

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

ELZIMAR ELER LUZ

EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO MOVIMENTO ROTACIONAL

VITÓRIA

2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ELZIMAR ELER LUZ

EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO MOVIMENTO ROTACIONAL

Dissertação realizada sob a orientação do Prof, Dr. José Plínio Baptista, apresentada ao programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Físicas.

VITÓRIA

2005

RESUMO

Desde o período pré-socrático foram elaboradas diversas teorias cosmogônicas que descreveram a ação dos turbilhões como o principal mecanismo para a origem, o desenvolvimento e a estruturação dos cosmos. A utilização dos efeitos produzidos pelo movimento rotacional também é reconhecido em diversas teorias elaboradas ao longo da evolução do pensamento científico. Mas embora o interesse pelos movimentos rotacionais esteja no início da história filosófica, sua evolução se torna lenta quando comparada à evolução dos conceitos do movimento de translação. Um fato que pode ser observado é que os efeitos da rotação foram, durante séculos, tratados como de “propriedades diferentes da translação”, isso os tornaram mais complexos e difíceis de serem compreendidos. Neste estudo percebemos que os obstáculos associados aos estudos do movimento rotacional estão ligados às dificuldades encontradas para a descrição do formalismo matemático presente nos movimentos curvos. Embora, no século XIII, se reconheça os esforços de Gerard de Bruxelas para a medição da velocidade de rotação, as dificuldades decorrentes nesse estudo apenas serão superadas a partir dos expressivos trabalhos de Isaac Newton, que reunido a outros importantes estudiosos, apresentou, no século XVII, toda uma base matemática que revolucionou o estudo dos conceitos relacionados ao movimento em especial ao movimento rotacional. Outro foco importante da dissertação é a tentativa de se compreender o mecanismo descrito pelos estudiosos que utilizaram os efeitos do movimento de rotação na descrição de teorias cosmogônicas, quando ainda lhes faltavam o conhecimento do formalismo

matemático existente na realização de um movimento rotacional. Nesta parte do trabalho discutimos as semelhanças existentes entre a ação dos turbilhões descritos nessas teorias e os efeitos produzidos pelos turbilhões atmosféricos, e outros vórtices que podem ser observados na natureza.

Evolução Histórica do Movimento Rotacional

Índice

Índice

Introdução

Capítulo I. O Movimento na Ciência Grega

I.1 Características Gerais da Cosmogonia Grega

I.2 A importância do Movimento de Rotação nas Teorias Cosmogônicas

Capítulo II. O Movimento Geral

II.1 Aristóteles

II.2 A evolução dos Conceitos Cinemáticos

II.2.1 A velocidade de Translação

II.2.2 A velocidade de Rotação

II.2.3 O Cálculo da velocidade de Rotação na Idade Média

Capítulo III. O Estudo da Dinâmica

III.1A Dinâmica na Idade Média

III.2 A Teoria do Ímpetus

III.3 O Impetus e o Movimento Violento de Rotação

III.4 Nicole d'Oresme

Capítulo IV. A Construção da Mecânica Clássica

IV.1 Uma Breve História do Desenvolvimento do Conceito de Curva e Tangente.

IV.2 As contribuições Científicas ao Estudo do Movimento da Renascença ao Final da Idade Moderna

Capítulo V. Estudo do Embasamento Empírico dos Turbilhões Cósmicos

V.1 Breve Resumo do Processo Cosmogônico das Teorias dos Pré-Socráticos

V.2 Embasamento Empírico das Teorias dos Pré-Socráticos

V.3 Os Turbilhões de Descartes e de Huyghens

Capítulo VI. Conclusão

Referencias

Introdução

O movimento, enquanto estado da matéria, tem sido discutido por pensadores ao longo de toda história filosófica-científica. Os modelos cosmogônicos dos primeiros filósofos pré-socráticos convergem ao relatarem o movimento, em particular o movimento de rotação, como um estado essencial para a criação do universo.

É importante destacar que de acordo com essas teorias o movimento rotacional é o mecanismo responsável pela condensação, tal como pela a separação de toda a matéria que dará início a formação do cosmos.

Aristóteles (384-322 a.C.) deu início a uma cadeia de profundas discussões em torno do movimento de translação que por vários séculos delinearam os traços modernos deste conceito. Neste cenário histórico, o estudo do movimento rotacional só foi efetivamente desenvolvido pelos pesquisadores escolásticos do final da Idade Média, onde se destaca Gerard de Brussels (~1250).

A história do pensamento científico (físico) da Idade Média e da Renascença pode ser dividida em três períodos, ou três tipos de pensamentos. A física aristotélica, inicialmente; a física do ímpetus, inaugurada pelos gregos, mas elaborada no decurso do século XIV, em seguida a física matemática, experimental, arquimediana ou galilaica.

Até o início do século XVI, era comum aos filósofos basearem suas teorias em modelos intuitivos, das quais suas idéias eram formuladas a partir de observações do senso comum. A utilização deste método de construção de idéias foi um obstáculo ao nascimento da física clássica. Nestes modelos não havia a confrontação das idéias elaboradas com uma observação mais precisa de um fenômeno.

Neste trabalho buscamos discutir o desenvolvimento dos conceitos relacionados ao movimento de rotação, em particular, as concepções iniciais do movimento rotacional desde o período pré-socrático, onde floresceram as primitivas teorias cosmogônicas, até o final da Idade Média, onde encontramos os primeiros traços das formulações matemáticas que descrevem o movimento e que predominam até os dias de hoje.

Também é feito um estudo da função do turbilhão descrito nas principais teorias cosmogônicas apresentados ao longo da história tendo como objetivo examinarmos o embasamento empírico dessas teorias.

De forma objetiva, no capítulo I estudaremos o movimento na ciência grega e destacaremos a importância da rotação nas cosmogonias.

No capítulo II apresentamos um estudo sobre o movimento em geral partindo dos conceitos básicos de Aristóteles sobre translação e rotação e as medidas das velocidades.

No capítulo III estudaremos a teoria do Ímpetus onde faremos uma cuidadosa análise sobre o Ímpetus de Translação e o Ímpetus de rotação.

No capítulo IV apresentamos uma breve descrição da evolução do movimento na Mecânica Clássica.

No capítulo V faremos uma análise do embasamento empírico dos turbilhões propostos nas teorias cosmogônicas tanto dos filósofos pré-socráticos quanto dos turbilhões de Descartes e C. Huyghens.

Finalmente no capítulo VII apresentaremos as conclusões obtidas do trabalho.

Capítulo I

O Movimento na Ciência Grega.

Os gregos foram os primeiros a procurarem respostas que satisfizessem suas indagações sobre o universo. Mas estas necessidades de uma resposta não foram sentidas todas de uma vez. O comportamento da natureza não foi seriamente questionado até a antiga concepção de natureza se extinguir. Os primeiros filósofos se ocuparam principalmente de especulações a respeito do mundo ao seu redor, tentando ter uma visão racional do universo.

As primeiras idéias envolvendo a matéria dinâmica primordial preenchendo todo o cosmos, denominada de *princípio*, partiram dos filósofos jônicos entre os séculos VII e IV a.C., os quais posteriormente, Aristóteles (384-322 a.C.) passou a denominá-los de Físicos. Com exceção do filósofo eleata Parmênides (540-450 a.C.), as concepções cosmogônicas desses filósofos pré-socráticos apresentam semelhanças gerais, principalmente quanto ao papel desempenhado pelo *movimento*. Para estes físicos o movimento é apresentado como um estado permanente da matéria e fundamentalmente importante para o entendimento dos processos de formação que se desenvolvem na natureza.

Para uma compreensão das similaridades entre as variadas e complexas teorias apresentadas por estes físicos, é apresentado abaixo as idéias predominantes relacionadas ao *movimento* e presentes nos principais processos cosmogônicos.

I.1 Características Gerais da Cosmogonia Grega.

Thales de Mileto (624-547 a.C.) foi um dos primeiros filósofos a propor que todas as coisas se originaram de uma única matéria primordial. Essa substância, para ele, é a Água. Devido ao movimento, a água sofre várias alterações das quais derivam toda a matéria, em seus diferentes estados: sólido, líquido e gasoso,

mediante processos de condensação e rarefação.

Pouco posterior a Thales, seu discípulo, Anaximandro de Mileto (611-546 a.C.) foi o primeiro pensador a usar o conceito de *princípio* (em grego, *arché*), ou seja, uma *matéria primordial* da qual todas as coisas eram geradas e para qual todas as coisas retornariam no fim. Anaximandro também foi o primeiro a supor a existência de um movimento eterno como causa eficiente da formação do mundo. Para ele, o movimento eterno do *princípio* produz uma infinidade de mundos em estados de permanente nascimento, maturidade e dissolução.

No pensamento de Anaximandro, assim como no de Thales, as coisas eram formadas a partir de um elemento fundamental, o *princípio*, que ele denominou de *Ápeiron*. O *Ápeiron* era uma substância infinita e indefinida que preenche todos os espaços e que possui todos os contrários necessários à formação do mundo, como o Quente e o Frio, o Úmido e o Seco, etc. Anaximandro imaginou que pela ação do movimento contínuo do *Ápeiron*, separaram-se as origens do quente e do frio. A partir dessa separação outros contrários se dissociariam dando início a estruturação do cosmos.

O *princípio*, segundo Anaxímenes (585-525 a.C.), outro filósofo de Mileto, é uma substância ilimitada (*ápeiron*), porém determinada. Ele ensinava que, esta substância é o Ar, (pneuma), que dotada de um movimento perpétuo de revolução produz compressões e rarefações que geravam e arquitetavam o cosmos. O movimento perpétuo também é o responsável pela dissolução do mundo, num processo que se renova indefinidamente. Devido a infinitude do *ápeiron*, muitos mundos são assim gerados, crescidos, amadurecidos e finalmente dissolvidos no retorno ao Ar primitivo.

Na cosmogonia de Anaxágoras de Clazômena (500-428 a.C.) e de Demócrito de Abdera (460-370 a.C.) é descrito que é do movimento em vórtice, que se processa em todos os pontos do cosmos, que resulta a formação dos planetas, estrelas e de todo o universo infinito. Durante o processo de formação o movimento turbilhonar separa as partículas pesadas das leves, agrupam as partículas mais pesadas no centro do vórtice e as mais leves nas bordas, dando início a um processo de condensação. Para Anaxágoras, a substância primordial é formada por *sementes* ou *homeomerias* de vários tamanhos, infinitamente divisíveis, que preenchem todo o

espaço, porém todas de uma mesma composição. Anaxágoras imaginou a existência de uma entidade, o espírito (*Nous*), pensamento ou razão, responsável pelo movimento da substância. O espírito inicia um movimento local das sementes, criando um vórtice que vai se ampliando em movimentos cada vez mais abrangentes.

Demócrito, por sua vez, imaginou uma substância primordial constituída por uma infinidade de elementos, os átomos, cada um uno, finito, contínuo e indivisível. Para ele, os átomos são eternamente animados de movimentos caóticos.

Neste movimento os átomos sofrem colisões entre si que provocam o agrupamento de dois ou mais átomos, gerando um composto maior, e desta forma mais exposto a novas colisões. As colisões entre o conjunto de átomos assim formado e átomos mais volumosos provocam no pequeno núcleo, um movimento de rotação que se intensifica tornando-se num movimento turbilhonar¹.

Um aspecto importante na cosmogonia de Demócrito é o fato do ponto de partida de sua teoria ser a existência do átomo se movimentando no vácuo. Contrariamente ao que pensava Parmênides que “o ser é, e o não ser não é” Demócrito afirmava que como o movimento existe o ser é (o átomo), e o não ser (o vácuo) *também* é. A aceitação do conceito de vazio é uma condição necessária à existência do movimento dos átomos.

I.2 A Importância do Movimento de Rotação nas Teorias Cosmogônicas.

Um aspecto relevante que deve ser observado no texto acima, é a função fundamental desempenhada pelo *movimento*, em particular o *movimento de rotação*, como responsável pela geração e organização do universo. Embora observemos a variedade e a complexidade de cada teoria, as concepções destes filósofos se assemelham quanto ao papel do *movimento*.

Este atributo é confirmado por quase todos os autores de teorias cosmogônicas, desde Anaximandro até Anaxágoras, passando por Demócrito e, modernamente, também empregado por René Descartes (1596-1650) e C. Huyghens (1629-1695).

¹ Este processo não é casual, mas como diz Demócrito, ocorre por necessidade. Isto é, o mundo não nasceu por acaso.

O movimento é uma condição essencial em todas as teorias cosmogônicas, com exceção de Parmênides. O universo de Heráclito é de uma natureza incessantemente transformada. O permanente movimento dos elementos produzem as transformações geradoras do mundo² Entretanto o turbilhão não tem destaque em sua teoria.

Na teoria de Empédocles é a partir do movimento de rotação da sua matéria primordial formada pelos quatro elementos terra, água, ar e fogo que é gerado o mundo.

Mesmo não sendo definida, para os filósofos do período pré-socrático é de se supor o uso intuitivo da ação de uma *força de inércia* no movimento rotacional. Isto pode ser verificado pelas referências dadas em suas teorias quanto a formações de redemoinhos e turbilhões que, movimentando a substância primordial realizam separações e agrupamentos da matéria.

A ação de um movimento turbilhonar continuado sobre a substância primordial é o responsável não só por gerar matéria, mas também por construir toda a arquitetura cósmica.

² Heráclito é filósofo que pregava que é impossível se banhar duas vezes no mesmo rio.

Capítulo II

O Movimento Geral

O objetivo deste estudo é descrever aspectos relevantes no desenvolvimento histórico do movimento de rotação. Antes de tratarmos o movimento na forma como nos interessa, a fim de que possamos perceber as dificuldades relacionadas à sua evolução, vamos estudar aspectos importantes sobre o desenvolvimento do movimento em geral. Nestes tópicos, abordaremos as teorias elaboradas por Aristóteles e um breve estudo da construção da cinemática e da dinâmica, apesar de que, neste período não havia esta separação dentro da mecânica, sugerida posteriormente pelas reflexões filosóficas de Guilherme de Ockahn³ (1285-1349) sobre o movimento.

II.1 Aristóteles.

É a partir dos estudos Aristotélicos que a causa do movimento de um corpo é estudado de forma precursoramente científica. Aristóteles, o mais destacado discípulo de Platão (427-347 a.C.), em sua obra “Física” rejeita a idéia de *Princípio Único* e adota, assim como Platão, a visão do *Princípio Múltiplo* (e.g. os átomos de Demócrito, os Quatro Elementos de Empédocles). Também resulta de seus inúmeros trabalhos uma detalhada análise sobre a questão da existência do vácuo, onde procura demonstrar que, contrariamente ao que pensavam os atomistas, o vácuo não existe.

Aristóteles parte do que já tinha sido estabelecido por Platão:

“...é impossível uma coisa movida sem o correspondente motor e o movimento só é possível no heterogêneo enquanto o repouso ocorre no homogêneo”.

³ Guilherme de Ockhan, desenvolveu o famoso princípio da Navalha de Ockhan, onde afirma que não se deve aumentar desnecessariamente o número de entidades numa demonstração. Isto implica dizer que o estudo do movimento pode ser realizado sem fazer menção a causa, ou seja, o estudo da cinemática pode ser realizado independente do estudo da dinâmica. (Crombie,1980)

Platão aqui se refere ao movimento de interpenetração dos elementos básicos: terra, ar, água e fogo, no curso da formação das coisas do mundo; o vácuo, tal como é compreendido, é essencialmente homogêneo, impossibilitando, portanto, todo movimento.

Outro importante legado de Aristóteles é que, todas as coisas têm, cada uma, o seu lugar natural e para o qual permanentemente os corpos se dirigem.

Baseando-se nesta idéia Aristóteles classifica os movimentos de deslocamento em:

1. *Movimento natural*, quando o movimento, que anima os corpos simples, tendem a levá-los aos seus lugares naturais. Deste modo, o fogo e o ar movem-se naturalmente para cima, em direção à periferia do mundo. A terra e a água movem-se naturalmente para baixo, em direção ao centro do universo.
2. *Movimento violento ou forçado*, quando um corpo simples é desviado de seu movimento natural ou retirado do seu lugar natural passando a se mover sob a ação contínua de um agente motor externo.

Para Aristóteles, em qualquer circunstância envolvendo o movimento, é fundamental, o conceito de *Motor*, o que o leva à definição do motor da grande esfera celeste, denominada de *Primeiro Móvel*. Neste caso, o motor é associado à providência divina. A alma é o motor dos seres vivos e de forma semelhante, os corpos em movimento violento deverão ser “empurrados” por um agente motor.

No estudo do movimento forçado, Aristóteles faz uso da importante noção de *sistema isolado* destacando os elementos básicos para a observação do fenômeno. Para ele, estes elementos são: o *corpo material*, o *meio* no qual ele se move e o agente motor que promove o movimento. Com esta idéia, Aristóteles começa a destacar o corpo, que está sendo estudado, da *totalidade* do universo que não interfere no estudo, eliminando todos os fatores que poderiam influenciar no movimento e deixando apenas o agente motor e o meio. Com este procedimento, Aristóteles passa a analisar um sistema físico idealizado em função de definições prévias e acompanhado de uma confrontação com a experiência. A experiência, neste caso, resume-se simplesmente ao registro visual dos acontecimentos e não algo que

decorra dos processos sofisticados de observação.

Para Aristóteles a compreensão de movimento pode ser definida como (Física, Livro III):

“A realização do que existe potencialmente, na medida em que exista potencialmente, é movimento”.

Em outras palavras, Aristóteles quer mostrar que o corpo, em certo momento, se encontra numa dada posição no espaço e em um estado que é a realização do que era uma potencialidade momentos antes, e ao mesmo tempo, se constitui na potencialidade do que será num momento posterior. Vemos aqui que, para Aristóteles o movimento não é uma sucessão de repousos e sim, um processo específico da matéria.

No livro IV da Física, Aristóteles também apresenta a seguinte descrição quanto ao movimento de um corpo:

“O motor impulsiona o corpo, superando a resistência do meio e conferindo-lhe uma velocidade de deslocamento”.

Nesta próxima descrição do movimento, Aristóteles questiona a existência do vácuo e faz uma análise de como se dá o movimento forçado. A questão do vácuo é abordada por Aristóteles através da análise da resistência do meio como mostra abaixo (Física, Livro IV):

“Seja um corpo A transportado através de meio B, durante o tempo C e através do meio D, menos denso que B, durante o tempo E. Se B é igual a D em comprimento, o tempo será proporcional à resistência do meio ... e assim quanto menos denso seja o meio, fracamente resistente, mais rápido é o transporte”

Neste raciocínio, Aristóteles conclui que todo corpo se moveria no vácuo com velocidade infinita, pois percorreria distâncias finitas em tempo nulo, o que seria um

absurdo. Portanto, o vácuo, sendo um meio de resistência nula se torna uma impossibilidade, uma vez que o movimento é real e que as velocidades de movimentos reais são finitas.

A afirmativa extraída da descrição acima nos permite compreender a lei da dinâmica aristotélica, claramente enunciada abaixo:

“A velocidade de um móvel que se desloca num meio, é diretamente proporcional à força aplicada ao corpo e inversamente proporcional à resistência do meio”.

É interessante percebermos que de acordo com esta lei Aristóteles deixa claro, mais uma vez, a impossibilidade de uma resistência tender a zero, $R \rightarrow 0$, pois neste caso a velocidade tenderia a infinito e velocidade infinita é impossível.

Esta equação de Aristóteles em linguagem mais moderna só foi representada matematicamente no século XIV a partir dos trabalhos de T. Bradwardine (c.1328).

A sua expressão ficou representada como:

$$V \propto \frac{F}{R}$$

Em relação à análise do movimento forçado, como é o caso de um corpo simples que é lançado num meio, Aristóteles inicialmente, afirma que esse tipo de movimento se processa (Física, Livro IV):

“como consequência da compressão do ar na frente do projétil e do empuxo aplicado à retaguarda do mesmo devido ao refluxo do ar em torno do projétil, movendo-o assim mais rapidamente que o seu movimento natural (para baixo e para o centro do mundo)”.

Este é o processo denominado de *antiperistásis* ou *processo da mútua substituição*.

No entanto, Aristóteles não se satisfaz com esta descrição, pois a antiperistásis

implica que o movimento deveria ser iniciado simultaneamente pelos elementos da série: *motor (ar) → movido (corpo) → movido (ar)*

Pois, para Aristóteles:

“O corpo substitui o ar que ele comprime em seu movimento e que reflui para a retaguarda e (o corpo) toma o lugar da porção de ar que se desloca para o lugar que o corpo ocupava”.

De acordo com a compreensão de Aristóteles, a cessação do movimento ocorreria simultaneamente para os três elementos da série, o que não parece muito claro. Em consequência disso ele propõe uma outra teoria para explicar o processo que se desenvolve na dinâmica do movimento. A nova descrição é:

“O ar, que está em contato permanente com o corpo, recebendo o impulso do agente motor, se põe em movimento e recebe também ao mesmo tempo um poder motor e com isso coloca em movimento o corpo superando a resistência da camada de ar que está na dianteira do corpo”.

Este processo é continuado até que o poder motor da camada de ar em contato com o corpo diminua e não seja mais capaz de vencer a resistência do ar. O movimento então cessa. A idéia da presença constante do motor em contato com o móvel é seguidamente reafirmada por Aristóteles que inicia o Livro VII, da obra 'Física' com a frase:

“Tudo que se move deve ser movido por alguma coisa”.

As leis aristotélicas e suas implicações foram submetidas a severas críticas durante o séc. VI, principalmente pelo neoplatônico John Philoponos (c. 475-565), que, em seus comentários sobre a Física de Aristóteles, apresenta argumentos irretorquíveis contra a teoria da antiperistásis.

Segundo Philoponos, o meio desempenharia somente um papel resistivo. Para

ele, o principal fator para a realização do movimento de um corpo é a ação de uma força impressa⁴ causadora do movimento. Segundo suas idéias, se um corpo se desloca no vácuo devido a ação de uma certa força F , o corpo se deslocará por uma distância S durante um período de tempo T_0 , tal que:

$$\frac{S}{T_0} \propto F$$

Quando o movimento ocorre num meio de densidade R , o tempo total, T_f , será representado pela adição de um tempo T_a ao tempo T_0 , ou seja:

$$T_f = T_0 + T_a \quad \text{Onde } T_a \propto R$$

Isto sugere que a presença de um meio resistivo se reflete linearmente no tempo do percurso.

De acordo com o proposto por Philoponos o vácuo não representa uma impossibilidade para a realização de um movimento. Autores posteriores interpretaram também esta visão dizendo essencialmente que a velocidade é diretamente proporcional a diferença entre a força F e a resistência R , esta proporção pode ser traduzida matematicamente por:

$$V \propto (F - R)$$

Na alta idade média, a rejeição de Philoponos às teorias aristotélicas do movimento, foi sustentada posteriormente por Ibn *Bājjā* (Avempaces, 980-1138) que traduziu e comentou muitas obras dos filósofos gregos.

As proposições de Philoponos representaram um primeiro passo para o abandono das teorias aristotélicas. A questão levantada pela exigência de que o motor esteja sempre e continuamente ligado ao móvel, qualquer que seja o movimento violento, só será definitivamente resolvida séculos mais tarde por Galileu

⁴ Força incorpórea, induzida.

Galilei.

II.2 A Evolução dos Conceitos Cinemáticos.

A cinemática foi desenvolvida na antigüidade por três distintas correntes de atividades científicas. Em primeiro lugar na geometrização da astronomia, em segundo na construção de métodos geométricos para análise dos movimentos (por exemplo, a geração de curvas pelo movimento, como a espiral de Arquimedes (287-212 a.C.) ou a curva de Hípias⁵) e, finalmente no desenvolvimento de tratados de física e mecânica cuja parte teórica tivesse um caráter geométrico.

A grande dificuldade no estudo do movimento que aparece já em Aristóteles, é a inexistência de uma definição analítica do movimento, além da ausência de métodos de medida das velocidades. Isto acontece principalmente porque os gregos não tinham chegado à definição métrica de velocidade, nem à sua representação matemática. A razão principal desta lacuna residiu na impossibilidade dos matemáticos gregos aceitarem a definição da magnitude de uma grandeza como a razão de duas quantidades que, além de serem de naturezas distintas, fossem incomensuráveis como: distância e tempo. Veremos a seguir os principais passos dados na direção da resolução destes problemas.

II.2.1 Velocidade de Translação

A definição de velocidade, mantida desde a antigüidade, é a que afirma que a velocidade representa a rapidez com que um objeto, ou um ponto material em movimento, percorre uma extensão espacial dada. Se o movimento é uniforme o ponto percorre espaços iguais em tempos iguais.

Definida a natureza do movimento, o primeiro problema que surge é o de encontrar a medida da magnitude de uma velocidade. Para Aristóteles, esta

⁵ Hípias de Elis (~400 a.C.), sofista de Atenas na época clássica. A ele se deve a introdução na matemática da primeira curva além do círculo e da reta. Seu trabalho mais conhecido é o traçado da chamada Quadratriz de Hípias que foi usado mais tarde para a quadratura do círculo.

magnitude pode ser obtida pela comparação com outra velocidade, desde que estas velocidades sejam comensuráveis, onde uma delas serviria de unidade de referência.

A velocidade de um ponto em movimento uniforme pode ser representada na forma seguinte:

Se um ponto percorre o espaço S no intervalo de tempo T , e percorre o espaço $2S$ no intervalo de tempo $2T$. Então:

$$\frac{S}{2.S} = \frac{T}{2.T}$$

De uma forma mais geral, se o ponto em movimento percorre o espaço S_1 no tempo T_1 e o espaço S_2 no tempo T_2 , então o movimento uniforme é dado pelas relações:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Em outras palavras, os espaços percorridos são proporcionais aos tempos empregados. Segue-se então que dois movimentos uniformes de velocidades iguais (magnitudes iguais) deverão ser tais que a razão entre os espaços percorridos deve ser igual à razão entre os tempos empregados.

O que implica, neste caso, que para tempos iguais $T_1 = T_2$ os pontos percorrem espaços iguais $S_1 = S_2$. Em notação moderna $V_1 = V_2$. Porém, adotando-se um movimento uniforme como padrão, por exemplo, V_0 , para comparação com outros movimentos, teríamos, por exemplo, que $V = 2V_0$ se, para o mesmo intervalo de tempo, o segundo móvel percorreria o dobro do espaço percorrido pelo primeiro, ou então, o segundo móvel percorreria o mesmo espaço percorrido pelo primeiro na metade do tempo empregado por este. Em representação proporcional temos:

$$\frac{S}{S_0} = 2 \quad \text{e} \quad \frac{T}{T_0} = 1, \quad \text{ou} \quad \frac{S}{S_0} = 1 \quad \text{e} \quad \frac{T}{T_0} = \frac{1}{2}$$

Em notação moderna⁶:

$$\frac{S}{T} = 2 \cdot \frac{S_0}{T_0}$$

Um aspecto observável é que, sem o recurso da definição métrica da velocidade, as medidas de velocidades não eram expressas com muita facilidade, ou pelo menos com muita praticidade.

Séculos depois, no período da alta Idade Média, o problema de medir a velocidade foi debatido no Colégio de Merton, em Oxford na Inglaterra, por um grupo de pesquisadores. Este grupo, retomando as questões já discutidas na antigüidade, considerou as duas formas de se realizar esta medida. São elas:

1º *pela dinâmica, isto é, pela medida da força motora geradora da velocidade.*

Ou,

2º *medir a velocidade pelo espaço percorrido em tempo determinado, sem levar em consideração a força motora. Esta forma ficou conhecida como método cinemático.*

Concluiu-se que medir pelo método cinemático, isto é pelo espaço percorrido, é um método mais seguro, pois este espaço percorrido é um “efeito” do movimento, e que, por outro lado, efetuar a medida pelo método dinâmico, isto é, pela força, seria medi-lo pela “causa”, o que traria muitas dificuldades, segundo a doutrina de Ockhan.

Um fato curioso é que a medida da velocidade, que foi sugerida na Idade Média, tem origem num problema filosófico⁷: O problema de como medir a variação da intensidade de uma qualidade. Do modo como ensinava a filosofia escolástica na época, a toda *qualidade* estavam associados dois fatores: a *intensidade* e a *extensão*.

⁶ Aristóteles, fonte primária de toda a Mecânica (cinemática) jamais, conforme já explicado, atribuiria um número a $\frac{S}{T}$.

⁷ Clagett 1959, pág. (ver)

Por exemplo:

Calor	<i>Intensidade</i> : a temperatura <i>Extensão</i> : a quantidade de calor
Peso	<i>Intensidade</i> : o peso específico <i>Extensão</i> : o peso total

Estes conceitos permitiram, aos estudiosos de Merton, definir a *Intensidade* do movimento e a *Extensão* do movimento. Segundo o critério acima, os fatores de uma qualidade *movimento*, estariam associados da seguinte forma: a *Intensidade* do movimento seria a velocidade e a *Extensão* do movimento seria o espaço percorrido no tempo t .

Estas idéias básicas foram desenvolvidas por Thomas Bradwardine (1290-1349) e seus colegas do colégio de Merton, mas seu significado final só foi esclarecido mais tarde, por Nicole d’Oresme, com a descoberta do método de representar geometricamente os movimentos.

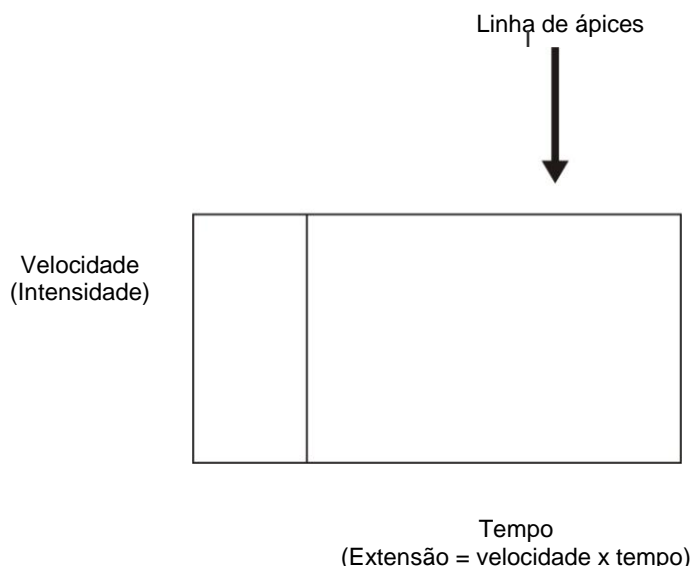


Figura 01: Representação da “qualidade” velocidade.

Na Figura 01, vemos que a altura (velocidade) representa a *Intensidade* do movimento, e na base, é colocada a *Extensão* do movimento representada pelo tempo, pois o espaço percorrido é proporcional ao tempo. A altura AB representa a velocidade instantânea, isto é, a velocidade do corpo num determinado tempo T . No caso do movimento uniformemente variado, (Figura 02), temos a seguinte representação geométrica:

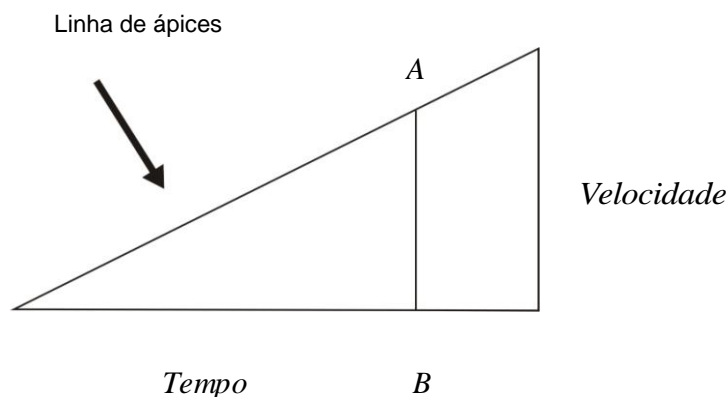


Figura 02: *Representação da qualidade velocidade variável.*

O movimento uniformemente variado foi definido como o movimento tal que a velocidade ganha acréscimos iguais em tempos iguais, o que resulta na representação geométrica do movimento como uma figura triangular, de acordo com a figura esboçada acima. Em ambos os casos, o valor da extensão do movimento é dado pelo valor da área compreendida entre a base e a linha de ápices.

Este método de representação, porém, só foi elaborado e aplicado mais tarde e como consequência dos trabalhos de Nicole d’Oresme, conforme foi dito anteriormente.

O problema que existia nesta fase do estudo do movimento era o de medir a velocidade variável.

A analogia desta situação com o problema resolvido por Gerard de Brussels, que será apresentado mais adiante, foi assinalada desde os trabalhos de Bradwardine, apontando para a possibilidade de se encontrar um modo de

representar o efeito de uma *velocidade variável* através do movimento gerado por uma *velocidade constante*.

Analogamente a idéia desenvolvida no trabalho de Gerard de Brussels, na busca de uma velocidade uniforme de um móvel que percorresse, no mesmo tempo, o mesmo espaço percorrido num movimento com velocidade uniformemente variada, foi escolhida que:

“a *velocidade constante* de um movimento é igual à metade da *velocidade máxima* do movimento variado, (como vemos na Figura 03) que, neste caso, é a própria *velocidade média* no intervalo de tempo dado”.

De acordo com esta idéia, o espaço percorrido no movimento variado será igual ao espaço percorrido, num mesmo intervalo de tempo, por um ponto animado com uma velocidade uniforme e igual à velocidade média do movimento variado.

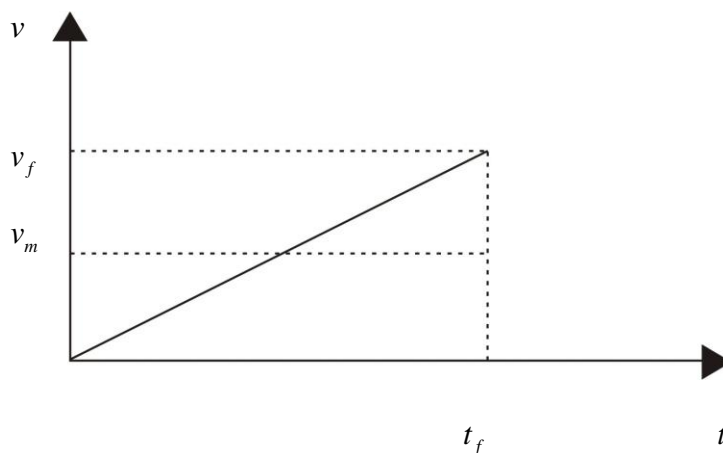


Figura 03: Representação do método para calcular o espaço percorrido no movimento uniforme a partir do movimento variado.

Deste modo, o espaço percorrido é igual a área sob a curva no intervalo de tempo considerado. Ou seja, em notação moderna:

$$S = V_m \cdot t \quad \text{ou} \quad S = \frac{1}{2} \cdot V_f \cdot t$$

Se o movimento fosse uniformemente desacelerado, a velocidade média seria igual à metade da velocidade máxima inicial.

Se o movimento variado iniciasse quando o ponto já estivesse animado de um movimento retilíneo uniforme de velocidade V_0 , a expressão do espaço percorrido total seria:

$$S = V_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot (V_f - V_0) \cdot t$$

Onde t é o tempo de duração total do movimento. Esta expressão é a representação matemática do Teorema Fundamental da Cinemática. Os matemáticos do Colégio de Merton apresentaram demonstrações aritméticas deste teorema, porém a demonstração final e aceita unanimemente foi a demonstração geométrica proposta por Nicole d'Oresme.

II.2.2 A Velocidade de Rotação.

A classificação dos movimentos em *movimentos naturais* e *movimentos forçados* no caso do movimento de rotação se situa da seguinte forma:

O movimento natural de rotação é o movimento uniforme dos corpos celestes em torno da Terra. O movimento forçado é o movimento circular uniforme ou acelerado dos corpos não celestes.

A primeira tentativa para encontrar um método para medida da velocidade da rotação foi feita por Aristóteles. Ele tentou encontrar a magnitude da velocidade da rotação através da comparação da velocidade da rotação com uma velocidade linear,

como foi feito para a velocidade linear, apresentada mais atrás. Para enfatizar a importância do movimento de rotação, Aristóteles afirma que:

Todo movimento de locomoção pode ser composto por movimentos retilíneos e movimentos circulares.

Entretanto, Aristóteles conclui que o movimento retilíneo e o circular eram do mesmo gênero, porém de espécies distintas e, portanto incomensuráveis. Isto impede a medida da velocidade da rotação por comparações com os movimentos retilíneos e uniformes.

Outro fator que contribuiu para a dificuldade de Aristóteles foi o desconhecimento da retificação do círculo, mais tarde realizada por Arquimedes.

A velocidade de rotação foi estudada com detalhes nos tratados de astronomia. Um importante exemplo disto foram os trabalhos realizados pelo astrônomo grego Autolyco (310, a.C.) e apresentados em sua obra *A Esfera Móvel*. Nestes trabalhos se destaca o estudo das velocidades dos pontos da superfície de uma esfera em rotação uniforme. Autolyco estudou as trajetórias dos pontos da superfície da esfera, e fez a seguinte observação:

Quando uma esfera gira em torno de seu próprio eixo em revolução uniforme, os pontos localizados fora dos pólos descrevem arcos iguais em tempos iguais, e em círculos paralelos.

Mas para as velocidades curvilíneas da superfície da esfera Autolyco não encontrou método capaz de fornecer as medidas de suas magnitudes.

Este estudo foi retomado de forma significativa séculos mais tarde por Alberto da Saxônia (~1650). Este físico acrescentará novos elementos à questão do movimento de rotação, discutindo o problema num livro intitulado *Questões Sobre o Livro VIII da Física de Aristóteles*. Nestes comentários ele estabelece a diferença entre as velocidades na rotação: a velocidade curvilínea e a velocidade de *circuito*.

Para Alberto da Saxônia, a velocidade de *círculo* uniforme é definida como a velocidade do movimento de rotação tal que o raio do movimento circular varre ângulos centrais iguais em tempos iguais. Ou seja, estabelece-se neste momento a noção de velocidade angular no movimento de rotação.

Além das noções iniciais desenvolvidas por Autolyco, Alberto da Saxônia introduz definições que esclarecem um pouco mais as grandezas associadas ao movimento de rotação.

II.2.3 O Cálculo da Velocidade de Rotação na Idade Média.

As dificuldades encontradas pelos físicos quanto à construção de um método de medida para a velocidade curvilínea só foram superadas após o conhecimento da retificação do círculo, realizada por Arquimedes e da concepção da velocidade métrica.

Usando a expressão de Arquimedes, onde se pode expressar a área da superfície de um círculo, (Figura 04. A), como a área de um triângulo retângulo, cuja altura seja igual ao raio do círculo e cuja base seja igual ao comprimento retificado da sua circunferência, (Figura 04. B), Gerard de Brussels (~1250), imaginou um meio de encontrar a magnitude da velocidade na rotação por comparação com a velocidade de um certo movimento retilíneo e uniforme.

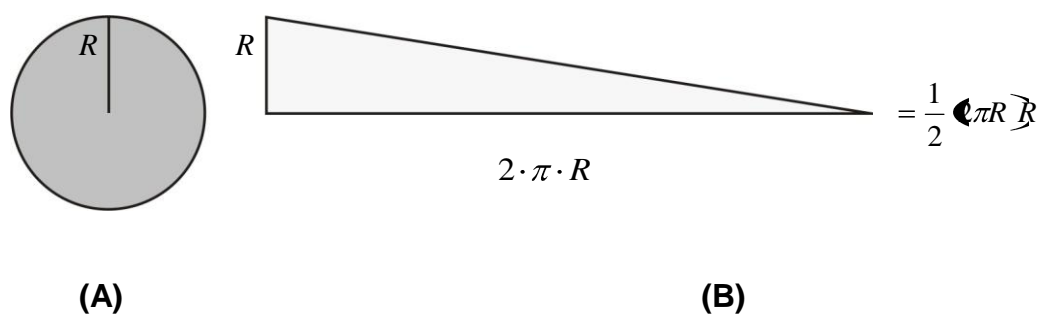


Figura 04: Representação do método de Arquimedes para retificação de um círculo.

O método de cálculo proposto por Gerard de Brussels, conforme foi dito anteriormente, teve como principal e importante consequência, inspirar os pesquisadores do Colégio de Merton, para a descoberta do teorema fundamental da cinemática ou da aceleração.

Considere o movimento de rotação de um ponto em torno do ponto O, com o tempo de uma volta igual a T e com raio igual a \overline{OF} , (Figura 05. A).

Se o segmento \overline{CF} do raio \overline{OF} se movimentar paralelamente a si próprio, num movimento de translação, e com uma velocidade constante V_C igual a velocidade do ponto C do movimento de rotação, no mesmo período T de uma volta, a área A' varrida por \overline{CF} , (Figura 05. B), será igual a área A definida pelo segmento \overline{CF} do raio.

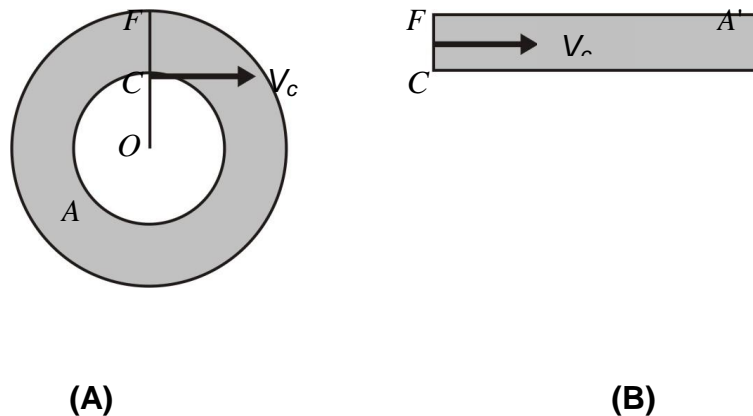


Figura 05: Representação do método de Gerard de Brussels para cálculo da velocidade na rotação.

De acordo com o método de Gerard de Brussels $A = A'$, sendo que:

$$A' = \pi \overline{OF}^2 - \pi \overline{OC}^2$$

Ou seja, a Área A' terá valor igual a área anular descrita no movimento de rotação do segmento \overline{CF} (Clagett, pág. 188).

Na realidade este processo oferece uma equivalência de movimentos com

relação ao resultado final. A escolha da velocidade uniforme do segmento \overline{CF} como a velocidade do ponto médio foi feita para uso exposto da demonstração. Esta escolha irá influenciar mais tarde o Colégio de Merton.

Poderíamos simplificarmente dizer que, o efeito de envolver uma área A por um ponto com velocidade curvilínea durante uma rotação, pode ser obtido pelo movimento de um segmento de reta, cujo comprimento seja igual ao do raio R , e se desloque em um movimento de translação com uma velocidade constante e igual a velocidade do ponto médio do movimento de rotação, num mesmo intervalo de tempo. Deste modo a velocidade curvilínea avaliada é V . Esta idéia está representada na Figura 06.

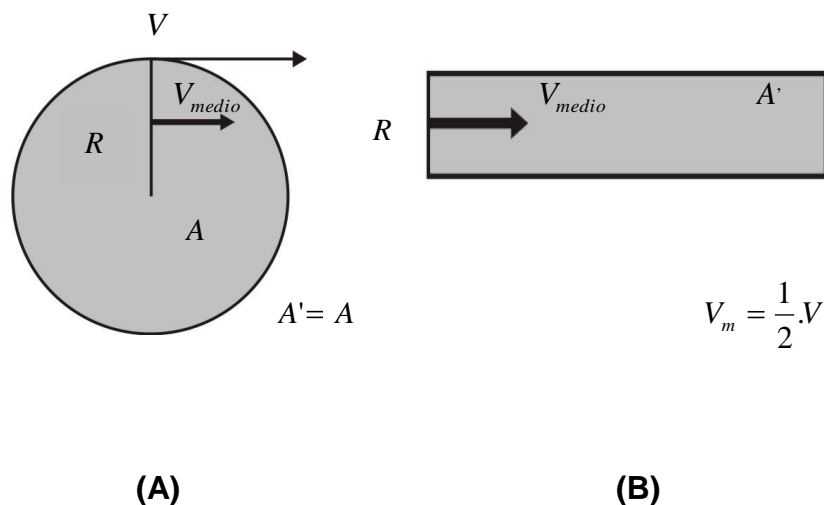


Figura 06: Representação do método de Gerard de Brussels para cálculo da velocidade na rotação.

Então, de acordo com o que se conhecia sobre o movimento de rotação, até esta determinada fase histórica, podemos resumidamente descrever:

- 1- *Todo ponto sobre uma esfera em rotação descreve trajetórias circulares e paralelas.*
- 2- *Se o movimento de rotação for uniforme o ponto percorrerá arcos iguais em períodos de tempos iguais.*

- 3- *Ao movimento do ponto sobre a esfera, também está associado a velocidade de circuito (modernamente conhecida como velocidade angular).*
- 4- *A velocidade curvilínea de um ponto em movimento circular durante um tempo T pode ser avaliada a partir da comparação com o movimento de translação de um segmento de reta de comprimento igual ao raio do círculo. Desse modo, a velocidade do segmento de reta será igual à metade da velocidade curvilínea.*

Capítulo III

O Estudo da Dinâmica.

Anteriormente aos estudos cinemáticos, o movimento dinâmico já era estudado sistematicamente desde os postulados Aristotélicos. Porém somente na segunda metade da Idade Média é que podemos verificar uma clara distinção entre dinâmica e cinemática, expressando uma real distinção entre *causa* do movimento e o *efeito* do movimento. Deste modo, a evolução dos conceitos cinemáticos ocorreram independentemente dos estudos dinâmicos, pois, já era conhecida a possibilidade de se estudar o movimento sem fazer menção às causas, devido ao princípio da Navalha de Ockham.

A influência deste princípio no estudo do movimento contribuiu grandiosamente para que estudiosos como Thomas Bradwardine, Jean Buridan entre outros, desenvolvessem teorias que tratassem essencialmente a *causa* do movimento e suas conseqüências. Os trabalhos de Thomas Bradwardine impulsionaram os tratados mecanicistas do Colégio de Merton, da mesma forma que Jean Buridan impulsionou os estudos no colégio parisiense.

É neste período que estão reunidos os primeiros estudos dedicados às questões sobre lançamento de projéteis e a aceleração dos corpos em queda livre.

Para maior compreensão dos passos que seguem a evolução dos estudos no campo da dinâmica, será feito a seguir, um resumo das principais teorias e suas implicações no desenvolver histórico da mecânica.

III.1 A Dinâmica na Idade Medieval.

Após o declínio de Alexandria, centro gerador de um considerável acervo científico, o veículo da transmissão desta ciência em direção ao ocidente foi admiravelmente executado pelos árabes, que traduziram quase todas as obras dos filósofos e físicos gregos e que, ao mesmo tempo, apresentaram idéias e comentários de parte de inúmeros pensadores, como por exemplo, Ibn Sina (Avicena) que estudou os trabalhos de John Philoponos e Ibn Rushd (Averroes, 1126-1198), que escreveu comentários sobre a física de Aristóteles.

Os trabalhos que mais contribuíram para o delineamento dos traços modernos dos estudos dos movimentos foram realizados em torno dos séculos XIII e XIV. Deste período podemos destacar alguns dos principais autores como Guilherme de Ockham (1285-1349), Thomas Bradwardine, Jean Buridan e seus continuadores Nicole d'Oresme e Alberto da Saxônia.

Além de importantes contribuições específicas ao estudo do movimento, esses pensadores são os precursores do método científico e responsáveis pela revolução conceitual do *porque* para o *como*.

De acordo com a opinião de diversos especialistas, apresentamos abaixo importantes idéias sobre o desenvolvimento do conceito de movimento durante o período medieval, entre as quais destacamos a teoria do ímpetus de Jean Buridan.

III.2 A Teoria do Ímpetus.

A teoria do ímpetus apresenta um conceito de fundamental importância neste período. Esta teoria foi elaborada pelo francês Jean Buridan após sérias críticas à teoria da antiperistáxis ou da mútua substituição de Platão-Aristóteles através da proposição de algumas questões teórico-práticas destinadas a revelar algumas inconsistências desta teoria, como por exemplo:

- Se uma roda d'água persiste no seu movimento de rotação mesmo após ter cessado a ação motora externa, como poderia se processar a antiperistásis neste caso?

- Considera-se dois corpos em forma de dois bastões de madeira, sendo que um deles tem suas extremidades aguçadas em forma de ponta. Se os dois forem lançados pelo mesmo motor e numa direção paralela aos seus eixos, o bastão pontiagudo deveria mover-se nitidamente mais lento que o outro, o que, como observa-se, não sucede. Como explicar a eficácia da antiperistásis neste caso?

- Um barco se movimenta rapidamente, e por um longo tempo, deslizando sobre a água do rio e contra a correnteza mesmo depois que a força motora que o impulsionava tenha cessado sua ação. Um marinheiro postado na popa do barco não sente nenhuma corrente de ar atuando pela retaguarda empurrando o barco. Além do mais, suponha que o barco esteja carregado até o convés, de grãos de cereais ou de farinha, e suponha-se também um marinheiro sentado a ré. Se o ar tivesse um ímpetus de forma a poder empurrar violentamente o barco, o homem a ré notaria o deslocamento de ar vindo de sua retaguarda. A experiência mostra que isto não acontece.

- Outra questão importante é o fato que, o ar, independente de quão rápido ele se mova, é facilmente separável pelos corpos pesados. Assim, como poderia o ar sustentar uma pedra ou um móvel projetado no espaço?

Constatando através desses exemplos o indiscutível fracasso da teoria aristotélica, Jean Buridan elaborou a teoria do ímpetus que substituiu plausivelmente o “motor de Aristóteles”. De acordo com as idéias de Buridan os corpos moviam-se devido a uma capacidade motora interna transmitida pelo projetor ao projétil no instante do lançamento. Isto expressa a idéia de Philoponos sobre a força (incorpórea) impressa no corpo, transmitida pelo projetor. Segundo Buridan:

“O ímpetus é uma qualidade permanente do corpo, embora possa ser destruída por agentes contrários, e é tal que não é auto-desvanecente meramente como resultado da separação do corpo e da força motora principal, mas pode ser superado pela resistência do ar ou pela tendência contrária do corpo”.

Neste trecho Buridan descreve que o ímpetus é o elemento responsável pela manutenção do movimento após o corpo perder contato com o projetor. Um fato observado em sua citação é que a teoria do ímpetus não possuía uma definição muito clara, pois, ao mesmo tempo em que é definido como uma espécie de virtude ou qualidade motora, também é definido como uma força interna ou potência que se imprime ao móvel no ato de seu lançamento, como consequência de sua associação com a força principal. Sendo assim, o ímpetus faz o papel de uma força motriz transmitida ao projétil, que lhe é imanente e possui as mesmas qualidades da força motora.

Em uma citação referente ao *Livro VIII da Física de Aristóteles* (Clagett, 1959), Buridan relata:

“Um motor imprime ao corpo um certo ímpetus ou uma certa força motora (vis motiva) na direção na qual o corpo foi lançado pelo motor, seja para cima ou para baixo, para um lado ou em círculo”.

De acordo com esta citação percebemos que Buridan, não faz distinção do ímpetus mantenedor do movimento de translação com o ímpetus mantenedor do movimento de rotação. Da forma como descrito por Buridan, entende-se que o movimento gerado dependia apenas das qualidades motoras transmitidas pela força principal. O processo de transmissão que gera o movimento (qualquer) pode ser representado esquematicamente pela seguinte cadeia:

Força motora → Ímpetus → Movimento violento

De acordo com as idéias de Buridan existe uma transmissão das qualidades da força principal para o ímpetus, que apesar de não fazer explicitamente afirmativa sobre a existência de ímpetus de rotação distinto do ímpetus de translação, deixa implícita a idéia que dependendo da natureza da força aplicada, confere ao ímpetus o papel de mantenedor de um movimento de translação ou de rotação. Se a força principal produzir um movimento violento de translação, o ímpetus gerado será mantenedor de movimento violento de translação. Neste caso a cadeia de transmissão poderia ser mais detalhada por:

Força motora → Ímpetus de translação → Movimento violento de translação

Se a força ou torque produzir um movimento violento de rotação, o ímpetus gerado será mantenedor de movimento violento de rotação. Desta forma podemos representar:

Força motora ou torque → Ímpetus de rotação → Movimento violento de rotação

Estas diferentes cadeias de transmissão ajudam-nos compreender um pouco mais profundamente as razões subjacentes às conclusões feitas pelos filósofos antigos sobre a manutenção dos movimentos pós-lançamentos sob ação de um ímpetus impresso.

Exemplos desta natureza são fornecidos pelas teorias sustentadas por alguns pensadores a respeito do movimento de um projétil lançado na atmosfera. Aristóteles, por exemplo, em seu tratado *Física*, afirma que um corpo não poderia estar animado simultaneamente de mais de um movimento, ou seja, durante a trajetória de um corpo é impossível a coexistência de um movimento natural e um movimento violento.

Tartaglia⁸ admitia, conforme idéias aristotélicas, que a trajetória realizada por um projétil após ser lançado era constituída de dois segmentos retilíneos (ver Figura 08.A). Já Alberto da Saxônia considerava que o corpo se deslocava inicialmente em linha reta dotado de um movimento violento e que, quando o seu movimento enfraquecia, caía verticalmente em movimento natural até o solo. As duas retas são reunidas por uma curva que representa o intervalo em que o movimento violento é consumido pela inclinação natural (Figura 08 A e B). A Figura 08.C representa a trajetória descrita por Alberto da Saxônia⁹, para um mesmo tipo de lançamento.

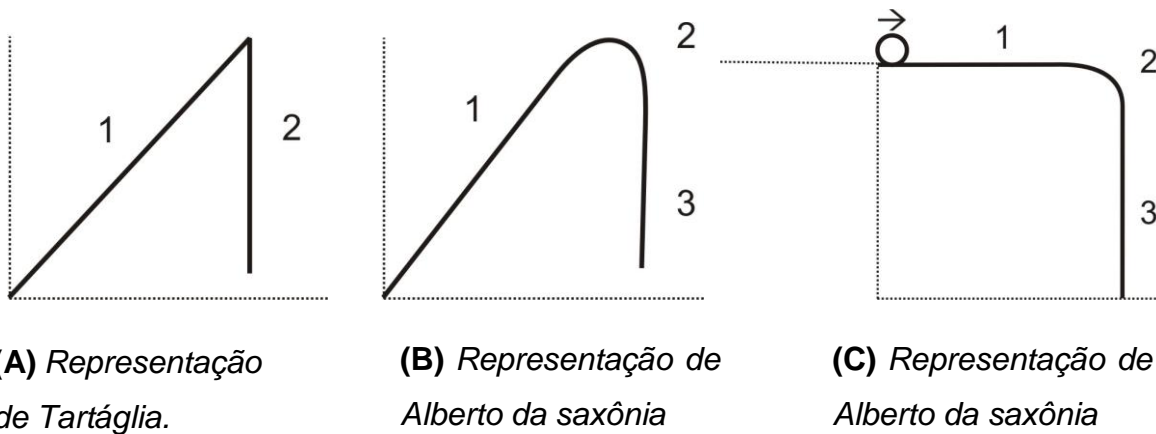


Figura 08

⁸ Niccolo Fontana, conhecido por Tartaglia (1500-1557), físico arquimediano e teórico de balística. Publicou tabelas de elevação para tiros de canhões e escreveu a teoria tradicional em sua obra *Nuova Cienza*.

⁹ É interessante notarmos que as concepções de estudantes sobre o movimento rotacional se assemelham notavelmente às interpretações do movimento violento, formuladas pelos pensadores do final da idade media. Ver Maccloskey (1980, 1983)

III.2 O Ímpetus e o Movimento Violento de Rotação.

Como foi detalhado anteriormente através das cadeias de transmissão, com a teoria do ímpetus pode-se compreender um pouco melhor a explicação dada para a persistência tanto do movimento violento retilíneo quanto do movimento de rotação, após o lançamento do corpo. Todavia com respeito ao movimento de rotação Clagett (Clagett, 1959; pág 525) observa que:

“Um sério defeito desta teoria medieval é que não existia uma distinção clara entre o ímpetus retilíneo e o ímpetus curvilíneo”.

Ao longo da história encontramos pensadores como João Baptista Benedetti¹⁰ e Leonardo da Vinci (1452-1519) que não admitiam a existência do ímpetus curvilíneo (Crombie, 1959). Outros apontavam como deficiência da própria teoria a inexistência do ímpetus de rotação. Estes comentários ocorreram devido ao fato de que as explicações do próprio Buridan davam lugar a dúvidas.

Em uma citação sobre o *Livro VIII de Aristóteles*, mencionada anteriormente¹¹, Buridan deixa entrever uma certa ambigüidade quanto à natureza do ímpetus ao deixar de fazer uma nítida distinção entre ímpetus de rotação e o ímpetus de translação. Em seus exemplos usados para criticar à teoria da antiperistasis, como por exemplo, o movimento da roda d'água que giraria devido ao recebimento de um ímpetus de rotação, é possível perceber a indecisão quanto ao processo de transmissão do ímpetus do *motor* para o *corpo*, a roda d'água. De acordo com a citação de Buridan o ímpetus transmitido possuiria características da força geradora

¹⁰ J. B. Benedetti (1530-1590) partidário resoluto da física parisiense. É antecessor de Galileu, antiaristotélico e copernicista. Desenvolveu estudos sobre teoria do ímpetus.

¹¹ Pagina 23

do movimento, porém esta idéia é contraditória se questionado o fato da força motora ser uma força tangente a um ponto da roda. Poderia uma força retilínea transmitir um ímpetus curvilíneo?

Ainda sob forte influência da teoria do ímpetus, Galileu Galilei (1564-1642) pretendendo estudar o movimento de rotação da Terra analisa a transmissão do ímpetus sobre um corpo que realiza um movimento de rotação e é subitamente lançado. Galileu imaginou que mesmo animado de um intenso movimento de rotação um corpo receberia um ímpetus no ponto de lançamento e na direção tangente à trajetória circular. O movimento posterior seguiria uma trajetória em linha reta na mesma direção do lançamento, porém se desviaria devido à ação de uma força externa. O desvio, neste caso, seria devido à ação da gravidade.

Apesar de certas indefinições, um fato importante a ser comentado é que o movimento rotacional mantido por um ímpetus de rotação, sem dúvida nenhuma criou um cenário favorável para que se permitisse maior compreensão da geração e manutenção do movimento dos corpos celestes. Partindo desta teoria, com efeito, a persistência do movimento dos céus era devido à transmissão de um ímpetus rotacional impresso por Deus no início da criação do universo.

Segundo, Buridan, "... Deus, quando criou o mundo, alegrou-se em mover cada orbe celeste. O movimento impresso transmitiu um ímpetus que continuou a mover os corpos continuamente, sem ter que movê-los novamente¹²... E este ímpetus que Deus imprimiu não decresceu ou posteriormente se corrompeu porque não existe inclinação dos corpos celeste para outro tipo de movimento. Nem existem resistências que poderiam corromper ou reprimir a quantidade de ímpetus impresso" (Clagett, 1959)

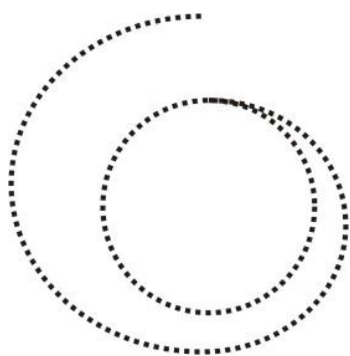
De acordo com as idéias de Buridan discutidas até aqui, podemos analisar a trajetória descrita por um corpo em um meio material após este ser submetido à ação de uma força rotacional ou um torque.

¹²Esta idéia do movimento continuado nos faz lembrar o princípio de inércia da mecânica newtoniana

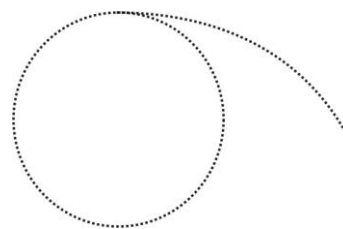
Depois de iniciado o movimento, como consequência deste torque, o corpo recebe uma quantidade de ímpetus que se esgotará continuamente devido à presença de forças resistivas, porém, a qualidade (virtude) deste ímpetus se manterá invariavelmente igual a do agente motor.

Sendo então a intensidade de ímpetus progressivamente enfraquecido, o corpo não conseguirá realizar posteriormente uma trajetória com as mesmas características do movimento primitivo. Isso implica, por exemplo, que se o movimento antes da projeção tiver uma trajetória circular, após a projeção a trajetória passará a ser uma espécie de espiral, cujo comprimento depende da quantidade de ímpetus que o móvel recebeu. Na ausência de um meio resistivo (vácuo) a trajetória do corpo lançado será um círculo.

Acreditava-se ainda que esta quantidade de ímpetus transmitido também dependia do tempo que o corpo permanecia em contato com a força principal, ou seja, quanto mais tempo o corpo estivesse submetido à ação da força motora, maior seria a quantidade de ímpetus impresso. Como no funcionamento de uma funda¹³. Em consequência das numerosas revoluções, o corpo receberia um ímpetus cada vez mais intenso e assim, mais longa era a trajetória circular descrita após o lançamento do corpo. (Veja Figura 09 A e B abaixo):



(A) *Trajetoira do corpo quando o ímpetus transmitido é de grande intensidade.*



(B) *Trajetoira do corpo quando o ímpetus transmitido é de pequena intensidade.*

Figura 09

¹³ Funda: lançador de couro ou corda, usada pelos antigos para o arremesso de pedras ou balas em longas distâncias.

Alguns pesquisadores acreditam que, a idéia proposta pela ação do ímpetus possui características semelhantes às encontradas nas explicações que os alunos contemporâneos dão à realização de diversos fenômenos físicos.

O psicólogo Michael Maccloskey, da Universidade John Hopkin, realizou várias pesquisas sobre as interpretações dos alunos sobre o comportamento dos corpos após serem projetados num meio. Em seus diversos trabalhos, Maccloskey propõe diferentes diagramas para que os alunos indiquem a forma da trajetória descrita pelo projétil após perder o contato com o agente propulsor.

Apresentamos abaixo, Figura 10, um exemplo dos diagramas propostos por Maccloskey. Neste é representado um tubo oco em formato circular onde pede que alguns estudantes analisem qual será a trajetória seguida por uma bolinha que partindo do ponto A percorra por dentro do tubo com velocidade constante até ser lançada do ponto B. Parte dos alunos argumentaram que no vácuo, a bolinha retornaria ao ponto A do tubo numa trajetória como a representada pela curva 1. Porém no ar, a trajetória seria melhor representada pela curva 2.

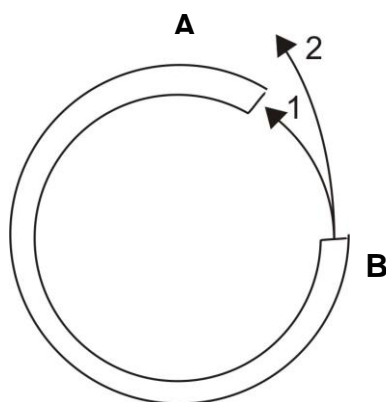


Figura 10. Diagrama elaborado por Mcccloskey. Ilustra a idéia dos alunos sobre a trajetória de um corpo lançado de dentro de um tubo oco. Na curva 1, o movimento ocorre no vácuo e na curva 2 o movimento ocorre no ar.

Conforme constatamos, este pesquisador obteve fortes indícios de que seus alunos descreviam trajetórias semelhantes às descritas pelos filósofos medievais,

como conseqüência da ação de um ímpetus de rotação. Esta visão foi encontrada em diversos níveis escolares, porém é de se supor que diminua com o sucessivo progresso no estudo dos conceitos físicos.

III.4 Nicole d' Oresme (1320-1382).

Nicole d'Oresme deu uma grande contribuição ao estudo do movimento inventando o sistema de coordenadas e demonstrando o teorema fundamental da cinemática.

Oresme retorna à teoria do ímpetus de Buridan, porém apresenta uma concepção diferente de Buridan. Para Oresme, o ímpetus é comunicado ao corpo pela aceleração e não pela velocidade. Rejeita também a idéia do ímpetus divino para o movimento eterno e constante dos céus e a idéia do ímpetus permanente dos corpos, considerando-o autoconsumível.

Concebe uma nova técnica para o estudo do movimento com o início da introdução da representação gráfica do movimento. Não se trata exatamente da criação da geometria analítica, entretanto, alguns historiadores sugerem que essas idéias de Oresme estejam na origem da teoria cartesiana.

Modernamente a teoria de Oresme está representada no cálculo gráfico do espaço percorrido por um móvel animado com velocidade $v(t)$: o espaço percorrido é igual à medida da área compreendida entre a curva $v(t)$ e o eixo t das abscissas.

Dessa forma, sob a perspectiva científica, nesse momento histórico a questão da descrição do movimento estava a um passo para ser apreciada por Galileu Galilei que direcionaria as idéias que, posteriormente, Isaac Newton (1642-1727) sistematizaria na formulação das Leis da Mecânica.

Capítulo IV

A Construção da Mecânica Clássica

Dentro da evolução histórica da física podemos dizer que este é o momento histórico onde ocorre a grande convergência entre os conceitos físicos e matemáticos, além da descoberta do método experimental como um novo método científico para análise de um fenômeno, abandonando de vez o uso das experiências mentais e sem confrontação de dados.

A dificuldade nas representações teórica e gráfica dos conceitos físicos é superada à medida que ocorre a evolução dos conceitos matemáticos, principalmente no estudo das grandezas do movimento circular. Isto impulsiona a construção da Mecânica Clássica.

Nos textos que se seguem apresentamos uma breve recapitulação da evolução histórica dos principais conceitos e dos principais métodos científicos utilizados pelos pensadores que impulsionaram e construíram a Mecânica Clássica conhecida por nós no período contemporâneo.

IV.1 Uma Breve História do Desenvolvimento dos Conceitos de Curvas de Tangentes.

Embora os conceitos de curvas e tangentes tenham se desenvolvidos efetivamente no decorrer do século XVII, o início de sua construção se dá ainda entre os antigos estudiosos gregos.

A noção de derivação é bem posterior a integração e se dá apenas no século XVII decorrendo diretamente de um formalismo desenvolvido por Fermat, a partir de seus exemplos de construção de tangentes de curvas e no seu método de máximos e

mínimos.

A quadratura da parábola, por exemplo, feita por Arquimedes no século III a.C., utilizando o método da exaustão (Galarda, Lílian; 1999), pode ser considerado como um dos primeiros exemplos na história da matemática de um método de integração.

O primeiro exemplo conhecido de construção de uma reta tangente a uma circunferência é atribuído ao matemático Euclides (~ 287-212 a.C.) apresentado em seu Livro III, de Os Elementos. Posteriormente as curvas foram estudadas por Arquimedes onde este emprega um método mais geral para a determinação da reta tangente à espiral, deduzida da cinemática da seguinte maneira:

Se revolvermos uma reta com uma das extremidades fixas, num movimento uniforme em um plano, até que ela retorne a posição inicial, e se, um ponto move-se ao longo da reta num movimento uniforme, começando da extremidade fixa, o ponto descreverá uma espiral.

Como a construção da espiral envolve dois movimentos, um radial uniforme e outro circular uniforme, Arquimedes parece ter determinado a direção do movimento observando a resultante destes dois movimentos, porém não desenvolve um método para a construção de uma tangente a outras curvas. Em uma de suas proposições, ele usa o traçado da tangente à espiral para determinação da retificação da circunferência.

Apolônio de Perga (262-190 a.C.) se dedicou aos estudos de tangentes e normais às seções cônicas, parábola, hipérbole, elipse e circunferência, apresentados em sua obra As Cônicas.

No final da Idade Média começava-se a desenvolver as primeiras idéias sobre velocidade instantânea e o emprego de tangentes para a determinação da direção de um corpo em movimento em um ponto qualquer no espaço. Até que, com Pierre de Fermat (1601-1665) no século XVII se inicia o estudo da geometria analítica e as idéias de variáveis algébricas, criando assim, a primeira relação entre as coordenadas de um ponto de uma curva, ou seja, a equação da curva.

Para a construção da tangente a uma curva, o método de Fermat descreve a tangente como a posição limite de uma secante quando os pontos de interseção com a curva tendem a se aproximar. Pela importância de seus trabalhos relacionados à determinação de máximos e mínimos e à construção de tangentes e normais às curvas planas, Fermat foi considerado por alguns estudiosos como o fundador do Cálculo Diferencial.

Além de Fermat, René Descartes (1596-1650) também se destacou nos trabalhos de geometria analítica introduzindo métodos algébricos na geometria. Posteriormente Roberval (1602-1675) e Torricelli (1608-1647) contribuíram em trabalhos fazendo uso do conceito dinâmico de tangentes. De acordo com a idéia destes estudiosos, traçar a tangente a uma curva descrita pelo movimento resultante da composição de dois movimentos consistia em determinar a resultante das direções das velocidades dos dois movimentos.

Estudando os trabalhos de Galileu, em que representa o movimento uniformemente acelerado por um diagrama onde o tempo é abscissa e a velocidade é a ordenada, dada pela expressão $S = 1/2 gt^2$, Torricelli parece reconhecer a relação entre a diferenciação e a integração.

Considerando os dois diagramas do espaço e da velocidade como função do tempo, ele enuncia que as ordenadas da curva do espaço são proporcionais às áreas limitadas pela curva da velocidade, desse modo, as ordenadas dos pontos sobre a curva da velocidade são os coeficientes angulares das tangentes da curva no espaço.

Os estudos das curvas e tangentes evoluíram ainda sob os esforços de estudiosos como Blaise Pascal (1623-1662), John Wallis (1616-1703), Isaac Barrow (1630-1677) até que no final do século XVII os trabalhos de Isaac Newton (1642-1727) e Leibniz (1646-1716) revolucionaram os métodos para resolução de novos problemas de construção de tangentes e cálculos de áreas, volumes, etc, pois seus métodos eram mais gerais que os de seus predecessores, não dependendo da natureza especial da curva tratada.

A evolução dos conceitos físicos parece estar intimamente ligada a evolução destes conceitos matemáticos. A invenção da geometria analítica, por exemplo, criou condições para a elaboração final da representação matemática de grandezas como

velocidade e aceleração. A dificuldade encontrada pelos estudiosos para elaboração de conceitos relativos ao movimento rotacional sempre esteve ligada à dificuldade encontrada em definir métodos matemáticos de estudos das curvas. Apenas no final do século XVII e início do século XVIII é que encontramos todas as ferramentas matemáticas que impulsionaram definitivamente as definições de grandezas físicas relativas ao movimento rotacional.

IV.2 As Contribuições Científicas ao Estudo do Movimento da Renascença ao Final da Idade Moderna.

Os textos apresentados neste trabalho nos têm mostrado a grande dificuldade encontrada por séculos de estudo para que se pudesse chegar a uma formulação final da Mecânica Clássica, concluída por Newton no decorrer do século XVII.

Sob a influência das idéias Aristotélicas e de seus seguidores, a dinâmica permaneceu quase que estacionária nos 2 mil anos que mediaram entre o século IV a.C e o início da renascença. Como já foi discutido anteriormente, a permanência do método intuitivo como base para a definição das grandezas físicas e a ausência de um método que permitisse a confrontação da idéia com uma análise experimental representaram uma dificuldade para o processo evolutivo das definições das grandezas físicas.

As dificuldades são ainda maiores quando analisada a evolução das teorias que trataram das definições métricas e representações analíticas das grandezas do movimento de rotação.

O desconhecimento de Aristóteles da retificação do círculo e a visão de que os movimentos circulares e de translação são incomensuráveis, refletiram em dificuldades para os estudos que trataram de suas medidas.

Um fato importante de se observar é que ao longo da história os tratados de astronomia sempre contribuíram no desenvolvimento do estudo do movimento rotacional, iniciado com Autolyco e conduzido por estudiosos como Alberto da Saxônia e Gerard de Brussels.

Os trabalhos apresentados por Galileu sobre o estudo do movimento revolucionam o método científico ao associar a matemática aos fenômenos naturais e propor o uso da experimentação na busca das leis da física.

O uso da experimentação permite a Galileu chegar, por exemplo, as primeiras proposições sobre o conceito de inércia onde afirma que:

Um corpo que se move continuará em movimento uniforme a menos que uma força seja aplicada e o force a parar.

Posteriormente, Descartes (1596-1650) formula o princípio geral de inércia, descobre a conservação do momento linear, propõe a grandeza *quantidade de movimento* (Koyré, 1986) envolvida nas interações entre dois corpos e contribui inovadoramente com seus trabalhos relativos ao estudo da geometria analítica, como vimos anteriormente.

Estas importantes descobertas criaram condições para a elaboração final da representação matemática de grandezas mecânicas como, por exemplo, a *velocidade* e *aceleração* que finalmente foram realizadas por Newton e apresentadas em sua obra *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* ou *Princípios*, como é popularmente conhecido. Nessa obra Newton dá uma explicação completa sobre o movimento e como as forças atuam. A descrição está contida nas suas conhecidas Três Leis de Newton.

De posse de todos esses conhecimentos, Newton pôde explicar o movimento dos planetas em torno do Sol, assumindo a hipótese de uma força dirigida ao Sol, onde conclui que esta força produz uma aceleração centrípeta que obriga a velocidade do planeta mudar de direção continuamente. Analisando o movimento da Lua e as Três Leis de Kepler, Newton chega a importante Lei da Gravitação Universal.

Os trabalhos de Newton sobre o conceito de aceleração centrípeta (publicado apenas em 1687, no *Principia*) tiveram uma importante contribuição com os estudos

anteriores realizados por Christian Huyghens¹⁴ (1629-1695) sobre aceleração em órbitas circulares, onde define o conceito de aceleração centrífuga. Estas definições são importantes para a resolução de problemas do movimento rotacional.

Newton, como já vimos anteriormente, obteve um grande êxito na aplicação do cálculo ao estudo das áreas planas, estabelecendo, por exemplo, um método geral para calcular a área delimitada por uma curva plana. A estrutura matemática que se formava no final do século XVII e início do século XVIII assegurava os progressivos avanços necessários para o desenvolvimento das teorias físicas.

Todos estes estudos são fundamentais para a construção definitiva da Mecânica. Nessa fase histórica da ciência a Física era capaz de descrever os movimentos dos corpos celestes e terrestres. Mas toda esta revolução científica sempre esteve ligada às investigações astronômicas, devido as constantes observações sobre os movimentos rotacionais das estrelas, da Terra e outros corpos celestes. Este interesse pelos movimentos celestes sempre exigiu do homem a formulação de idéias mais apuradas na busca de respostas mais precisas e estas respostas sempre foram mais difíceis de serem dadas devido ao aspecto rotacional dos movimentos.

É interessante notar que uma questão primitiva, como por exemplo, em que Aristóteles afirmava que os movimentos de translação e de rotação eram considerados do mesmo gênero, porém de espécies diferentes, apresenta uma idéia que, embora seja refutada, pode ser compreendida quando analisamos o desenvolvimento das teorias do movimento geral. Pois, percebemos que as dificuldades na descrição de uma grandeza no movimento de rotação leva-nos a acreditar que, aparentemente, o movimento de rotação possui “propriedades diferentes da translação”.

Como vimos nos capítulos referentes à cinemática, no curso da história, o estabelecimento formal da cinemática de translação e da rotação seguem ritmos distintos. Apesar do estudo de Gerard de Brussels sobre a rotação ter proporcionado aos pesquisadores do Colégio de Merton uma sugestão que viabilizou o enunciado do teorema da cinemática, a formalização da rotação foi um pouco mais difícil de ser

¹⁴ Christian Huyghens, além desses conceitos de mecânica foi o criador da teoria ondulatória da luz.

conseguida. E esta formalização se cumpriu quando esta questão para a cinemática da translação já estava resolvida, e isto se fez completamente pela Mecânica na teoria de Newton.

Com o advento da representação formal das grandezas da Mecânica podemos entender a razão desta dificuldade histórica. Na representação vetorial das grandezas Mecânicas o conjunto de todos os vetores (um espaço vetorial) pode ser considerado como composto de dois subconjuntos separados: O conjunto de vetores que representam as grandezas translacionais da Mecânica e o conjunto de vetores “anti-simétricos” associados às grandezas rotacionais.

No primeiro caso as grandezas matemáticas apresentam uma disposição longitudinal relativa aos elementos geométricos do movimento. Por exemplo, o vetor velocidade é sempre tangente à trajetória da partícula em movimento. A aceleração é sempre colinear à força aplicada, etc. No segundo caso ocorre sempre uma “transversalidade” entre as grandezas e os elementos geométricos, por exemplo: o momento angular de uma partícula é ortogonal aos seus vetores posição e velocidade e também o vetor velocidade angular e o vetor velocidade de uma partícula em movimento de rotação são sempre ortogonais. Daí percebemos que a álgebra vetorial do movimento de translação difere da álgebra vetorial do movimento de rotação. Sua matemática vetorial torna-se mais complexa devido ao efeito produzido pela rotação.

É nossa suposição que esta diferença tenha gerado dificuldades distintas na visualização do movimento que ocasionou a defasagem na evolução histórica.

Evidentemente não existe nenhuma distinção ontológica entre o movimento translacional e o movimento de rotação. Estes dois ocorrem simplesmente em consequência das condições iniciais. As dificuldades encontradas ao longo da história foram devidas, conforme já assinaladas, à formalização matemática incompleta naquele momento histórico.

Com a exceção da tentativa de Gerard de Brussels, o movimento de rotação era tratado pelos astrônomos em seus cálculos sobre os deslocamentos dos astros celestes, considerados simplesmente como movimentos uniformes projetados sobre a abóbada celeste e possivelmente estimados em suas intensidades pelo processo de Aristóteles já descrito em outros capítulos.

A obtenção da descrição formal do movimento de rotação nos permite examinar com propriedade este movimento que é associado aos principais fenômenos dinâmicos encontrados na natureza ou em fenômenos produzidos pelo homem. Ao longo do curso da história encontramos inúmeros exemplos onde o movimento de rotação desempenha um papel fundamental. Esta presença é encontrada em quase todas as teorias cosmogônicas dos filósofos, gregos ou modernos, e em fenômenos naturais que se desenrolam diante de nossos olhos. É o caso de eventos meteorológicos como os tornados, os desvios dos ventos próximos ao equador terrestre ou, com um maior impacto sobre nossas admirações, nas formas das galáxias espirais detectadas pelos astrônomos há mais de um século.

Assim como as considerações de Einstein sobre o estado do movimento translacional dos referenciais o conduziu à teoria da relatividade, a descoberta de Pauli de que as partículas elementares giram em torno de seu próprio eixo, acrescentou mais uma grandeza fundamental (*spin*) na descrição formal dos fenômenos quânticos.

Analisaremos a seguir as teorias cosmogônicas, que trazem a rotação como elemento fundamental para o processo de criação da matéria. Nestas, a rotação gera um movimento turbilhonar que se revela a principal causa eficiente na geração do cosmos. Neste estudo procuraremos compreender as origens da base empírica supostamente utilizada pelos filósofos na construção de suas teorias.

Capítulo V

Estudo do Embasamento Empírico dos Turbilhões Cósmicos

Como mencionamos nos capítulos precedentes, o movimento de rotação é um estado da matéria encontrado em muitos processos naturais ou mesmo em sistemas experimentais, expressamente preparados com objetivo de usar suas propriedades para obter informações mais precisas sobre fenômenos naturais. Dos casos mencionados e que têm o movimento rotacional atuando, o exemplo das teorias cosmogônicas é particularmente interessante, principalmente do ponto de vista da história da Física.

Conforme conclusão de um historiador da ciência, as teorias cosmogônicas foram apresentadas historicamente como produtos de filosofia elaborados pelos chamados filósofos pré-socráticos e, sob este aspecto, estas idéias foram analisadas e discutidas por uma grande maioria de filósofos, desde Aristóteles até os filósofos modernos, como Nietzsche, Hegel, entre outros. Entretanto o historiador acima mencionado propõe uma interpretação diferente no sentido de que estas teorias deveriam ser estudadas sob o ponto de vista físico e não necessariamente filosófico. A sua opinião é parcialmente corroborada pelo próprio Aristóteles que denomina de *físicos* aqueles filósofos pré-socráticos.

O mesmo Aristóteles, estudando estas teorias cosmogônicas, explica a ação exercida pelo movimento turbilhonar nas propostas daqueles filósofos inspirando-se em fenômenos meteorológicos. Veremos esta questão detalhadamente mais adiante. Nos textos que seguem vamos tentar compreender a ação do turbilhão cósmico tendo como modelo o turbilhão meteorológico, ou tomado.

V.1 Breve Resumo do Processo Cosmogônico das Teorias dos Pré-Socráticos

As principais teorias cosmogônicas têm em comum a descrição da ação exercida por um turbilhão, e assim é para o pensamento de Anaximandro, Anaxímenes, Anaxágoras e de Demócrito. A diferença essencial entre elas reside na definição da *matéria primordial* ou, como chamou Anaximandro, o *Princípio*. A ação intensa do turbilhão tem a propriedade de levar ao centro do turbilhão toda matéria pesada, condensando-a e provocando ali a compactação desta matéria. Ao mesmo tempo todas as partes mais leves são conduzidas para a periferia do turbilhão.

No núcleo do turbilhão são fabricadas todas as partes sólidas e líquidas dos mundos, rochas em geral, montanhas, e também rios, lagos e mares.

Na periferia, onde vão se agrupar todos os elementos leves, devido a alta rotação a que estão submetidos esses elementos, são gerados o fogo, o éter e os corpos celestes: o Sol, a Lua e os planetas.

Nessas teorias dos pré-socráticos é também proposta uma arquitetura ordenada dos componentes do mundo, estabelecendo os lugares da Terra, do Sol, da Lua e dos planetas, seus movimentos etc. O universo resultante e com essa arquitetura cósmica é chamado de *Cosmos*.

No que segue vamos tentar compreender como se processa o mecanismo migratório acima descrito baseados na suposição de que esta teoria tem inspiração na observação de fenômenos naturais, conforme já observou Aristóteles.

V.2 Embasamento Empírico das Teorias dos Pré-Socráticos.

Aristóteles, analisando a natureza do mecanismo gerador provocado pelo movimento turbilhonar, escreve, no seu tratado *Os Céus*:

'...a forma da causação supõe que todos eles se baseiam na observação dos líquidos e do ar, nos quais os corpos maiores e mais pesados sempre se movem para o centro do turbilhão. Isto é pensado por todos os que tentam gerar os céus por este meio para explicar porque a Terra se situa no centro.'

Percebemos aqui claramente que Aristóteles se referia ao emprego, como modelos, dos redemoinhos, turbilhões atmosféricos e, possivelmente, até mesmo da observação de fenômenos que ocorrem sob a ação de movimentos rotacionais no cotidiano da vida¹⁵.

O nosso objetivo é tentar compreender como se processa a dupla migração no curso do movimento turbilhonar, e assim vamos resumir abaixo as principais características e mecanismos físicos presentes num turbilhão atmosférico, muito bem estudado atualmente.

Os turbilhões atmosféricos, ou tornados, são fenômenos meteorológicos que ocorrem com frequência em várias regiões da Terra. No meio oeste americano se contam centenas e mesmo milhares por ano. Em outras partes ocorrem com menor frequência, porém não são de todos ausentes. Vejamos resumidamente a física dos tornados:

¹⁵ Este modelo do turbilhão foi também usado por Descartes em sua cosmogonia.

- Grandes massas de ar úmido e quente colidem com grandes massas de ar seco e frio resultando numa rápida precipitação do ar úmido liberando uma grande quantidade de energia térmica, gerando uma zona de baixa densidade que, por ação do empuxo se desloca para camadas superiores deixando 'um vácuo' atrás de si;
- Grandes massas de ar das vizinhanças são 'sugadas' pela zona de baixa pressão e se dirigem para seu centro. Entretanto, como são desviadas de suas direções pela ação das forças de Coriolis, acabam num movimento de rotação em torno do núcleo;
- A conservação do momento angular cria no núcleo uma zona de altíssima rotação, sendo constantemente alimentada pelas massas de ar que para aí são atraídas;
- Esta altíssima rotação acentua ainda mais a diferença de pressão entre o núcleo e as partes periféricas das massas de ar que gravitam em torno desse núcleo, intensificando o fluxo das partículas que 'caem' em direção ao centro do turbilhão;
- As massas de ar que giram em torno do centro do núcleo numa trajetória, determinada pelo equilíbrio entre a força centrífuga e o gradiente de pressão na região, desenvolvem altíssimas velocidades lineares. Matéria sólida que se encontrar no caminho dessas massas de ar em movimento espiralado em torno do núcleo do turbilhão, serão inevitavelmente arrastadas com violência para o centro do vórtice.

O modelo do turbilhão cósmico foi generalizadamente aceito entre os filósofos pré-socráticos o que nos leva a imaginar que não pairava nenhuma dúvida quanto à eficiência do processo gerador da matéria, e, por conseguinte e aparentemente, a dupla migração de matéria não gerou nenhuma controvérsia que tivesse sido registrada nos escritos desses filósofos.

Apesar do processo da dupla migração ter recebido o aval daqueles filósofos, a analogia com os turbilhões meteorológicos não deixa muito claro como o processo inteiro pode ser desenvolvido, pois, se a concentração de matéria no centro do turbilhão, alimentada pela massa que cai movida pelo gradiente de pressão, é facilmente explicável, já à migração para 'fora' implica em alguma dificuldade. Conforme vimos mais acima, o grande, e cada vez mais intenso, fluxo de massa 'empurrada' para o centro arrastaria consigo todo sólido que se encontrasse no meio dessa massa em movimento.

A questão então é: Como compreender o processo de migração de matéria para o exterior do turbilhão se for aceita a analogia deste com os turbilhões atmosféricos?

Uma via possível que poderia conduzir a uma interpretação do fenômeno pode ser encontrada em publicação recente (Baptista, 2002), e também numa breve referência em Burnet (Burnet, 1994).

A idéia básica nesta interpretação seria de que, estando a matéria densa misturada com as partes mais leves, estas migrariam para o exterior por um processo de percolação.

Este processo acomodaria a matéria mais pesada na região central, resultando na concentração da matéria mais leve na periferia. A fragilidade desta solução reside no fato de que esse processo de acomodação não é suficientemente violento para produzir compactação da matéria no centro do turbilhão.

Assim sendo e acreditando que os filósofos das cosmogonias já mencionados imaginaram o processo completo, podemos supor que alguma disposição na função total do turbilhão deve ter permitido o deslocamento de matéria para o exterior. Para compreendermos como foi possibilitada aquela migração, vamos tentar introduzir uma pequena modificação no mecanismo turbilhonar (Baptista, J.P. e Ferracioli, L., 2004).

Vamos imaginar um sexto parágrafo na descrição da física do tomado escrito mais acima:

- O crescimento da velocidade rotacional no centro do turbilhão aumentando ainda mais a altíssima rotação já existente geraria um tal e descomunal gradiente de pressão que poderia provocar um violento

colapso de massa em direção ao núcleo, deixando uma zona de baixa densidade na região vizinha do núcleo, um 'vácuo', que permitiria a passagem de pequenas porções de matéria sólida arrancadas pela força centrífuga do corpo central compactado.

Esta solução não é totalmente estranha ao mecanismo dos turbilhões cósmicos, pois é possível que esta situação já tenha sido imaginada por Anaxágoras, quando ele afirma que o movimento de rotação faz desprender pedaços de matéria sólida do núcleo lançando-os para o espaço, produzindo os corpos celestes, e que devido à alta rotação estes corpos celestes estão em chamas. O Sol, diz ele, é um pedaço de rocha em chamas do tamanho do Peloponeso¹⁶.

V.3 Os Turbilhões de Descartes e de Huyghens

O recurso aos turbilhões para servir como gerador de matéria do universo também foi usado pelo filósofo Descartes na sua teoria cosmogônica, publicada em 1662 em sua conhecida obra 'O Mundo ou Tratado da Luz'.

Todavia o uso específico que Descartes faz do turbilhão difere do papel desempenhado nas teorias dos pré-socráticos, entretanto a sua capacidade de separar os corpos leves dos pesados é empregada e representa importante papel na arquitetura do mundo.

Resumidamente a teoria de Descartes descreve a seguinte situação:

O universo infinito é preenchido pela matéria sutil e é estruturado por infinitos turbilhões dispostos como um mosaico espacial. Estes turbilhões se tocam em suas periferias gerando, por causa do atrito, energia suficiente para gerar corpos sólidos, líquidos e gasosos, e a ação do turbilhão 'empurra' as partes pesadas para o centro e mantém as partes mais leves girando na periferia. Desta maneira é organizado o sistema solar: O Sol no centro, os outros corpos celestes gravitando em torno e mantidos pela ação permanente do turbilhão.

Este processo cosmogônico descrito por Descartes difere um pouco em relação aos demais processos por considerar que é a matéria sutil que empurra a

¹⁶ Esta afirmativa como é sabido, lhe custou uma condenação por heresia, por parte da assembléia ateniense.

matéria pesada para o centro do turbilhão, isto é compreendido em sua carta enviada a Mersenne., (Koyré, 1964). Nesta carta Descartes descreve uma experiência destinada a mostrar a existência do fenômeno da dupla migração, onde sugere que:

Para compreender como a matéria sutil que gira em torno da Terra empurra os corpos pesados para o centro do turbilhão é suficiente realizar uma experiência simples em que consiste em colocar pequenas esferas de chumbo e de madeira em uma vasilha cilíndrica e fazê-la girar em torno de um eixo que passe pelo seu centro. Nisto, é possível observar que as esferas de chumbo empurrarão as peças de madeira para o centro da vasilha.

No caso do turbilhão descrito por Descartes, não é aplicável a interpretação dada mais acima sobre a dupla migração da matéria. Mais apropriadamente seria o caso de se proceder a uma análise cuidadosa desta experiência descrita pelo filósofo. Conforme foi observado (Baptista e Ferracioli, 2002), entretanto, se constata uma contradição entre a descrição dada por Descartes na aludida carta a Mersenne e a conclusão do próprio Descartes, a menos que tenha ocorrido algum erro na tradução original da carta

Por outro lado neste mesmo período Newton, de plena posse de sua Mecânica, analisa o comportamento físico-matemático dos turbilhões de Descartes quanto à sua função mantenedora do movimento gravitacional dos corpos celestes. Em nenhum momento Newton propõe uma teoria sobre a geração e a manutenção do cosmos, porém a ação dos turbilhões cartesianos confrontavam-se com suas teorias sobre a gravitação universal.

A polêmica entre as teorias cartesianas e newtonianas se dava principalmente quanto ao processo de interação dos corpos. Descartes descreve, que em seu espaço geometrizado, todas as ações ou passagens de um tipo de movimento para outro só poderia ser por contato entre as partes. Em sua grande obra sobre a teoria da gravitação, Newton estuda a ação à distância existente no comportamento da natureza.

Newton descreve que num turbilhão infinito ou turbilhão gerado por uma esfera em rotação uniforme no interior de um fluido homogêneo, os tempos de rotação dos

pontos do turbilhão variam na razão do quadrado das distâncias destes pontos ao centro do turbilhão. Newton demonstra que:

1. Se um corpo de mesma densidade que o fluido for arrastado pelo turbilhão, ele percorrerá trajetórias circulares e terá período de rotação proporcional ao quadrado de sua distância ao centro do turbilhão.
2. Se um corpo de densidade menor que o fluido for arrastado pelo turbilhão, ele descreverá uma trajetória em espiral se dirigindo para o centro do turbilhão.
3. Se um corpo de densidade maior que o fluido for arrastado pelo turbilhão, ele descreverá uma trajetória em espiral e se dirigirá para fora do centro do turbilhão.
4. Os tempos de rotação das órbitas planetárias descobertas por Kepler são proporcionais às raízes quadradas do cúbico das distâncias médias ao Sol.

De acordo com esta última demonstração Newton conclui que o movimento dos corpos mantidos pelos turbilhões cartesianos está em contradição com as Leis de Kepler e a análise de todas as suas demais demonstrações lhe levam a rejeitar as teorias cartesianas sobre os processos cosmogônicos e toda sua dinâmica planetária.

O cientista holandês C. Huyghens também empregou o turbilhão em suas teorias. Entretanto o objetivo de Huyghens era o de encontrar uma explicação mecânica para a atração gravitacional da teoria newtoniana, já que, ele próprio achava inaceitável a idéia da ação à distância.

Huyghens imaginou que em torno dos corpos celestes, do Sol por exemplo, existiria um movimento turbilhonar espacial de matéria sutil, etérea, formada por pequenas partículas que girariam em todos os sentidos possíveis seguindo trajetórias em planos completamente aleatórios, mas que passavam pelo núcleo, e tal que todo corpo sólido que estiver contido no espaço do turbilhão seria 'empurrado' pela ação

do vórtice em direção do centro, neste caso em direção do Sol. Assim, segundo Huyghens, a ação gravitacional seria exercida por contacto e não à distância, pois estes corpos se movimentando em torno do Sol estariam constantemente sujeitos a ações centrípetas.

Huyghens, semelhantemente a Descartes, imaginou uma experiência que comprovaria o efeito do turbilhão descrito por ele. A descrição desta experiência se encontra na obra *A Mecânica*, de Ernest Mach., e difere da experiência imaginada por Descartes.

Mach escreve o seguinte:

'ele mergulha num vaso cilíndrico fechado e cheio de água, pedaços de cera de lacre, que, devido à sua densidade um pouco maior, vão se depositar no fundo do vaso. Este vaso é em seguida animado de um movimento de rotação e os pedaços de cera vão se colocar no bordo exterior. Cessando bruscamente a rotação do vaso, a água continuará a girar enquanto que os pedaços de cera, que repousam sobre o fundo e cujo movimento é mais rapidamente contrariado são agora impelidos para o centro.' (E.Mach, 1925, pág.155).

De posse destas informações vemos finalmente que, apesar de que estas teorias tenham, no princípio, o turbilhão como idéia central, a justificativa para seu embasamento empírico não é a mesma para todas.

Capítulo VII

Conclusão

Tendo como objetivo o estudo da evolução do conceito de rotação, elaboramos uma descrição da evolução histórica do movimento em geral onde pudemos identificar as várias fases desta evolução.

Constatamos que a evolução conceitual das grandezas do movimento de rotação, bem como os processos de sua medição foram elaborados em um ritmo histórico diferente da evolução conceitual do movimento translacional.

A maior parte dos pensadores que se dedicavam ao estudo do movimento, inevitavelmente procuravam uma solução para o problema do lançamento na atmosfera de projeteis, na tentativa de resolver o impasse criado pela teoria aristotélica da antiperistásis. A melhor solução encontrada pelos filósofos escolásticos foi a elaboração da teoria do Impetus de Jean Buridan.

Apesar de que Jean Buridan se utilizou em seus exemplos de corpos em rotação para contestar a teoria aristotélica, a rotação propriamente dita foi ignorada pela sua teoria do Ímpetus. Elaboramos nesta parte a idéia da *cadeia de transmissão* para compreender melhor a questão quando o movimento de rotação estivesse presente.

O desenvolvimento das teorias do movimento em trajetórias retilíneas se deu mais rapidamente do que o desenvolvimento das teorias dos movimentos de rotação. A visão de que os movimentos circulares e de translação eram incomensuráveis, (segundo Aristóteles) dificultou seu desenvolvimento que teve início nos trabalhos de Autolyco, mas só teve continuidade no final da Idade Média.

Na época de Autolyco a Astronomia já se encontrava fundamentada na geometria e o estudo do movimento circular se limitava à observação das trajetórias desenhadas na esfera celeste. A trajetória de um corpo celeste se revelava como uma curva traçada sobre a esfera, e a única medida que se considerava deste movimento era dada pelo valor de sua velocidade angular. Os corpos celestes se deslocavam na esfera celeste percorrendo ângulos iguais em tempos iguais, isto é, com velocidade angular uniforme, constante, mas em geral diferente para cada corpo celeste.

Do ponto de vista da medição da velocidade de rotação, somente no século XIII apareceu uma teoria neste sentido, proposta por Gerard de Brussels. Do ponto de vista conceitual o método de G. de Brussels se baseava ainda no antigo método de se obter a medida da velocidade de um corpo pela comparação de sua velocidade com outro movimento cuja velocidade fosse conhecida. Esta comparação só foi possível por que já se conhecia, à época de G. de Brussels, a retificação do círculo. Porém, além deste trabalho nada de novo foi acrescentado ao conhecimento do movimento de rotação até o século XVII, com os trabalhos de Galileu e de Newton.

Todavia o trabalho de G. de Brussels serviu de ponto de partida para que os pesquisadores do Colégio de Merton, de Oxford, construíssem o método da medida da velocidade linear variável, posteriormente conhecido como *o teorema de Merton* ou *teorema fundamental da cinemática*.

O movimento de rotação está presente numa infinidade de fenômenos, conforme observamos no capítulo V. Sendo encontrado como estado fundamental na natureza como no caso das partículas elementares que apresentam, como condições de suas existências, a rotação em torno de seu próprio eixo, denominado de *Spin* da partícula.

É também encontrado no comportamento dos corpos celestes, onde as galáxias espirais se revelam como belíssimas estruturas estelares formadas pelo seu movimento de rotação que tem a aparência turbilhonar, como o movimento de rotação dos planetas, estrelas, etc.

Do ponto de vista histórico, a rotação presente nas teorias cosmogônicas sob a forma de turbilhões, sempre se constituiu num interessante objeto de estudos. Em função desta importância apresentamos um estudo destes turbilhões com a finalidade de compreender sua possível origem empírica, uma vez que os turbilhões estão

presentes em quase todas as teorias cosmogônicas, incluindo as teorias dos turbilhões de René Descartes e C. Huyghens.

De acordo com nosso trabalho, verificamos que a dificuldade encontrada para o desenvolvimento das grandezas do movimento de rotação, além de se dar pela dificuldade na construção matemática do conceito de curva, como mencionado mais acima, também teve à influência de métodos intuitivos e embasamentos empíricos que se apoiavam em fenômenos naturais para justificarem as teorias desenvolvidas.

O uso dos métodos intuitivos fizeram parte do progressivo processo de evolução das teorias. As experiências de pensamento foram fundamentais para o aprimoramento de conceitos físicos, como por exemplo, a ausência do atrito e o desenvolvimento do conceito de inércia.

Porém, a utilização destes métodos, em particular, não contribuíram de maneira significativa para o desenvolvimento das grandezas do movimento rotacional, pois não haviam justificativas matemáticas que acompanhassem suas descrições.

Referências:

- [1] J.P. Batista e L. Ferracioli, *Da Physis à Física: Uma História da Evolução do Pensamento da Física*. (Editora Edufes, Vitória, 2003).
- [2] A. Koyré, *Estudos Galilaicos*. (Editora Dom Quixote, Lisboa, 1986).
- [3] Galarda, Lílian e Silva, Sophia E.E. e Rossi, Suely M.M., *A Evolução do Cálculo Através da História*, (Editora Edufes, Vitória, 1999).
- [4] J. P. Batista e L. Ferracioli, *A Construção do Princípio de Inércia e do Conceito de Inércia Material*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2000.
- [5] J. P. Batista e L. Ferracioli. *A Evolução do Pensamento Sobre o Conceito de Movimento*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 1999.
- [6] M. Clagett. *The Science of Mechanics in the Middle Ages*. (Madison: The University of Wisconsin Press, 1961)
- [7] A. C. Crombie, *História de La Ciencia de San Agustín a Galileo* (Alianza Editorial Madrid-Vols 1 e 2, 1959)

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)