

Força efetiva relativa no Ciclismo: um conceito com mais de 30 anos e ainda por esclarecer

Autores

Paulo Roriz^{1,2}; Cristina Veloso^{3,4}; António Peres^{5,6}; Henrique Martins¹; Nuno Pimenta¹; José Simões^{7,8}

paulororiz@ismai.pt

Resumo

O esforço despendido por um atleta na execução de uma tarefa motora determinante para o seu rendimento desportivo é um fator crítico na competição e, por conseguinte, objeto de estudo indispensável nas Ciências do Desporto. É neste contexto que se discute a fragilidade do conceito atual de força efetiva relativa, usado no ciclismo para se estudar a força que o ciclista aplica no pedal e que, efetivamente, contribui para a rotação do braço pedaleiro em torno do eixo pedaleiro, ou seja, para a geração de potência útil. Em contrapartida à metodologia empírica atual apresenta-se uma proposta para o cálculo assertivo da força efetiva relativa articulando-se dois fatores críticos no ciclismo de competição: o contributo da força utilizada para gerar potência útil e o da força dissipada.

Palavras-chave: Ciclismo; ciclo de pedalada; força efetiva relativa

¹ CIDESD-ISMAI - Centro de Investigação em Saúde, Desporto e Desenvolvimento Humano, Instituto Superior da Maia (ISMAI) e Instituto Politécnico da Maia (IPMAIA)

² LABIOMEPT – Laboratório de Biomecânica do Porto

³ Instituto Politécnico de Coimbra, ISEC, Departamento de Engenharia Química e Biológica

⁴ CEB - Centre of Biological Engineering, Universidade do Minho, Braga, Portugal

⁵ CIMO - Centro de Investigação de Montanha, ESA, Instituto Politécnico de Bragança

⁶ LSRE-LCM - Laboratório de Processos de Separação e Reação - Laboratório de Catálise e Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

⁷ ESAD - Escola Superior de Artes e Design, Matosinhos

⁸ TEMA – Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

INTRODUÇÃO

A potência gerada no movimento de pedalada executado pelo ciclista é função da força e da velocidade aplicadas no pedal e propaga-se até à roda traseira da bicicleta por um mecanismo concebido para minimizar a dissipação de energia provocada pela produção de calor e ruído, consequências do atrito produzido pelo contacto entre esses componentes. Não obstante, só poderá o sistema (ciclista e bicicleta) deslocar-se, em plano não inclinado, na condição de existência de atrito, este agora desejável, entre a roda traseira e o piso.

Ora, o mecanismo utilizado nas bicicletas para a transmissão de potência impõe um importante constrangimento ao movimento do braço pedaleiro, pois só admite 1 grau de liberdade de rotação. Assim, independentemente da orientação da força aplicada pelo ciclista no pedal e com exceção da rotação do pedal em torno do seu eixo, e do braço pedaleiro em torno do eixo pedaleiro, todos os outros movimentos estão impedidos (Fig.1).

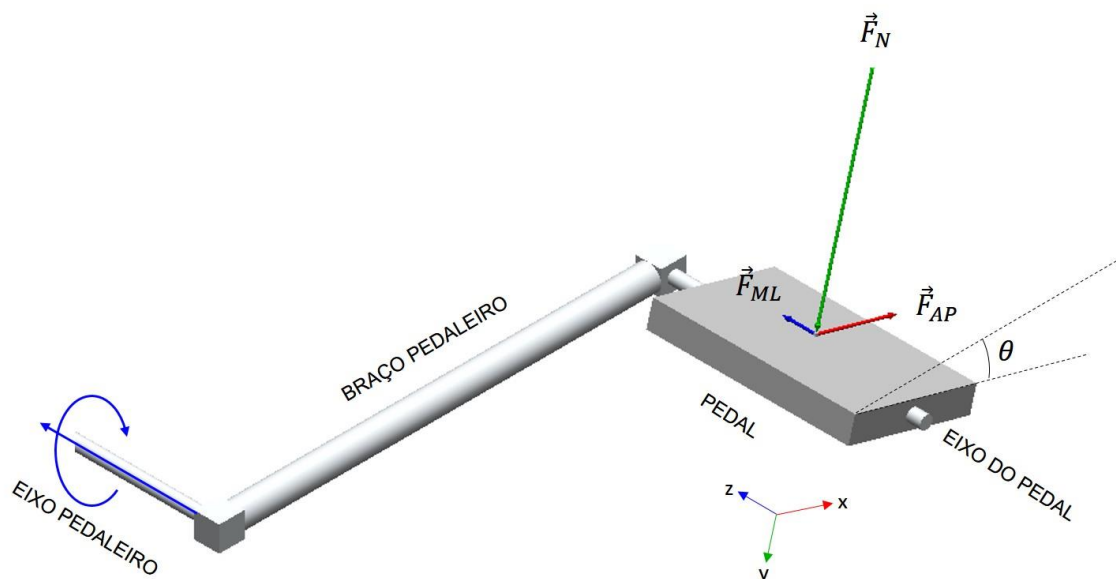


Fig. 1 - Esquema 3D simplificado do mecanismo de rotação do braço pedaleiro. A força aplicada no pedal transmite-se através do seu eixo ao braço pedaleiro e a este só lhe é permitido rodar em torno do eixo pedaleiro. Os componentes vetoriais da força aplicada no pedal pelo ciclista num dado instante do ciclo de pedalada foram definidos de acordo com o referencial ilustrado e designados por: AP: força ântero-posterior; N: força normal; ML: força médio-lateral. O ângulo θ mede a inclinação do pedal em relação ao braço pedaleiro.

Desse constrangimento resulta que nem toda a força aplicada pelo ciclista é utilizada para produzir a rotação do braço pedaleiro. Surgiu, assim, a necessidade de se calcular a força efetiva (FE), definindo-se como o componente da força que contribui para a rotação do braço pedaleiro e, conseqüentemente para a produção de trabalho ou potência útil [1]. A designação “força efetiva” é, porventura, a mais frequente mas não é única, observando-se outras como, por exemplo eficiência motriz, eficiência da pedalada, índice de performance ou de força eficaz, tendo por base igual raciocínio [1, 2].

A aplicação de transdutores de força no pedal ou no braço pedaleiro veio permitir calcular os componentes da força aplicada pelo ciclista durante o ciclo de pedalada [1, 3-5] e, através destes, a FE e o seu contributo relativo, ou seja, a força efetiva relativa (FER) [1].

A metodologia adotada no cálculo da FER, e que resulta da sua ponderação à força resultante (ou total) foi introduzida em 1981 por Hull e Davis [1] e tem permanecido inalterada [2, 6, 7]. Todavia, essa abordagem, que designaremos por escalar e empírica, é insatisfatória e poderá até induzir falsas interpretações.

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a limitação da abordagem atual no cálculo da FER e apresentar uma metodologia alternativa.

CONCEITO ATUAL DE FORÇA EFETIVA E FORÇA EFETIVA RELATIVA

Para se compreender a FER explica-se primeiro o conceito de FE. Na Fig. 1 representou-se, de forma simplificada, os componentes vetoriais da força aplicada pelo ciclista no pedal num dado instante do ciclo de pedalada. Esses componentes designam-se por força ântero-posterior (\vec{F}_{AP}) e força médio-lateral (\vec{F}_{ML}), ambos definidos no plano que corresponde à superfície do pedal, e por força normal (\vec{F}_N), esta perpendicular ao plano definido pelos outros dois [8, 9].

Sem perda de generalidade, admitir-se-á que os componentes AP, ML e N, estão também aplicados no eixo do pedal o qual, por sua vez, se encontra solidário com o braço pedaleiro. Conseqüentemente, pode estudar-se a sua contribuição para a rotação do braço pedaleiro em torno do eixo pedaleiro como demonstrado originalmente por Hull e Davis [1, 10].

Não obstante, para se compreender melhor o contributo da força aplicada pelo ciclista na rotação do braço pedaleiro é comum substituir os componentes AP, N e ML, definidos em função da orientação do pedal, por outros componentes designados por tangencial, radial e axial, definidos em função da orientação do braço pedaleiro e do seu movimento, o qual se traduz por uma rotação no plano em torno de um eixo fixo [4, 11] (Fig. 2).

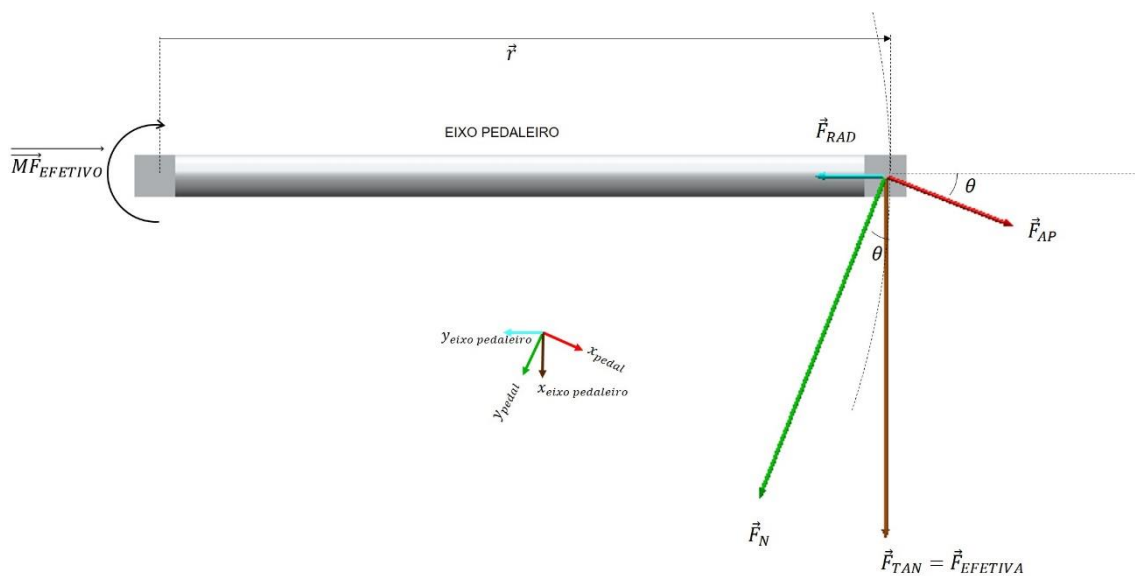


Fig. 2 – Vista 2D do plano (OXY na figura 1) que contém o movimento de rotação pura do braço pedaleiro em torno do eixo pedaleiro. Usando os componentes das forças aplicadas no referencial associado ao pedal, ântero-posterior (AP), normal (N) e médio-lateral (ML), calculam-se as forças aplicadas no referencial associado ao braço pedaleiro (tangencial, radial e axial).

Observa-se na Fig. 2 que o referencial associado ao pedal e o do braço pedaleiro partilham um eixo comum, o eixo OZ. Assim, a força aplicada na direção ML não se altera no referencial do braço pedaleiro, mudando apenas a sua designação para componente axial. Observa-se ainda que a força radial possui a direção definida pelo braço pedaleiro, e passando pelo respetivo eixo, e a força tangencial possui a direção da tangente à trajetória definida pelo movimento de rotação do braço pedaleiro.

O cálculo dos componentes axial, radial e tangencial da força partindo dos componentes AP, N e ML, é obtido aplicando uma matriz de rotação ao vetor força inicial, matriz essa que resulta de se projetar os vetores unitários do referencial inicial (pedal) no novo referencial (braço pedaleiro) e que, por consequência, impõe o

conhecimento do ângulo entre os dois referenciais (o ângulo θ representado nas Fig. 1 e 2).

Na eq. 1 detalha-se o método de cálculo dos componentes axial, radial e tangencial, resultando estes do produto matricial entre a matriz de rotação e o vetor inicial.

$$\begin{bmatrix} F_{TAN} \\ F_{RAD} \\ F_{AXIAL} \end{bmatrix} (N) = \begin{bmatrix} \sin \theta & + \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{AP} \\ F_N \\ F_{ML} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \times F_{AP} + \cos \theta \times F_N \\ -\cos \theta \times F_{AP} + \sin \theta \times F_N \\ 1 \times F_{ML} \end{bmatrix} \quad eq. 1$$

A vantagem de utilizar o referencial do braço pedaleiro resulta da evidência de que apenas a força tangencial produz rotação do braço pedaleiro. Isso deve-se ao constrangimento já descrito, que impõe a rotação do braço pedaleiro num só plano (OXY, na Fig. 1 e 2) e em torno do eixo fixo que lhe é perpendicular (eixo OZ). A força tangencial é, por isso, a FE.

A grandeza física que melhor traduz a rotação gerada pela força tangencial ou FE é o Momento de Força efetivo (MFE). O vetor ($\overline{M\vec{E}_{EFETIVO}}$) possui a direção do eixo pedaleiro e obtém-se a sua intensidade através do produto entre os valores da FE e do braço dessa força, neste caso, o comprimento do braço pedaleiro (caso se trate de uma peça reta como a da Fig. 2).

O MFE é apenas um componente de um vetor mais genérico designado por Momento de Força ($\overline{M\vec{F}}$), este com três componentes calculados através do produto vetorial (eq. 2) entre o vetor posição definido na direção radial (representado por \vec{r} na Fig. 2) e o vetor força.

$$\overline{M\vec{F}} (N m) = \vec{r} (m) \times \vec{F}_{braço\ pedaleiro} (N) = \begin{bmatrix} 0 \\ -r \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{TAN} \\ F_{RAD} \\ F_{AXIAL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \times F_{AXIAL} \\ 0 \\ r \times F_{TAN} \end{bmatrix} \quad eq. 2$$

Como se observa na eq. 2, o componente axial da força também gera Momento, todavia, segundo um eixo cuja rotação não é permitida. Os movimentos gerados pelos componentes axial e radial estão impedidos, embora essas forças gerem esforços no eixo pedaleiro que contribuem para o seu desgaste e folgas. Idealmente, as forças axial e radial seriam nulas ou residuais, orientando-se a força aplicada pelo ciclista na direção do componente tangencial. Esta assunção tem motivado atletas, treinadores e investigadores no estudo de estratégias que possam contribuir para maximizar a FE durante o ciclo de pedalada. Sabe-se, no entanto, que devido aos constrangimentos mecânicos, impostos pelo mecanismo da bicicleta, e anatómicos (entre outros), do

ciclista, não lhe é possível aplicar toda a sua força para a geração de FE ou MFE [12]. Surgiu assim, a necessidade de quantificar a FER, ou seja, de expressar a FE em função da força total aplicada pelo ciclista.

Atualmente a FER é calculada através da razão entre o valor da FE e o da força resultante (F_{RES}), podendo ser obtida para todo o ciclo de pedalada (eq. 3) ou para uma posição específica do braço do pedaleiro (eq. 4) (Fig. 2).

$$FER(\%) = \frac{\int_0^{360^\circ} F_{TAN} d\alpha}{\int_0^{360^\circ} F_{RES} d\alpha} \times 100 \quad eq. 3$$

$$FER(\%) = \frac{F_{TAN}}{F_{RES}} \times 100 \quad eq. 4$$

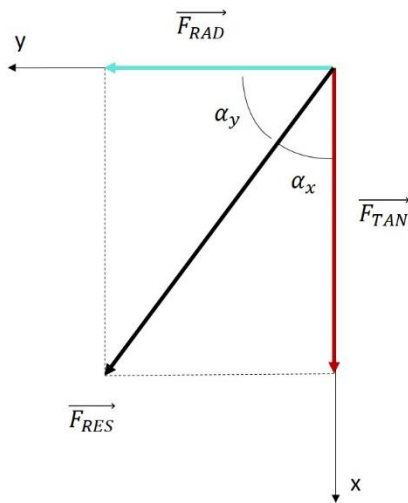
$$sendo, \quad F_{RES} = \sqrt{F_{AXIAL}^2 + F_{RAD}^2 + F_{TAN}^2}$$

LIMITAÇÃO NO CÁLCULO DA FORÇA EFETIVA RELATIVA

Sem perda de generalidade, centrar-se-á a presente exposição numa posição específica do braço do pedaleiro e considerar-se-á a força axial nula, reduzindo-se o problema do cálculo da FER a uma análise bidimensional. Não obstante, mais adiante, tratar-se-á da sua generalização para o espaço tridimensional.

Na Fig. 3 são apresentados, a título de exemplo, valores arbitrários para as forças tangencial (=4) e radial (=3), calculando-se o valor da força resultante através do teorema de Pitágoras e o da FER usando a eq. 4.

Resulta do cálculo da FER a interpretação de que 80% da força aplicada pelo ciclista é usada para produzir a rotação do braço pedaleiro em torno do respetivo eixo. Esta metodologia induz, no entanto, uma falsa suposição, sugerindo que 20% da força aplicada pelo ciclista é dissipada. Ora, em clara contradição, ao calcular-se o valor relativo da força radial, aqui interpretado como força não efetiva relativa (FNER) porque não produz rotação, verifica-se ser igual a 60% (Fig. 3).



$$F_{TAN} = F_{RES} \times \cos \alpha_x = 4$$

$$F_{RAD} = F_{RES} \times \cos \alpha_y = 3$$

$$F_{RES} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$$

$$FER = \frac{F_{TAN}}{F_{RES}} = \frac{4}{5} \times 100 = 80\%$$

$$\text{FORÇA "NÃO EFETIVA" RELATIVA} = \frac{F_{RAD}}{F_{RES}} = \frac{3}{5} \times 100 = 60\%$$

Fig. 3 – Exemplo do cálculo da força efetiva relativa (FER) usando valores arbitrários para a força tangencial (F_{TAN}) e radial (F_{RAD}). Os cossenos dos ângulos α_x e α_y são designados por cossenos diretores, dado que definem a direção e sentido do vetor força resultante (F_{RES}).

Um olhar atento à metodologia aplicada sugere que não foi considerada a natureza vetorial da força. Na verdade, a metodologia empírica só resultaria caso um dos vetores, radial ou tangencial, fosse nulo ou apresentassem ambos igual direção e sentido, resultando esta própria assunção numa contradição.

METODOLOGIA PROPOSTA PARA O CÁLCULO DA FORÇA EFETIVA RELATIVA

A apresentação da metodologia que permite estimar melhor a FER tem por base a natureza vetorial da força. Observe-se, desde já, que o cálculo da FER explicitado na Fig. 3 consiste, na verdade, no cálculo do valor relativo do cosseno diretor definido pelo ângulo α_x , dado que o valor da força resultante é cancelado, por ser fator comum no numerador e denominador da fração (eq. 5). O mesmo ocorreria para a FNER e α_y .

$$FER(\%) = \frac{F_{TAN}}{F_{RES}} \times 100 = \frac{F_{RES} \times \cos \alpha_x}{F_{RES}} \times 100 = \cos \alpha_x \times 100 \quad \text{eq. 5}$$

Na Fig. 4 apresenta-se o comportamento da função cosseno em função de α_x e α_y , e as possíveis relações entre a FER e a FNER para uma variação angular de 90° ($\frac{\pi}{2} \text{ rad}$).

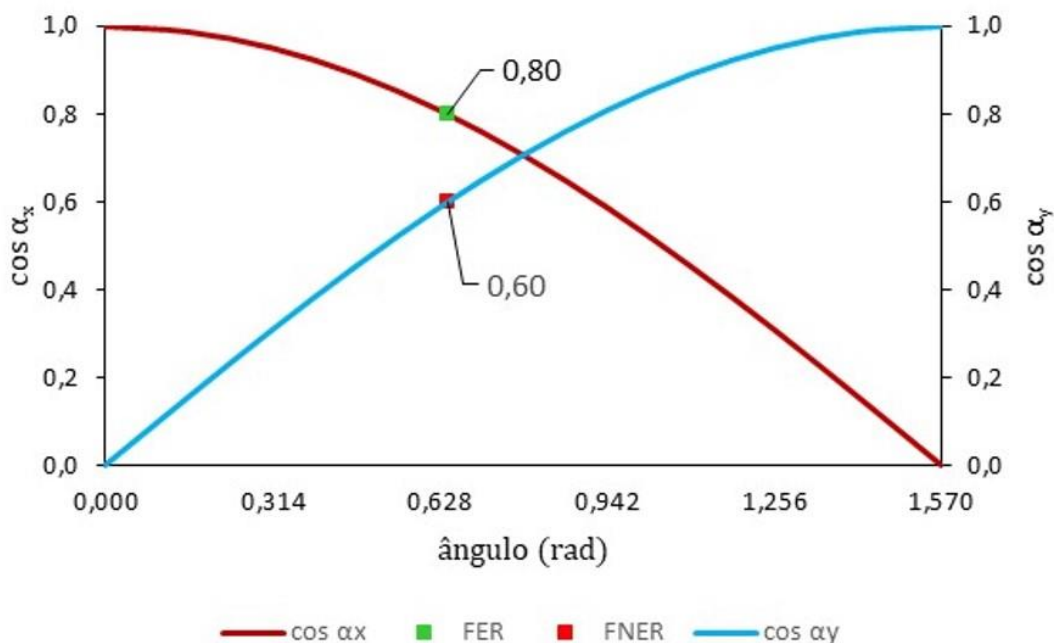


Fig. 4 – Variação da força efetiva relativa (FER) e da força não efetiva relativa (FNER) em função dos ângulos que definem a direção e sentido da força resultante aplicada pelo ciclista. Destacam-se os valores apresentados na figura 3 para a FER e para a FNER.

Em síntese, o que se está a medir com a fórmula atual da FER é o valor percentual do cosseno de um ângulo. Ora, a procura de uma abordagem mais adequada remete-nos para a relação fundamental da trigonometria, (eq. 6), a qual se apresenta geometricamente na Fig. 5.

$$\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y = 1 \quad \text{eq. 6}$$

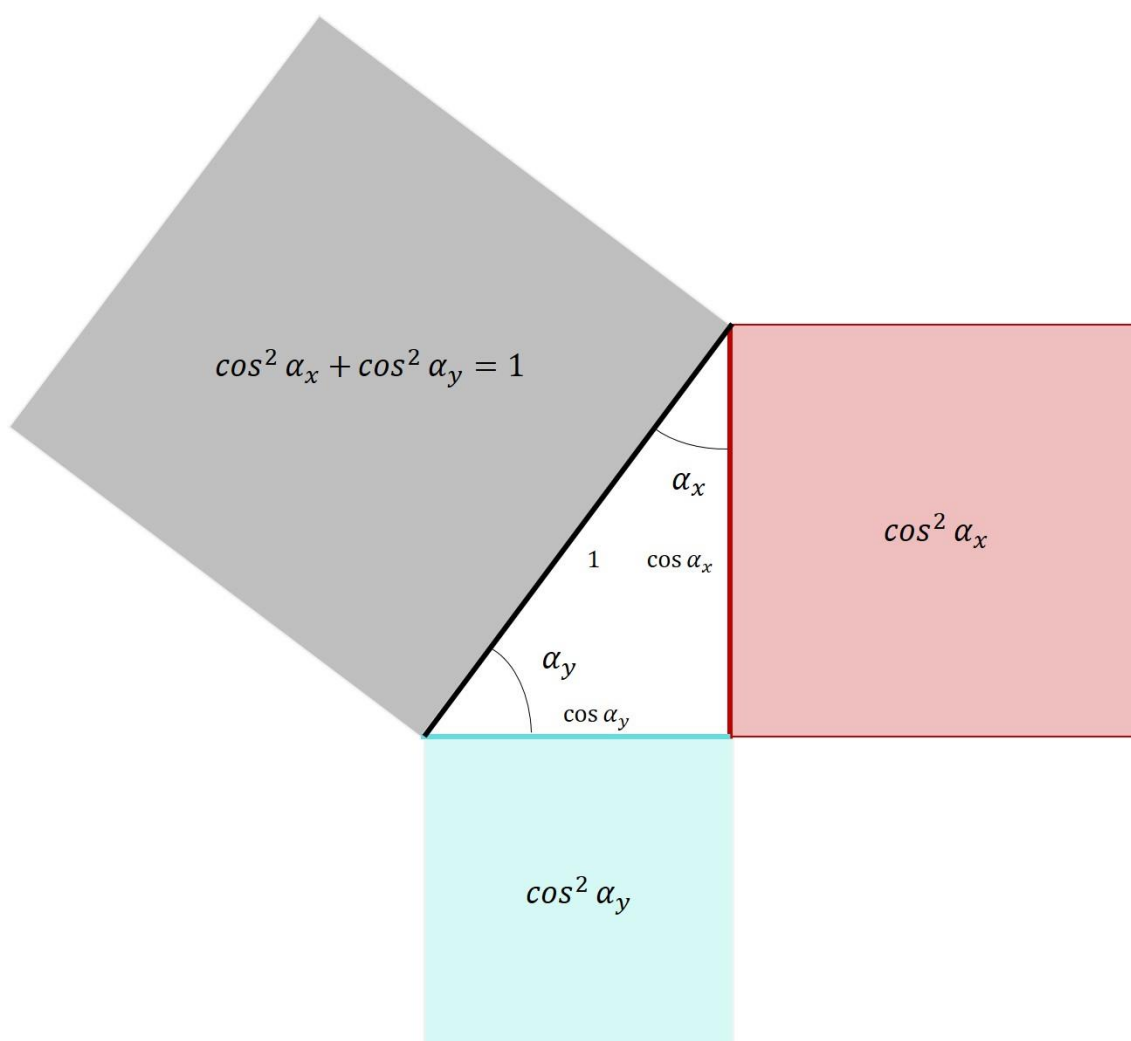


Fig. 5 – Relação fundamental da trigonometria explicada geometricamente.

Depreende-se da relação geométrica apresentada que o método empírico para o cálculo da FER consiste, simplesmente, no cálculo (em %) do comprimento do lado de um triângulo com hipotenusa de comprimento unitário. De facto, vectorialmente, os cossenos dos ângulos em estudo são os componentes do versor de direção da força resultante. Ora, o que se vem propor para o cálculo da FER, e uma interpretação assertiva do seu contributo para a produção de rotação, é o cálculo do quadrado do cosseno desse ângulo (eq. 7), ou seja, da área apresentada na Fig. 5.

$$FER(\%) = \frac{F_{TAN}^2}{F_{RES}^2} \times 100 = \frac{F_{RES}^2 \times \cos^2 \alpha_x}{F_{RES}^2} \times 100 = \cos^2 \alpha_x \times 100 \quad eq. 7$$

A aplicação da expressão anterior para os valores arbitrários apresentados na Fig. 3 resulta numa interpretação mais adequada da FER. Assim, poderá afirmar-se que a

FER, associada à força tangencial, contribui em 64% para a rotação, enquanto que a FNER, associada à componente radial, representa 36% (=100%-64%). Na Fig. 6 apresenta-se o comportamento da função cosseno quadrado em função de α_x e α_y , confirmando-se a relação clara na diferença relativa entre a FER e a FNER. Por esta via, os valores absolutos da força tangencial e radial serão calculados recorrendo ao teorema de Pitágoras, e não aos respetivos valores relativos.

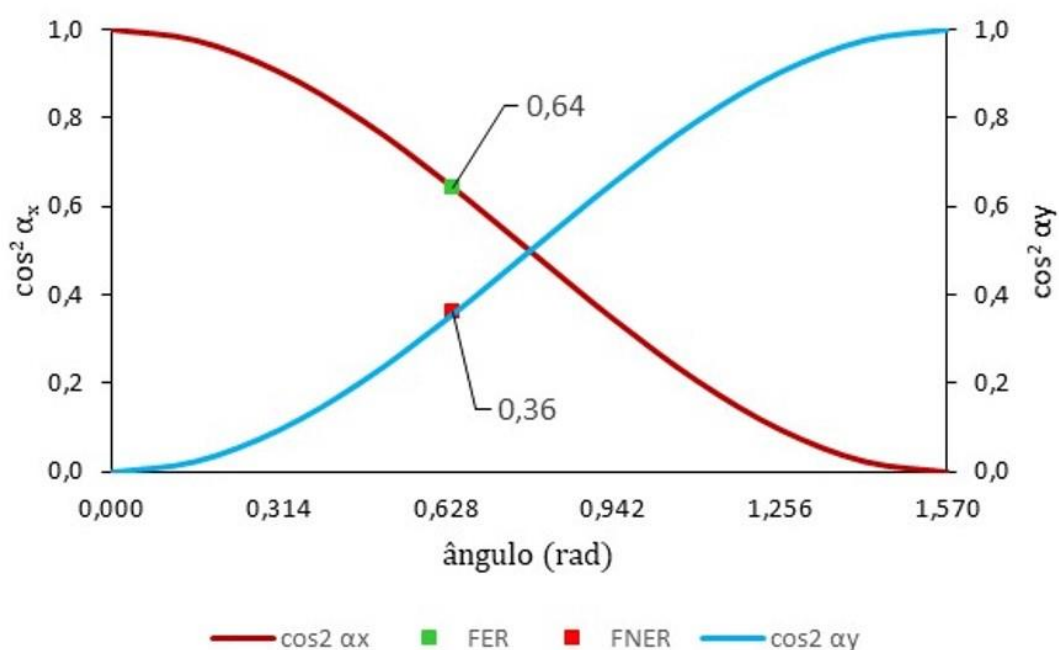


Fig. 6 – Variação da força efetiva relativa (FER) e da força não efetiva relativa (FNER) em função dos ângulos que definem a direção e sentido da força resultante aplicada pelo ciclista. Destacam-se os valores apresentados na figura 3 para a FER e para a FNER com base na abordagem proposta para os cossenos quadrados.

A generalização do problema para o espaço tridimensional ocorre naturalmente. Para esse efeito, recordar-se-á a extensão da relação fundamental da trigonometria (suportada por relações estabelecidas entre dois triângulos retângulos e três ângulos diretores) (eq. 8).

$$\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \alpha_z = 1 \quad \text{eq. 8}$$

Portanto, o contributo relativo dos componentes da força aplicada pelo ciclista no braço pedaleiro calcular-se-á usando os respetivos cossenos quadrados dos ângulos

diretores, α_x , α_y e α_z , que definem a direção e sentido do vetor força resultante (eq. 9, 10 e 11).

$$FER(\%) = \frac{F_{TAN}^2}{F_{RES}^2} \times 100 = \frac{F_{RES}^2 \times \cos^2 \alpha_x}{F_{RES}^2} \times 100 = \cos^2 \alpha_x \times 100 \quad eq. 9$$

$$FNER_{RADIAL}(\%) = \frac{F_{RADIAL}^2}{F_{RES}^2} \times 100 = \frac{F_{RES}^2 \times \cos^2 \alpha_y}{F_{RES}^2} \times 100 = \cos^2 \alpha_y \times 100 \quad eq. 10$$

$$FNER_{AXIAL}(\%) = \frac{F_{AXIAL}^2}{F_{RES}^2} \times 100 = \frac{F_{RES}^2 \times \cos^2 \alpha_z}{F_{RES}^2} \times 100 = \cos^2 \alpha_z \times 100 \quad eq. 11$$

CONCLUSÃO

A adoção da metodologia proposta para o cálculo da FER terá como efeito imediato uma alteração nos valores referência que são apresentados atualmente para o ciclo de pedalada e deverá despertar o interesse de atletas, técnicos e investigadores. Por outro lado, permitirá também estabelecer uma comparação mais simples e objetiva entre a FER e a FNER, também esta importante no ciclismo porque resulta em energia dissipada e requer estratégias que a possam minimizar.

Acresce, ainda, que a metodologia proposta não se esgota no ciclismo porque é aplicável a qualquer grandeza física vetorial e em qualquer contexto, em particular, no das Ciências do Desporto e nas modalidades desportivas onde grandezas como, por exemplo, a velocidade, a aceleração ou o momento de força, são determinantes para o rendimento desportivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hull, M. and R. Davis, *Measurement of pedal loading in bicycling: I. Instrumentation*. J. Biomech, 1981. **14**(12): p. 843-55.
2. Bini, R., et al., *Pedal force effectiveness in cycling: a review of constraints and training effects*. J Sci Cycling, 2013. **2**(1): p. 11-24.
3. Soden, P. and B. Adeyefa, *Forces applied to a bicycle during normal cycling*. J Biomech, 1979. **12**(7): p. 527-41.
4. Ericson, M.O. and R. Nisell, *Efficiency of pedal forces during ergometer cycling*. International journal of sports medicine, 1988. **9**(02): p. 118-22.
5. Kraemer, L.I., et al. *Design and implementation of an instrumented pedal for cycling biomechanics research*. in *Summer Biomechanics, Bioengineering and Biotransport Conference Proceedings: June 17-20, 2015, Snowbird Resort, UT*. 2015. Snowbird Resort, Utah, USA.
6. Bouillod, A., et al., *Influence of power output on pedalling biomechanical parameters in cyclists of different competitive levels*. J Sci Cycling, 2017. **6**(3).
7. Zameziati, K., et al., *Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power*. Eur J Appl Physiol, 2006. **96**(3): p. 274-81.
8. Dal Monte A, Manoni A, and S. Fucci, *Biomechanical study of competitive cycling: the forces exercised on the pedals*, in *Med & Sport: Vol 8 Biomechanics III*, S. Venerando and A. Wartenweiler, Editors. 1973, University Park Press. p. 434-39.
9. Chen, J.Y., et al. *A new automatic measurement system for a bicycle*. in *Mechatronics, 2005. ICM'05. IEEE International Conference on*. 2005. IEEE.
10. Davis, R. and M. Hull, *Measurement of pedal loading in bicycling: II. Analysis and results*. J Biomech, 1981. **14**(12): p. 857-61.
11. Stapelfeldt, B., et al., *Development and evaluation of a new bicycle instrument for measurements of pedal forces and power output in cycling*. Int J Sports Med, 2007. **28**(04): p. 326-32.
12. Dorel, S., et al. *Neuromechanics of cycling: opportunities for optimizing performance*. in *ISBS-Conference Proceedings Archive*. 2016. Poitiers, France.