

Precisámos mesmo da força peso?

José M. L. Figueiredo*

*Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve,
Campus de Gambelas, 8005-139 FARO, Portugal*

(Dated: February 2, 2008)

Com raras excepções, nos manuais de Física para os ensinos secundário e universitário e em muitas publicações científicas, a força “peso de um corpo” é definida como a força da gravidade ou uma consequência exclusiva desta. Estas definições carecem de lógica do ponto de vista do conhecimento actual e podem ser mesmo enganadoras para o estudante. A definição operacional da força “peso do corpo” como a força que o corpo exerce no seu suporte tem a vantagem de eliminar a necessidade de vários conceitos associados à definição gravitacional ou, pelo menos, a ambiguidade de alguns deles. Neste texto discute-se o conceito da força “peso” e apresentam-se exemplos das vantagens da sua redefinição e, em particular, do abandono da expressão “peso do corpo” uma vez que a noção de força “peso do corpo” não é fundamental em Física.

I. INTRODUÇÃO

Quem lecciona disciplinas introdutórias de Física está acostumado a lidar com a confusão que os estudantes fazem quando confrontados com os conceitos de massa e de força “peso”, e com as ambiguidades das noções associadas à definição da força “peso do corpo” baseada na força da gravidade. Vários estudos indicam que os estudantes do secundário e da universidade mostram dificuldades em aplicar os conceitos relacionados com a força “peso” em situações de imponderabilidade e em sistemas com movimento acelerado [1][2][3]. Com frequência, os alunos consideram que as situações correntemente designadas como “gravidade-zero”, “microgravidade” ou “sem peso” se referem a eventos que ocorrem fora da influência gravitacional da Terra ou de outro corpo celeste e ficam, muitas vezes, surpreendidos quando percebem que durante uma missão do vaivém espacial, por exemplo, a aceleração devida à gravidade a que ficam sujeitos os astronautas é apenas 12% inferior à que experimentam à superfície da Terra.

Na literatura encontram-se várias definições da força “peso” de um corpo baseadas na força da gravidade: “o peso” é a força gravitacional da Terra”, “a força exercida pela Terra num objecto é chamada “peso” do objecto” [4]; “o peso” de um corpo é a força gravitacional total exercida no corpo por todos os outros corpos do Universo” [5]. Estas definições são compatíveis com a decisão da terceira reunião da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), em 1901, que definiu “peso de um corpo” como o produto da sua massa pela aceleração devida à gravidade [6].

As definições da força “peso” baseadas na gravidade e os conceitos com ela relacionados são largamente usadas nas aulas e nos livros de texto de Física, especialmente nas escolas secundárias e nas disciplinas introdutórias de Física do ensino superior, apesar de serem insatisfatórias e ambíguas, tendo em conta o conhecimento actual, e

são, muitas vezes, origem de confusão. Note-se, por exemplo, a imprecisão e a falta de clareza das noções de “peso verdadeiro”, de “peso aparente”, de “sem peso”, de “gravidade zero” e de “microgravidade”. A ambiguidade dá origem a equívocos que podem facilmente contribuir para o alargamento do fosso entre o que se pretende ensinar e o que é aprendido pelos estudantes.

Poucos autores adoptam a definição operacional da força “peso de um corpo”: “força que o corpo exerce no suporte a que está ligado” [7]. Nesta definição operacional, a força “peso do corpo” é uma força de ligação tal como, por exemplo, a força de atrito ou a tensão numa corda. Este artigo discute o conceito de força “peso do corpo”, das noções de gravidade-zero, de microgravidade, de vertical e de “para baixo/cima”, e as vantagens pedagógicas da adopção da definição operacional da força “peso” e/ou o abandono do termo força “peso” em Física.

II. ACELERAÇÃO DEVIDA À GRAVIDADE

No modelo da Física Clássica a força da gravidade é uma força de longo alcance entre os corpos com massa e, tanto quanto se sabe, não pode ser blindada [8]. Em situações convencionais é independente do estado de movimento dos corpos. A aceleração devida à gravidade é a aceleração do movimento de um dado corpo material resultante apenas da acção da força da gravidade sobre esse corpo e, num dado instante, corresponde à razão entre a força da gravidade e quantidade de matéria do corpo.

Na descrição dada pela Teoria Geral da Relatividade um campo gravitacional corresponde a modificações da geometria do espaço-tempo provocada por uma concentração de massa ou de energia. As geodésicas do espaço-tempo são linhas curvas e os corpos descrevem órbitas correspondentes a estas linhas curvas.

*E-mail: jlongras@ualg.pt

A. Gravidade segundo a Física Newtoniana

Desde que Isaac Newton propôs a lei da Gravitação Universal que se aceita que a interacção gravitacional entre massas é universal e apenas depende das quantidades de matéria em interacção e da distância que separa os seus centros de massa. A partir dos trabalhos de Kepler e de Galileu, Newton concluiu que a força da gravidade \vec{F}_g que a Terra exerce num corpo de massa m , consequência da interacção gravitacional do corpo com o planeta Terra, é dada por

$$\vec{F}_g = -\frac{GMm}{|\vec{r}|^3}\vec{r} = \vec{G}m, \quad (1)$$

onde G representa a constante gravitacional ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$), M é a massa da Terra, \vec{r} é o vector posição com origem no centro de massa da Terra e extremidade no centro de massa do corpo. A força da gravidade que a Terra exerce num corpo \vec{F}_g pode ser escrita como o produto da massa m do corpo pela aceleração devida à gravidade \vec{g} , $\vec{F}_g = m\vec{g}$; a grandeza $\vec{g} = -\frac{GM}{|\vec{r}|^3}\vec{r}$ corresponde à aceleração que o corpo adquire quando sujeito unicamente à acção do campo gravitacional \vec{G} . Junto à superfície da Terra \vec{g} é praticamente constante; a intensidade de \vec{g} ao nível do mar é, aproximadamente, $9,8 \text{ m s}^{-2}$.

A intensidade da força da gravidade pode ser medida com auxílio de um dinamómetro ou de uma balança-dinamómetro, assegurando que o corpo e o dinamómetro estão em repouso em relação à Terra. Esta afirmação requer alguns esclarecimentos. Considere-se um corpo em repouso relativamente à superfície da Terra a uma dada latitude, Fig. 1. O corpo é actuado por duas forças: a força da gravidade \vec{F}_g , apontando para o centro da Terra, e a força de reacção \vec{N} que a superfície da Terra (ou do suporte) exerce sobre a superfície do corpo. A direcção de \vec{N} é determinada pela força da gravidade e pela rotação da Terra em torno do seu eixo. Tendo presente a segunda lei de Newton da Dinâmica (a resultante das forças que actuam num corpo é igual à taxa temporal de variação do momento linear do corpo, $\vec{F} = d(m\vec{v})/dt$), a resultante \vec{F} destas duas forças assegura a rotação diária do corpo segundo o paralelo que passa pela posição deste. Como consequência apenas deste efeito, as direcções de \vec{F}_g e de \vec{g} “medidas” diferem ligeiramente da direcção do centro da Terra - excepto nos pólos e no equador - em um ângulo cuja amplitude é inferior $0,1^\circ$. Verifica-se também que, devido à aceleração centrípeta do corpo, a intensidade de \vec{F}_g indicada na balança ou no dinamómetro é inferior, excepto nos pólos, ao valor dado pela equação 1. Acresce ainda que as *irregularidades* da superfície e as variações de densidade nas diferentes regiões que constituem a Terra dão origem a um campo gravitacional não exactamente central pelo menos nas proximidades da superfície da Terra e, portanto, a variações na direcção e na intensidade de \vec{g} .

Ao longo do resto do texto considera-se que a Terra é uma esfera homogénea e desprezam-se os efeitos da rotação em torno do seu eixo e da translação em torno do Sol, e de quaisquer outros movimentos, devido aos pequenos valores das acelerações linear e angular da Terra quando comparados com aceleração devida à gravidade ou a outras forças aplicadas. Isto é, a Terra é considerada em repouso durante os tempos característicos dos fenómenos aqui analisados. É desprezado também o efeito da atmosfera no corpos.

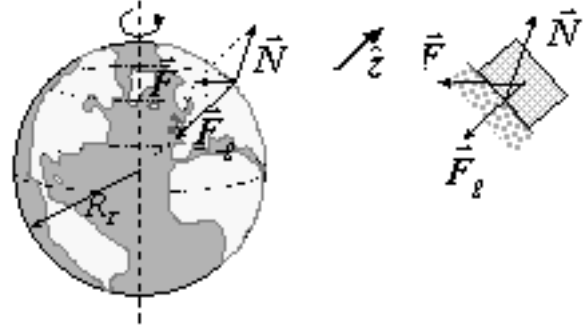


FIG. 1: Forças que actuam no corpo em repouso na superfície sólida da Terra, a uma dada latitude: a força \vec{F} é a resultante da força da gravidade \vec{F}_g que actua no corpo e da acção da superfície da Terra \vec{N} no corpo.

B. Gravidade segundo a Teoria da Relatividade Geral

A Teoria da Relatividade Geral trata a gravidade e o movimento acelerado. Numa das suas famosas experiências conceptuais, Einstein concluiu que não é possível distinguir entre um referencial em repouso num campo gravitacional homogéneo e um referencial acelerado na ausência de um campo gravitacional: princípio de equivalência de Einstein. A partir deste princípio de equivalência, Einstein propõe uma interpretação geométrica da gravitação: a presença de massa ou de energia provoca a curvatura do contínuo espaço-tempo, e as geodésicas deixam de ser linhas rectas e passam a ser percursos curvos. Numa descrição clássica deste efeito podemos associar ao movimento (órbita) de um corpo nas proximidades da Terra, ou de outro corpo celeste, uma aceleração centrípeta que corresponderá ao conceito clássico de *aceleração devida à gravidade*.

III. DEFINIÇÃO OPERACIONAL DE FORÇA PESO DO CORPO

O que os seres humanos e a restante matéria experimentam como “peso” não é a força da gravidade. A

sensação de “peso” é devida à força normal que os suportes exercem nos corpos, constringindo-os de forma a contrariar a força (“peso”) que eles exercem nos suportes. Uma evidência deste facto ocorre quando uma pessoa em cima de uma balança-dinamómetro verifica que o valor indicado por esta (a intensidade do “peso”) varia sempre que flexa as pernas sem perder o contacto com a superfície da balança. Outra manifestação ocorre quando um elevador a descer, trava para parar: uma pessoa sente um acréscimo de pressão nas pernas e nos pés. Estas variações não podem ser atribuídas à força da gravidade, porque a distância entre os centros de massa da Terra e da pessoa praticamente não se alterou, assim como as respectivas massas.

A. Força peso de um corpo em repouso

Consideremos um corpo em repouso à superfície da Terra, Fig. 2a. O corpo está sujeito à força \vec{F}_g devido ao “puxão” gravitacional da Terra. A força de reacção a esta força é $-\vec{F}_g$ e corresponde à acção gravitacional exercida pelo corpo na Terra. O par de forças \vec{F}_g e $-\vec{F}_g$ constitui um par acção-reacção. A tendência do corpo em acelerar no sentido do centro da Terra devido à força \vec{F}_g dá origem à força \vec{P} , Fig. 2b, força que a superfície do corpo exerce (acção do corpo) na superfície da Terra. Se o corpo exerce na superfície da Terra a força \vec{P} , a superfície sólida da Terra reage exercendo uma força \vec{N} no corpo que contrabalança a força \vec{P} , Fig. 2b. A força \vec{N} designa-se força normal e é a reacção a \vec{P} : \vec{P} e \vec{N} constituem um par acção-reacção, $\vec{N} = -\vec{P}$. A acção que o corpo exerce na superfície da Terra (ou suporte) corresponde à definição operacional da força “**peso do corpo**”.

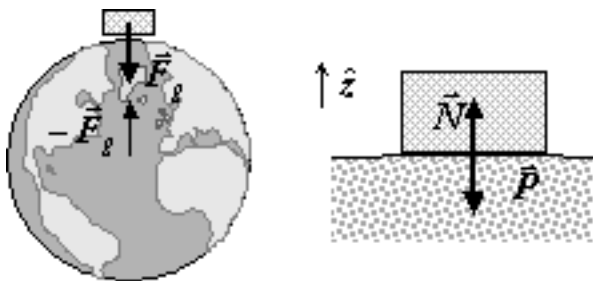


FIG. 2: a) \vec{F}_g e $-\vec{F}_g$: par acção-reacção devido à interacção gravitacional entre o corpo e a Terra. b) \vec{P} e \vec{N} : par acção-reacção em resultado da interacção entre as superfícies do corpo e da Terra.

Em conclusão, no corpo actuam duas forças, a força \vec{F}_g apontando para o centro da Terra e a força \vec{N} no sentido oposto. Uma vez que o corpo está em repouso relativamente à Terra é nula a resultante das forças que

actuam no corpo. Em consequência, as forças \vec{F}_g e \vec{N} que actuam no corpo - em pontos de aplicação diferentes - têm a mesma intensidade e orientações opostas. De forma similar, as duas forças que actuam na Terra, $-\vec{F}_g$ e \vec{P} , têm também a mesma magnitude, $|\vec{P}| = |-\vec{F}_g|$, sentidos opostos e pontos de aplicação diversos.

Consideremos agora o corpo pendurado num dinamómetro ou colocado no prato de uma balança-dinamómetro. Quando o corpo é colocado na balança, a mola da balança é comprimida (no caso do dinamómetro seria distendida) e a sua deformação é comunicada ao ponteiro da escala da balança. O corpo exerce uma acção no prato da balança e através deste na mola. O ponteiro indica a magnitude da força “peso do corpo” \vec{P} , força exercida **na** superfície do prato da balança **pela** superfície do corpo.

Se o corpo e a balança estiverem em repouso em relação à Terra então, e como anteriormente, a intensidade da força “peso do corpo”, que actua na balança, iguala a magnitude da força da gravidade que actua no corpo, $|\vec{P}| = |\vec{F}_g|$; a igualdade verifica-se também no caso do corpo e da balança estarem em movimento uniforme e rectilíneo relativamente a um referencial ligado à Terra.

Será que a relação $|\vec{P}| = |\vec{F}_g|$ permanece válida se o corpo e o seu suporte estiverem em movimento acelerado em relação à Terra? Qual é a indicação da balança nesta situação?

B. Força peso de um corpo num referencial acelerado

Imaginemos o corpo colocado no prato de uma balança fixa no pavimento de um elevador. Quando o elevador acelera com uma aceleração \vec{a} , enquanto estiver em contacto com a balança o corpo move-se em conjunto com a balança e o elevador. No corpo actuam duas forças: a força da gravidade \vec{F}_g e a reacção \vec{N} da balança à força “peso do corpo” \vec{P} . De acordo com a segunda lei de Newton da Dinâmica e assumindo que a massa m do corpo não varia, a resultante das forças que actuam no corpo é igual ao produto da massa m com a aceleração \vec{a} do corpo, isto é,

$$m\vec{a} = \vec{F}_g + \vec{N}. \quad (2)$$

Uma vez que a força “peso do corpo” \vec{P} e a reacção \vec{N} da superfície da balança formam um par acção-reacção, $\vec{P} = -\vec{N}$, podemos rescrever a equação 2 como

$$\vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a}. \quad (3)$$

Ter presente que o valor indicado na balança corresponde à intensidade da força \vec{P} que o corpo exerce na balança.

Correntemente, define-se vertical de um lugar como a direcção da aceleração devida à gravidade. Outras definições baseiam-se na direcção do fio-de-prumo, que

à superfície da Terra e em repouso coincide com a direcção da força da gravidade. A noção de vertical é mais geral. Por exemplo, um ser humano ou outro ser vivo sente-se equilibrado na direcção da força que exerce no suporte e a orientação “para baixo” correspondem ao sentido dessa força. A vertical está sempre segundo a linha de acção da força “peso do corpo” e a orientação “para baixo” corresponde ao sentido dessa força. Da relação 3 pode concluir-se que tanto a direcção da vertical de um corpo como as orientações “para baixo/cima” dependem da aceleração do corpo e da aceleração devida à gravidade. Uma constatação quotidiana ocorre quando um autocarro arranca ou quando trava: nesta situação a “nossa” vertical é oblíqua e para não nos desequilibrarmos inclinamo-nos na direcção da “nova” vertical.

IV. FORÇA PESO DO CORPO NUM CAMPO GRAVITACIONAL FRACO

A acção que um corpo exerce nos seus suportes, a força “peso do corpo”, não depende da existência de um campo gravitacional na região do espaço onde este se encontra. Considere-se um veículo espacial numa região do Universo onde o efeito gravitacional é nulo ou pouco significativo, i.e., $\vec{g} \simeq \vec{0}$. Se uma nave em movimento rectilíneo e uniforme nesta região accionar os seus motores entrará em movimento acelerado e os objectos no seu interior serão “projectados” no sentido oposto à aceleração \vec{a} da nave, tal como acontece quando um carro acelera, acabando estes por exercer forças nos seus suportes ou nas paredes da nave. Isto é, quando a nave espacial acciona os motores passa a ser actuada pela força de propulsão que é transferida a cada objecto no seu interior. Estes, após entrarem em contacto com as paredes da nave ou com outros corpos solidários com a nave, deslocam-se com a aceleração \vec{a} da nave. Nestas condições a equação 3 toma a forma

$$\vec{P} = -m\vec{a}, \quad (4)$$

i.e., a acção que o corpo exerce no seu suporte tem o sentido oposto à aceleração da nave e depende apenas da intensidade dessa aceleração e da massa do corpo.

Pode, portanto, concluir-se que a força que os corpos exercem nos seus suportes ou a “sua ausência” não têm a ver necessariamente com o facto do corpo estar ou não sob a influência de um campo gravitacional. Mesmo na presença de um campo gravitacional significativo, esta força depende essencialmente das características de movimento do corpo e do seu suporte. De facto, as propostas para “criar artificialmente” o efeito da gravidade no interior de naves interplanetárias empregam a rotação da nave em torno do seu centro de massa, sendo a aceleração devida à “gravidade artificial” oposta à aceleração centrípeta da nave.

V. IMPONDERABILIDADE E MICROGRAVIDADE

Nas situações ideais de queda livre todas as partes de um avião ou de nave espacial acelerariam uniformemente e o ambiente no seu interior seria de “gravidade-zero”, porque os corpos no seu interior não sentiriam os efeitos da gravidade. Em situações reais o efeito da gravidade nos corpos, embora substancialmente reduzido, faz-se sentir, e diz-se que os corpos estão em ambiente de “microgravidade” porque a “ausência de peso” não é total. Contudo, o emprego do termo “microgravidade” sem especificar o seu significado real pode aumentar os equívocos associados à identificação da força “peso” com a força da gravidade.

A total “ausência de peso” numa nave espacial só seria possível se todos os pontos da nave estivessem em movimento rectilíneo e uniforme, fora da acção de qualquer campo gravitacional. Neste caso, os corpos dentro da nave não experimentariam qualquer aceleração uns relativamente aos outros, e a situação seria de gravidade-zero, desprezando é claro as interacções gravitacionais mútuas e com as paredes da nave. As situações de imponderabilidade (“ausência de peso”) correntes são frequentemente designadas, de forma imprópria, como “gravidade-zero” ou “microgravidade”. É importante ter presente que no interior de uma nave nas proximidades da Terra a intensidade da aceleração devida à gravidade terrestre não é nula (“gravidade-zero”) ou diminuta (“microgravidade”): a 400 km de altura, por exemplo, a aceleração devida à gravidade terrestre é $8,4 \text{ m s}^{-2}$, e mesmo à distância da órbita da Lua é $2,6 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-2}$, embora nessas regiões a aceleração devida à gravidade solar seja cerca de duas vezes superior, i.e., aproximadamente $5,8 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-2}$. A verdadeira microgravidade terrestre, $g \approx 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$, só poderia ser experimentada em regiões à distância de 17 vezes a separação entre a Terra e a Lua.

Para os cientistas, o termo microgravidade caracteriza o facto de que a nave em queda livre e os corpos no seu interior não estarem todos sujeitos exactamente à mesma aceleração, em resultado das diferentes interacções gravitacionais entre os corpos interiores e exteriores à nave, da acção de outras forças, e traduz-se na aceleração residual que os corpos no interior de um veículo em queda livre experimentam relativamente, por exemplo, ao centro de massa deste. Em consequência, nas proximidades da Terra e em naves não tripuladas em queda livre obtém-se com facilidade $1\mu g$, enquanto que em missões tripuladas dificilmente se consegue menos de $100\mu g$. As causas mais relevantes são: i) a variação da aceleração devida à gravidade em resultado da morfologia da Terra; ii) variações devidas ao efeito gravitacional dos outros corpos celestes, em particular do Sol e da Lua, dependentes das posições relativamente à Terra iii) a variação da aceleração da gravidade terrestre com a altitude que decresce aproximadamente 1 parte por milhão por cada 3 m de aumento (numa nave em órbita a força centrípeta e, portanto, a aceleração devida à gravidade é superior na parte da nave

mais afastada da Terra do que na parte mais próxima); iv) a atmosfera, embora podendo ser muito rarefeita, por exemplo, a 400 km de altura, desacelera gradualmente a nave.

VI. CONCLUSÃO

A identificação da força “peso” com a força da gravidade carece de lógica do ponto de vista do conhecimento actual e é, muitas vezes, fonte de confusão. Na definição operacional discutida neste texto, a força “peso do corpo” corresponde à acção que este exerce no seu suporte, e depende do estado de movimento de ambos. Tendo presente que o conceito de “peso” não é fundamental em Física, acredita-se que a aprendizagem desta ciência sairá ben-

eficiada se a expressão “peso do corpo” não for usada. Uma vantagem óbvia é eliminar a confusão frequente na disciplina entre o conceito de massa do corpo e de força “peso do corpo”. Espera-se que este texto ajude a motivar a comunidade científica, os professores e os autores dos manuais de Física, a adoptarem a definição operacional da força “peso”, embora o abandono do enunciado força “peso do corpo” seja desejável.

Agradecimentos

O autor agradece aos Professores Robertus Potting, Paulo Sá, José Rodrigues, e Paulo Silva os comentários e a revisão do manuscrito.

-
- [1] I. Galili, “*Weight versus gravitational force: historical and educational perspectives*,” *Int. J. Sci. Educ.* **23**, 1073-1093 (2001).
- [2] Z. Gurel e H. Acar, “*Research into Students’ Views About Basic Physics Principles in a Weightless Environment*,” *The Astronomy Education Review* **2**, 65-81 (2003).
- [3] M. D. Sharma, R. M. Millar, A. Smith, and I. M. Sefton, “*Students’ Understandings of Gravity in an Orbiting Space-Ship*,” *Research in Science Education* **34**, 267-289 (2004).
- [4] R. A. Serway, *Physics for Scientists and Engineers with modern physics* (Saunders College Publishing, Philadelphia, CA, 1996) page 113.
- [5] H. D. Young e R. A. Freedman, *University Physics with modern physics* (Addison-Wesley, Reading, MA, 2000) page 362.
- [6] Résolution de la 3^e CGPM, “*Déclaration relative à l’unité de masse et à la définition du poids; valeur conventionnelle de g_n* ,” *Comptes rendus de la 3^e CGPM*, 70 (1901).
- [7] J. B. Marion e W. F. Hornyak, *General Physics with Bioscience Essays* (John Wiley & Sons, New York, NY, 1985).
- [8] T. Van Flandern e X. S. Yang, “*Allais gravity and pendulum effects during solar eclipses explained*,” *Phys. Rev D* **67**, 022002 (2003); C. S. Unnikrishnan, A. K. Mohapatra, e G. T. Gillies, “*Anomalous gravity data during the 1997 total solar eclipse do not support the hypothesis of gravitational shielding*,” *Phys. Rev D* **63**, 062002 (2001).