

MODELAGEM DE CICLO DE VIDA E PEGADA DE CARBONO DE QUADROS DE BICICLETAS

LIFE CYCLE MODELING AND CARBON FOOTPRINT OF BICYCLE FRAMES

Vanessa Dafni Bard

ORCID 0009-0001-3095-277X.

Instituto Federal de Santa Catarina
Campus Itajaí
Itajaí, Brasil
vanessa.db@aluno.ifsc.edu.br

Cássio Aurélio Suski

ORCID 0000-0002-3965-4373

Instituto Federal de Santa Catarina
Campus Itajaí
Itajaí, Brasil
cassio.suski@ifsc.edu.br

Resumo. O estudo tem como objetivo avaliar o ciclo de vida de quadros de bicicleta confeccionados em fibra de carbono, alumínio e aço carbono, comparando-os entre si. Utilizou-se do *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory na ferramenta Eco Audit para obter os dados do ciclo de vida dos quadros de bicicleta, obtendo o consumo de energia e as emissões de carbono em todas as etapas da vida útil. Como resultado obteve-se a percepção de que, devido aos procedimentos de fabricação e descarte, o quadro de fibra de carbono é o maior emissor dentre os objetos de estudo. Destaca-se a elevada emissão na etapa de extração do material para a fabricação dos quadros de bicicleta nos diferentes materiais de estudo.

Palavras-chave: Quadro de bicicleta; Emissões de CO₂; Ciclo de vida; Modelagem.

Abstract. The study aims to evaluate the life cycle of bicycle frames made of carbon fiber, aluminum, and carbon steel, comparing them with each other. The Ansys GRANTA EduPack Introductory *software* was used in the Eco Audit tool to obtain data on the life cycle of bicycle frames, obtaining energy consumption and carbon emissions at all stages of their useful life. As a result, the perception was obtained that, due to manufacturing and disposal procedures, the carbon fiber frame is the largest emitter among the objects of study. The high emission in the material extraction stage for the manufacture of bicycle frames in the different study materials stands out.

Keywords: Bicycle frame; CO₂ emissions; Life cycle; Modeling.

1. INTRODUÇÃO

As práticas de ciclismo são cada vez mais utilizadas em se tratando de mobilidade urbana, uma vez que se torna mais prático e muitas vezes mais rápida a locomoção nas grandes metrópoles (Roy, 2019). Os benefícios do ciclismo estão além, pois dentre os meios de transportes, este possui baixo índice de emissões de CO₂, baixo custo e propõem ao ciclista uma atividade física. Existem diversas vantagens na prática do ciclismo e a principal delas é a saída do sedentarismo e sobrepeso, como também a prevenção de doenças cardiovasculares (Maitland, 2012). Sabe-se que no ano de 2018, o Brasil fabricou, em média, 3,8 milhões de bicicletas, tornando-se o terceiro maior produtor mundial, aproximadamente 1 bilhão de unidades já fabricadas (Frare, 2020).

Frare (2020), mostra que o Brasil é responsável por 4,2% da produção mundial de bicicletas. O principal motivo, mostrado pelo autor, para a utilização desse modo de transporte, principalmente nas pequenas cidades, se dá pela falta de meios de transporte urbano coletivo, como também pelo baixo custo de aquisição e manutenção. Destaca também, que o aumento no ciclismo traz inúmeros benefícios à comunidade, dentre eles, o aumento da demanda de empregos no setor trabalhista e inovações nesta área.



Tendo em vista os benefícios do ciclismo, faz-se cada vez mais necessário pesquisas na área, desde o setor de extração, fabricação e utilização. Segundo Suthahar et al. (2023), para a fabricação de bicicletas os principais materiais utilizados são: alumínio, aço, titânio, fibra de vidro e fibra de carbono. O autor destaca que a escolha dos materiais leva em consideração fatores como resistência do material, a durabilidade, a leveza e outras propriedades destes materiais.

Os impactos ambientais associados à fabricação de bicicletas estão principalmente relacionados ao uso intensivo de recursos naturais e à emissão de gases de efeito estufa durante a extração e o processamento de materiais como aço carbono e alumínio, que são os mais comumente utilizados. Como destacado por Azevedo (2018), apesar de serem materiais altamente recicláveis, com potencial de reciclagem de até 100%, muitas vezes esse potencial não é totalmente aproveitado. A presença de impurezas e as perdas durante o processo de fabricação comprometem a qualidade do material reciclado, o que dificulta a redução efetiva das emissões ao final de sua vida útil. Outro ponto importante a ser destacado quanto ao potencial de aproveitamento dos recicláveis é que, a reciclagem ainda está muito associada à desigualdade social, de forma que, geralmente, não é a população que destina seus resíduos para o processo de reciclagem, mas na verdade, há uma necessidade de grupos em situação de vulnerabilidade de realizar a coleta de resíduos sólidos urbanos a fim de gerar uma renda mínima para sobrevivência.

Para uma avaliação mais precisa das emissões associadas a diferentes materiais e produtos, é essencial realizar uma Análise do Ciclo de Vida (ACV). Este método abrange todos os estágios do ciclo de vida de um material, desde a obtenção da matéria-prima até o seu descarte final (ISO 14040:2006). Dessa forma, a ACV é fundamental para analisar os impactos ambientais ao longo de todas as etapas citadas na norma. Conforme a Associação brasileira de normas técnicas (ABNT) (2009), a ACV considera todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas, passando pela produção de energia e materiais, fabricação, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final. Essa abordagem holística é crucial para uma compreensão abrangente dos impactos ambientais associados aos materiais e produtos utilizados na fabricação de bicicletas.

Para uma compreensão mais abrangente das emissões ao longo da vida útil dos quadros de bicicleta, faz-se necessário realizar uma análise detalhada da distribuição dessas emissões ao longo das diferentes etapas do ciclo de vida. Estas fases compreendem a utilização, extração dos materiais, fabricação, transporte e descarte dos quadros.

O objetivo geral desta pesquisa foi examinar o ciclo de vida de quadros de bicicleta produzidos com alumínio, aço carbono e fibra de carbono, visando identificar os materiais mais adequados para sua fabricação, com ênfase na redução da pegada de carbono. A pesquisa visa fornecer uma avaliação detalhada das emissões de gases de efeito estufa associadas a cada material, promovendo a escolha de opções mais sustentáveis e eficientes. Isso implica na minimização das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo assim para mitigar os impactos do aquecimento global. A pesquisa organiza-se em revisão da literatura, metodologia, resultados e discussões, e por fim a conclusão dos resultados obtidos na pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A escolha dos materiais para a fabricação de quadros de bicicletas tem implicações significativas para a performance e o impacto ambiental desses veículos. Diversos estudos

exploram as características, vantagens e desvantagens de materiais como fibra de carbono, alumínio e aço.

Em sua pesquisa, Zoltek (2017), trouxe alguns dos benefícios da utilização da fibra de carbono, uma vez que esse material é dez vezes mais resistente que o aço e oito vezes mais forte que o alumínio. Nuss (2014), constatou em sua pesquisa, que o aço é responsável por, aproximadamente, 30% das emissões de carbono e o alumínio por apenas 2%.

De acordo com Marques (2013), quando utilizado o alumínio na fabricação de bicicletas, faz-se necessário até três vezes mais materiais do que a fabricação em aço. Essa quantidade maior de material utilizado resulta em um diâmetro de quadro maior das bicicletas. Entretanto, ao utilizar o alumínio como matéria prima, produz-se um meio de transporte mais leve, possibilitando maior velocidade ao condutor e com um custo-benefício alto para, principalmente, ciclistas amadores.

Já as bicicletas confeccionadas em aço, são conhecidas por trazerem maior absorção de impacto e são bastante utilizadas em terrenos irregulares. Embora as bicicletas tenham evoluído tecnologicamente, o aço continua a ser um material popular na indústria do ciclismo, conforme destacado por Ferreira (2014). Segundo o autor, o aço é uma liga composta de ferro e carbono, que por ser um material com densidade elevada, torna necessário a confecção de quadros de bicicleta com três diâmetros diferentes entre si, que variam também a espessura em locais de maior impacto.

Por sua vez, a fibra de carbono, outro material muito utilizado na confecção de bicicletas, é um material composto de um polímero e fibras de carbono (Santamaría, 2022). Possui uma alta resistência mecânica, quando aplicado um peso, em comparação aos demais materiais comumente utilizados na fabricação de bicicletas. A fibra de carbono é considerada cinco vezes mais resistente que o aço e é consideravelmente mais leve que o alumínio (Ferreira, 2014).

Para Coelho et al. (2015), as emissões de carbono das bicicletas se concentram no processo de extração e fabricação dos materiais utilizados nos quadros, nas rodas e na forqueta. Constata também, que ao fim da vida, a reciclagem dos materiais e componentes pode ser responsável por uma diminuição significativa das emissões de carbono.

Ao analisar estudos que se assemelham com a pesquisa proposta, encontra-se o trabalho proposto por Azevedo (2018). O estudo tem como objetivo avaliar as diferenças de impacto ambiental entre diferentes cenários de produção de quadros de bicicleta em Portugal e Taiwan. Foram analisados três tipos de materiais para a produção dos quadros de bicicleta: Aço carbono; Alumínio; e fibra de carbono. A pesquisa teve como resultado o aço carbono como a opção mais sustentável, seguido pelo quadro de fibra de carbono e, por último, o quadro de alumínio. Ressalta também que a fase de extração de matéria-prima e os processos de transporte são identificados como os maiores contribuidores para o impacto ambiental, independentemente do material analisado.

As emissões globais de CO₂ são de aproximadamente 3.459,65 milhões de toneladas de CO₂ no processo de fabricação do aço, sendo este uma das matérias-primas utilizadas amplamente na indústria (Santos et al., 2020). Uma das estratégias eficazes para reduzir essas emissões é a reciclagem desses materiais, uma vez que é possível alcançar uma redução de até 81% nas emissões de carbono quando utiliza-se a sucata para a produção de aço. Da mesma forma, a reciclagem do alumínio pode resultar em uma diminuição de até 16 mil toneladas de CO₂ (Melo, 2021).

3. METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida a partir da comparação entre os resultados obtidos acerca das emissões de carbono e consumo de energia no ciclo de vida de quadros de bicicleta. Utilizou-se o software Ansys GRANTA EduPack Introductory, na ferramenta Eco Audit para análise do ciclo de vida de quadros de bicicleta de fibra de carbono, de alumínio e de aço carbono.

Foram feitas as análises individuais para cada um dos três materiais: fibra de carbono; alumínio; e aço carbono. Primeiramente, para o quadro de fibra de carbono foi selecionado o peso de 1,5 kg de material bruto. Por sua vez, para o quadro de bicicleta de alumínio foi selecionado um material com aproximadamente 80% reciclado, com massa de 2 kg. E por fim, o quadro feito de aço de carbono possui peso de 3 kg e 20% de material reciclado.

A Tabela 1 mostra os materiais utilizados em cada um dos quadros de bicicletas em estudo.

Tabela 1. Parâmetros de entrada para análise do ciclo de vida

Componente	Material	Conteúdo reciclado (%)	Massa da peça (kg)	Quantidade	Massa total (kg)
Quadro em fibra de carbono	Carbon fibers, high modulus (5 microns, f)	Bruto (0%)	1,5	1	1,5
Quadro em alumínio	Aluminum, 6061, T6	80,00%	2	1	2
Quadro em aço carbono	Low alloy steel, AISI 4130, annealed	20,00%	3	1	3

Fonte: Elaborada pelos autores no *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory (2024).

A etapa seguinte se deu pela seleção do processo de fabricação e transporte, onde foi selecionada a produção de tecido para o quadro de fibra de carbono. Para fins de transporte, foram utilizadas duas etapas com um caminhão variando de 16 a 32 toneladas, onde a primeira etapa é o trajeto da extração do petróleo até a fábrica de fibra de carbono e a segunda etapa consiste no deslocamento da fábrica até a montadora de bicicletas, com ambos os trajetos percorrendo 100 km.

Já para o alumínio e aço carbono foram selecionados laminação para a etapa de fabricação. Para fins de transporte, ambos utilizaram um caminhão de 16 a 32 toneladas nas três etapas do percurso, onde as etapas consistem no caminho da extração à siderurgia, da siderurgia até a fundição e, por último, da fundição para a montadora. As distâncias para cada etapa do percurso também foram escolhidas, na primeira etapa tem-se 50 km, na segunda etapa um trajeto de 200 km e por último um trajeto de 100 km.

Para fins de descarte dos quadros de bicicletas, confeccionados em fibra de carbono, foi selecionada a opção aterro sanitário. Por sua vez, a opção de descarte selecionada para alumínio e aço carbono foi a de reciclagem.

O *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory gerou gráficos e tabelas com as comparações entre os materiais estudados, como também as emissões em cada fase do ciclo de vida, sendo elas, o material, a fabricação, o transporte, a utilização e descarte. Ao fim do processo, foi possível um estudo da concentração de energia e emissões em cada etapa do ciclo de vida, assim como o potencial de fim de vida de cada material.

É importante ressaltar a metodologia adotada pelo *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory acerca da dupla contagem de carbono, ou seja, ao selecionar materiais com porcentagem de reciclagem tem-se uma redução nas emissões de carbono e, ao optar pela reciclagem como forma de descarte, há o surgimento de uma dupla contagem de carbono. Com o intuito de evitar este problema, o *software* utiliza a separação dos dados em: dados totais para

primeira vida e dados potenciais para o fim da vida útil, que de modo geral, representam os valores encontrados a partir das opções de descarte selecionadas.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos pela simulação realizada no software Ansys GRANTA EduPack Introductory estão organizados e descritos no decorrer do texto, organizados pelo material utilizado na fabricação de cada quadro de bicicleta.

4.1 Quadro de bicicleta em fibra de carbono

Ao analisar a Tabela 2, e realizar a comparação entre energia e pegada de carbono para um quadro de bicicleta de fibra de carbono. Observa-se que a etapa de obtenção do material concentra a maior parte do consumo de energia, o que resulta em uma pegada de carbono significativamente elevada. Essa energia é essencialmente a energia de produção, que inclui a extração e o processamento das matérias-primas necessárias para fabricar o quadro de fibra de carbono. Nota-se que ao final da vida útil do quadro fabricado em fibra de carbono, obtém-se um potencial nulo.

A etapa do “material” relaciona a extração do material, no caso da fibra de carbono engloba todo o processo de fabricação da fibra, da resina e a confecção da fibra de carbono como matéria prima para utilização na indústria. A etapa de “fabricação” envolve todos os processos de fabricação do quadro de bicicleta, utilizando a matéria prima proveniente da etapa de “material”. Para a etapa de transporte, como explicado na metodologia, caracteriza o transporte da matéria prima para produção da fibra de carbono e o transporte do material (fibra de carbono) finalizado até a fábrica montadora. Por fim temos a etapa de “descarte” nesta etapa tem-se o aterro como forma de descarte do quadro de bicicleta fabricado em fibra de carbono, visto que, na grande maioria dos casos, a reciclagem da fibra de carbono não é um processo utilizado.

Tabela 2. Consumo de energia e pegada de carbono por fase do ciclo de vida (quadro de fibra de carbono).

Fase	Energia(MJ)	Energia (%)	Pegada de CO ₂ (kg)	Pegada de CO ₂
Material	428,48	98,5	30,41	98,4
Fabricação	3,9	0,9	0,31	1
Transporte	2,52	0,6	0,15	0,5
Utilização	0	0	0	0
Descarte	0,3	0,1	0,02	0,1
Total (para a primeira vida)	435,2	100	30,9	100
Potencial de fim da vida útil	0		0	

Fonte: Ansys GRANTA EduPack Introductory (2024)

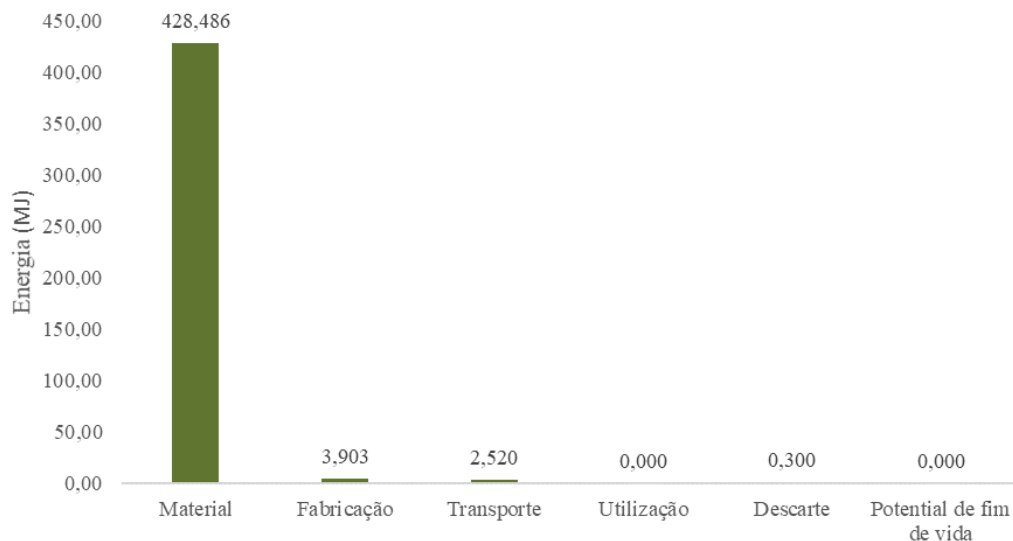


Gráfico 1. Análise de energia por fase do ciclo de vida (Quadro de fibra de carbono).
Fonte: Elaborada pelos autores no *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory (2023).

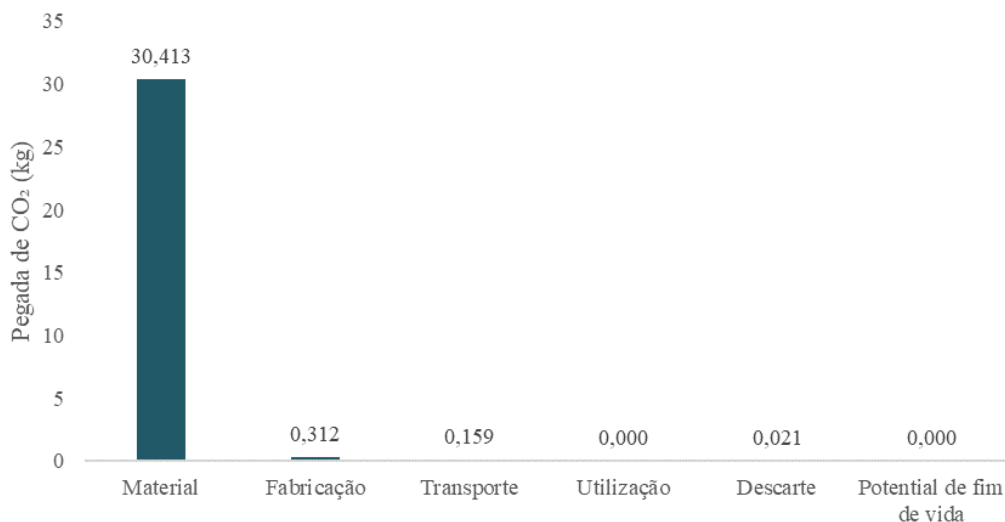


Gráfico 2. Análise da pegada de carbono por fase do ciclo de vida (Quadro de fibra carbono).
Fonte: Ansys GRANTA EduPack Introductory (2024).

Os Gráficos 1 e 2 mostram dados da distribuição do consumo de energia e da pegada de carbono do quadro de fibra de carbono e, em relação ao consumo de energia, estão distribuídos, dentre as etapas do ciclo de vida, 98,5% na etapa do material, 0,9% para a etapa da fabricação, 0,6% para o transporte, e 0,1 % para o descarte. Nota-se que a obtenção do material (fibra de carbono) concentra o maior gasto de energia, como também a maior emissão de CO₂, totalizando 30,4 kg de CO₂, ou seja, 98,4%, assim como um consumo de 435,2 MJ/ ano e uma emissão de CO₂ de 30,9 kg/ano ao fim da primeira vida do material.

Conforme os estudos de Azevedo (2018), para um quadro de bicicleta de fibra de carbono, produz em seu ciclo de vida uma emissão de 10,1 kg de CO₂ no ciclo de vida. De forma que era esperado uma alta emissão de CO₂ em todo o ciclo de vida do quadro de fibra de carbono, onde a maior concentração é proveniente da etapa de “material” do quadro de bicicleta em fibra de carbono.

4.2 Quadro de bicicleta em alumínio

Analisou-se da Tabela 3, a contribuição relativa da fase de vida do quadro de bicicleta confeccionado em alumínio, com os dados de consumo de energia e CO₂ no ciclo de vida, ou seja, sua pegada de carbono. Observou-se um crédito de carbono de 41,17% para o potencial de fim de vida, ou seja, durante a etapa sob a qual considera-se a etapa de descarte como reciclagem. É possível também a observação do crédito de consumo de energia de 43,84% para o potencial de fim de vida útil, considerando a reciclagem como uma opção de descarte.

A Tabela 3 fornece uma visão detalhada do consumo de energia e da pegada de carbono associada a este estudo. Notavelmente, a pegada de carbono, durante a primeira vida, é de 10,91 kg de CO₂, com o material desempenhando o papel predominante, representando impressionantes 89,3% dessa pegada total. Destaca-se também a fase de utilização com dados obtidos nulos, uma vez que a utilização das bicicletas não gera emissões de carbono.

Os dados da Tabela 3 mostram ainda os valores de consumo de energia, para os quadros de bicicleta confeccionados em alumínio, sendo eles, 147,483 MJ ao final da primeira vida, onde o maior consumo de energia se concentra na fase do material com 131,474 MJ, aproximadamente 89,1% do consumo total de energia.

Tabela 3. Energia e pegada de carbono por fase do ciclo de vida (quadro de bicicleta de alumínio)

Fase	Energia (MJ)	Energia (%)	Pegada de CO ₂ (kg)	Pegada de CO ₂ (%)
Material	131,47	89,1	9,74	89,3
Fabricação	12,68	8,6	0,95	8,7
Transporte	1,92	1,3	0,11	1,1
Utilização	0	0	0	0
Descarte	1,4	0,9	0,09	0,9
Total (para a primeira vida)	147,48	100	10,91	100
Potencial de fim da vida útil	-64,65		-4,49	

Fonte: Elaborada pelos autores no *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory (2024).

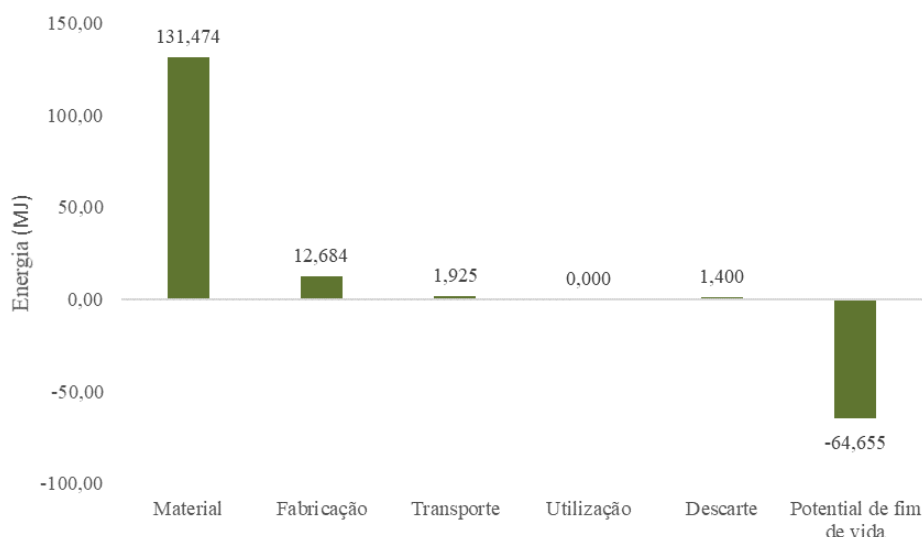


Gráfico 3. Análise de energia por fase do ciclo de vida (Quadro de alumínio).

Fonte: Ansys GRANTA EduPack Introductory (2023).

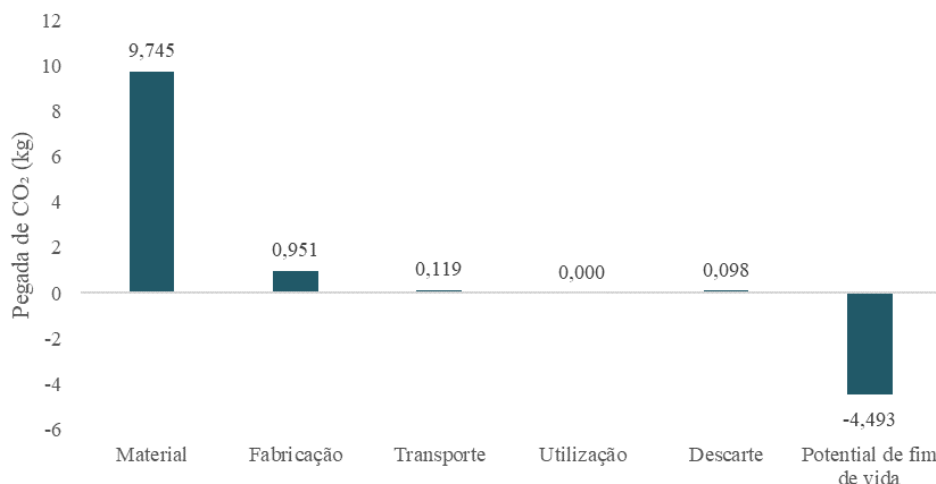


Gráfico 4. Análise da pegada de carbono por fase do ciclo de vida (Quadro de alumínio).
Fonte: Elaborada pelos autores no *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory (2024).

Com o relatório do Eco Audit obteve-se também as análises de energia e pegada de carbono. Os Gráficos 3 e 4 detalham estas análises, concluindo um potencial de fim de vida útil de -64,65 MJ e -4,49 Kg de CO₂. É importante destacar que os dados de fim de vida útil levam em consideração todas as etapas do ciclo de vida do material, incluindo as formas de descarte.

Quando comparada com os estudos de Azevedo (2018), que concluiu para quadros de bicicletas confeccionadas em alumínio, dados que se aproximam de 42,6 kg de CO₂ no final do ciclo de vida, a atual pesquisa encontrou dados que não se assemelham, por motivos de métodos diferentes de transporte e descarte. Porém ao observar as pesquisas de Azevedo (2018) esperava-se do alumínio uma menor emissão e comparação com os valores encontrados para quadros de fibra de carbono.

4.3 Quadro de bicicleta em aço carbono

Realizadas as análises da Tabela 4, comparou-se o consumo de energia e a pegada de carbono de um quadro de bicicleta fabricado em aço carbono. Os dados presentes na tabela revelam uma redução de 57,52% no consumo de energia e uma diminuição de 56,67% na pegada de carbono.

Tabela 4. Energia e pegada de carbono por fase do ciclo de vida (quadro de bicicleta de aço de carbono).

Fase	Energia (MJ)	Energia (%)	Pegada de CO ₂ (kg)	Pegada de CO ₂ (%)
Material	77,62	83,8	5,82	84,4
Fabricação	10	10,8	0,75	10,9
Transporte	2,88	3,1	0,17	2,6
Utilização	0	0	0	0
Descarte	2,1	2,3	0,14	2,1
Total (para a primeira vida)	92,61	100	6,9	100
Potencial de fim da vida útil	-53,27		-3,91	

Fonte: Ansys GRANTA EduPack Introductory (2023).

Do mesmo modo, a Tabela 4 ainda detalha as demandas de energia e a pegada de CO₂ ao longo de todo o ciclo de vida do quadro de bicicleta de aço carbono, com números que indicam um consumo de 92,64 MJ de energia e uma emissão de 6,9 Kg de CO₂ durante a primeira vida (considerou-se uma primeira vida de um ano).

Por sua vez, os Gráficos 8 e 9 ilustram a distribuição de energia e pegada de carbono nas etapas de material, transporte, fabricação, utilização e descarte. Nesse contexto, ao considerar um potencial fim de vida, observa-se uma redução no consumo de energia de 53,27 MJ e uma diminuição de 3,91 kg de CO₂.

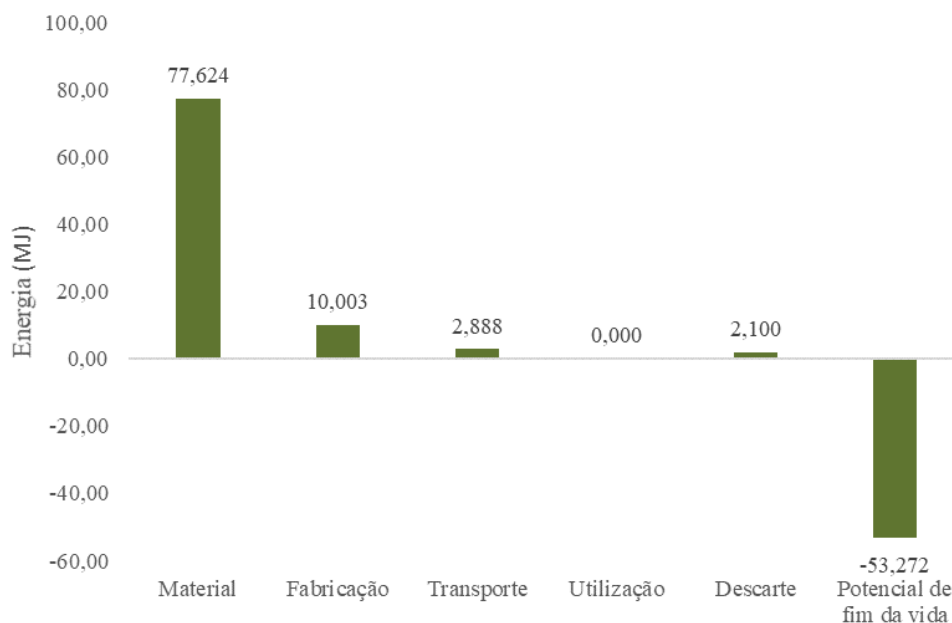


Gráfico 5. Análise de energia por fase do ciclo de vida (Quadro de aço carbono).

Fonte: Elaborada pelos autores no *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory (2024).

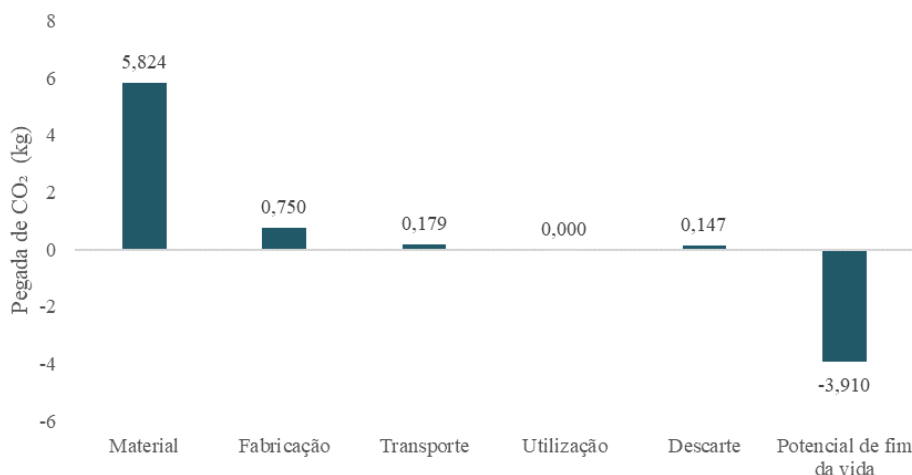


Gráfico 6. Análise da pegada de carbono por fase do ciclo de vida (Quadro de aço carbono).

Fonte: Ansys GRANTA EduPack Introductory (2023).

Os resultados apresentados neste estudo são importantes para a compreensão da distribuição de consumo de energia dos objetos de estudo e da sua pegada de carbono, vindo a corroborar com os estudos realizados nesta área. Foram comparados quadros de bicicleta feitos em fibra de carbono, alumínio e aço carbono, a fim de observar o rastro de carbono destes objetos.

Nos Gráficos 7 e 8, uma análise comparativa entre os três materiais em estudo é possível por meio de gráficos que retratam o consumo de energia e a pegada de carbono em todas as etapas do ciclo de vida desses materiais. Destaca-se um notável padrão de alto consumo de energia e uma pegada de carbono significativa associada aos quadros de fibra de carbono, contrastando com os quadros feitos de alumínio e aço carbono. A partir dos gráficos, é possível o cálculo percentual da diferença nas emissões de CO₂ dos quadros de fibra de carbono e aço carbono, sendo estes o maior e o menor emissor respectivamente, chegando a uma diferença de aproximadamente 348%.

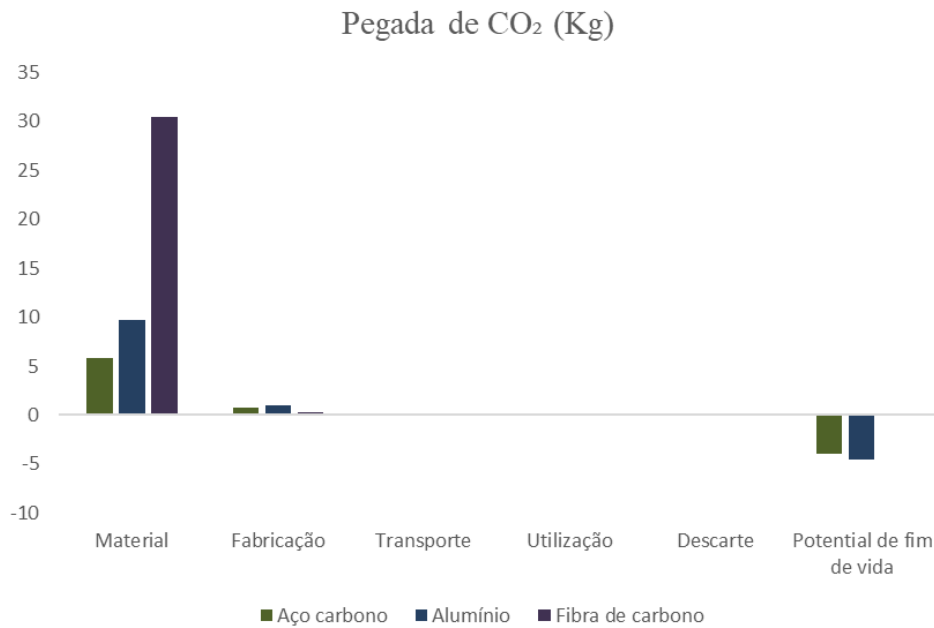


Gráfico 7. Comparativo dos diferentes quadros de bicicleta para emissões de CO₂.
Fonte: Elaborada pelos autores no *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory (2024).

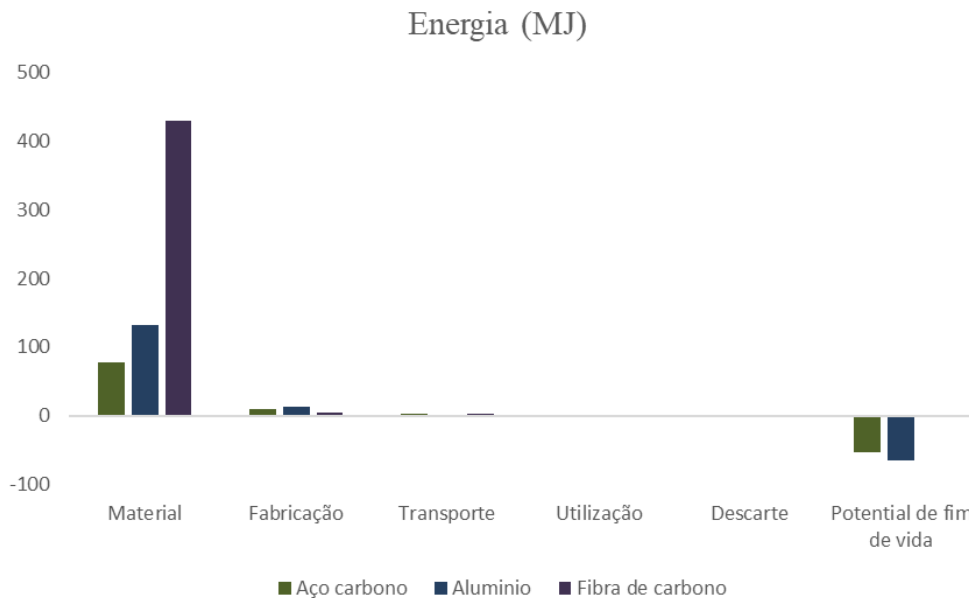


Gráfico 8. Comparativo dos diferentes quadros de bicicleta para energia.
Fonte: Elaborada pelos autores no *software* Ansys GRANTA EduPack Introductory (2023).

Além disso, observa-se que os valores de emissões para a etapa do material aumentam, respectivamente, do aço carbono para o alumínio e a fibra de carbono: 5,82 Kg de CO₂, 9,74

Kg de CO₂ e 30,41 Kg de CO₂. Esses dados corroboram a constatação de que a fibra de carbono é o material com a maior emissão de gases de efeito estufa entre os três estudados. Tal fenômeno é atribuído ao processo de fabricação, no qual a fibra de carbono, em sua fase inicial, emite consideravelmente mais poluentes do que os demais materiais, como enfatizado na fase do material.

Em seus estudos, Azevedo (2018) constatou uma emissão de 6,48 kg de CO₂ ao final de uma vida para bicicletas feitas em aço carbono e, obteve também, para bicicletas confeccionadas em alumínio, dados que se aproximam de 42,6 kg de CO₂ no final do ciclo de vida. Já para uma bicicleta de fibra de carbono, concluiu-se uma emissão de 10,1 kg de CO₂ no ciclo de vida.

O presente estudo, em comparação com os estudos de Azevedo (2018), obteve dados de emissões para o aço carbono de 6,9 kg de CO₂, o alumínio de 10,9 kg de CO₂ e para fibra de carbono de 30,9 kg de CO₂. É possível a percepção de dados semelhantes para o aço carbono, porém os dados para o alumínio e fibra de carbono se diferem. Essa diferença é resultante de diferentes motivos, como processos escolhidos para a fabricação, transporte e reciclagem. Em seu estudo, Azevedo fez uso do software OpenLCA, onde não utiliza percentual de reciclagem na obtenção da matéria prima. Então a etapa do material acaba por tornar as emissões superiores ao estudo em questão, visto que para o alumínio, a atual pesquisa adotou um percentual de 80% de material reciclado.

Agyekum et al. (2017), estudou a comparação de quadros de bicicleta em bambu, alumínio e aço. Os dados obtidos pelo autor, trazem uma diminuição nas emissões relacionadas ao aquecimento global, de 30% na comparação do alumínio com o aço, ou seja, o aço obteve 30% menos emissões em comparação com o alumínio, concluindo que o impacto do aço é superior ao do alumínio.

Por sua vez, os dados obtidos na presente pesquisa, trazem uma diminuição de emissões de carbono, na faixa de 59% ao comparar o aço com o alumínio, e 348% ao comparar o aço com a fibra de carbono. Sendo assim, o aço carbono é o material menos poluente ao fim da primeira vida, e a sua maior concentração da pegada de carbono está na extração do material.

Ao analisar, exclusivamente, os dados relacionados à extração de materiais e à fabricação de bicicletas, para o quadro confeccionado em aço carbono, identifica-se que um quadro com 1,5 kg de aço, emite 5,81 Kg de CO₂. Ao realizar uma análise obteve uma emissão de 3,87 tCO₂ a cada tonelada de aço. Song (2023) em seus estudos obteve a relação de emissões de dióxido de carbono por tonelada de aço de 2.33 tCO₂/t. Trazendo outra comparação tem-se o estudo de Dolci e Tua (2024) que obteve uma relação de 2,08 tCO₂/t de aço carbono. O resultado encontrado na atual pesquisa não possui diferenças significativas com os ambos autores, comprovando assim que a produção do aço é o principal fator de emissão ao produzir um quadro de bicicleta. É importante ressaltar que a comparação de dados muitas vezes se torna complexa devido a diversos fatores, tais como a taxa de reciclagem dos materiais envolvidos no estudo.

Dentro dos resultados obtidos, é possível também, a análise e comparação do potencial de fim de vida de cada um dos materiais. O aço carbono possui um potencial de fim de vida em torno de -53,3 MJ ou -3,9 kg de CO₂. Para o alumínio estes valores estão maiores, com um potencial de -64,7 kg de CO₂ e -4,5 MJ de energia necessária. Por sua vez, os valores de potencial de fim de vida da fibra de carbono são nulos.

Ao analisar estes dados, tem-se a constatação de que devido ao processo de reciclagem do alumínio e do aço carbono o potencial de fim de vida está negativo, significando que há uma

compensação das emissões de carbono ao longo do ciclo de vida destes materiais. Entretanto, o potencial de fim de vida da fibra de carbono é nulo (compensação das emissões ao longo do ciclo de vida) devido às dificuldades de reciclagem da fibra de carbono, como custo das tecnologias necessárias e ao fato de ser uma tecnologia relativamente nova.

O cálculo do potencial de fim de vida leva em consideração os processos de descarte dos materiais. Como explicado na metodologia, o software retorna os valores para a primeira vida do material e para o potencial de fim de vida a fim de evitar a dupla contagem de carbono. Sendo assim, os valores de potencial de fim de vida podem ser considerados o crédito de carbono gerado do processo escolhido para descarte, ou seja, a reciclagem para aço carbono e alumínio e o aterro para a fibra de carbono.

5. CONCLUSÃO

Este estudo se dedicou a analisar as emissões de carbono associadas aos diferentes materiais utilizados na produção de quadros de bicicleta, com foco principal em aço carbono, alumínio e fibra de carbono. Os resultados obtidos auxiliam na compreensão do impacto ambiental desses materiais ao longo de seu ciclo de vida.

Uma vez que o objeto de estudo é a bicicleta, é esperada a maior concentração de emissões no processo de extração da matéria prima. Dentre os materiais estudados nota-se que a obtenção da fibra de carbono, torna este material o maior emissor de CO₂ na etapa do material em comparação com os demais. Sendo assim, o aço carbono, o alumínio e a fibra de carbono possuem, respectivamente: 84,4%, 89,3% e 98,4% das emissões concentradas no material.

Ao comparar os três materiais, destacou-se uma diminuição expressiva nas emissões de carbono ao optar pelo aço carbono em vez do alumínio, com uma redução de aproximadamente 59%. Destacou-se ainda a constatação de que, em comparação com a fibra de carbono, o aço carbono apresentou uma redução massiva de 348% nas emissões de carbono.

Também é relevante considerar os potenciais de fim de vida útil, que indicam a capacidade dos materiais em serem reciclados ao final de sua vida útil, onde o aço carbono e o alumínio apresentam resultados satisfatórios. Notavelmente, a fibra de carbono é o único material a apresentar um potencial nulo, uma vez que sua reciclagem é complexa e com custos elevados de tecnologias para tal feito.

Este estudo relaciona as emissões ao longo do ciclo de vida de quadros de bicicleta confeccionados em fibra de carbono, alumínio e aço carbono. Teve como limitador da pesquisa a falta de pesquisas já realizadas na área. Desta forma o atual estudo vem para contribuir com o comparativo das emissões, que devem ser levadas em conta, para a produção de quadros de bicicleta.

As tecnologias relacionadas à fabricação de bicicletas têm, historicamente, priorizado a eficiência, resistência, peso, entre outros aspectos. Contudo, diante dos crescentes níveis de emissões de carbono e dos danos ambientais, é crucial considerar a importância de futuras pesquisas nesse campo. Estudos futuros poderiam investigar e comparar as emissões resultantes dos processos de fabricação de quadros de bicicleta utilizando materiais inovadores como materiais compósitos. Essa abordagem é fundamental para promover a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental na produção de bicicletas, contribuindo para uma mobilidade mais ecológica e consciente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina pelo financiamento do projeto de pesquisa.



REFERÊNCIAS

- ABNT. (2009). *NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Agyekum, E. O., Fortuin, K. P. J., & Harst, E. van der. (2017). Environmental and social life cycle assessment of bamboo bicycle frames made in Ghana. *Journal Of Cleaner Production*, 143, 1069-1080.
- Antón-González, L., et al. (2023). Cycling in urban environments: quantitative text analysis. *Journal Of Transport & Health*, 32, 101651. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2023.101651>
- Azevedo, A. J. T. de. (2018). *Análise do Ciclo de Vida de quadros de bicicleta em aço, alumínio e fibra de carbono* (Dissertação de Mestrado). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Coelho, M. C., & Almeida, D. (2015). Cycling Mobility – A Life Cycle Assessment Based Approach. *Transportation Research Procedia*, 10, 443-451.
- Dolci, G., & Tua, C. (2024). *CO₂ Emissions from Bicycles: A Study by Politecnico di Milano*. Politecnico di Milano.
- Ferreira, A. D. B. L., Silva, A. D. de M. M., Costa, M. I. M., & Abreu, S. A. C. (2014). *Análise Estrutural do Quadro de uma Bicicleta* (Dissertação de Mestrado). Universidade do Porto, Porto.
- Frare, M. (2020). Ciclovias: a utilização da bicicleta como forma de desenvolvimento sustentável - estudo Av. Brasil - Cascavel - Parana - Brasil. *Revista Competitividade e Sustentabilidade*, 7, 93.
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Maitland, M. E. (2012). Purposeful Exercise, Including Bicycle Transportation, Improves Health. *Clinical Journal Of Sport Medicine*, 22(3), 292-293. <https://doi.org/10.1097/jsm.0b013e318256e797>
- Marques, F. A. (2013). *Estudo Comparativo das propriedades mecânicas do Quadro de Bicicletas, fabricados com Alumínio, Titânio e aço* (Trabalho de Conclusão de Curso). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Melo, R. H. J. de, Ferreira, H. S., Ferreira, G. V. M., & Adão, M. C. R. (2021). Reciclagem metálica veicular com redução na emissão de CO₂ e consumo energético. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 16(6), 96-140.
- Nuss, P., & Eckelman, M. J. (2014). Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. *PloS one*, 9(7), e101298.
- Roy, P., Miah, M. D., & Zafar, M. T. (2019). Environmental impacts of bicycle production in Bangladesh: A cradle-to-grave life cycle assessment approach. *SN Applied Sciences*, 1, 700. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0721-z>
- Santamaría, A. B. H. de. (2022). *Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono* (Dissertação de Mestrado). Comillas Universidad Pontificia- Icaí, Madrid.
- Santos, S. F., De Lima, L. R. P., Da Silva, J. J. M., & Paciornik, S. (2020). Sustainability analysis of steelmaking in an integrated steelworks with different steel grades and energy sources. *Metals*, 10(9), 1117. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- Song, X., Du, S., Deng, C., Shen, P., Xie, M., Zhao, C., Chen, C., & Liu, X. (2025). Carbon emissions in China's steel industry from a life cycle perspective: Carbon footprint insights. *Journal of Environmental Sciences*, 148, 650-664. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.04.027>
- Suthahar, P., et al. (2023). Design and analysis of bicycle frame by using metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.355>
- Zoltek. (n.d.). *What is carbon fiber?* Zoltek. Retrieved August 15, 2024, de <<https://zoltek.com/carbon-fiber/what-is-carbon-fiber/>>. Acesso em: 15/08/2024.