obtido de science: <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Lemos, A. M., & Frendenberg, F. C. (julho de 2019). Estudo da utilização de fibra de coco em vigas de concreto. *Engineering sciences*. Pp. 1-8.
- Lima, C. (2009). *Plano de gerenciamento integrado de resíduos plásticos – PGIRP*. Belo Horizonte: Fundação Israel Pinheiro.
- Maia, A., & Dantas, T. D. (2005). Reaproveitamento do bagaço do coco para agregação de valor econômico e ambiental. *Revista Analítica*, p 4.
- Mansiha, M., & Farret, F. (2017). Avaliação do ciclo de vida do alumínio primário utilizando o software OpenLca. *revista espacios* Vol. 38 (Nº 41), 6.

- Manuel, A. (2024). Vantagens e desvantagens da telha ecológica casa. *Construção e Reforma*.
- Martinelli, F. R., & Azevedo, A. R. (2023). *A review of the use of coconut fiber in cement composites. Polymers*.
- Maunahan, B., & Adeba, K. (2021). Produção de bloco oco a partir de resíduos de plástico e areia. *Jornal Americano de Ciência, Engenharia e Tecnologia*. Vol. 6, nº 4.
- Omosebi, T., & Noor, F. (2021). Telhas plásticas de resíduos de garrafas pet recicladas com resistência melhorada e inflamabilidade reduzida. *Engenharia civil e arquitetura*, 9(5), 1347 - 1355. Doi: 10.13189.
- ONU Habitat. (12 de Novembro de 2022). *As práticas tradicionais de construção oferecem soluções sustentáveis à medida que as cidades africanas crescem*. Obtido de Sala de imprensa: <https://moderndiplomacy.eu/2022/11/12/traditional-building-practices-offer-sustainable>
- Parente, R. A. (2006). *Elementos estruturais de plástico reciclado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas*. São Carlos: Universidade de São Paulo,.
- Pirancomposites. (jun de 2020). *moulding-process*. Obtido de news: <https://pirancomposites.com/news/composite-moulding-process>
- PNUMA. (2022). *O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente*. Obtido de <https://www.unep.org/pt-br/poluicao-plastica>
- Reis, C. V. (2024). *Telha de plástico pead (polietileno de alta densidade) reciclado. Um protótipo inicia*.
- Ribeiro, M. F. (2018). *Moldagem por injeção*. Universidade Federal Fluminense.
- Ritchie, H., & Roser, V. (2024). *Ourworldindata*. Obtido de plastic pollution: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

- Rosa, V. (2019). *Compósitos de polietileno de alta densidade (pead) reforçados com biomassa da casca do açaí*. Fundação oswaldo aranha.
- Secchi, A., & Argimiro, J. (s.d.). *Indicadores de sustentabilidade para avaliação do tratamento de RSU: o estudo de caso do Rio de Janeiro*. Obtido em 2025, de mdpi: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7445>
- Silva, R. (2019). *Compósitos de polietileno de alta densidade (pead) reforçados com biomassa da casca do açaí*. Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA.
- Tulane, R., & Afonso, R. (2019). Application of plastic wastes in construction materials: a review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives. *journal of sustainable materials*.
- Varga, J., & Silva, V. (2022). *Microplásticos: uso na indústria cosmética e impactos no ambiente aquático*. Quim. Nova.
- World Bank Document. (2018). Obtido em abril de 2025, de Economia Circular dos Plásticos em Moçambique, Desafios e Oportunidades: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/684051645000740370/pdf/The-Circular-Plastics-Economy-in-Mozambique-Challenges-and-Opportunities>
- Yemal, J. A., & Teixeira, N. O. (2011). *Sustentabilidade na construção civil. Clear production initiatives and challenges for a sustainable world*. São paulo – brasil,.
- Zanin, M., & Mancin, S. (2004). *Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia*. São carlos: edufsc.

6.2. Bibliografia consultada

- ASTMD635-14. (2014). *Standard test method for rate of burning and/or extent and time of burning of plastics in a horizontal position*. Astm international, west conshohocken, pa.
- Política Nacional do Ambiente. (1995). Resolução nº5/95 de 3 de Agosto.

Decreto13/2006. (s.d.). *Regulamento sobre a gestão de resíduos sólidos*).

Global plastics production. (2019). Obtido de <https://share.google/tlk1s36xtotmsmsc1>.

ISO14040, (2009). *Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Brasil.

IPCC. (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Vol. 2: Energy. Japan: IGES.

NBR 15310, A. (2005). *Telhas cerâmicas — terminologia, requisitos e métodos de ensaios*. Rio de janeiro: abnt.

OPENLCA. (2024). *The openLCA Project*. Obtido em maio de 2025, de <http://www.openlca.org/home>.

PNUMA. (21 de outubro de 2021). *unep*. Obtido em 2025, de Relatório da ONU sobre poluição plástica alerta sobre falsas soluções e confirma necessidade de ação global urgente: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/relatorio-da-onu-sobre-poluicao-plastica-alerta-sobre>.

Anexos

Anexo 1. Resultados dos ensaios da avaliação das propriedades físicas e mecânicas

Tabela A1.1: Resultados do ensaio de absorção de água.

Amostras	Massa húmida (g)	Massa seca (g)	Absorção de água (AA%).	Media de (AA) %	Desvio Padrão
S1-1	7441	7225	2,98	2,94	0,09
S1-2	7401	7197	2,83		
S1-2	7541	7321	3,01		
S2-1	7703	7472	3,09	3,26	0,15
S2-2	8539	8267	3,29		
S2-3	8822	8533	3,38		

5.3 Absorção de água (AA)

O limite máximo admissível é 20%.

NOTAS

1 Essa determinação pode ser aplicada em acessórios cerâmicos retirados do lote de fornecimento das telhas, desde que o produtor e o usuário final estabeleçam acordo particular para esse fim.

Figura A1.1: Estabelece os limites máximos de absorção de água

Tabela A1.2: Resultados do ensaio de carga de ruptura a flexão

Grupo	Amostra	Força de ruptura (F) [N]	Média [N]
S1	1	1050	1080
	2	1400	
	3	1100	

	4	850	
	5	1000	
S2	1	1450	1450
	2	1750	
	3	1450	
	4	1000	
	5	1600	

5.5 Carga de ruptura à flexão

As cargas de ruptura à flexão não devem ser inferiores às indicadas na tabela 1.

Tabela 1 — Tipos de telhas e cargas de ruptura

Tipos de telhas	Exemplos	Cargas N (kgf)
Planas de encaixe	Telhas francesas	1 000 (100)
Compostas de encaixe	Telhas romanas	1 300 (130)
Simples de sobreposição	Telhas capa e canal colonial	1 000 (100)
	Telhas plan	
	Telhas paulista	
	Telhas Piauí	
Planas de sobreposição	Telhas alemã e outras	

Figura A1.2: Para a carga de ruptura à flexão a norma estabelece os seguintes limites mínimos.

Tabela A1.3: Resultados do ensaio de inflamabilidade.

Amostras	Comprimento queimado (L) [mm]	Tempo de queima (T) [min]	Taxa de queima (V) [mm/min]	Media [mm/min]
S1-1	6,8	30	13,6	

S1-2	5,8	30	11,6	12,6
S1-3	6,5	30	13	
S1-4	6,1	30	12,2	
S2-1	3,1	30	6,2	6,25
S2-2	2,9	30	5,8	
S2-3	3,5	30	7	
S2-4	3	30	6	

Tabela A1.4: Resultados do ensaio da densidade aparente.

Grupo	Amostra	Massa (g)	Volume (cm^3)	Densidade (g/cm^3)
S1	S1-1	7315	3690	1,982
S1	S1-2	7274	3620	2,009
S1	S1-3	7378	3730	1,978
Média S1				1,98
S2	S2-1	8228	3680	2,235
S2	S2-2	8425	3760	2,240
S2	S2-3	8171	3680	2,220
Média S2				2,23

Anexo 2 – Resultados da avaliação impactos ambientais gerados pelo Open Lca para telha S1

Nome	Categoria	Resultado do invent...	Fator de impacto	Resultado do impacto
▼ ☰ Climate change	ILCD 2011 Midpoint+			18.76905 kg CO2 eq
▼ 🏠 Polyethylene terephthalate (PET) - REF	Materials production/Plastics			19.31870 kg CO2 eq
🌱 Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/uns...	16.59388 kg	1.00000 kg CO2 eq/kg	16.59388 kg CO2 eq
🌱 Methane	Elementary flows/Emission to air/uns...	0.10899 kg	25.00000 kg CO2 eq/kg	2.72481 kg CO2 eq
▼ 🏠 Producao da telha S1				8.82400 kg CO2 eq
🌱 Carbon dioxide, biogenic	Elementary flows/Emission to air/hig...	8.82400 kg	1.00000 kg CO2 eq/kg	8.82400 kg CO2 eq
▼ 🏠 Polyethylene terephthalate (PET) - REF	Materials production/Plastics			-9.37800 kg CO2 eq
🌱 Methane	Elementary flows/Emission to air/uns...	-0.05291 kg	25.00000 kg CO2 eq/kg	-1.32272 kg CO2 eq
🌱 Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/uns...	-8.05528 kg	1.00000 kg CO2 eq/kg	-8.05528 kg CO2 eq

Figura A2.1: Resultados gerados da categoria de Impacto ambiental aquecimento global da telha S1.

		Resultado do Invent	Fator de impacto	Resultado do Impacto
▼ ☰ Particulate matter	ILCD 2011 Midpoint+			0.24069 kg PM2.5 eq
▼ 🏠 Producao da telha S1				0.23733 kg PM2.5 eq
🌱 Particulates, < 2.5 um	Elementary flows/Emission to air/high ...	7.12E-2 kg	3.33 kg PM2.5 eq/kg	0.24 kg PM2.5 eq
▼ 🏠 Polyethylene terephthalate (PET) - RER	Materials production/Plastics			0.00652 kg PM2.5 eq
🌱 Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspe...	5.94E-2 kg	6.11E-2 kg PM2.5 eq/kg	3.63E-3 kg PM2.5 eq
🌱 Particulates, < 10 um	Elementary flows/Emission to air/unspe...	1.12E-2 kg	0.23 kg PM2.5 eq/kg	2.56E-3 kg PM2.5 eq
🏠 Polyethylene terephthalate (PET) - RER	Materials production/Plastics			-0.00317 kg PM2.5 eq

Figura A2.2: Resultados gerados da categoria de Impacto ambiental material particulado PM2.5 da telha S1.

▼ 🌿 Photochemical ozone formation	ILCD 2011 Midpoint+				0.07517 kg NMVOC eq
▼ 🏭 Polyethylene terephthalate (PET) - RER	Materials production/Plastics				0.10615 kg NMVOC eq
🌿 NMVOC, non-methane volatile organic co	Elementary flows/Emission to air/unspecified	5.46E-2 kg	1.00 kg NMVOC eq/kg		5.46E-2 kg NMVOC eq
🌿 Nitrogen dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	4.37E-2 kg	1.00 kg NMVOC eq/kg		4.37E-2 kg NMVOC eq
🌿 Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	5.94E-2 kg	8.11E-2 kg NMVOC eq/kg		4.82E-3 kg NMVOC eq
🌿 Carbon monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	4.25E-2 kg	4.56E-2 kg NMVOC eq/kg		1.94E-3 kg NMVOC eq
🌿 Methane	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.11 kg	1.01E-2 kg NMVOC eq/kg		1.10E-3 kg NMVOC eq
▼ 🏭 Producao da telha S1					0.02052 kg NMVOC eq
🌿 Carbon monoxide	Elementary flows/Emission to air/high pop...	0.45 kg	4.56E-2 kg NMVOC eq/kg		2.05E-2 kg NMVOC eq
▼ 🏭 Polyethylene terephthalate (PET) - RER	Materials production/Plastics				-0.05153 kg NMVOC eq
🌿 Carbon monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-2.06E-2 kg	4.56E-2 kg NMVOC eq/kg		-9.40E-4 kg NMVOC eq
🌿 Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-2.88E-2 kg	8.11E-2 kg NMVOC eq/kg		-2.34E-3 kg NMVOC eq
🌿 Nitrogen dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-2.12E-2 kg	1.00 kg NMVOC eq/kg		-2.12E-2 kg NMVOC eq
🌿 NMVOC, non-methane volatile organic co	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-2.65E-2 kg	1.00 kg NMVOC eq/kg		-2.65E-2 kg NMVOC eq

Figura A2.3: Resultados gerados da categoria de Impacto ambiental formação de ozônio fotoquímico PM2.5 da telha S1.

Anexo 3 – Resultados da avaliação impactos ambientais gerados pelo Open Lca para telha S2

Nome	Categoria	Resultado do inventário	Fator de impacto	Resultado do impacto
▼ 🌿 Climate change	ILCD 2011 Midpoint+			12.25611 kg CO2 eq
▼ 🏭 Polyethylene terephthalate (PET) granulate - F	Materials production/Plastics			13.73438 kg CO2 eq
🌿 Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	11.79721 kg	1.00000 kg CO2 eq/kg	11.79721 kg CO2 eq
🌿 Methane	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.07749 kg	25.00000 kg CO2 eq/kg	1.93717 kg CO2 eq
▼ 🏭 Producao da telha S2				5.18000 kg CO2 eq
🌿 Carbon dioxide, biogenic	Elementary flows/Emission to air/high pop...	5.18000 kg	1.00000 kg CO2 eq/kg	5.18000 kg CO2 eq
▼ 🏭 Polyethylene terephthalate (PET) granulate - F	Materials production/Plastics			-6.66717 kg CO2 eq
🌿 Methane	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-0.03761 kg	25.00000 kg CO2 eq/kg	-0.94037 kg CO2 eq
🌿 Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-5.72680 kg	1.00000 kg CO2 eq/kg	-5.72680 kg CO2 eq

Figura A3.1: Resultados gerados da categoria de Impacto ambiental aquecimento global da telha S2.

▼ Particulate matter	ILCD 2011 Midpoint+				0.14439 kg PM2.5 eq
▼ Producao da telha S2					0.14200 kg PM2.5 eq
Particulates, < 2.5 um	Elementary flows/Emission to air/high pop...	0.04260 kg	3.33000 kg PM2.5 eq/kg		0.14186 kg PM2.5 eq
▼ Polyethylene terephthalate (PET) granulate - F	Materials production/Plastics				0.00464 kg PM2.5 eq
Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.04222 kg	0.06110 kg PM2.5 eq/kg		0.00258 kg PM2.5 eq
Particulates, < 10 um	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00799 kg	0.22800 kg PM2.5 eq/kg		0.00182 kg PM2.5 eq
Polyethylene terephthalate (PET) granulate - F	Materials production/Plastics				-0.00225 kg PM2.5 eq

Figura A3.2: Resultados gerados da categoria de Impacto ambiental material particulado PM2.5 da telha S2.

▼ Photochemical ozone formation	ILCD 2011 Midpoint+				0.05121 kg NMVOC eq
▼ Polyethylene terephthalate (PET) granulate - F	Materials production/Plastics				0.07547 kg NMVOC eq
NMVOC, non-methane volatile organic co	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.03879 kg	1.00000 kg NMVOC eq/kg		0.03879 kg NMVOC eq
Nitrogen dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.03105 kg	1.00000 kg NMVOC eq/kg		0.03105 kg NMVOC eq
Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.04222 kg	0.08110 kg NMVOC eq/kg		0.00342 kg NMVOC eq
Carbon monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.03020 kg	0.04560 kg NMVOC eq/kg		0.00138 kg NMVOC eq
Methane	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.07749 kg	0.01010 kg NMVOC eq/kg		0.00078 kg NMVOC eq
▼ Producao da telha S2					0.01231 kg NMVOC eq
Carbon monoxide	Elementary flows/Emission to air/high pop...	0.27000 kg	0.04560 kg NMVOC eq/kg		0.01231 kg NMVOC eq
▼ Polyethylene terephthalate (PET) granulate - F	Materials production/Plastics				-0.03663 kg NMVOC eq
Carbon monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-0.01466 kg	0.04560 kg NMVOC eq/kg		-0.00067 kg NMVOC eq
Sulfur dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-0.02049 kg	0.08110 kg NMVOC eq/kg		-0.00166 kg NMVOC eq
Nitrogen dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-0.01507 kg	1.00000 kg NMVOC eq/kg		-0.01507 kg NMVOC eq
NMVOC, non-methane volatile organic co	Elementary flows/Emission to air/unspecified	-0.01883 kg	1.00000 kg NMVOC eq/kg		-0.01883 kg NMVOC eq

Figura A3.3: Resultados gerados da categoria de Impacto ambiental formação de ozônio fotoquímico PM2.5 da telha S2.