

Este arquivo contém o texto completo do seguinte trabalho:

MARTINS, Roberto de Andrade. Huygens e a gravitação newtoniana. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* [série 2] 1 (2): 151-84, 1989.

Este arquivo foi copiado da biblioteca eletrônica do Grupo de História e Teoria da Ciência <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), do seguinte endereço eletrônico (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-32.pdf>>

Esta cópia eletrônica do trabalho acima mencionado está sendo fornecida para uso individual, para fins de pesquisa. É proibida a reprodução e fornecimento de cópias a outras pessoas. Os direitos autorais permanecem sob propriedade dos autores e das editoras das publicações originais.

This file contains the full text of the following paper:

MARTINS, Roberto de Andrade. Huygens e a gravitação newtoniana. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* [série 2] 1 (2): 151-84, 1989.

This file was downloaded from the electronic library of the Group of History and Theory of Science <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> of the State University of Campinas (UNICAMP), Brazil, from following electronic address (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-32.pdf>>

This electronic copy of the aforementioned work is hereby provided for exclusive individual research use. The reproduction and forwarding of copies to third parties is hereby forbidden. Copyright of this work belongs to the authors and publishers of the original publication.

CDD: 509

HUYGENS E A GRAVITAÇÃO NEWTONIANA ¹

ROBERTO DE ANDRADE MARTINS

*Instituto de Física "Gleb Wataghin" e
Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência
Universidade Estadual de Campinas
CEP 13081 - Campinas, SP, Brasil*

Resumo

Este artigo compara as abordagens de Newton e de Huygens a respeito da teoria da gravidade. Newton admitia, como generalização experimental, a existência da gravitação universal e aplicava coerentemente essa lei, até as últimas conseqüências. Huygens recusava-se a aceitar um fenômeno para o qual não pudesse formular um modelo mecânico e negava a existência da gravitação universal, tentando explicar a gravidade por turbilhões de inspiração cartesiana, em seu livro *Discurso sobre a causa do peso*. Mostra-se que, na época, a oposição entre as duas abordagens era de natureza metodológica e não empírica. São também discutidas as evidências relativas à variação de período dos pêndulos com a latitude e ao achatamento da Terra que permitiriam, depois, diferenciar entre as duas teorias.

Palavras-chave: Huygens, Christiaan; Newton, Isaac; gravitação; pêndulos; Terra, forma da; gravidade, variação com latitude.

1 INTRODUÇÃO

Para nós, que fomos educados dentro de uma visão de mundo essencialmente newtoniana, é difícil compreender a originalidade, a ousadia, o aspecto revolucionário e o impacto provocado pela teoria da gravitação universal apresentada nos *Principia*. Pode parecer-nos que esse aspecto da obra de Newton teria sido um passo natural e quase obrigatório a partir do desenvolvimento das leis da mecânica e sua aplicação ao estudo dos movimentos astronômicos. Algumas vezes cita-se que vários outros físicos - Hooke, Wren, Halley - haviam chegado,

¹Nota editorial: Uma versão preliminar deste trabalho foi apresentada por ocasião do Segundo Colóquio de História da Ciência ("Os *Principia* de Newton: 300 anos"), promovido pelo Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, realizado de 4 a 6 de novembro de 1986.

aproximadamente ao mesmo tempo, à lei de gravitação de Newton, o que é verdade (ver, por exemplo, BALL, *An essay on Newton's Principia*). Isso pareceria indicar que não se exigiu um salto muito grande para edificar a teoria gravitacional. Mas seria tolice imaginar que Newton nada adicionou à Física da época, com sua teoria.

Por um lado, é preciso admitir que o terreno estava preparado, trezentos anos atrás, para a síntese newtoniana – que teria sido impossível, por exemplo, em 1630. Por outro lado, no entanto, convém reconhecer a originalidade da abordagem newtoniana – e isso pode ser feito com facilidade, estudando a reação de coevos à publicação dos *Principia*.

Dentre os cientistas eminentes do século XVII, um dos mais capacitados para compreender e avaliar os *Principia* era certamente Christiaan Huygens. Sua habilidade matemática, admirada em toda a Europa, permitia-lhe compreender, reproduzir, avaliar e desenvolver análises geométricas como as de Newton, sem dificuldade (excetuando-se o uso do cálculo diferencial e integral). Seu conhecimento de mecânica era profundo, tendo ele sido o principal responsável pelo desenvolvimento das leis de colisões, da formulação moderna da conservação da quantidade de movimento e do estudo de oscilações e movimentos complexos. Já antes da publicação dos *Principia*, Huygens havia escrito e divulgado um estudo sobre a gravidade. Não é de estranhar que, ao tomar conhecimento da obra de Newton, Fatio de Duillier escrevesse a Huygens:

Já estive três vezes na Sociedade Real (de Londres) onde ouvi propostas tanto de coisas bastante boas quanto de (outras) bastante mediócras. Alguns desses senhores que a compõem possuem preconceito extremamente favorável a um livro do Sr. Newton (o terceiro livro dos *Principia*) que está sendo impresso atualmente (24/06/1687) e que sairá daqui a três semanas...

Esse tratado que vi em parte é certamente muito belo e repleto de um grande número de belas proposições, mas eu desejaria, Senhor, que o Autor vos tivesse consultado um pouco sobre esse princípio de atração que ele supõe entre os corpos celestes. (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, carta 2465, p.167.)

Provavelmente Fatio de Duillier não queria apenas agradecer a Huygens; exprimia uma opinião totalmente plausível, no momento, e de que compartilho – a de que Huygens seria um ótimo juiz para essa obra.

Acima de tudo, é importante lembrar que, ao contrário de Leibniz, por exemplo, Huygens não tinha qualquer rivalidade em relação a Newton. Não se deve imaginar, anacronicamente, que houvesse alguma disputa grave entre Newton e Huygens a respeito da natureza da luz. Huygens admirava o trabalho de Newton sobre as cores, sendo por isso levado a calar sobre o assunto em seu *Tratado*

sobre a luz²; a *Óptica* de Newton, por outro lado, só foi publicada cerca de dez anos após a morte de Huygens. Tanto em sua correspondência quanto em suas obras publicadas, Huygens parece avaliar imparcialmente cada contribuição de Newton, fazendo críticas a algumas e grandes elogios a outras. A própria atitude de Huygens, visitando a Inglaterra expressamente para conhecer Newton, mostra sua falta de prevenção. Veja-se, por exemplo, a carta que Huygens escreve a seu irmão, Constantyn, a 30 de dezembro de 1688:

Penso que, atualmente, a Sociedade Real desfruta das grandes férias. No entanto, vós podereis ter oportunidade de ver o Sr. Boyle e outros dos membros. Eu gostaria de estar em Oxford, somente para conhecer o Sr. Newton, de quem admiro extremamente as belas invenções que encontro na obra que me enviou. Poderei remeter-vos uma carta para ele, que facilmente encontrareis um meio de fazer chegar-lhe. (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, carta 2529, p. 304.)

E, de fato, posteriormente, Huygens desloca-se até a Inglaterra para conhecê-lo³. Mesmo quando Huygens discorda de Newton, parece sinceramente disposto a manter um bom entendimento com ele, como se nota, por exemplo, em carta que enviou a Fatio de Duillier, a 07 de fevereiro de 1690, ao falar-lhe sobre sete cópias do *Tratado sobre a luz* acompanhado pelo *Discurso sobre a causa do peso*, que será depois discutido:

Ontem finalmente enviei a meu irmão de Zulichen, secretário do rei, sete exemplares desse livro, pedindo que vô-los entregue ao mesmo tempo que esta carta. Eles são para vós, Senhor, assim como para os Senhores Newton, Boyle, Hamden, Halley, Locke e Flamsteed... Vereis que em alguns lugares assinalai a diversidade entre meus sentimentos e os do Sr. Newton, tendo sido obrigado a isso para sustentar minha teoria, mas fi-lo de tal modo que creio que ele não o levará a mal. (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, carta 2558, p. 357.)

Essas e outras evidências parecem indicar que Huygens era pessoa bastante neutra, além de capaz de avaliar o trabalho de Newton.

Esses são os principais motivos da escolha do tema da presente pesquisa: examinar a reação de Huygens à teoria da gravitação de Newton. As principais

²ver HUYGENS, *Tratado sobre a luz*, Prefácio, pp. 5-7. Ver especialmente a nota 3, à página 7.

³Durante sua visita a Londres, onde encontrou Newton e foi recebido pela Royal Society, Huygens apresentou uma conferência sobre a causa da gravidade (ver HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, p. 333), onde provavelmente apresentou a sua própria teoria, depois publicada no *Discurso*.

fontes utilizadas para este estudo foram a correspondência de Huygens publicada em sua *Obras* e o *Discurso sobre a causa do peso*, de 1690.

2 O DISCURSO SOBRE A CAUSA DO PESO

Durante sua estada em Paris, um dos vários trabalhos que Huygens leu diante da Academia era denominado “De la cause de la pesanteur” (apresentado em 28 de agosto de 1669). Esse pequeno ensaio procurava explicar, mecanicamente, a força que atrai os corpos em direção à Terra. Sua inspiração, como veremos – e como o próprio Huygens admite – é cartesiana, embora existam grandes diferenças entre as duas propostas. O próprio Huygens não atribui muito valor a esse trabalho, que só foi publicado sob forma original, vinte quatro anos depois (após a versão final), por De la Hire (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 21, p. 622). Entretanto, Huygens gradualmente adicionou ao ensaio original novos trechos. O primeiro estímulo para retomar o estudo do peso dos corpos foi devido à notícia de que o astrônomo Richer havia observado que um pêndulo transportado da Europa para um ponto próximo ao equador oscilava mais lentamente (ver adiante). Sendo a maior autoridade em pêndulos da época, Huygens não podia deixar de tentar explicar o fenômeno, e interpretou-o então como um efeito da força centrífuga gerada pela rotação da Terra (qualitativamente, esta é ainda a explicação hoje aceita). Isso o levou a estudar a variação da gravidade terrestre com a latitude e a atribuir uma forma achatada à Terra – independentemente de Newton. Huygens, no entanto, nada publicou inicialmente sobre o assunto, e foi Newton quem apresentou essa idéia pela primeira vez, nos *Principia* (1687).

Baseando-se em sua teoria, Huygens planejou uma experiência de transporte de relógios de pêndulo em navios, da Holanda ao Cabo da Boa-Esperança, no extremo Sul da África. Após a realização da experiência, que parecia confirmar quantitativamente suas previsões, Huygens tomou conhecimento dos *Principia*. Após receber e estudar a obra de Newton, escreveu uma nova adição a seu ensaio e o publicou sob o título “Discours de la cause de la pesanteur”, como um apêndice ao seu famoso *Traité de la lumière*, em 1690. Essa última adição contém uma nova discussão sobre a forma da Terra e a relação entre peso e latitude, em que Huygens compara sua teoria com a de Newton, frisando as diferenças; e uma análise do movimento de projéteis em meios resistentes, onde concorda totalmente com os resultados dos *Principia*.

Os pontos mais relevantes do *Discurso*, para nosso objetivo presente, são aqueles em que Huygens apresenta sua explicação mecânica do peso; sua análise da forma da Terra e da variação do peso com a latitude; e as críticas e comparação, entre suas idéias e as concepções de Newton.

Tendo sido eclipsado pela teoria de Newton, o *Discurso* de Huygens tem sido pouco estudado pelos historiadores. Entre os que o analisaram, é relevante citar especialmente DUGAS (*La mécanique au XVII^e siècle*, cap. 13, especialmente pp.446-59) e KOYRÉ (*Newtonian studies*, especialmente pp.116-23). Por ser pouco conhecido e de difícil obtenção, ele será discutido aqui mais detalhadamente do que os *Principia*.

3 A EXPLICAÇÃO DE HUYGENS SOBRE O PESO

Foi com Descartes que se iniciou, no século XVII, a busca de uma explicação mecânica da força que atrai os corpos para a Terra (DESCARTES, *Le monde*, cap. 11; *Principia philosophiae*, parte 4, §§20-7). O programa mecanicista de Descartes desenvolvido no *Le monde* e no *Principia philosophiae* é extremamente claro: determinar as leis de movimento dos corpos, estabelecendo como único tipo de interação a de contato e colisão; e, a partir desses princípios, deduzir e explicar todos os fenômenos do Universo – da geração das estrelas e dos planetas à atração dos ímãs e aos fenômenos vitais. Nesse programa, Descartes procurou explicar também a força gravitacional. Na concepção cartesiana, o Universo é totalmente preenchido pela matéria. As regiões aparentemente vazias entre os planetas e estrelas seriam, segundo ele, ocupadas por uma matéria constituída por minúsculas esferas duras e polidas por seu atrito mútuo, constituindo o éter. Esse éter não estaria parado, mas movendo-se em imensos turbilhões. Nesses turbilhões, o próprio movimento do éter produziria um tipo de empuxo sobre a matéria mais grosseira em seu meio, levando-a para o centro do turbilhão. Assim teriam sido constituídos os planetas e as estrelas. Posteriormente à constituição, como esses turbilhões continuam a existir em torno de cada corpo que formaram, eles empurram para seu centro (e, portanto, para o centro dos astros) os corpos que se encontram em suas proximidades. Essa seria a causa da gravidade.

Não há dúvidas de que Descartes foi a maior influência sofrida por Huygens. É da teoria dos turbilhões de Descartes que Huygens parte, analisa, critica e reforma – mas, todo o tempo, permanecendo muito próximo do espírito cartesiano.

Vejamos o início do Prefácio do *Discurso sobre a causa da gravidade*:

A natureza age por caminhos tão secretos e tão imperceptíveis, ao levar para a Terra os corpos chamados pesados, que os sentidos nada conseguiram aí descobrir seja qual for a atenção e a indústria empregadas. Foi isso que obrigou os filósofos dos séculos passados a não procurar a causa desse efeito admirável senão nos próprios corpos e a atribuí-lo a alguma qualidade interna e inerente, que os faria

tender para baixo e para o centro da Terra, ou a um apetite das partes de unir-se ao todo. Isso não era expor as causas, mas supor princípios obscuros e não compreendidos... (HUYGENS, *Discours*, p. 125.)

Após descrever algumas tentativas inócuas de explicar a gravidade, Huygens prossegue:

O Sr. Des Cartes reconheceu, melhor do que aqueles que o precederam, que nada jamais seria compreendido na Física senão aquilo que se pudesse fazer depender de princípios que não excedem o alcance de nosso espírito, tais como aqueles que dependem dos corpos, considerados sem qualidade, e de seus movimentos. (HUYGENS, *Discours*, p. 126.)

Essa posição metodológica de Huygens é o ponto essencial que o fará afastar-se de Newton. Já com sua teoria elaborada, quando Fatio de Duillier lhe escreve sobre os *Principia* de Newton, Huygens responde (carta 2473, de 11 de junho de 1687):

Desejo ver o livro de Newton. Agrada-me que não seja cartesiano desde que ele não nos faça suposições como a da atração. (HUYGENS, *Oeuvres* v. 9, p. 190.)

Após o estudo da obra de Newton, Huygens continua considerando inadequada a hipótese da atração à distância, como se verá mais detalhadamente depois. Ele exprime essa opinião no *Discurso* e em cartas posteriormente. Em 1692, comentando os *Principia*, afirma sobre Newton:

Muito estimo seu saber e sua sutileza, mas ele os empregou muito mal, em minha opinião, em uma grande parte dessa obra, quando o autor pesquisa coisas pouco úteis, ou quando ele edifica sobre o princípio pouco verossímil da atração. (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 10, carta 2746, p. 354.)

Seria diferente se supuséssemos que a gravidade fosse uma qualidade inerente da matéria corporal. Mas não creio que o Sr. Newton aceite isso, pois uma tal hipótese nos afastaria muito dos princípios Matemáticos ou Mecânicos. (HUYGENS, *Discours*, p. 163.)

Como explicar mecanicamente a atração da gravidade? Huygens, como Descartes, concentra sua atenção em movimentos circulares e faz uso das propriedades da “força centrífuga”:

Imaginemos que em torno do centro D gire a matéria fluida contida no espaço ABC, do qual ela não possa sair por causa dos corpos que a cercam. Certamente todas as partes desse fluido se esforçam para se afastar do centro D; mas sem efeito nenhum, pois aquelas que deveriam sucedê-las em seus lugares possuem a mesma tendência de se afastarem desse centro. Mas se entre as partes dessa matéria houvesse alguma, como E, que não seguisse o movimento circular das outras, ou que seguisse menos velozmente do que aquelas que a cercam; digo que ela será empurrada para o centro. Pois não fazendo esforço nenhum para se afastar do centro, ou fazendo menos do que as partes próximas, ela cederá ao esforço das que estiverem menos afastadas do centro D e lhes dará lugar aproximando-se do centro, pois não poderia fazer o contrário. (HUYGENS, *Discours*, p. 131.)

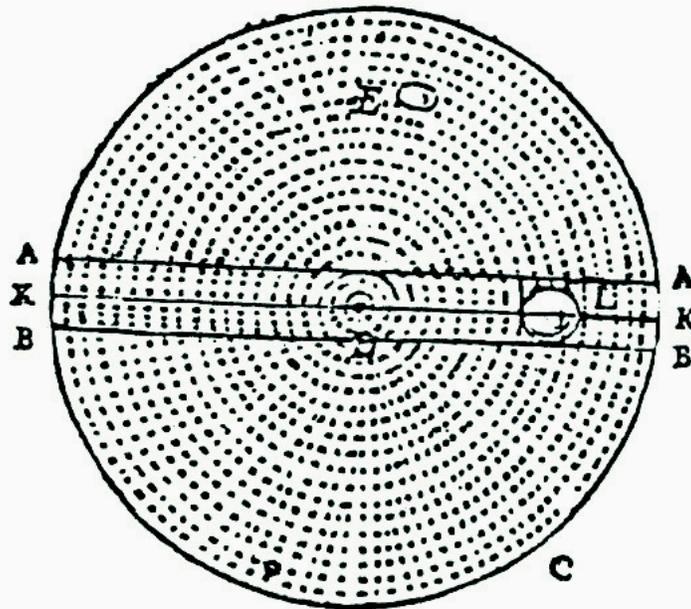


Figura 1: Desenho de Huygens (*Discours*), para ilustrar sua explicação da gravidade através de um modelo mecânico (éter).

Huygens ilustra esse fenômeno por meio de uma experiência que diz haver realizado e que parece ter sido exibida diante da Academia de Ciências de Paris, em 1669 (ver carta a Leeuwenhoek, de 06 de março de 1690 – HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, carta 2571, p. 390). Nessa experiência, Huygens enche de água um recipiente cilíndrico e coloca em seu interior pedaços de cera de Espanha,

mais densa do que a água e que portanto ficava em contato com o fundo do recipiente. Colocando a água em rotação e parando o recipiente, os pedaços de cera, por seu atrito com o fundo, diminuíam sua rotação mais depressa do que a água, sendo então empurrados para o centro do recipiente, pelo efeito descrito acima.

Tendo estabelecido que esse efeito era capaz de produzir, por uma causa mecânica perfeitamente compreensível, o movimento de corpos para um centro, Huygens discute a possibilidade de nele basear um modelo de atração gravitacional terrestre (na primeira versão do *Discurso* ele não discute a possível existência de um efeito semelhante em outros corpos celestes). Logo indica duas dificuldades: se houvesse em torno da Terra um fluido em movimento circular muito rápido em torno do eixo da Terra, ele tenderia a arrastar consigo os corpos terrestres por uma força paralela ao equador - que parece não existir - e produziria uma "gravidade" perpendicular ao eixo da Terra e não radial, como é observada - o que também é contrário à experiência. Isso o obriga a complicar seu modelo:

Para explicar portanto o peso (gravidade) da maneira como o concebo, supus que no espaço esférico, que compreende a Terra e os corpos que a cercam até uma grande distância, há uma matéria fluida que consiste em partes muito pequenas e que é agitada diversamente em todos os sentidos, com muita rapidez. Como essa matéria não pode sair desse espaço, que é cercado por outros corpos, digo que seu movimento deve se tornar em parte circular em torno do centro; mas não de tal forma que ela gire toda em um mesmo sentido e sim de modo que a maior parte de seus movimentos diferentes sejam feitos em superfícies esféricas em torno do centro do espaço citado, que por isso se torna também o centro da Terra. (HUYGENS, *Discours*, p.135.)

Os movimentos circulares, em todas as direções e sentidos imaginados por Huygens, certamente parecem implausíveis. Ele percebe que imediatamente será colocada uma crítica sobre a possibilidade desses movimentos, respondendo antecipadamente que esses movimentos não se aniquilam mutuamente porque as partículas desse fluido são muito pequenas e móveis: assim como o ar resiste muito menos ao movimento do que a água, da mesma forma esse fluido celeste resistiria incomparavelmente menos ao movimento.

Admitindo-se esses movimentos, o fluido celeste passaria a exercer uma força radial sobre os outros corpos e não tenderia a deslocá-los horizontalmente. Dessa forma seria possível explicar a gravidade terrestre.

É portanto verossímil que o peso dos corpos consista nisso: é o esforço feito pela matéria fluida, que gira circulante em torno da Terra em todos os sentidos, para se afastar desse centro e empurrar em seu lugar os corpos que não seguem esse movimento. (HUYGENS, *Discours*, p.137.)

Huygens considera que esses movimentos do fluido celeste não são perceptíveis ao observarmos corpos grandes porque eles são empurrados para todos os lados ao mesmo tempo; mas que corpos bastante pequenos seriam agitados por esses movimentos de forma perceptível – e que tal seria talvez a explicação do movimento irregular de partículas de poeira no ar.

A matéria celeste cujo movimento produz o peso deve ser capaz de interagir com a matéria comum, para empurrá-la; mas Huygens adiciona que a interação é fraca: é preciso supor que essa matéria celeste ou éter passe com grande liberdade pela matéria – caso contrário, seria impossível explicar como um corpo encerrado em recipientes de vidro, de metal ou de outros materiais poderia manter sempre o mesmo peso. Se a matéria comum impedisse significativamente a passagem da matéria celeste, seria possível blindar a atração gravitacional por paredes grossas. Além disso, o peso de grandes corpos seria proporcional ao seu volume e não ao seu conteúdo de matéria – o que é contrário à experiência (HUYGENS, *Discours*, p. 139). Da mesma forma, para explicar a existência de gravidade no fundo de grandes túneis e poços, Huygens precisa admitir que o movimento da matéria celeste atravessa a própria Terra.

É interessante observar que Huygens, mais uma vez seguindo a concepção de Descartes, supõe que todos os tipos de matéria são essencialmente iguais, diferindo apenas nos aspectos geométricos de suas partículas. Assim, as partículas do éter celeste e de toda matéria terrestre teriam a mesma densidade. Isso lhe permite calcular a velocidade com que as partículas da matéria celeste tangenciam a superfície da Terra: seria 17 vezes superior à velocidade equatorial da superfície terrestre, o que corresponderia a cerca de 8 Km/s. Sendo muito superior às velocidades de projéteis conhecidos, isso parece a Huygens permitir explicar por que a aceleração gravitacional age igualmente sobre corpos parados ou em movimento rápido – ficando implícita a sugestão de que corpos em queda com velocidade muito alta poderiam tender a uma velocidade limite, ao invés de aumentar indefinidamente sua velocidade, com aceleração constante.

Essa tentativa de explicação mecânica da gravidade é tudo o que se encontra no primeiro ensaio apresentado por Huygens em 1669 (e que corresponde às páginas 129 a 145 do *Discurso* de 1690). Note-se o quanto estamos distantes da teoria da gravitação de Newton: não existem forças entre corpos muito afastados; nada se fala sobre a relação entre a força gravitacional e a distância; a dinâmica do sistema solar não é apresentada – apenas a gravidade terrestre

é discutida⁴; essa gravidade não é produzida pela Terra, mas produz a Terra (como em Aristóteles), devendo assim continuar a existir mesmo se a Terra fosse destruída; além disso, o modelo exige, a rigor, que a proporcionalidade entre peso e massa, a inexistência de blindagem gravitacional e a constância da aceleração para corpos com altas velocidades sejam apenas aproximadamente verdadeiras, devendo existir efeitos observáveis, novos, em casos limites – que Huygens não se preocupa em discutir ou detectar.

Antes de passar a uma comparação entre essa visão e a teoria de Newton, vejamos no entanto um estudo quantitativo da gravitação que Huygens faz ao investigar o efeito da rotação da Terra.

4 O PERÍODO DOS PÊNDULOS E A LATITUDE

Em 1672, o astrônomo Richer realizou em Caiena cuidadosas medidas do período de um pêndulo de segundos, observando que ele oscilava mais lentamente do que em Paris, sendo necessário reduzir seu comprimento de uma linha e um quarto (1 linha francesa = 1/12 de polegada) para voltar a oscilar em um segundo⁵.

Uma das observações mais consideráveis que fiz é a do comprimento do pêndulo de segundos de tempo, que foi encontrado mais curto em Caiena do que em Paris: pois naquele lugar se marcou em uma barra de ferro o comprimento que era necessário para fazer um pêndulo de segundos de tempo e esta, tendo sido transportada para a França, e comparada com a de Paris, observou-se que sua diferença era de uma linha e 1/4, sendo a de Caiena menor do que a de Paris, a qual é de 3 pés, 8 linhas e 3/5. Essa observação foi repetida durante dez meses inteiros, durante os quais não se passou uma semana em que ela não fosse feita várias vezes com muito cuidado. As vibrações do pêndulo simples de que nos servíamos eram muito pequenas e duravam, de modo bem sensível, até 52 minutos de tempo, e eram comparadas às de um relógio muito excelente, cujas vibrações marcavam os segundos de tempo. (Richer, *apud* WOLF, *Mémoires sur le pendule*, p. B-13).

⁴Foi Leibniz quem tentou primeiramente explicar a lei do inverso do quadrado da distância através de um modelo de vórtices, cuja velocidade dependia da distância. Esse trabalho de Leibniz, "Tentamen de motuum coelestium causis" (LEIBNIZ, *Mathematische Schriften*, v. 6, p. 144) foi publicado em 1689 e não foi aprovado por Huygens (ver KOYRÉ, *Newtonian studies*, pp. 124 e seguintes).

⁵Na verdade, nesta e em outras experiências discutidas a seguir, não se utilizava um pêndulo com período de um segundo e sim um pêndulo cujas vibrações (meia oscilação) durassem um segundo.

Esse resultado conflitava com observações anteriores de Picard, que sempre observava exatamente o mesmo período para pêndulos de igual comprimento, em diferentes regiões da Europa: 440 1/2 L. Com a chegada da notícia de Richer a Paris, Picard e De la Hire fizeram novas medidas do comprimento do pêndulo de segundos em regiões da Europa, sempre encontrando o mesmo valor de 440 1/2 linhas francesas (equivalentes a 0,2256 cm e não 0,2117 cm, como a linha inglesa)⁶.

Várias sugestões foram apresentadas para tentar explicar a diferença de comprimentos: sugeriu-se que a temperatura em Caiena, mais elevada do que na Europa, poderia tornar o ar mais rarefeito (alterando o movimento do pêndulo), além de produzir uma dilatação da régua de metal usada para medir seu comprimento⁷. Mas logo se concluiu que a variação de densidade do ar tenderia a produzir um efeito oposto ao observado; e que o efeito de dilatação deveria ser muito inferior ao observado. A posição mais comum, por volta de 1674, deve ter sido semelhante à de Fontenelle que, embora admitindo que as medidas de Richer eram cuidadosas, comentava:

No entanto, seria ainda uma temeridade estabelecer algo sobre todo esse assunto; e é uma espécie de precipitação procurar sistemas físicos para explicar como os corpos pesam menos no Equador do que nos pólos... Deve-se temer que não serão encontradas boas razões para aquilo que não existe. (Fontenelle, *apud* WOLF, *Mémoires sur le pendule*, p. XXXIII.)

Apesar desse conselho cauteloso, tanto Newton quanto Huygens, independentemente, propuseram a explicação atualmente aceita para o fenômeno: a redução da atração gravitacional pela rotação da Terra, que é mais sensível próxima ao Equador terrestre. Daí ambos tiraram também como consequência o achatamento polar da Terra; mas as diferenças entre as duas abordagens são importantes e instrutivas.

Não se sabe ao certo quando Huygens tomou conhecimento das experiências de Richer e outros. Mas deve ter sido em 1687 que ele começou a desenvolver

⁶Mais detalhes sobre essas e outras medidas serão apresentadas no *Apêndice*, ao final deste artigo.

⁷Não era razoável esperar que a temperatura tivesse um efeito muito grande. De fato, Picard já observara que era preciso alterar o comprimento do pêndulo de segundos no verão e no inverno, mas notara que a variação era de apenas 1/10 de linha (ver WOLF, *Mémoires sur le pendule*, p. B-10).

o estudo da influência da rotação terrestre nos pêndulos. De fato, a 1º de maio desse ano ele escreve uma carta a De la Hire (carta 2455), onde diz:

Há entre meus escritos um pequeno tratado sobre a causa da gravidade, no qual gostaria de adicionar algumas reflexões sobre o que o Sr. Richer e outros observaram sobre o diferente comprimento dos pêndulos (de segundo) em diferentes climas; mas tendo visto que o Sr. Picard, na ilha de Tycho Brahe (Uranibourg), pretende haver encontrado o mesmo comprimento que no cabo de Cette e em Paris, e que a observação do Sr. Varin que é descrita no tratado do Sr. Mariotte⁸ sobre o movimento das águas não é proporcional (ou: não se coaduna) com a do Sr. Richer⁹, não sei o que se deve acreditar sobre esse fenômeno. É por isso que vos peço, senhor, que me mandeis o mais depressa, se as tendes, outras informações que vos persuadem que existe efetivamente essa variação na natureza, o que me parece muito verossímil, embora eu também pudesse dar uma razão no caso em que ela não exista. (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, pp. 130-1).

A resposta de De la Hire a Huygens (carta 2462, datada de primeiro de julho de 1687) é interessante, pois mostra a confusão existente na época sobre o fenômeno:

Já que possuí a (obra sobre a) viagem do Sr. Richer, nada vos direi sobre sua observação, mas, quanto às dos senhores Varin e des Hayes na ilha de Guadalupe, o Sr. Cassini, que fez imprimir suas observações, diz que aí ele (o comprimento do pêndulo de segundos) foi observado de 36 polegadas e 6 linhas e meia, embora essa ilha tenha latitude de 14 graus; e que em Caiena, que só tem 5 graus de latitude, encontrou-se 36 polegadas e 7 linhas e meia, que deveria ser proporcionalmente menor; essa irregularidade se adiciona àquilo que o Sr. Picard observou em Uranibourg e no cabo de Cette e que nós juntos verificamos ainda em Bayonne, onde não se encontra diferença sensível, mas sempre muito embaraçado (irregular?); suspeitei que uma parte dessa irregularidade poderia ser causada pelo filete (do pêndulo), que poderia estar mais rígido em uma observação do que outra e talvez um pouco mais pesado; e se não tivéssemos feito a observação da mesma bola ao retornar de viagem, eu teria suscitado de alguma irregularidade. Mas, além dessas causas, aquela que poderia vir do ar poderia, ao que me parece, trazer uma mudança muito grande...(HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, pp. 162-3.)

⁸O livro de Mariotte citado por Huygens é datado de 1686. Nele, Mariotte afirma que Varin obteve para o comprimento do pêndulo de segundos na ilha de Gorée, próxima ao Cabo Verde, o valor de 3 pés, 6 linhas e meia (ver HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, p. 131, n. 5).

⁹A incongruência entre a observação de Varin e a de Richer, citada por Huygens, é a seguinte: Varin fez sua observação em Gorée, que fica a uma latitude superior à de Caiena, onde Richer fez sua observação. Dever-se-ia esperar que o resultado de Gorée estivesse entre o resultado de Caiena e o de Paris, mas não estava. Assim não parecia tratar-se de um fenômeno regular, que fosse uma função da latitude. Ver o *Apêndice* do presente artigo.

De la Hire especula então que o ar, que é “mais pesado e muito úmido na Zona Tórrida, exigiria um pêndulo mais curto do que na Zona Temperada”. É difícil perceber por que motivo ele pensa que o ar quente deveria produzir um maior empuxo do que o ar frio.

A partir da correspondência de Huygens é possível verificar que, antes de 1690, ele havia presenciado experiências que mostraram ser desprezível o efeito da dilatação dos metais, no caso. Em carta a Denis Papin, datada de setembro de 1690 (carta 2617), afirma:

Para ver se as hastes dos pêndulos se alongam pelo calor sob a linha equinocial (na região tropical) não é preciso ir até lá, pois sabe-se, pela descrição dos viajantes, a quanto chega aproximadamente ali o maior calor (temperatura) a saber: (ele chega) a derreter a manteiga e quase (a derreter) as velas de cera, de modo que basta aquecer até aí (até essa temperatura) uma haste de cobre de 2 ou 3 pés e ver se o comprimento aumenta perceptivelmente, o que não foi encontrado com tão pouco calor nas experiências que fizemos na Academia de Ciências de Paris, se tenho boa memória. (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 9, p. 485).

Huygens parecia, portanto, estar bem informado sobre os fatos relevantes.

5 VARIAÇÃO DA GRAVIDADE COM A LATITUDE: HUYGENS

A primeira versão da análise de Huygens é extremamente simples. Ele considerou, como ponto de partida implícito, uma Terra esférica, em rotação; e, por composição “vetorial” da atração gravitacional com a força centrífuga, que ele tão bem estudara no seu *Horologium oscillatorium*, determinou a redução da gravidade em função da latitude. Para este cálculo, ele supõe a aceleração gravitacional, propriamente dita, como constante. O raciocínio utilizado é elementar e não precisa ser reproduzido.

Ele leva ao resultado que, expresso em notação moderna, pode ser escrito:

$$g = g_0(1 - A \cos^2 \varphi)$$

onde g_0 é a aceleração gravitacional polar e g a aceleração à latitude φ . A constante A é

$$A = \frac{\omega^2 R}{g_0}$$

onde R é o raio da Terra e ω sua velocidade angular. O valor de A é, aproximadamente, 1/289.

Como os pêndulos que meçam o segundo, em diferentes latitudes, terão comprimentos proporcionais à aceleração gravitacional local, esse comprimento obedecerá à mesma fórmula:

$$L = L_0(1 - A\cos^2\varphi)$$

Utilizando o valor conhecido do comprimento do pêndulo de segundos em Paris, de 3 pés, 8 3/8 linhas (440 3/8 linhas), Huygens calcula:

...segue-se que o comprimento do pêndulo sobre a Terra imóvel, ou sobre o Pólo, seria de 3 pés 9 1/6 linhas. Daí subtraindo 1/289, que corresponde a 1 1/2 linha, teremos o comprimento do pêndulo de segundos, no Equador, de 3 pés 7 2/3 linhas (439 2/3 linhas). De modo que esse pêndulo seria mais curto do que o de Paris de 5/6 de uma linha; que é um pouco menos do que aquilo que foi encontrado em Caiena pelo Sr. Richer, ou seja, uma linha e um quarto. (Huygens, *Discours*, p. 149.)

O efeito previsto por Huygens era da mesma ordem de grandeza do observado por Richer, embora o valor fosse diferente. Huygens atribui a diferença a falhas observacionais. No *Discurso*, ele cala sobre as medidas de Picard; e considera ainda mais falhas do que as de Richer as observações do pêndulo em Guadalupe (por Varin, des Hayes e de Glos), que indicavam uma diferença de 2 linhas em relação a Paris embora Guadalupe estivesse mais distante do Equador do que Caiena.

Note-se que Huygens não faz qualquer correção associada à temperatura, à densidade do ar ou à altitude dos locais estudados.

Ainda nessa parte de sua obra, que antecede a leitura dos *Principia*, Huygens indica que o fio de prumo em latitudes diferentes de 0° e 90° não tem a direção radial, formando um ângulo de cerca de 6' de arco na latitude de Paris. A partir daí, ele mostra que a superfície dos mares, que tem que se manter perpendicular à linha de prumo¹⁰, não pode ser esférica, mas deve ser uma superfície achatada

¹⁰Para nós, é óbvio que a superfície de um líquido deve ser perpendicular à gravidade resultante que age sobre ela - caso contrário, ela se deslocaria. No entanto, isso não foi sempre claro. Em uma carta a Huygens, datada de 28 de agosto de 1691, J. Goussset pergunta se a inclinação do fio de prumo em relação à direção radial não seria perceptível (por observação direta, comparando com um nível), ao que Huygens responde, em 02 de novembro de 1691:

Mesmo se esse ângulo fosse ainda maior, ocorreria sempre e necessariamente que a superfície de água seria perpendicular ao fio de prumo e que assim o abaixamento de nível não seria percebido de modo nenhum, pois a linha de nível é também perpendicular a esse fio de prumo. (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 10, carta 2708, p. 181.)

nos pólos em relação ao equador – mas não calcula esse achatamento; nem estuda uma possível influência do próprio achatamento no cálculo dos pêndulos.

Antes que fosse publicado esse *Discurso*, ocorreram dois fatos importantes que levaram Huygens a lhe acrescentar uma “Adição”: a leitura dos *Principia* e a realização de uma experiência de transporte de relógios em navios. Sem dar detalhes dessa experiência, ele a considera totalmente favorável à sua teoria. Essa não parece ter sido uma opinião unânime, pois ele próprio acrescenta:

O detalhe de tudo isso está deduzido ao longo do Relatório que fiz, sobre essa viagem dos pêndulos, aos citados Senhores Diretores (da Companhia das Índias Orientais). Em relação a esse relatório, após fazê-lo examinar por pessoas inteligentes, aprovei-lhes ordenar que se fizesse uma segunda prova; para assegurar-se por várias experiências da validade dessa invenção.

O resultado dessa segunda experiência não é descrito nem no *Discurso* nem na correspondência de Huygens.

6 NEWTON E O ACHATAMENTO DA TERRA

Consideremos agora a diferença entre os cálculos de Huygens, para o pêndulo e o desvio do fio de prumo, com o cálculo de Newton. No Livro III dos *Principia*, Newton estuda as questões da forma e achatamento da Terra (proposição 19, problema 3) e da variação da gravidade com a latitude (proposição 20, problema 4).

Durante a resolução do primeiro problema, Newton faz uso de um resultado obtido anteriormente, sobre a atração gravitacional de elipsóides. No 1º Livro dos *Principia*, seção XIII, após estudar a atração de corpos esféricos, cujas partículas produzam forças que variem de forma conhecida com a distância, Newton estuda o caso dos corpos não esféricos. Na proposição 91, problema 45, ele estuda o caso de sólidos de revolução homogêneos, analisando como caso particular um elipsóide homogêneo. Uma das propriedades deduzidas é que, no interior do elipsóide homogêneo, ao longo de um eixo, as forças serão diretamente proporcionais às distâncias ao centro – como em uma esfera homogênea.

Primeiramente ele imagina um elipsóide com um achatamento de 1%, e prova que, nesse caso, se o elipsóide não girasse, a força de atração nos “pólos” seria 1/500 maior do que no Equador. No caso desse elipsóide, se fossem feitos dois canais radiais de mesma seção reta, até o centro, do pólo e do Equador, cheios de água, as massas de água em cada um teriam a proporção de 100 para 101, e seus pesos manteriam a proporção de 501 para 505. As duas colunas poderiam ficar em equilíbrio se sua rotação reduzisse em 4/505 o peso da coluna equatorial. Mas

a rotação da Terra só reduz em $1/289$ o peso da coluna equatorial¹¹; portanto, o achatamento da Terra deve ser inferior a 1%; por proporcionalidade, Newton encontra então um achatamento de $1/229$ (ou $3/689$, na primeira edição) e calcula que a distância do Equador ao centro da Terra é 85.472 pés (17,1 milhas ou 26,05 Km) maior do que a distância dos pólos. O valor atualmente admitido para esse achatamento é de 21 km – 20% menor do que o previsto por Newton, por motivo que será discutido depois.

Os cálculos de Newton utilizam, implicitamente, a lei da gravitação universal, que foi necessária para deduzir a lei de atração de um elipsóide. Como se verá depois, essa suposição de que cada parte da Terra atrai um corpo em sua superfície é um dos aspectos que Huygens não conseguirá aceitar.

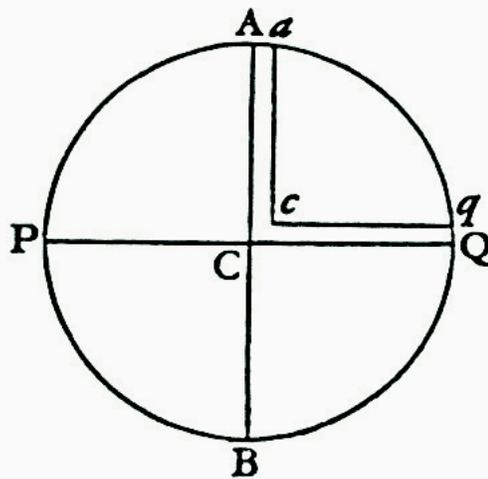


Figura 2: Esquema utilizado nos *Principia* de Newton, para deduzir o achatamento da Terra através da condição de equilíbrio de dois canais que vão até o seu centro, preenchidos por um líquido homogêneo.

¹¹O valor utilizado por Newton na primeira edição dos *Principia* é de $1/290,8$: a diferença entre os dois números provém de diferentes valores adotados para o raio terrestre. Na primeira edição, Newton adota o valor de 19.615.800 pés parisienses (medida de Picard); na segunda, utiliza as medidas de Picard, Norwood e Cassini, que fornecem o valor de 19.695.539 pés parisienses (note-se que não se respeitava muito o uso de algarismos significativos).

Aplicando a mesma teoria a Júpiter, Newton calcula seu achatamento. Na primeira edição, Newton se engana, supondo que o achatamento não depende da densidade do corpo, e obtém, para Júpiter, um achatamento de $1/39,6$. Na segunda edição, levando em conta a diferença de densidade média entre Júpiter e Terra, ele obtém o valor $1/8$; e, na terceira edição, $1/9,2$. Sabia-se já, na época, que Júpiter era achatado em um pouco menos de 10%, e a concordância parecia satisfatória (o achatamento aceito atualmente é $1/15$, menor do que o calculado por Newton).

Nesses cálculos, Newton supôs sempre que a densidade da Terra (ou de Júpiter) fosse homogênea. O efeito de uma possível concentração de massa no centro do planeta é também discutido. Nas duas primeiras edições dos *Principia*, ao final da proposição 19 do terceiro livro, Newton afirma: "Se a matéria for mais densa no centro do que na circunferência, o diâmetro traçado de oriente a ocidente (eixo equatorial) será maior". Ou seja: a concentração de massa no centro do planeta *umentaria* o achatamento. Isso é incorreto. Na terceira edição dos *Principia*, Newton omite essa frase, provavelmente percebendo que havia se enganado. O achatamento, no caso da densidade uniforme, é maior do que no caso de uma maior densidade central. Se quase toda a massa estivesse concentrada no centro, o achatamento seria, para a Terra, $1/578$ (ver TODHUNTER, *History*, pp. 32-5, especialmente §64). Assim sendo, atualmente se interpreta a diferença entre a previsão teórica e o valor observado para o achatamento como proveniente de um aumento de densidade dos planetas, de fora para dentro.

Note-se que, por este fator, a teoria de Newton admite a possibilidade de um ajuste à experiência, dentro de certos limites. O mesmo não ocorre com a teoria de Huygens, que supõe uma gravidade constante.

Após determinar a forma da Terra, Newton considera o problema da variação da aceleração gravitacional com a longitude e o comprimento dos pêndulos de segundos. A partir da análise do achatamento, ele obtém que a aceleração resultante nos pólos é $1/230$ maior do que no Equador, se a Terra for homogênea (ao invés de $1/289$, como obtido por Huygens). Novamente, é preciso notar que a teoria de Newton admite certo ajuste. Sabemos atualmente (Newton não faz esse cálculo) que, se toda a massa da Terra estivesse concentrada em seu centro, a variação da aceleração gravitacional resultante nos pólos e no Equador seria de $1/144,5$; em qualquer caso, o efeito previsto por Newton é *maior* do que o previsto por Huygens. O efeito atualmente admitido é de uma variação de $1/191$, que, novamente, é compatível com a teoria de Newton se houver um aumento de densidade da Terra da superfície para o centro.

Tanto no caso de Huygens como no de Newton, a variação de gravidade ou

de peso é proporcional ao quadrado do seno da longitude.

Utilizando a suposição de que a densidade é homogênea, Newton calcula (na primeira edição) os pesos relativos (e os comprimentos relativos dos pêndulos de segundos) em Paris, Gorée e Caiena, comparando seus resultados com as medidas de Richer, Varin e des Hayes. A diferença prevista por Newton para a diferença de comprimento do pêndulo de segundos entre Paris e o Equador é de 1,087 linhas, inferior aos observados (para detalhes, ver *Apêndice*).

Embora afirme não confiar nas medidas, Newton diz que elas parecem indicar que a densidade central da Terra é maior. Na terceira edição, Newton leva em conta também o efeito de dilatação dos pêndulos pelo calor, o que melhora a concordância.

Na segunda e terceira edições, além de trazer um maior número de referências a experiências com pêndulos, Newton apresenta tabelas dos comprimentos dos graus de um meridiano e dos comprimentos do pêndulo de segundos a diferentes latitudes. Se a Terra é achatada, sua curvatura é maior próxima ao Equador do que próxima aos pólos. Assim sendo, ao se percorrer a mesma distância sobre um meridiano, a vertical variará mais nas proximidades do Equador do que dos pólos. Portanto, medidas cuidadosas do arco correspondente a uma variação de 1° em um meridiano, a diferentes latitudes, poderiam permitir determinar o grau de achatamento da Terra. Essas medidas geodésicas foram, de fato, as que permitiram determinar o grau de achatamento da Terra, 50 anos depois da primeira edição dos *Princípios*.

7 VERSÃO FINAL DO *DISCOURS* DE HUYGENS

Após estudar os *Princípios*, como é explicitamente dito no *Discurso*, Huygens retoma seus cálculos sobre o achatamento da Terra. Primeiramente ele tenta obter geometricamente a forma da superfície terrestre, sem êxito. Depois, ele toma de empréstimo a Newton o “truque” dos canais de água. No entanto, em seu cálculo, Huygens não faz uso das delicadas suposições de Newton. Ele encontra então um achatamento de apenas 1/578 (duas vezes e meia *menor* do que o previsto por Newton); e determina uma forma não elipsoidal para a Terra. Note-se que a diferença entre as previsões de Newton e Huygens para o achatamento (1/229 versus 1/578) é muito grande, enquanto as duas previsões para a variação da aceleração gravitacional (1/230 versus 1/289) é bem menor. Embora, em princípio, as experiências com pêndulos pudessem distinguir entre as duas teorias, era mais fácil decidir entre elas por medidas geodésicas. Isso foi, de fato, o que aconteceu depois (ver *Apêndice* do presente artigo). Huygens faz uso explícito da hipótese de que a gravidade terrestre é constante, independente

da distância ao centro e do achatamento da Terra! O que Huygens está supondo é, no fundo, que a gravidade terrestre não é produzida pela matéria da Terra e sim pelas partículas (éter) celestes, rejeitando assim a teoria newtoniana.

Supus em todo esse raciocínio que a gravidade é a mesma no interior da Terra e em sua superfície; o que me parece muito verossímil, apesar da razão que se pode ter para disso duvidar, da qual falarei depois...

O Sr. Newton o encontra (o achatamento) $1/231$ de EC, e que assim a forma da Terra difere bem mais da esférica (do que de acordo com o cálculo de Huygens); para isso ele se serve de uma suposição completamente diferente – que não examinarei aqui, pois também não estou de acordo com um Princípio que ele supõe nesse cálculo e em outros; que é: que todas as pequenas partes que podem ser imaginadas em dois ou mais corpos diferentes, se atraem ou tendem a se aproximar mutuamente. Eu não poderia admitir isso, pois vejo claramente que a causa de uma tal atração não é explicável por nenhum princípio de Mecânica, nem pelas regras do movimento. Assim como também não estou persuadido da necessidade da atração mútua dos corpos inteiros; tendo mostrado que, mesmo se a Terra não existisse, os corpos não deixariam de tender para um centro, por aquilo que é chamado de sua gravidade. (HUYGENS, *Discours*, p. 159.)

8 O CONFLITO METODOLÓGICO

Analise agora diferenças básicas entre Huygens e Newton. No seu *Discurso*, logo após o trecho acima citado, Huygens indica os aspectos da teoria gravitacional de Newton que lhe parecem sólidos:

(1) a existência de forças entre o Sol e os planetas e dos planetas entre si – forças que poderiam ser explicadas por uma extensão do modelo de Huygens;

(2) o decréscimo da força com o inverso do quadrado da distância, que explicaria as órbitas elípticas observadas e a relação entre a gravidade terrestre e a aceleração da Lua;

(3) a suposição de inexistência dos turbilhões de Descartes, permitindo livre movimento aos astros e explicando a constância das excentricidade das órbitas e de suas inclinações, assim como o movimento dos cometas.

No entanto, ao aceitar a abolição dos turbilhões de Descartes, que outrora aceitara como existentes (*Discours*, p. 160), Huygens não admite que o espaço celeste seja vazio: se não existisse matéria no espaço celeste, não poderia nem haver gravidade nem propagação de luz (segundo a teoria ondulatória). A posição de Huygens é muito clara: não se pode conceber um efeito ou força à distância, e a única alternativa é uma força transmitida por um meio material. Esse meio, no entanto, pode apresentar baixa resistência ao movimento. Huygens concebe

que o que dá fluidez à água – e não à areia – é o movimento de suas partículas; e que o movimento das partículas da matéria celeste, sendo muito mais rápido, produziria uma fluidez ainda maior (e menor resistência).

Quanto a outros aspectos da teoria de Newton, Huygens não só os rejeita mas nem mesmo os compreende. Ao comentar sobre a lei do inverso do quadrado da distância (p. 167) Huygens sugere que ela não seria válida nas proximidades e dentro da Terra, “pois se não, dever-se-ia dizer que a gravidade, indo para o centro, aumentaria até o infinito; o que não é verossímil”. Na teoria newtoniana, como se sabe a lei do inverso do quadrado da distância não tem essa consequência. Ela só se aplica ao campo externo de um corpo com simetria esférica. Em outro ponto, ao considerar a forma achatada da Terra, Huygens se pergunta se isso poderia produzir uma variação da gravidade na superfície, sugerindo que, se essa variação existisse ela obedeceria à lei do inverso do quadrado da distância – ignorando assim os cálculos de Newton. Tudo o que Newton produz, nos *Principia*, baseado na lei da gravitação universal entre todas as partes da matéria, é rejeitado por Huygens. E até mesmo a magnífica teoria das marés, que não depende dessa suposição, exigindo apenas as leis da Mecânica e as forças entre os planetas, é rejeitada, em carta que remete a Leibniz em 18 de novembro de 1690:

Quanto à causa do Refluxo (marés) fornecido pelo Sr. Newton, não me contento de forma nenhuma com ela, nem com todas suas outras teorias que ele edifica sobre seu princípio de atração, que me parece absurdo, como já o testemunhei na Adição ao *Discurso sobre a gravidade*. E freqüentemente me espantei como ele pode dar-se a pena de realizar tantas pesquisas com cálculos difíceis cujo único fundamento é esse mesmo princípio. (HUYGENS, *Oeuvres*, v. 10, p. 57.)

Analisando-se o repúdio a esses aspectos da teoria gravitacional de Newton, pode-se notar que a dificuldade de Huygens prende-se a dois aspectos *metodológicos* centrais: para ele parece inaceitável:

a) universalizar para todas as partes da matéria os resultados obtidos para as forças entre os astros;

b) desenvolver uma teoria fenomenológica da gravitação, desprovida de um modelo mecânico capaz de dar conta de seus princípios básicos.

Em relação a esses dois pontos, a posição de Newton nos *Principia* é clara: ele quer levar tão longe quanto possível as consequências da lei da gravitação, aplicando-a a todas as substâncias, a partículas de qualquer tamanho e a qualquer distância. Essa posição foi justificada posteriormente pelas regras de raciocínio em filosofia (regras III e IV). Também está claro, no desenvolvimento dos *Principia*, que Newton procurou afastar-se de pontos controversos, desviando-

se da questão da explicação mecânica da força gravitacional. Independente de suas convicções próprias, Newton abstém-se de discutir a causa da gravitação – e pode fazê-lo porque a enorme massa de resultados dos *Principia* independe disso.

A posição de Huygens só pode ser justificada se forem assumidas duas proibições metodológicas gerais:

- a) não se deve universalizar os resultados que a experiência corroborou apenas em casos limitados;
- b) não se deve edificar uma teoria que se baseie em propriedade e leis que não são explicáveis mecanicamente.

Quando expressas sob a forma de proibições, as críticas de Huygens são vistas em toda sua fragilidade. Mesmo se admitirmos que uma extrapolação da experiência é perigosa e que é desejável dispor-se de modelos mecânicos dos fenômenos, esses seriam aspectos que podem ser cuidados, corrigidos, adicionados a uma teoria, mas que certamente não estabelecem condições de aceitação ou rejeição. Para contrastar com a formulação proibitiva, vamos atenuar essas normas e exprimi-las sob a forma de *desiderata*¹²:

- a) ao se extrapolar os resultados obtidos em certos domínios da experiência, é desejável testar essa extrapolação nos novos domínios de aplicação.
- b) dada uma teoria que descreve um determinado nível observacional em um domínio de estudos, é desejável desenvolver uma teoria de nível observacional inferior, que explique a primeira teoria.

Colocados sob essa forma, como descrição de coisas desejáveis na Ciência, mas sem a conotação de proibição ou obrigações, essas normas são, em primeiro lugar, facilmente aceitáveis. Não há dúvidas de que Newton as aceitaria. No entanto, se consideradas como proibição, elas barrariam a teoria newtoniana de gravitação – e creio que todos concordamos que proibir essa teoria teria sido uma grande perda para a Ciência.

Neste caso, como em muitos outros episódios da Ciência, ocorre que um avanço científico importante pode ser feito graças à desistência – pelo menos temporária – de satisfação de certas regras metodológicas. Se as regras são vistas como normas em sentido estrito – proibições e exigências rígidas – isso representa uma quebra metodológica. No entanto, se as regras são vistas como *desiderata*, não é necessário considerar a falta de satisfação de alguns *desiderata* como uma falha ou quebra metodológica.

Ao invés de opor-se à teoria newtoniana por não preencher certas condições, Huygens poderia dedicar-se a aperfeiçoá-la. Em parte, ele o faz – ao tentar

¹²A respeito das abordagens proibitivas e não proibitivas da metodologia científica, ver MARTINS, *Sobre o papel dos "desiderata" na ciência*.

explicar a gravidade mecanicamente. Mas mesmo esse trabalho de Huygens poderia ser criticado, sob o ponto de vista da própria regra que ele utiliza: Huygens não explica mecanicamente a variação da força entre os astros com o inverso do quadrado da distância. Como ele poderia, então, aceitar a explicação gravitacional dos movimentos planetários, faltando esse elemento? Se adotarmos a posição proibitiva, isso é incompreensível: mostraria uma inconsistência de Huygens. No entanto, se assumirmos normas apenas desiderativas, a posição de Huygens é compreensível: pois, dada as leis de Kepler, Newton proporcionou uma teoria de nível observacional inferior, que as explica. A própria lei da gravitação pode, por sua vez, solicitar uma explicação – mas isso constituiria um segundo passo.

Por outro lado, ao questionar a extrapolação da lei da força gravitacional a todas as partículas, seria desejável que Huygens propusesse testes dessa idéia, no novo domínio. A única diferença testável entre a teoria newtoniana e a sua, discutida por Huygens, era a relativa ao achatamento da Terra e retardamento dos pêndulos. Ele afirma que sua experiência dos relógios concorda com seus cálculos – sem dar detalhes e sem dizer que discorda da teoria newtoniana. Mas os dados não eram suficientemente precisos para esclarecer a questão. Apenas o acúmulo de medidas de períodos de pêndulos – e, posteriormente, das medidas de comprimentos de arcos do meridiano – permitiu mostrar, cinquenta anos mais tarde, que a experiência era contrária aos cálculos de Huygens e favorável aos de Newton. O *Apêndice* ao presente artigo apresenta uma descrição mais detalhada desse episódio.

APÊNDICE

Neste apêndice será apresentada uma descrição e discussão mais detalhada das evidências observacionais relativas à variação do período dos pêndulos e à forma da Terra. As fontes principais para o estudo dessas questões foram: os trabalhos de Maupertuis e de Boscovich, do século XVIII, repletos de dados históricos (MAUPERTUIS, *Oeuvres*; BOSCOVICH, *Philosophiae recentioris*); e os estudos históricos de Todhunter e Wolf, do século XIX (TODHUNTER, *History*; WOLF, *Mémoires sur le pendule*). Outras fontes usadas serão citadas nos locais apropriados.

A-1 Estudos sobre o pêndulo

Podemos dividir as pesquisas experimentais sobre a variação da gravidade com a latitude, por meio de pêndulo, em várias fases históricas. A primeira fase observacional pode ser considerada a que vai de 1670 a 1674 (ver tabela

1). Em 1670, após realizar muitas medidas na França, Picard havia concluído que o pêndulo de segundos media sempre 440 linhas e meia, em unidades francesas (ou seja, 99,36 cm). Aparentemente, ele era capaz de notar variações de cerca de 1/10 de linha (cerca de 0,02 cm). A constância do comprimento do pêndulo de segundos lhe parecia tão certa, que Picard chegou a sugerir seu uso como padrão de comprimento. O resultado de Picard foi contrariado pelas observações de Mouton, abade de Lyon (que foi, aliás, quem sugeriu a criação do sistema métrico baseado na medida do meridiano terrestre). Mouton afirmou ter observado uma grande variação de comprimento do pêndulo em Lyon e Londres (ver tabela 1). Convencido de que estava correto, Picard refaz suas medidas, deslocando-se até a Dinamarca (Uranibourg) e a Lyon, sempre observando a constância do comprimento do pêndulo de segundos. Nesse meio tempo, surge a observação de Richer, em Caiena; mas essa anomalia não era levada a sério por todos. Fontenelle, em 1674, adverte os filósofos sobre o perigo de procurar explicações sobre o que não existe!

TABELA 1

No.	ANO	OBSERVADOR	LOCAL	LATITUDE	COMPRIMENTO DO PÊNDULO (LINHAS)
1	1670	Picard	Paris	48° 50'	440 1/2
2	?	(apud Picard)	La Haye	52° 06'	440 1/2
3	1670	Mouton	Lyon	45° 45'	438 3/10
4	1670	Mouton	Londres	51° 31'	443 1/2
5	1671	Picard	Uranibourg	55° 54'	440 1/2
6	1672	Richer	Caiena	4° 56'	439 1/4
7	1674	Picard	Cette	43° 24'	440 1/2
8	1674	Picard	Lyon	45° 45'	440 1/2
9	1674	De la Hire	Bayonne	43° 29'	440 1/2

Pode-se também observar a posição cautelosa da Academia de Ciências de Paris pelas instruções que Cassini preparou (em 1681) para que fossem seguidas por Varin, Des Hayes e De Glos, em suas observações (viagem a Gorée e Guadalupe, em 1682):

Por experiências muito exatas feitas por senhores de Academia, em Paris, La Haye, Copenhagen e Londres, encontrou-se sempre o mesmo comprimento do pêndulo que faz uma vibração em um segundo. Somente em Caiena ele foi

encontrado mais curto; mas há dúvidas de que isso tenha ocorrido por algum defeito na observação. É por isso que se deve observar com a maior exatidão possível. (Cassini, *apud* WOLF, *Mémoires sur le pendule*, p. B-16.)

TABELA 2

No.	ANO	OBSERVADOR	LOCAL	LATITUDE	COMPRIMENTO DO PÊNDBULO (LINHAS)
10	1677	Halley	Santa Helena	-15° 57'	~ 439
11	1679	Roemer	Londres	51° 31'	440 1/2
12	1682	Varin, des Hayes, de Glos	Gorée	14° 40'	438 5/9
13	1682	Varin, des Hayes, de Glos	Guadalupe	16° 0'	438 1/2
14	1686	Padres jesuítas (Fontaney, Thomas)	Sião (Tailândia)	-14°	438 1/2

A segunda fase observacional, que vai da advertência de Fontenelle à composição das teorias de Huygens e Newton (1687), corresponde a um aumento de dúvidas: por um lado, Roemer, enviado por Picard a Londres, obtém lá o mesmo valor obtido em Paris para o comprimento do pêndulo de segundos (ver tabela 2); por outro lado, observações realizadas na zona tropical (Halley; Varin, des Hayes e Glos; padres jesuítas) indicavam um comprimento claramente menor do que o de Paris. O gráfico 1 indica como eram confusos os dados existentes até então.

Na primeira edição dos *Principia*, na proposição 20 do Livro III, Newton cita apenas as observações de Paris, Gorée e Caiena. Nas edições seguintes ele adiciona mais dados. É provável que, ao elaborar sua teoria, ele só dispusesse dessas informações (aliás, conflitantes) sobre o comprimentos do pêndulo de segundos.

Newton talvez tivesse também conhecimento, já nesta época, da observação de Halley (à qual ele se refere apenas na segunda edição dos *Principia*):

É verdade que em Santa Helena, na latitude de 16 graus ao Sul, descobri que o pêndulo de meu relógio, que vibrava segundos, para poder marcar o tempo (acuradamente), precisava ser tornado mais curto do que na Inglaterra por um espaço

muito sensível (mas que naquela época esqueci-me de observar exatamente); e depois disso observações semelhantes foram feitas por observadores franceses perto do Equinócio (Equador). No entanto, no meu caso, eu não ousaria afirmar que a causa foi algo diferente da grande altura do meu local de observação acima da superfície do mar, pelo que, ficando diminuída a gravidade, o comprimento do pêndulo que vibra segundos diminui proporcionalmente. (HALLEY, 1686.)

Embora as observações não fossem muito regulares, parecia estar sendo observada uma diminuição do comprimento do pêndulo de segundos (e portanto, da gravidade) próximo ao Equador. A ordem de grandeza do efeito observado (variação de cerca de 1/200, de Paris ao Equador) concordava com o efeito previsto teoricamente. Tornava-se desejável aperfeiçoar as medidas e repeti-las.

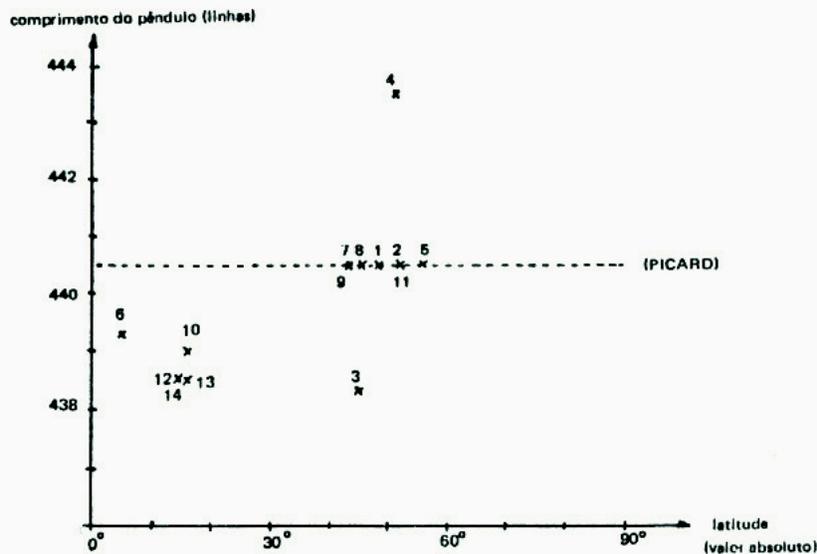


Gráfico 1: Comprimento do pêndulo de segundos, em função da latitude da observação, compreendendo os dados de 1670 a 1686 (Tabelas 1 e 2), ou seja, antes da publicação dos *Principia* de Newton (1687). A linha tracejada indica o valor supostamente constante, obtido por Picard. Os números correspondem aos utilizados nas tabelas.

Em uma terceira fase observacional (da publicação das obras de Newton e Huygens até o início do século XVIII), novas medidas irão confirmar a existência do efeito e estabelecer sua regularidade (Tabela 3). Destaca-se, nesse período, a cuidadosa série de medidas de Des Hayes, na qual se observou o gradual aumento do comprimento do pêndulo de segundos à medida que aumentava a distância ao Equador. Embora ainda houvesse alguma dúvida sobre o valor exato da variação, ela foi aceita como real a partir desse período.

TABELA 3

No.	ANO	OBSERVADOR	LOCAL	LATITUDE	COMPRIMENTO DO PÊNDULO (LINHAS)
15	1694	Chazelles	Cairo	30° 03'	438 4/5
16	1698	Couplet	Lisboa	38° 43'	439 1/6
17	1698	Couplet	Paraíba	-6° 38'	438
18	1700	Des Hayes	Caiena	4° 56'	438 1/2
19	1700	Des Hayes	Granada	12° 06'	438 1/2
20	1700	Des Hayes	Martinica	14° 44'	438 1/2
21	1700	Des Hayes	S. Cristóvão	17° 19'	438 3/4
22	1700	Des Hayes	S. Domingos	19° 48'	439
23	1700	Des Hayes	Cabo	-33° 18'	440
24	1704	Fevillé	Puerto Bello	9° 33'	437 7/12
25	1704	Fevillé	Martinica	14° 44'	437 10/12

Os dados considerados finais e decisivos, tanto no que refere às medidas com pêndulos quanto em relação à medida dos graus terrestres (que será discutida mais adiante), foram obtidos na década de 1730 por duas grandes expedições. O Rei da França ordenou, inicialmente, o envio de um grupo de cientistas à região do Equador e, após a partida dessa expedição, foi resolvida também a realização de medidas no Círculo Ártico. E expedição equatorial partiu da França em 1735, levando Godin, Bouguer e Condamine. Em 1736, partiu o grupo formado por Maupertuis, Clairaut, Camus, le Mommier e Outhier para o Norte. O trabalho durou vários anos. Existem célebres descrições dessas expedições (CONDAMINE, *Journal du voyage*; idem, *Relation abrégée*; MAUPERUIS, *Relation du voyage fait par ordre du Roi au circle polaire pour déterminer la figure de la Terre*, in: *Oeuvres*, v. 3, p. 69) A tabela 4 indica os resultados dos dois grupos, em relação ao pêndulo (ver BOSCOVICH, *Philosophiae recentioris*, v. 2, p. 375). Pode-se notar a grande regularidade do efeito observado, indicando um nítido e gradual aumento do comprimento do pêndulo de segundos em direção ao Pólo Norte.

TABELA 4

No.	OBSERVADOR	LOCAL	LATITUDE	COMPRIMENTO DO PÊNULO (LINHAS)
26	Bouguer et al.	Peru	0°	439,21
27	Bouguer et al.	Puerto Bello	9° 34'	439,30
28	Bouguer et al.	Petit Goave	18° 27'	439,47
29	Bouguer et al.	Paris	48° 50'	440,67
30	Maupertuis et al.	Londres	51° 31'	440,75
31	Maupertuis et al.	Pello	66° 48'	441,27

Do ponto de vista qualitativo, as medidas confirmaram tanto a teoria de Huygens quanto a de Newton. No entanto, sob o ponto de vista quantitativo, é fácil perceber que esses dados estão dentro da faixa admitida pela teoria de Newton e que não concordam com a teoria de Huygens (Gráfico 3). Pode-se dizer que, nesta época (1740) essas experiências eram claramente favoráveis a Newton, indicando também (no contexto dessa teoria) a existência de um aumento de densidade da Terra em direção ao centro.

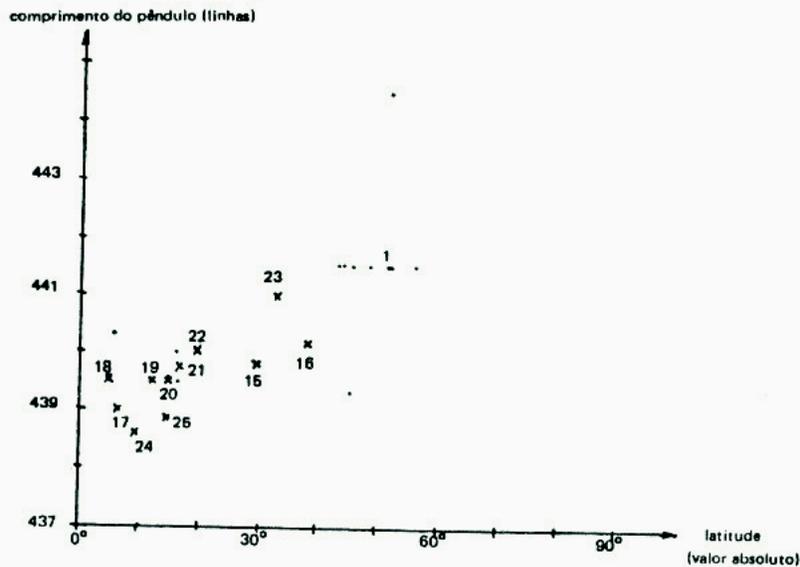


Gráfico 2: Comprimento do pêndulo de segundos, em função da latitude da observação, no período de 1694 a 1704. Esses dados eram conhecidos por Newton quando da elaboração da segunda e terceira edições dos *Principia* (1713 e 1726). Os números indicam as observações correspondentes da Tabela 3. Os pontos indicam as observações anteriores (da Figura 1).

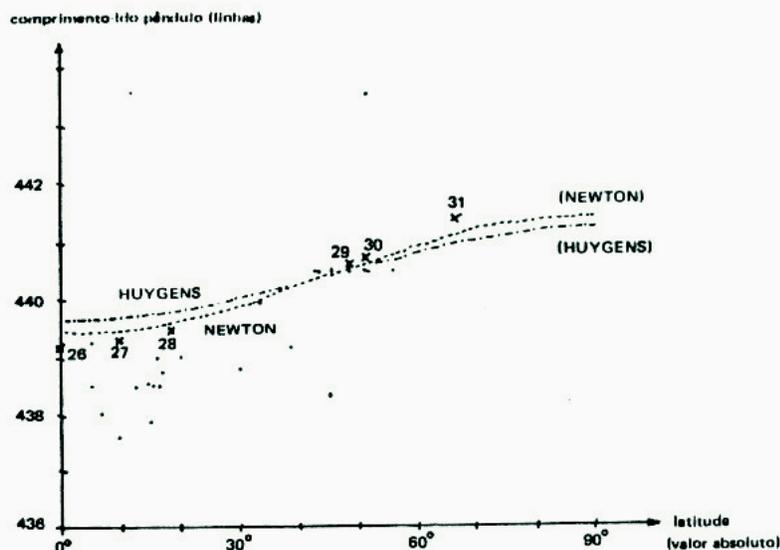


Gráfico 3: Comprimento do pêndulo de segundos, em função da latitude da observação, pelas expedições enviadas pelo Rei da França (1735-1745). Os números indicam as observações correspondentes da tabela 4. Os pontos indicam as observações anteriores (Gráficos 1 e 2). A linha tracejada indica a previsão teórica de Newton, anterior a essas medidas. A linha com traços e pontos corresponde à teoria de Huygens, que prevê uma menor variação da gravidade com a latitude. A variação observada é um pouco maior do que a prevista por Newton e muito maior do que a prevista por Huygens.

A-2 Estudos geodésicos

O segundo método historicamente importante para se determinar o efeito da rotação da Terra em sua forma foi o estudo da curvatura de sua superfície, a diferentes latitudes. Se a Terra fosse esférica, percorrendo-se iguais distâncias ao longo de um meridiano sempre seriam observadas iguais variações de latitude, medidas a partir de observações astronômicas. O achatamento da Terra se traduz, nas medidas, por uma variação de latitude mais lenta, para iguais percursos, nas partes achatadas.

Anteriormente à publicação dos *Principia* de Newton, não haviam sido realizadas medidas para verificar a forma da Terra. Admitia-se que ela era esférica. É verdade que haviam, até então, sido realizadas medidas do raio de curvatura terrestre em diferentes latitudes; mas essas medidas, obtidas por diferentes observadores, com diferentes padrões de medida, métodos e instrumentos diferentes, não podiam ser comparadas para se tirar nenhuma conclusão. Costuma-se às vezes citar que, quando Newton publicou os *Principia*, já conhecia medidas que mostraram o achatamento da Terra: as de Norwood, na Inglaterra; e as de Picard, na França. Essas medidas, citadas por Newton na proposição 19 do terceiro livro dos *Principia*, eram:

a) Richard Norwood, em 1635, medira a distância entre Londres e York, assim como a diferença entre suas latitudes (ângulo formado pelas verticais locais), obtendo para esse trecho do meridiano, o valor de 367196 pés ingleses por grau. Isso equivale, diz Newton, a 57.300 toesas (ou, segundo outros autores, 57.374 ou 57.442 toesas – ver TODHUNTER, *History*, p.r 39).

b) Picard, em 1669, mediu a distância de Malvoisine a Amiens, assim como a diferença de latitude, obtendo a razão de 57.060 toesas por grau (uma toesa = 6 pés franceses).

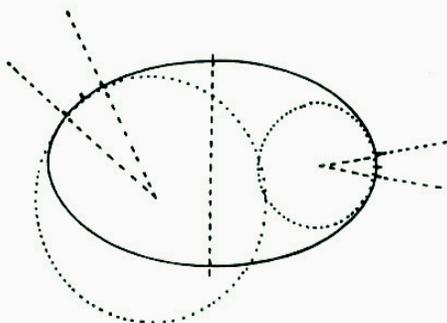


Figura 3: Se a Terra é achatada (elipsoidal), cada meridiano é uma elipse. Em cada ponto dessa elipse, o raio de curvatura é igual ao da circunferência osculadora, naquele ponto. A mesma variação angular corresponde a diferentes arcos da elipse. Nos pólos, o raio de curvatura é máximo, assim como o valor do arco correspondente a um grau.

Comparando-se esses resultados, nota-se que o comprimento de um grau é maior na Inglaterra (mais próxima ao pólo) do que na França, o que indicaria, já nessa época, uma confirmação do achatamento da Terra. No entanto, não era possível tirar esta conclusão. Outras medidas da época apontavam para a conclusão oposta e, pouco depois da publicação dos *Principia* e do *Discurso* de Huygens, foram cuidadosamente coletadas por Johan Caspar Eisenschmidt que em 1691 publicou um livro denominado *Diatribes de figura telluris elliptico-sphaeroide*. Leibniz publicou um resumo deste livro nos *Acta eruditorum*, neste mesmo ano, e escreveu a Huygens uma carta (em 19 de fevereiro de 1692), onde comenta:

Não sei se vistes um pequeno livro de um (autor), chamado Eisenschmid (*sic*), de Strasbaug (Strasbourg), *De figura terrae*, onde ele pretende provar, comparando entre si as diferentes observações daqueles que tentaram medir a Terra ou o tamanho de um grau, que elas variam conforme se aproximaram mais do pólo e, conseqüentemente, a Terra é elíptica de fato, mas ela é mais elevada nos pólos, enquanto que segundo vós e o Sr. Newton ela deveria ser mais elevada no Equador. Isso merece ser considerado. (Leibniz, carta 2740 – HUYGENS, *Oeuvres*, v.10, p. 261.)

Huygens responde a Leibniz, em carta datada de 15 de março de 1692:

Vi o resumo do tratado do Sr. Eysenschmid nas *Acta*. Parece-me que ele edifica sobre um fundamento muito pouco seguro, ou seja, as diferentes medidas que foram feitas do globo terrestre. Pois sabe-se como diferem entre si os observadores que trabalharam sob o mesmo clima. Por outro lado, observa-se que Júpiter é elíptico no sentido de Sr. Newton e do meu, e a razão o requer, enquanto nada existe a favor da figura elíptica do Sr. Eysenschmid. (HUYGENS, *Oeuvres*, v.10, p. 269 – carta 2744.)

Até o final do século XVII, não houve tentativa de verificar sistematicamente a forma da Terra. Mas, a partir de 1701, começam os célebres trabalhos dos Cassini. Deste ano a 1718, Jean Dominique Cassini (pai) mede o meridiano de Paris, primeiramente para o Sul, até os Pirineus; depois, para o Norte, até as proximidades de Dunquerque. No trecho ao Sul, obtém a medida de 57.097 toesas por grau; ao Norte de Paris, obtém 56.960 toesas por grau. Conclusão: a Terra não é achatada mas sim *alongada* no eixo polar! A partir dessa medidas, Cassini calcula que a excentricidade da Terra é de 1/11.

As medidas de Cassini contrariavam as teorias de Huygens e de Newton, ao mesmo tempo. Apesar do estranho resultado, respeitava-se o trabalho de Cassini, que era um famoso astrônomo e cujo trabalho parecia ser muito cuidadoso.

Pode-se imaginar que os resultados de Cassini deveriam ser desprezados, já que, nessa época parecia ter sido comprovado o efeito dos pêndulos. Ora, se a aceleração gravitacional era menor no Equador, isso não mostrava que o eixo equatorial era maior do que o polar?

Não necessariamente. Em 1720, um certo Mairan apresenta à Academia de Paris uma memória onde defende o alongamento da Terra e tenta compatibilizá-lo com o fenômeno dos pêndulos. Para isso, ele propõe uma alteração da lei da gravitação. Na superfície de um corpo esférico, a aceleração gravitacional é proporcional a $1/R^2$. Mas, sobre um elipsóide, não existe um raio. Em cada ponto da superfície, existem dois raios de curvatura principal. Mairan sugere que, neste caso, a aceleração deve ser proporcional a $1/RR'$ - o que, no caso esférico, se reduz a $1/R^2$. Utilizando esta lei, Mairan mostra que, se a Terra for oblonga, a aceleração gravitacional é máxima nos pólos e mínima no Equador - concordando assim com as observações de pêndulo.

O trabalho de Dominique Cassini foi continuado, depois, por seu filho, Jacques-Dominique Cassini, que resolve utilizar novo método: medir o raio de curvatura do paralelo de Paris e compará-lo ao raio de curvatura do meridiano. Em 1733, publica o primeiro resultado: para Oeste de Paris, um grau de longitude do paralelo correspondente a 36.670 toesas - e deveria valer 37.707 toesas, se a Terra fosse esférica. Ou seja: a largura da Terra é menor do que a esperada - a Terra se assemelha a um charuto! No ano seguinte, as medidas realizadas a Leste de Paris dão o resultado de 37.066 toesas por grau - também inferiores ao valor previsto (se a Terra fosse esférica) de 37.745 toesas por grau.

TABELA 5

LATITUDE	COMPRIMENTO DO GRAU (TOESAS)		OBSERVADOR
	TEÓRICO	OBSERVAÇÃO	
0°	56.700	56.751	Bouguer
10°	56.723		
20°	56.788		
30°	56.886		
33° 18'		57.037	La Caille
40°	57.009		Maupertuis
49° 23'		57.138	
50°	57.138		
60°	57.260		
66° 19'		57.438	Clairaut, Maupertuis
70°	57.359		
80°	57.424		
90°	57.446		

Apesar do prestígio dos Cassini, algo parecia errado. Em 1733, La Condamine propõe à Academia de Ciências de Paris que sejam feitas medidas na América do Sul, na região próxima ao Equador – e a proposta é aceita. Com o apoio do Rei, parte em 1735 para o Peru uma expedição científica, levando, Bouguer e Condamine. No ano seguinte, parte para a região ártica outro grupo, com Maupertuis, Clairaut e Camus. O segundo grupo retorna antes do que o primeiro e apresenta seus resultados: na Lapônia, um grau do meridiano corresponde a 57.438 toesas (ou 57.497, se não for feita a correção devida à aberração). Esse valor era claramente superior às medidas obtidas na França. A Terra é, portanto, achatada. Para confirmar seu resultado, Maupertuis mede novamente o meridiano de Paris a Amiens e obtém 57.183 toesas por grau.

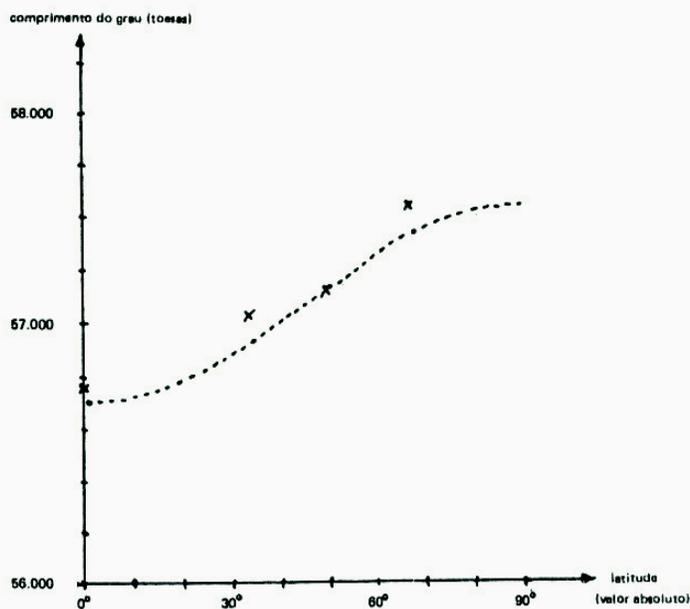


Gráfico 4: Comprimento medido ao longo de um meridiano, correspondente a um grau de variação de latitude, em função da latitude. A linha tracejada indica a previsão teórica, baseada no modelo de Newton para a Terra homogênea. Os dados experimentais são os da tabela 5. A curva foi ajustada para coincidir com a medida de Maupertuis para Paris.

Aos resultados de Maupertuis logo se adicionam outros: o grupo enviado ao Peru obtivera, a uma latitude de zero a três graus, o valor de 56.750 toesas por grau, confirmando os resultados da Lapônia. Por fim, o próprio neto do primeiro Cassini, chamado Cassini de Thury, refaz as medidas francesas e confirma o achatamento. Além disso, o abade la Caille obtém, no Cabo da Boa Esperança, 57.037 toesas por grau. Utilizando esses dados Maupertuis obtém, para o achatamento da Terra, o valor de $1/230$ – próximo à previsão de Newton e muito diferente da previsão de Huygens (ver MAUPERTUIS, *Oeuvres*, v. 4, p. 335). Atualmente, o valor aceito para o achatamento terrestre é de $1/298$.

Esse trabalho teve grande repercussão, estabelecendo de forma bem fundamentada o achatamento da Terra e derrubando as medidas de Cassini. O crédito do trabalho conjunto foi atribuído principalmente a Maupertuis, grande divulgador e defensor de Newton na França e que foi intitulado na época, por Voltaire: “aplatisseur du monde et de Cassini” (*apud CAJORI, Mathematical principles*, p. 664). É curioso que posteriormente, tendo se tornado adversário de Maupertuis, Voltaire ridicularizou seu trabalho, falando sobre a inutilidade de todo o seu esforço de viajar e fazer medidas no Círculo Ártico: “Vous avez confirmé dans des lieux pleins d’ennui/ Ce que Newton connut sans sortir de chez lui.”

AGRADECIMENTOS

Sou grato ao apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que possibilitou a realização desta pesquisa.

LISTA BIBLIOGRÁFICA

- 1 BALL, W.W. Rouse. *An essay on Newton's Principia*. New York, Johnson Reprint, 1972.
- 2 BOSCOVICH, Rogerius Josephus. *Philosophiae retentioris a Benedicto Stay*. 2 v. Roma, Nicolai et Marci Palearini, 1755.
- 3 CAJORI, Florian (ed.). *Sir Isaac Newton's mathematical principles of natural philosophy and his system of the world*. Berkeley, University of California, 1934.
- 4 CONDAMINE, Charles Marie de la. *Relation abrégée d'un voyage fait dans l'intérieur de l'Amérique Méridionale, depuis la côte de la Mer du Sud, jusqu'aux côtes du Brésil et de la Guyane, en descendant la rivière des Amazones*. Paris, Veuve Pissat, 1745.
- 5 —. *Mesure des trois premiers degrés du méridien dans l'hémisphere austral, tirée des observations de Mrs. de l'Académie royale des sciences, envoyés par le Roi sous l'équateur*. Paris, Imprimerie Royale, 1751.
- 6 —. *Journal du voyage fait par ordre du Roi, à l'équateur*. Paris, Imprimerie Royale, 1751.
- 7 DESCARTES, René. *Le Monde*. In: *Oeuvres de Descartes*, v. 11.

- 8 —. *Principiarum philosophiae*. In: *Oeuvres de Descartes*, v. 8.1.
- 9 —. *Oeuvres de Descartes*. Ed. C. Adam e P. Tannery. Paris, J. Vrin, 1967-71.
- 10 DUGAS, René. *La Mécanique au XVII siècle*. Paris, Dumod, 1954.
- 11 HALLEY, E. A discourse concerning gravity, and its properties, wherein the descent of heavy bodies, and the motion of projects is briefly, but fully handled: together with the solution of a problem of great use in gunnery. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 16 (179): 3-21, 1686.
- 12 HORE, P. de la (ed.). *Divers ouvrages de mathématique et de physique*. Paris, Imprimerie Royale, 1693.
- 13 HUYGENS, Christiaan. *Discours de la cause de la pesanteur*. Leide, Pierre van der Aa, 1690.
- 14 —. *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*. 21 v. La Haye, Martinus Nijhoff, 1888-1950.
- 15 —. *Tratado sobre a luz*. Trad. Roberto de A. Martins. *Cadernos de História e Filosofia de Ciência*, supl. 4, 1986.
- 16 KOYRÉ, Alexandre. *Newtonian studies*. Chicago, University of Chicago Press, 1968.
- 17 LEIBNIZ, G.W. *Mathematische Schriften*. Ed. C.I. Gerhardt. 7 v. Hildesheim, Georg Olms, 1971.
- 18 MAUPERTUIS, Pierre Louis Moreau de. *Oeuvres de M. de Maupertuis* 4 v. Lyon, Jean-Marie Bruyset, 1756.
- 19 NEWTON, Isaac. *Philosophiae naturalis principia mathematica*. 3rd. ed., with variant readings. Ed. A. Koyré & I.B. Cohen. 2 v. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1972.
- 20 PERRIER, Georges. *Petite histoire de la géodésie*. Paris, P.U.F. 1936.
- 21 ROHAULT, Jacques. *A system of natural philosophy*. Trad. e ed. John e Samuel Clarke. 2 v. New York, Johnson Reprints, 1969.
- 22 THURY, Cassini de. *La meridienne de l'Observatoire Royal de Paris, vérifiée dans toute l'étendue du Royaume par de nouvelles observations*. Paris, Guerin, 1744.
- 23 TODHUNTER, I. *A history of the mathematical theories of attraction and the figure of the Earth - from the time of Newton to that of Laplace*. New York, Dover, 1962.
- 24 WOLF, C. *Mémoires sur le pendule*, v. 4 In: Société Française de Physique (ed.) *Collection de mémoires relatifs a la Physique*. Paris Gauthier-Villars, 1889.

Abstract

*This paper compares the approaches of Newton and Huygens to gravity. Newton accepted, as an empirical generalization, the existence of universal gravitation and coherently applied this law to its utmost consequences. Huygens refused to accept a phenomenon without a suitable mechanical explanatory model and could not accept universal gravitation. In his book *Discours de la cause de la pesanteur* he attempted to explain gravity by way of Cartesian vortices. It is shown that, at that time, the opposition between the two approaches was of a methodological and not empirical character. Evidences related to the influence of latitude upon pendulum periods and to the flattening of the Earth are also presented, that afterwards allowed to choose between the two theories.*

(Recebido em 10/08/88.)