

BICICLETA DE ALUMÍNIO *VERSUS* FIBRA DE CARBONO: ESTUDO COMPARATIVO

João Hermínio de Queiroz Heráclio Filho

Estudante de Engenharia Mecânica, Recife, Brasil, E-mail: joaoheracliofilho@outlook.com

Sidney R. Cunha

Professor do Curso de Engenharia Mecânica, UniFG, Recife, Brasil, E-mail

RESUMO: Este trabalho aborda as características estruturais e propriedades mecânicas do alumínio e do aço e compara seu desempenho na construção de bicicletas de competição de ciclismo de estrada. Para isso, realizou-se um estudo comparativo entre uma bicicleta constituída de fibra de carbono e uma bicicleta constituída de alumínio, objetivando demonstrar a vantagem da fibra de carbono sobre alumínio, tanto em relação a densidade, resistência e outras propriedades, como em relação à performance e desempenho do atleta.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência, Densidade, Alumínio, Fibra de Carbono.

ABSTRACT: This work addresses the structural characteristics and mechanical properties of aluminum and steel and compares their performance in the construction of road cycling competition bicycles. For this, a comparative study was carried out between a bicycle made of carbon fiber and a bicycle made of aluminum, aiming to demonstrate the advantage of carbon fiber over aluminum, both in relation to density, resistance and other properties, as well as in relation to the athlete performance and performance.

KEYWORDS: Resistance, Density, Aluminum, Carbon Fiber.

1 Introdução

De acordo com Motta (2022), os primeiros esboços do que viria a ser uma bicicleta foram encontrado na coleção de documentos de Leonardo da Vinci (1452-1519). Tais esboços prenunciam um acervo de tecnologias que viriam a ser aplicadas, aproximadamente, 400 anos após o aparecimento, de fato, das primeiras bicicletas, tais como rodas com aros de madeira, sistema de pedais e transmissão por corrente e roda dentada. Aliás, tanto a inclusão do pedal como a de manivelas, capazes de tornar o veículo mais veloz e mais agradável, foram as responsáveis pela aceitação da bicicleta enquanto veículo de tração humana. Isto posto, logo a bicicleta começou a ser utilizada para a prática de esportes, datando do final do século XIX, de modo que, desde o século XX, os modelos de bicicletas encontram-se em constante evolução visando suprir as necessidades dos ciclistas competitivos de acordo com determinadas variações de uso e de terreno. O setor responsável pela produção de bicicletas, nesse sentido, deu início ao desenvolvimento de novos materiais capazes de proporcionar vantagens aos competidores, tais como leveza, resistência e velocidade.

Segundo Gräbin (2022), uma bicicleta é constituída por diversos elementos cujas funcionalidades, apesar de distintas, são complementares, de maneira que, quando unidas, possibilitam a conquista de um objetivo. Tais elementos apresentam-se agrupados em quatro conjuntos: (1) rodas, aros e pneus; (2) garfo e suspensão; (3) quadro, câmbio dianteiro, câmbio traseiro, pedivela e pedais; (4) selim e canote. O primeiro conjunto, constituído pelas rodas, aros e pneus, apresenta características diversas a depender do modelo e do uso da bicicleta. Por exemplo, enquanto bicicletas destinadas à competição apresentam rodas mais rígidas a fim de ocasionar menor dispersão de energia em pneus mais finos, bicicletas destinadas à trilhas exibem rodas menos rígidas a fim de absorver impactos e proporcionar conforto. O segundo conjunto, constituído pelo garfo e pela suspensão, objetiva a absorção de impactos e eventuais irregularidades da pista, reduzindo a vibração direcionada ao piloto e otimizando a estabilidade e conforto. O terceiro conjunto, constituído pelo quadro, câmbio dianteiro, câmbio traseiro, pedivela e pedais, tem suas características variáveis a depender da função e objetivo da bicicleta. Já o quarto conjunto, constituído pelo selim e pelo canote, correspondem à última etapa de amortecimento de vibrações. Além disso, o selim caracteriza-se por ser o assento do piloto.

Segundo Motta (2022), dentre as modalidades de competição existentes atualmente, o ciclismo de estrada caracteriza-se como sendo a primeira, tendo iniciado na segunda metade do século XIX. Isto posto, a primeira competição de que se tem registro aconteceu na data 31 de maio de 1868, no *Parc de Saint-Cloud*, localizado em Paris. Assim sendo, o ciclismo de competição de estrada, por sua vez, divide-se nas categorias contra relógio individual e corrida de estrada. Por um lado, a categoria de ciclismo contra relógio caracteriza-se pela competição através de percurso individual, na qual o competidor vencedor deve realizar o percurso em menor tempo. Por outro lado, a categoria corrida de estrada caracteriza-se pela largada conjunta dos competidores, vencendo aquele que chegar à linha de chegada primeiro. Independente da categoria, as bicicletas mais indicadas para tais competições são intituladas *road bike* ou *speed*. Tais modelos de bicicletas, nesse sentido, são projetadas para permitir uma performance superior tanto quanto à velocidade como em relação à percursos de longa duração.

Sendo assim, Azevedo (2018) assegura que, visando suprir as necessidades do ciclista, essas bicicletas são projetadas em formato aerodinâmico, no qual o guidão aparece intencionalmente para baixo. Além disso, são construídas, em sua maioria, em fibra de carbono ou alumínio, garantindo rigidez e leveza; as rodas, por sua vez, são propositalmente leves, com pneus finos e alta pressão; apresentam mínima aderência ao solo; aceleram rapidamente e apresentam capacidade de manter a alta velocidade. Faz-se necessário ressaltar que tais modelos de bicicleta são restritos ao uso em asfalto, cujo desempenho apresenta-se satisfatório diante de uma estrada em boas condições.

Segundo Rezende (2012), a fibra de carbono, inicialmente, foi desenvolvida para uso na indústria aeroespacial e, posteriormente, adotou-se sua utilização nas indústrias automobilística, naval e de construção civil. Em contrapartida o alumínio, utilizado amplamente na construção de bicicletas atualmente, inicialmente era utilizado para produção de vasos de barro contendo óxido de alumínio. Para adequar-se aos objetivos deste trabalho, destacou-se seu uso na construção de bicicletas de competição, de modo que será enfatizado as bicicletas de modelo *speed* constituídas de fibra de carbono e alumínio, pois são os materiais mais comumente encontrados na fabricação de bicicletas desse modelo.

2 Referencial Teórico

Ribeiro (2013) declara que ciclismo competitivo, por sua vez, viabiliza a construção de bicicletas mediante o uso de materiais estruturais que promovem melhor desempenho, tais como liga não-ferrosas, principalmente alumínio e titânio; polímeros reforçados com fibras e materiais compósitos avançados, especialmente fibras de carbono. O design dos quadros, portanto, é produzido visando características específicas a respeito do peso, da rigidez, do conforto do utilizador e do consumo de energia do ciclista. A energia, por sua vez, utiliza-se, sobretudo, na propulsão, de modo que apenas uma parte se direciona à deformação elástica da estrutura. Sendo assim, objetivando o melhor desempenho do ciclista de competição, o quadro da bicicleta deve harmonizar com as dimensões antropométricas do ciclista (peso, circunferência abdominal, altura, índice de massa corporal, percentual de gordura e índice de padrão de crescimento) e ser leve dentro do possível. Além disso, deve apresentar resistência mecânica para absorver eventuais tensões derivadas dos choques causados pelas irregularidades do terreno; deve ser capaz de suportar a carga constante de pedalada e impactos súbitos e deve ser resistente à corrosão.

2.1 Alumínio

Segundo Azevedo (2018), o alumínio corresponde ao segundo metal mais usado na construção de bicicletas devido à sua capacidade de propiciar uma experiência rígida ao atleta ao mesmo tempo que apresenta excelente relação de custo benefício. Ademais, o alumínio exibe diversas propriedades mecânicas essenciais para o ciclismo de competição, tais como elevada resistência à corrosão, resistência à fadiga, baixa relação peso:resistência, dentre outras. Além disso, conforme declara Rezende (2018), o alumínio apresenta densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$ e resistência à tração de aproximadamente 70 a 700 MPa e sua composição química constitui-se de magnésio (Mg), silício (Si), cobre (Cu), manganês (Mn) e cromo (Cr).

De acordo com Ribeiro (2013), o alumínio caracteriza-se por apresentar significativa rigidez, capaz de aprimorar a movimentação e a aceleração durante um *sprint* ou uma subida. Além disso, o alumínio exibe ampla resistência à corrosão, entretanto, apresenta maior predisposição ao surgimento de falhas por fadiga e de danos devido à impactos. Atualmente, a liga de alumínio AISI 6061 apresenta-se como a mais utilizada na construção de quadros de bicicleta devido à boa capacidade de soldabilidade, subdividindo-se em 6061-O, 6061-T4 e 6061-T6. Isto posto, tais ligas assemelham-se entre si quanto ao peso (densidade) e rigidez, entretanto, a resistência apresenta variação em detrimento do tratamento térmico e dos elementos utilizados na composição. Nesse sentido, a liga 6061-O caracteriza-se por ser uma liga de recozido, sendo a mais frágil e, portanto, não recomendada para uso nos tubos do quadro. A 6061-T4, por sua vez, é produzida a partir de tratamento térmico com envelhecimento natural, sendo cerca de duas vezes mais resistente que a 6061-O. Finalmente, a 6061-T6 apresenta-se como a mais resistente entre as três ligas e, portanto, mais comumente utilizada, sendo produzida através de tratamento térmico com envelhecimento artificial.



Figura 1. Chapa de alumínio, (Azevedo, 2018).

2.2 Fibra de Carbono

De acordo com Small (2021), a fibra de carbono tem apresentado-se como material de primeira escolha para a construção de bicicletas de alto desempenho devido a alta resistência à tração, alta rigidez e baixa relação entre peso e resistência que, por sua vez, permite a construção de quadros mais leves. A fibra de carbono, nesse sentido, corresponde a um material composto caracterizado por constituir-se de dois ou mais materiais, com particularidades físicas e químicas em proporções distintas, que permanecem separados entre si dentro de determinada estrutura. Os materiais constituintes são chamados matriz e reforço de modo que utiliza-se o material da matriz para sustentar o material de reforço e para proporcionar estabilidade e proteção em relação a ataques químicos ou danos mecânicos. O material de reforço, por sua vez, promove maior rigidez. A combinação desses materiais possibilita maior leveza, resistência e velocidade. Rezende (2012) aponta que a fibra de carbono apresenta características físico-mecânicas essenciais e decisivas para sua inclusão na produção de bicicleta de competição e seus componentes. A fibra de carbono *high modulus* (HM), por exemplo, apresenta propriedades mecânicas de força de tração de 3530 Mpa e densidade de $1,8 \text{ g/cm}^3$.

Isto posto, conforme declara Santamaría (2022), a fibra de carbono corresponde a um tecido bastante resistente mecanicamente, além de apresentar-se duradoura e flexível. Suas principais características incluem elevada resistência e rigidez, leveza e elegância. A fibra de carbono pode apresentar até cinco vezes mais resistência que o aço e apresenta-se mais leve que o alumínio. Entretanto, devido à suas características

benéficas, a fibra de carbono exige alto custo de material e fabricação. Ademais, de acordo com Azevedo (2018), a fibra de carbono compõe-se, em sua maioria por átomos de carbono unidos por cristais microscópicos, os quais encontram-se dispostos paralelamente ao eixo da fibra, resultando em uma fibra notadamente forte para a sua dimensão. Para criar um fio de carbono, dezenas de fibras deste material precisam ser torcidas.

Em outras palavras, segundo Ribeiro (2013), o termo fibra de carbono refere-se à soma de materiais sintéticos que permitem o desenvolvimento de um material composto chamado compósito que, por sua vez, constitui-se de polímeros de carbono e de grafite mantidos em uma matriz de resina epoxídica. São produzidas a partir de fibras de poliacrilonitrilo (PAN) através de estabilização, carbonação e grafitação. Durante a estabilização, por sua vez, as fibras PAN são submetidas ao alongamento, visando a obtenção do alinhamento das redes fibrilares no interior de cada fibra, e, posteriormente, são submetidas à oxidação em uma temperatura entre 200 e 220°C. Na carbonação, as fibras PAN são aquecidas a uma temperatura entre 1000 e 1500°C para transformarem-se em fibras de carbono através da eliminação de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio. Durante esse processo, são formadas fibrilas ou fitas com estrutura de grafite no interior de cada fibra, responsáveis por proporcionar o aumento da resistência à tração desse material. A grafitação, por sua vez, realiza-se a uma temperatura de 1800°C e responsabiliza-se por aumentar o módulo de elasticidade, entretanto, diminui a resistência à tração.



Figura 2. Fibra de carbono IM, (Azevedo, 2018).

3 Metodologia

Trata-se de uma pesquisa teórica constituída através de literatura especializada e artigos científicos — encontrados através de portais acadêmicos no formato *online*, tais como Google Acadêmico e Scientific Electronic Online (SciELO). A pesquisa foi realizada mediante as palavras chaves “bicicleta”, “fibra de carbono”, “alumínio”, “mecânica de bicicleta” e “ciclismo”. Para serem selecionados, os estudos deveriam cumprir os seguintes critérios: (1) escritos em português, espanhol ou inglês; (2) publicados no intervalo entre 2000 e 2023; (3) tratar da mecânica da bicicleta. Além da pesquisa teórica, realizou-se um estudo comparativo entre uma bicicleta de fibra de carbono e de alumínio. O estudo objetivou destacar eventuais diferenças de performance em relação ao material de composição da bicicleta.

Para realizar o estudo, utilizou-se duas bicicletas, sendo uma de fibra de carbono e uma de alumínio. Primeiramente, utilizou-se uma bicicleta de fibra de carbono da marca *Soul*, modelo 3R5 Aero, com quadro em fibra de carbono T800; relação de marcha com grupo de transmissão sram rival de 11 velocidades com pneus de 28c de espessura e pressão de pneus a 100psi; coroa de 53t/39t; cassete 11t/28t e peso aproximado de 8,3kg.



Figura 3. Bicicleta da marca Soul, modelo 3R5 Aero, (2023).



Figura 4. Teste prático com bicicleta da marca Soul, modelo 3R5 Aero, (2023).

Em seguida, usou-se bicicleta de alumínio da marca Vicinitech, modelo Roubaix 2, com quadro em alumínio 6061; relação de macha com grupo de transmissão sram rival de 11 velocidades com pneus de 23c de espessura e pressão de pneus a 100psi; coroa de 52t/36t; cassete 11t/28t e peso aproxima de 8,1kg.



Figura 5. Bicicleta da marca Vicinitech, modelo Roubaix 2, (2023).



Figura 6. Teste prático com bicicleta da marca Vicinitech, modelo Roubaix 2, (2023).

Para análise de performance de ambas as bicicletas, utilizou-se ciclocomputador/GPS da marca Garmin, modelo Edge 530; um medidor de frequência cardíaca da marca Garmin, modelo HRM; e um medidor de potência da marca Garmin, modelo Vector 3S, localizado no pedal esquerdo.



Figura 7. Ciclocomputador/GPS da marca Garmin, modelo Edge 530, (2023).



Figura 8. Medidor de frequência cardíaca da marca Garmin, modelo HRM, (2023).



Figura 9. Medidor de potência da marca Garmin, modelo Vector 3S, (2023).

O estudo foi realizado em via local, no bairro de Maria Farinha, na cidade de Paulista, em Pernambuco. O percurso apresentou cerca de 3,65km de extensão, com desnível estimado em 36m.

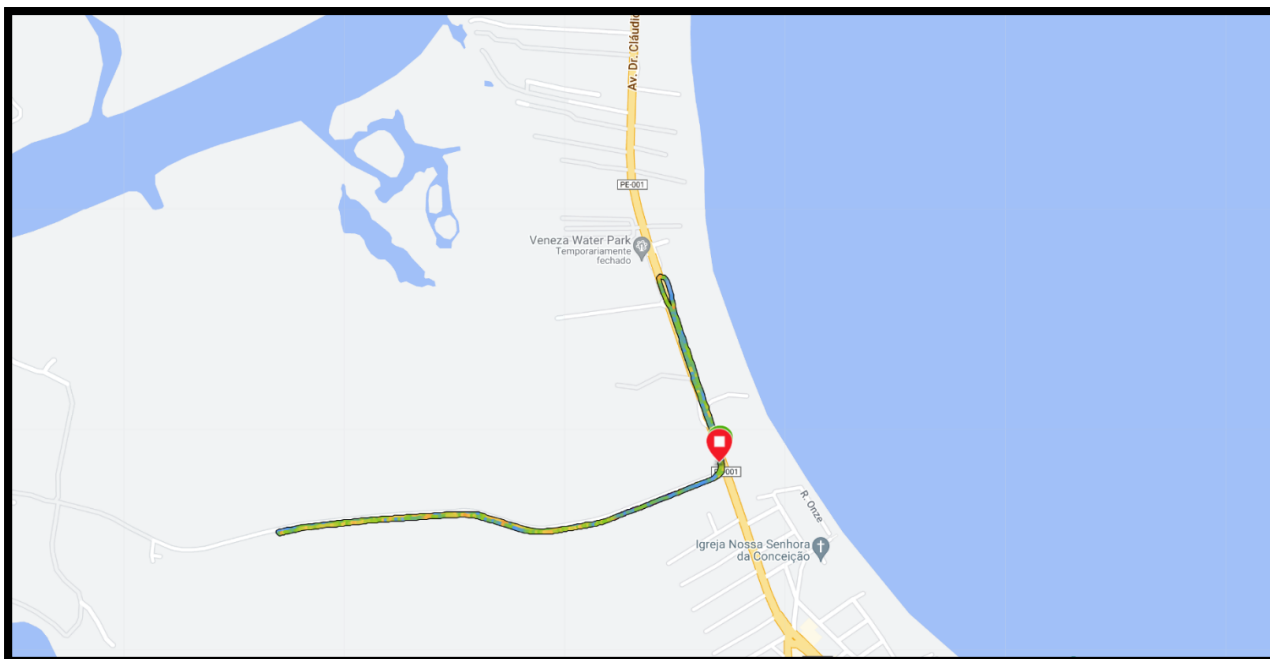


Figura 10. Mapa demonstrativo do percurso, (2023).

O estudo dividiu-se em quatro partes: (1) início do percurso com 1.1km de extensão; (2) subida principal com 0,34km de extensão; (3) retorno com 1,84km; (4) percurso final com 0,37km de extensão. De modo geral, as quatro partes referem-se aos testes com ambas as bicicletas. Sendo assim, a primeira parte objetivou a percepção do comportamento das bicicletas em um percurso plano, sem variação de elevação. Para isso, a potência média e a cadência adotadas correspondem à 150w e 80rpm, respectivamente. A segunda parte objetivou a percepção do comportamento da bicicleta em aclive mediante subida de, aproximadamente, 20m de ganho de elevação. Para isso, adotou-se pedalada em pé com cadência média de 70rpm e potência média de 300w, aproximadamente. A terceira parte do percurso objetivou avaliar a performance da bicicleta em

terreno misto, com pequenas variações de elevação. Para isso, adotou-se potência média de 180w e cadência média de 80rpm. A quarta e última parte objetivou a análise de ambas as bicicletas em descida, com declive de aproximadamente 20m. Para isso, adotou-se potência média de 150w e cadência média de 80rpm.

O percurso com a bicicleta de carbono ocorreu no dia 28 de maio de 2023 às 16:05 horas e encontra-se demonstrada em ambos os gráficos abaixo.

Gráfico 1. Gráfico de estatística da bicicleta em fibra de carbono, da marca Soul, modelo 3R5 Aero.

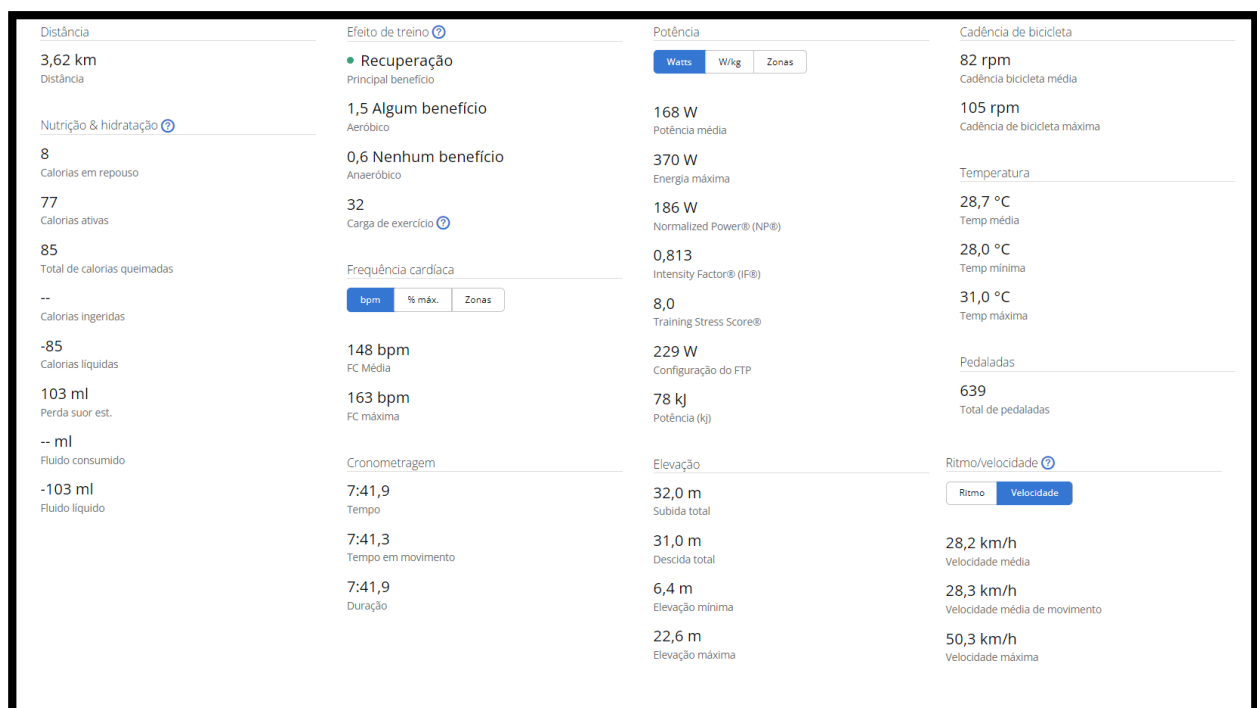
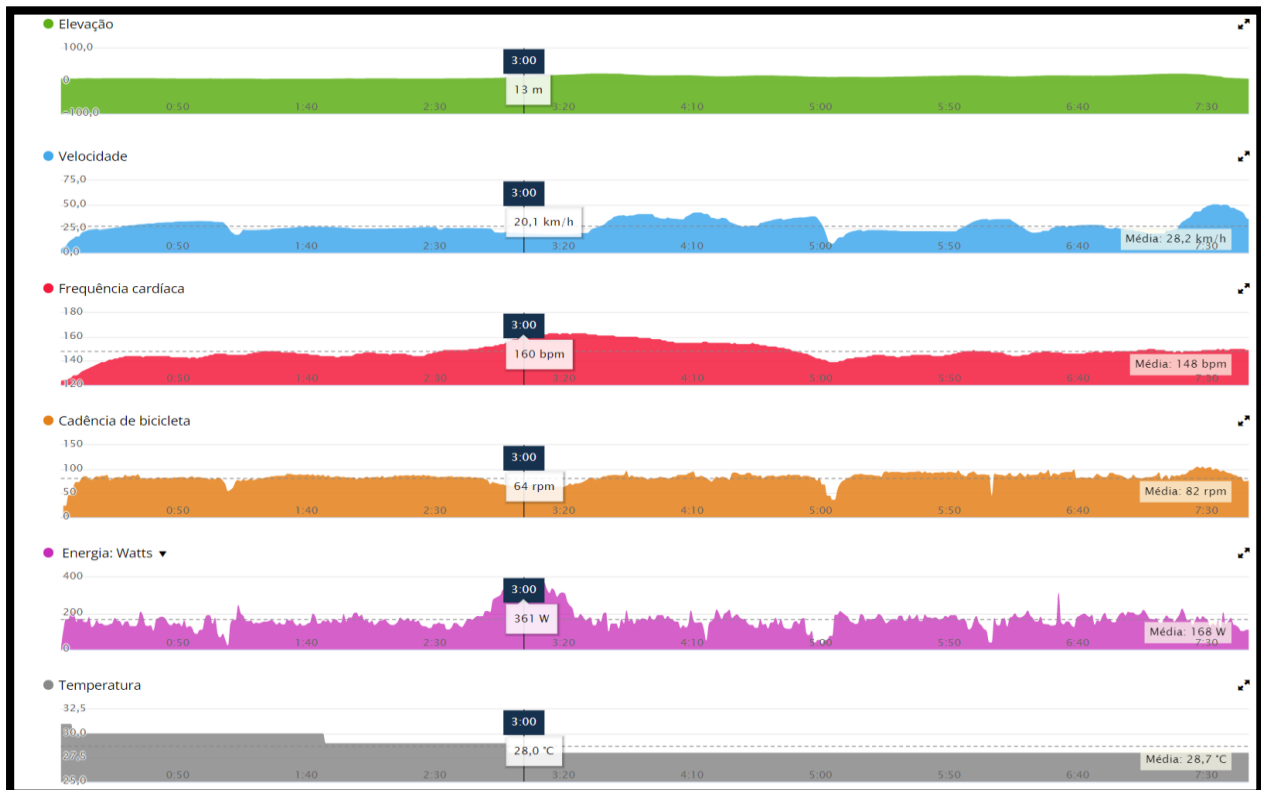


Figura 11. Informações complementares da bicicleta da marca Soul, modelo 3R5 Aero, (2023).

Gráfico 12. Gráfico de estatística da bicicleta em alumínio, da marca Vicinitech, modelo Roubaix 2.

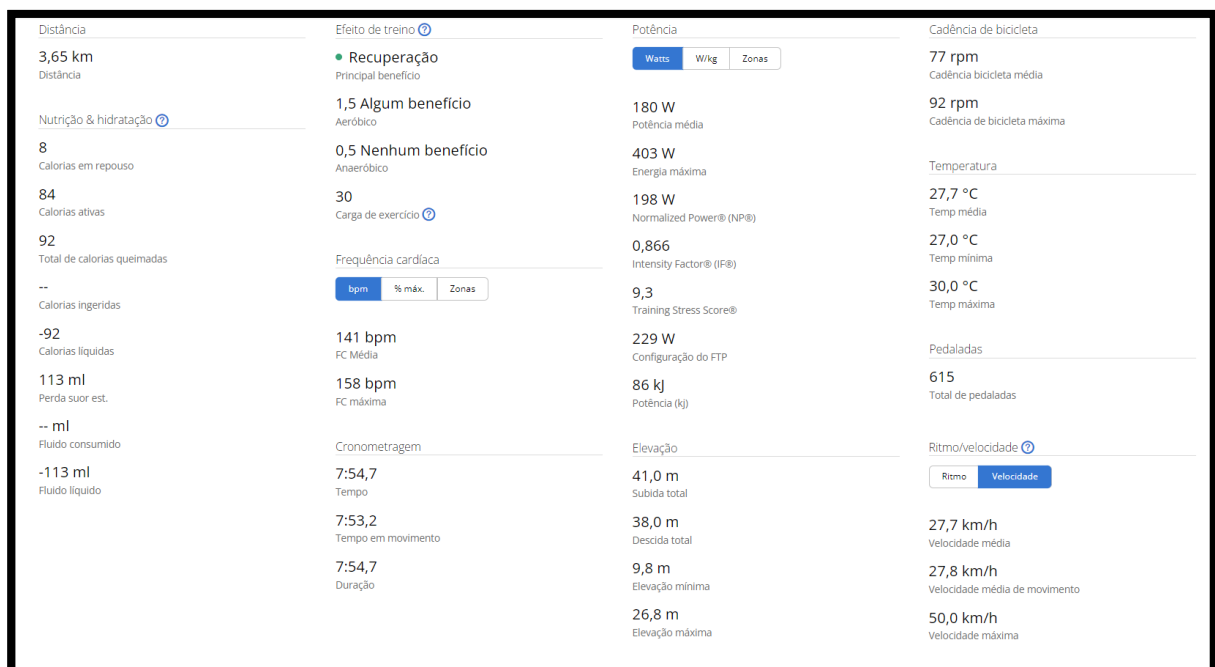
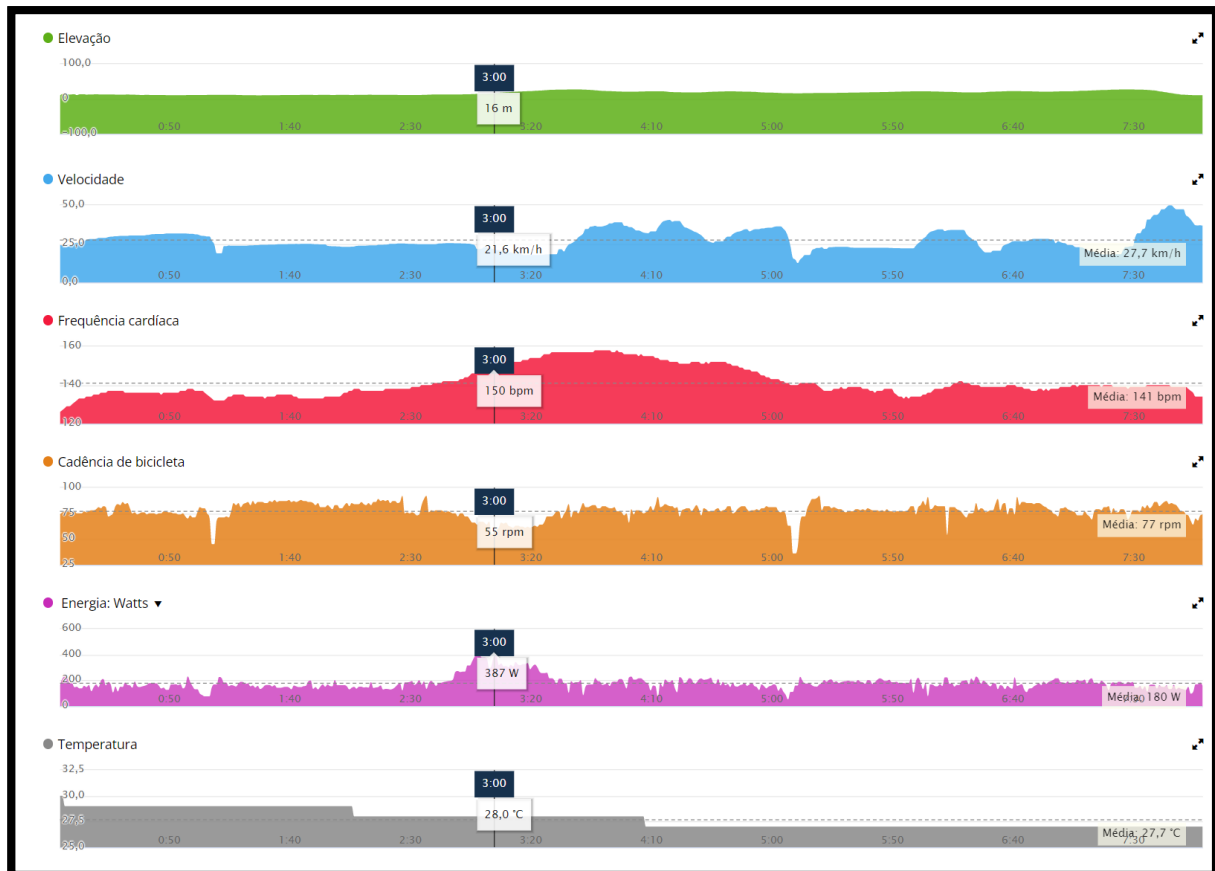


Figura 13. Informações complementares da bicicleta da marca Vicinitech, modelo Roubaix 2, (2023).

4 Resultados e Discussão

O estudo dividiu-se em quatro partes: (1) início do percurso com 1.1km de extensão; (2) subida principal com 0,34km de extensão; (3) retorno com 0,92km; (4) percurso final com 0,37km de extensão. A primeira parte objetivou a percepção do comportamento da bicicleta em um percurso plano, sem variação de elevação. Para isso, a potência média e a cadência adotadas correspondem à 150w e 80rpm, respectivamente. A segunda parte objetivou a percepção do comportamento da bicicleta em alicive mediante subida de, aproximadamente, 20m de ganho de elevação, resultando em uma perceptiva deformação e, consequentemente, desperdício de energia.

Para análise de performance de ambas as bicicletas, utilizou-se ciclocomputador/GPS da marca Garmin, modelo Edge 530; um medidor de frequência cardíaca da marca Garmin, modelo HRM; e um medidor de potência da marca Garmin, modelo Vector 3S. O ciclocomputador apresenta a característica de registrar a atividade e seus respectivos dados de forma igualitária e precisa. O medidor de frequência, por sua vez, possui múltiplos pontos de aferição para registrar o trabalho fisiológico do atleta participante do estudo. Por último, o medidor de potência utilizado compara de forma fidedigna a diferença de performance entre as bicicletas selecionadas para o estudo.

Tabela 1. Tempo de volta com a bicicleta em fibra de carbono, da marca Soul, modelo 3R5 Aero.

Volts ▲	Tempo	Tempo acumulado	Distância	Velocidade média	FC Média	FC máxima	Subida total	Descida total	Cadência bicicleta média	Cadência de bicicleta máxima	Normalized Power® (NP®)	Potência média
1	2:24,9	2:24,9	1,07	26,7	143	148	1	1	81	90	151	150
2	0:53,5	3:18,4	0,33	22,4	155	163	10	0	72	85	237	253
3	1:38,5	4:56,9	0,93	33,9	155	163	8	12	83	96	205	153
4	2:14,1	7:11,0	0,92	24,7	146	150	13	4	86	99	161	166
5	0:30,9	7:41,9	0,37	43,0	149	150	1	14	92	105	174	155
Resumo	7:41,9	7:41,9	3,62	28,2	148	163	32	31	82	105	186	168

Tabela 2. Tempo de volta com a bicicleta de alumínio, da marca Vicinitech, modelo Roubaix 2.

Volts ▲	Tempo	Tempo acumulado	Distância	Velocidade média	FC Média	FC máxima	Subida total	Descida total	Cadência bicicleta média	Cadência de bicicleta máxima	Normalized Power® (NP®)	Potência média
1	2:27,1	2:27,1	1,10	26,9	135	138	7	3	80	92	155	156
2	0:57,4	3:24,5	0,34	21,3	147	156	13	0	69	92	264	270
3	1:39,4	5:03,9	0,92	33,3	152	158	6	13	78	91	208	176
4	2:18,7	7:22,7	0,92	23,8	138	142	14	6	78	92	175	177
5	0:32,0	7:54,7	0,37	41,8	138	140	1	16	78	87	167	154
Resumo	7:54,7	7:54,7	3,65	27,7	141	158	41	38	77	92	198	180

Ademais, buscou-se comparar ambas as bicicletas mediante potência média e massa. Para realizar esse comparativo, utilizou-se a equação $x = \frac{\text{Potência média}(w)}{\text{Massa}(kg)}$, onde $X_{\text{Alumínio}} = \frac{180w}{8,1kg} = 22,22w/kg$ e $X_{\text{Carbono}} = \frac{168w}{8,3kg} = 20,24w/kg$. A partir dos resultados obtidos, constatou-se a vantagem da fibra de carbono em relação ao alumínio, pois a relação da energia gasta em watts médios está diretamente relacionada com a massa da bicicleta testada. Sendo assim, contata-se uma diferença de aproximadamente 10% menor a cada quilograma, ou seja, a cada quilograma, em ambas as bicicletas, foi determinado que o ciclista economiza, aproximadamente, 2w de potencia média.

5 Considerações Finais

Após análise dos dados, constatou-se, de forma expressiva, que o quadro de carbono exibiu ganho de performance expressivamente maior que o de alumínio. Os dados constataam que, apesar de a bicicleta de alumínio ter executado o percurso completo com 14w de potência média a mais, ainda assim foi 13s mais lenta em comparação com a bicicleta de carbono. De fato, fica confirmado a maior vantagem da bicicleta de fibra de carbono na subida da volta, sendo mais rígido, rápido e economizando mais potência que os demais trechos em comparação com a bicicleta de alumínio, obtendo maior destaque. Além disso, a bicicleta de alumínio

apresenta a vantagem de ser mais leve e possuir pneus de menor espessura, uma vez que, na prática, a menor espessura apresenta vantagem sobre pneu mais largo. Todavia, mesmo assim, a bicicleta de fibra de carbono destacou-se nos testes comparativos, sendo mais rápida e poupando mais energia do atleta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, A. J. T. *Análise do ciclo de vida de quadros de bicicleta em aço, alumínio e fibra de carbono*. Orientador: Maria Paula Baptista da Costa Antunes. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2018. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/63684>. Acesso em: 03 jun 2023
- Gräbin, E. F. G. *Estudo do comportamento dinâmico de um modelo de bicicleta*. Orientador: Herbert Martins Gomes. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/240160>. Acesso em: 25 mai 2023.
- Motta, G. P. *Análise dos pontos críticos em sistemas de suspensão de bicicletas de alta performance: estudo de caso*. Orientador: Jean de Dieu Briand Minsongui Mveh. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Centro Universitário Ritter dos Reis, Canoas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/30787>. Acesso em: 25 mai 2023.
- Rezende, R.C. *Aplicação da fibra de carbono na construção de bicicletas e seus componentes*. Orientador: Erik Vitor da Silva. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2012. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/94>. Acesso em: 03 jun 2023.
- Ribeiro, P. M. T. *Análise dinâmica de um quadro de bicicleta*. Orientador: Mario Vaz. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/69186>. Acesso em: 17 mai 2023.
- Santamaría, A. B. H. *Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*. Orientador: Alberto Carnicero López. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia, Universidade Pontificia Comillas, Madri, 2022. Disponível em: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/61193>. Acesso em: 17 mai 2023.
- Small, S. W; Wilson, H. M. Ultrasonic Testing of Carbon Fiber Bicycles. *International Ultrasonic Testing, Online Conference*. Portland, 2021. Disponível em: https://www.ndt.net/article/UTonline2021/Paper/19_Small.pdf. Acesso em: 17 mai 2023.