



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DECANATO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
INSTITUTO DE BIOLOGIA
INSTITUTO DE FÍSICA
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENSINO DE CIÊNCIAS

Analogias e Metáforas no Ensino de Física: Um Exemplo em Torno da Temática de Campos

JANICE ANITA BOMFIM GOULART

Brasília – DF
JULHO DE 2008



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DECANATO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
INSTITUTO DE FÍSICA
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENSINO DE CIÊNCIAS

Analogias e Metáforas no Ensino de Física: Um Exemplo em Torno da Temática de Campos

JANICE ANITA BOMFIM GOULART

Dissertação realizada sob orientação da Prof. Dr. Maria de Fátima da Silva Verdeaux e apresentada à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Ciências – Área de Concentração “Ensino de Física”, pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília.

Brasília – DF
JULHO DE 2008

FOLHA DE APROVAÇÃO

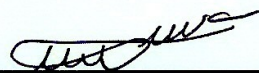
JANICE ANITA BOMFIM GOULART

ANALOGIAS E METÁFORAS NO ENSINO DE FÍSICA: UM EXEMPLO EM TORNO DA TEMÁTICA DE CAMPOS

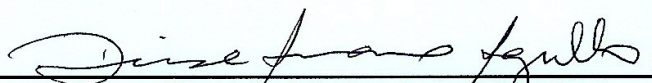
Dissertação apresentada à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Ciências – Área de Concentração “Ensino de Física”, pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília.

Aprovada em 03 de julho de 2008.

BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima da Silva Lettere Verdeaux
(Presidente)



Prof.^a Dr.^a Deise Amaro Agrello
(Membro interno não vinculado ao Programa – IF/UnB)



Prof. Dr. Gerson de Souza Mól
(Membro interno vinculado ao Programa – IQ/UnB)

*A meu avô, Lourival Bomfim,
a meu pai, Milton Avila Goulart,
e ao professor Cláudio Ferretti,
principais responsáveis por minha escolha pela Física.*

AGRADECIMENTOS

A Fátima Verdeaux e Cristiane Woo, duas amigas queridas, pelo suporte incondicional que me deram.

Ao professor Ricardo Gauche, pelo incentivo constante.

Ao professor Gerson Mol, pelo estímulo.

A professora Deise, pelo entusiasmo.

Ao Júnior pela prontidão, eficiência e disposição em ajudar.

A todos envolvidos no PPGEC da UnB, pela colaboração.

A Lui Lobão, pelas ilustrações e pela paciência.

Agradeço também a minha família, pelo apoio.

RESUMO

Embora não haja um consenso sobre o exato papel da analogia no ensino de ciências as discussões a esse respeito têm fornecido parâmetros para o uso da analogia como ferramenta de ensino. O objetivo desse trabalho é retomar essa discussão sob o enfoque de que o raciocínio analógico seja constituinte da própria estrutura do pensamento científico e, portanto, essencial na alfabetização científica e formação cultural do estudante. Nesse sentido, propomos um exemplo do uso da analogia como ferramenta de ensino por meio de um texto de apoio no qual apresentamos o conceito de campo para estudantes do Ensino Médio. Queremos com isso destacar um ensino que explicita os aspectos conceituais do conteúdo escolar de física, em contraste ao ensino que se limita à mera mecanizada manipulação matemática de fórmulas esvaziadas de significado, sem um modelo que as ampare e que torne esse conteúdo significativo.

Palavras chave: ensino de Física; analogia; Física conceitual; campo; ação mediada; ação à distância; éter; modelização.

ABSTRACT

The exact role played by analogy in science teaching is a much discussed topic. Even though a general consensus has not yet been reached, those discussions have arguably contributed to providing guiding elements in the use of analogy as a teaching tool. This work aims at rethinking the role of analogy in science teaching by considering and highlighting its participation in the very structure of scientific thinking and thus arguing its necessity to the building of scientific literacy and culture. We then propose a new didactic and pedagogical strategy based upon the use of analogy as a tool to explicitly address the conceptual aspects of Physics, contrasting with the teaching based on merely mechanical resolutions of mathematical exercises.

Keywords: Physics teaching; analogy; conceptual Physics; field; mediated action/ action at distance controversy; ether; modeling.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro comparativo entre a aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa.	18
Tabela 2 - Representação esquemática do processo de ancoragem.	19
Tabela 3 - Representação esquemática da classificação da aprendizagem significativa.	22
Tabela 4 - Representação esquemática das etapas de assimilação, diferenciação progressiva e reconciliação integrativa.	23
Tabela 5 - Representação esquemática da diferenciação progressiva do subsunçor.	24

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1 - APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	16
CAPÍTULO 2 - ANALOGIA	26
2.1 - INTRODUÇÃO	26
2.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.2.1 - ANALOGIA E COGNIÇÃO	50
2.2.2 - ANALOGIA E CIÊNCIA	56
2.2.3 - ANALOGIA E ENSINO-APRENDIZAGEM	58
2.2.4 - ANALOGIA E APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	58
CAPÍTULO 3 – CAMPO	65
CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICE 1 - OBSERVAÇÕES ACERCA DO TEXTO DE APOIO PRODUZIDO	
APÊNDICE 2 - TEXTO DE APOIO PRODUZIDO	

INTRODUÇÃO

Neste trabalho, discutimos o papel do uso da analogia no Ensino de Física, sob o enfoque nersessiano (NERSESSIAN, 1992, 1995) que considera a sua função constituinte do pensamento científico e, portanto, necessária na alfabetização científica, essencial à formação básica do cidadão.

É freqüente, dentro de um enfoque conceitual do ensino de ciências, que os professores façam uso de analogias ao explicarem os conteúdos que fazem parte do escopo do ensino escolar. Mas as vantagens, desvantagens e cuidados envolvidos são pouco discutidos (MOL, 1999).

Apesar de este ser o nosso tema, não queremos atribuir à utilização didática da analogia nenhum caráter salvacionista, nem sequer excludente de outras práticas (“laboratório didático”, “aprendizagem por descoberta”, “construtivismo”, “interdisciplinaridade”, “abordagem Ciência, Tecnologia e Sociedade, CTS”, “contextualização histórica e filosófica”, etc.), mesmo porque, acreditamos ser o raciocínio analógico um constituinte intrínseco do pensamento humano (VOSNIADOU; ORTONY, 1989), portanto, em qualquer uma das abordagens, a analogia estaria explícita ou implicitamente presente.

Para promover então um ensino de Física com enfoque conceitual que resgate a exploração das idéias e conceitos físicos e não apenas a operacionalização de equações (o que torna a Física, para nossos estudantes, quase um sub-ramo intrincado e mais complicado da Matemática), consideramos quase que inevitável, o uso de analogias.

Na prática pedagógica do ensino de Física almejamos a desmistificação de fórmulas e a apresentação dos conceitos de forma mais atraente e eficiente que torne o conteúdo curricular mais prazeroso, dentro de uma abordagem capaz de extrair a essência do significado físico dos fenômenos, que utilize símbolos universais e cause um impacto que

desencadeie no estudante um processo de reflexão, transformação e de apropriação do conhecimento.

A intervenção do professor nesse processo ensino-aprendizagem se insere numa trama de interação comunicativa (MORTIMER e SCOTT, 2002) e será tão mais eficiente quanto melhor for essa comunicação. Nessa comunicação, assinalamos toda a teia de circulação, interação, construção e assimilação de conhecimento que deve alicerçar-se, sobretudo, no diálogo entre seus agentes por meio do qual o professor, por já conceber sua intervenção de forma flexível, deve reorientá-la a cada instante desse processo, balizando-se no “feedback” obtido dos estudantes.

Para que isso aconteça deve-se estabelecer uma dinâmica de trabalho em que o aprendiz sinta-se estimulado a participar ativamente, sinta-se acolhido para expressar-se, respeitado em suas opiniões, valorizado no conhecimento que já traz consigo e também desafiado a romper e transformar conceitos anteriores.

Consideramos, portanto, que, quanto mais possibilidades de interação com o conteúdo determinada forma de apresentação escolhida pelo professor ofereça ao estudante, maiores serão as chances de que o estudante seja convencido a se envolver, mobilizar-se mentalmente para a aprendizagem do conteúdo.

Hoje sabemos que a estrutura cognitiva do estudante ao se engajar num processo de aprendizagem não é uma tábula rasa na qual podem ser inseridas informações de forma arbitrária. De uma maneira ou de outra, qualquer informação nova que uma pessoa recebe interactiva com aquilo que ela já sabe, e o produto dessa interação, que resulta em novos significados, poderia ser definido como aprendizagem significativa (MOREIRA, 2003, 2006).

Observamos freqüentemente um ensino mecânico de uma Física quase que meramente operacional. Os conceitos, as idéias por trás das equações pouco são ensinadas ou discutidas pelo professor. Consideramos lamentável esse quadro.

Também no atual acervo de livros didáticos para o Ensino Médio disponíveis no mercado, o quadro é o mesmo, poucas são as coleções que exploram a física conceitual, embora pareça surgir uma nova safra de coleções com essa tendência¹.

Pontuamos, a seguir, alguns aspectos da minha experiência pessoal que me levaram à escolha desse tema e que influenciam esse trabalho.

Após vários fracassos e abordagens equivocadas, nas instituições onde trabalhei, percebi o padrão de ser considerada entre os estudantes como “a professora que explica bem” ou que consegue tornar mais simples coisas aparentemente complicadas.

Sempre utilizei analogias, e, ao final dos ciclos, minhas anotações de aula estavam repletas de figuras, analogias criadas por mim e muitas construídas por meio das contribuições dos estudantes. Essas anotações tinham, assim, um caráter original que complementava o material que eu adotava (em geral “Física e Realidade”, de Aurélio Gonçalves Filho e Carlos Toscano, da Editora Scipione, como livro didático básico e Leituras de Física, do GREF, como leitura obrigatória complementar).

Na nossa prática pedagógica, percebíamos maiores dificuldades de aprendizagem dos conceitos com maior grau de abstração, como o de campo, fosse ele vetorial, como o gravitacional ou o eletromagnético, ou escalar, como o potencial elétrico. O campo gravitacional, no entanto, admite, mais facilmente, associações a fenômenos macroscopicamente “visíveis”, isso pode ser percebido, por exemplo, no fato de ele estar associado a observações que frequentemente são alvo de questionamentos como: “Por que o

¹ GONÇALVES FILHO, Aurélio; TOSCANO, Carlos. **Física e Realidade**. São Paulo: Scipione, 1997.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. Instituto de Física da USP. **Física**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. Instituto de Física da USP. **Leituras de Física**. São Paulo, 1998. Disponível em: <<http://axpfep1.if.usp.br/~gref/pagina01.html>> . Acesso em 20 de jun de 2008.

GUIMARÃES, Luiz Alberto Mendes; BOA, Marcelo Cordeiro Fonte. **Física para o 2º Grau**. São Paulo: Harbra, 1997.

HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. Porto Alegre: Bookman, 2002.

chinês não se desprende do globo terrestre, já que ele está do outro lado do planeta, ‘de cabeça para baixo?’”, “Se massa atrai massa, por que estou ‘grudada’ no chão e não no teto?”.

Nesse processo de ensino-aprendizagem, a distinção entre força de campo (meio mágica como se os corpos se movessem sozinhos por vontade própria) e a força de contato parecia ser facilmente assimilada pelos estudantes.

Após a aprendizagem do conceito de campo gravitacional, construíamos paralelos, analogias entre ele e os demais campos, o que é delicado, já que se trata de uma analogia abstrato-abstrato (MOL, 1999). Usávamos o fato de a física ainda não ter conseguido unificar o campo gravitacional ao campo eletromagnético, para realçar uma das principais deficiências da analogia gravitação/eletromagnetismo: no eletromagnetismo temos os dois comportamentos, repulsão e atração, enquanto que na gravitação, apenas, atração.

Neste trabalho, então, a partir de minhas notas de aula, elaborei um texto de apoio que faz uso de analogias.

Segundo Moreira,

a aprendizagem do aluno é tanto mais significativa quanto maior for sua capacidade de modelar. Física é uma ciência de modelos e a modelagem é uma atividade sistemática dos físicos para construir e aplicar o conhecimento científico. Aprender Física implica, então, aprender a jogar o jogo da modelagem. (MOREIRA 1997, p.28).

Inserimo-nos, então, na produção de material didático que faz uso da analogia como estratégia pedagógica dentro de uma proposta sob a perspectiva “nersessiana” (NEERSESSIAN, 1992, 1995) de que o uso da analogia deva ser feito integrado ao ensino de ciências, não com o objetivo de facilitador da aprendizagem, mas sim por fazer parte do próprio escopo de objetivos deste ensino. Portanto, sugerimos a inclusão das analogias em sala de aula não porque isso vá facilitar a aprendizagem dos conceitos (embora isso possa ocorrer), e sim para que o exercício de construir e desconstruir analogias se torne familiar ao

estudante e que dessa forma ele adquira essa habilidade, porque isso vai lhe dar autonomia para construir diferentes tipos de modelos em diversas situações, estritamente acadêmicas ou não.

É razoável que ao professor de Ciências caiba essa tarefa, já que a habilidade de modelar lhe é uma característica peculiar, pois o exercício de modelar faz, obrigatoriamente, parte da sua rotina, sobretudo dos físicos, até mesmo por exigência de sua atividade (modelar o universo), portanto, é especialmente adequado que o professor de física faça uso de analogias no tratamento conceitual de seu conteúdo, pois isso vai familiarizar o aprendiz com essa ferramenta que é comum ao perfil e *modus operandi* do físico. E, se modelar é o trabalho do físico, a modelagem deve fazer parte do escopo do ensino de física.

Nesse trabalho, fundamentamo-nos na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, que analisa a aprendizagem sob o foco dos subsunçores, estruturas já pertinentes à estrutura cognitiva do aprendiz que servem de pontos de ancoragem às informações novas às quais o aprendiz vai sendo exposto.

Como delimitação, abordaremos o conceito de campo, que foi escolhido por ter elevado nível de abstração e por incluir a analogia como instrumento historicamente usado na construção desse conceito (por meio das cordas elásticas de Faraday) e também por ser a analogia tradicionalmente a principal ferramenta judicativa e explanativa até hoje comumente usada pelos autores que discutem esse conceito.

No capítulo 1, relacionamos, ao nosso trabalho, alguns aspectos da teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel.

No capítulo 2, apresentamos uma revisão bibliográfica sobre a relação entre a física e o uso de analogia e o também sobre o uso de analogias no ensino de física. Fazemos apontamentos sobre a discussão que se faz em torno da construção do conhecimento escolar e sua relação com o conhecimento científico e a questão da transposição didática.

No capítulo 3, discutimos o conceito físico de campo.

Nos apêndices, apresentamos a analogia como ferramenta de transposição didática no ensino de física, aplicando-a ao ensino do conceito de campo.

Capítulo 1 - APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Nesse trabalho nos fundamentamos na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, faremos a seguir alguns apontamentos sobre essa teoria (MOREIRA, 2003, 2006), relacionando-a com nosso trabalho.

David Paul Ausubel é médico-psiquiatra de formação, mas dedicou sua carreira acadêmica à psicologia educacional (MOREIRA, 2003, 2006).

Para a teoria de Ausubel, a aprendizagem significa organização e integração de material na estrutura cognitiva (MOREIRA, 2003, 2006).

Estrutura cognitiva é definida como sendo o conteúdo total de idéias de um indivíduo e sua organização (MOREIRA, 2003, 2006).

Apropriamo-nos dessa definição de aprendizagem, portanto: conceito aprendido é conceito integrado à estrutura cognitiva do aprendiz (MOREIRA, 2003, 2006).

O foco de Ausubel é o cognitivo, mas ele assume que os aspectos afetivos e psicomotores influem no processo de apropriação de um novo conceito, pois relações afetivas e psicomotoras podem já existir ou ser estabelecidas ao objeto (MOREIRA, 2003, 2006).

Segundo a teoria de Ausubel, o novo é aprendido e retido por meio de ancoradouros (subsunçores) (MOREIRA, 2003, 2006).

Subsunçores são pontos de ancoragem às novas idéias e conceitos; são conceitos preexistentes, relevantes e inclusivos, adequadamente claros, disponíveis e funcionais na estrutura cognitiva (MOREIRA, 2003, 2006).

O armazenamento de informações no cérebro é organizado numa hierarquia conceitual: elementos mais específicos ligados a conceitos mais gerais (MOREIRA, 2003, 2006).

Na perspectiva da teoria de Ausubel, pode-se ampliar o conceito de estrutura cognitiva para: estrutura cognitiva é uma estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais do indivíduo (MOREIRA, 2003, 2006).

Esse conceito se adequa a nossos objetivos, pois podemos a partir dele inferir que a base do processo de apropriação de um novo conhecimento é o exercício de relacionar esse conhecimento novo aos conhecimentos já pertinentes à estrutura cognitiva do aprendiz, e a analogia poderia ser apontada como uma ferramenta preferencial no estabelecimento dessas relações.

Aprendizagem significativa é o processo por meio do qual uma nova informação (novo conhecimento) se relaciona de maneira não arbitrária e substantiva (não-literal) à estrutura cognitiva do aprendiz (MOREIRA, 2003, 2006).

A não-arbitrariedade é o termo utilizado por Ausubel para expressar o fato que o relacionamento não é com qualquer aspecto preexistente da estrutura cognitiva, e sim com conhecimentos especificamente relevantes, os subsunçores, conhecimentos prévios que servem de matriz ideacional e organizacional para a incorporação, compreensão e fixação (ancoragem) de novos conhecimentos (MOREIRA, 2003, 2006).

Já substantividade é o termo utilizado por Ausubel pra expressar o aspecto de que o que é incorporado à estrutura cognitiva é a substância do novo conhecimento e não os signos precisos usados para expressá-lo (MOREIRA, 2003, 2006).

Já que, segundo Ausubel, o subsunçor não é arbitrário, podemos inferir que ele deva ser selecionado, acionado pelo aprendiz, por guardar relações de analogia com o objeto que se deseja incorporar à estrutura cognitiva.

Para a teoria de Ausubel é no curso da aprendizagem significativa que o significado lógico do material de aprendizagem se transforma em significado psicológico para o sujeito. (MOREIRA, 2003, 2006)

Ausubel contrasta a aprendizagem significativa com a aprendizagem mecânica.

Na tabela 1, a seguir, apresentamos um quadro comparativo entre as características da aprendizagem mecânica e da aprendizagem significativa.

Tabela 1 - Quadro comparativo entre a aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa.

APRENDIZAGEM MECÂNICA	APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA
Nova informação com pouca ou nenhuma interação com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva.	Nova informação interage com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva, os subsunçores.
Relacionabilidade arbitrária	Relacionabilidade não-arbitrária
Relacionabilidade literal	Relacionabilidade substantiva
Armazenamento arbitrário	Armazenamento hierárquico
Exemplos: pares de sílabas; memorização de fórmulas.	Exemplo: material potencialmente significativo

Fonte: adaptada de MOREIRA, 2003, 2006.

A aprendizagem significativa deve ser preferida à aprendizagem mecânica, mas Ausubel não as apresenta como dicotômicas. A aprendizagem mecânica pode inclusive viabilizar a aprendizagem quando não há um subsunçor pronto e disponível para a ancoragem de um objeto específico. E nesse processo subsunçores vão sendo elaborados e à medida que novas relações vão se estabelecendo eles vão se modificando, tornando-se estruturas mais sofisticadas (MOREIRA, 2003, 2006).

Ao longo do nosso desenvolvimento o grau de elaboração dos nossos subsunçores aumenta, por isso crianças mais estimuladas possuem subsunçores mais disponíveis e elaborados o que lhes facilita a aprendizagem significativa.

Na tabela 2, a seguir, fazemos uma representação esquemática do processo de ancoragem.

Tabela 2 – Representação esquemática do processo de ancoragem.

Nova informação potencialmente significativa	Relacionada a, Assimilada por	Conceito subsunçor existente na estrutura cognitiva	Produto interacional	Subsunçor modificado e nova informação modificada
a	+	A	=	A´a´

Fonte: adaptada de MOREIRA, 2003, 2006.

Segundo a teoria de Ausubel são três as condições para a ocorrência da aprendizagem significativa (MOREIRA, 2003, 2006).

A primeira condição é que o novo material que se deseja incorporar à estrutura cognitiva do sujeito seja um “material potencialmente significativo”, isto é, um material potencialmente relacionável a uma imagem, símbolo, conceito, proposição de forma não-arbitrária (MOREIRA, 2003, 2006).

Nesse aspecto entendemos que quanto mais elementos forem destacados no objeto que se quer ensinar, mais possibilidades de se estimular o aprendiz a estabelecer relações entre o objeto novo e os subsunçores que o aprendiz possui são oferecidas, daí a importância da forma da apresentação do objeto, da roupagem com a qual se apresenta esse objeto, quanto mais aspectos desse objeto novo forem destacados mais “reativo” (potencialmente significativo) esse objeto se torna.

Daí pode-se destacar a importância da transposição didática (CHEVALLARD, 1991) que elabora o conhecimento científico num conhecimento escolar mais “reativo”, mais relacionável aos subsunçores da estrutura cognitiva do aprendiz, atrelando elementos históricos, filosóficos, ressaltando relações de analogia, destacando aplicações ou implicações práticas tecnológicas ou sociais daquele objeto (aqui todas as técnicas de transposição didática são válidas) para com isso munir o aprendiz de recursos que mobilizem, tornem disponíveis seus subsunçores. Consideramos, como já ressaltado, que a todas essas técnicas, no entanto, subjaz o uso da analogia inerente ao próprio raciocínio humano.

A segunda condição segundo Ausubel para a ocorrência da aprendizagem significativa é a disponibilidade de subsunçores adequados na estrutura cognitiva do aprendiz. (MOREIRA, 2003, 2006) Por isso quanto mais estimulado (afetivamente, psicomotoramente, cognitivamente) for o aprendiz, maior for seu “repertório cultural”, mais acesso a biblioteca e outros recursos ele tiver, maior será o número e o grau de elaboração dos seus subsunçores. Quanto mais estimulada for a estrutura cognitiva do aprendiz, mais potenciais subsunçores disponíveis ele vai possuir.

A terceira condição elencada por Ausubel para a ocorrência da aprendizagem significativa é a disposição pessoal do aprendiz para relacionar o novo material de maneira substantiva e não-arbitrária, isso depende de fatores afetivos (ansiedade, auto-estima, extroversão/introversão), depende da motivação do aluno que pode ser uma motivação intrínseca (curiosidade natural, interesse por considerar o objeto de alguma forma relevante para ele) e/ou uma motivação extrínseca (por exemplo, uma motivação de rendimento escolar), depende também da idade, sexo, contexto social, memória, hábitos de estudo, etc. (MOREIRA, 2003, 2006).

Da mesma maneira aqui, quanto mais elementos o professor for capaz de destacar no objeto que se deseja incorporar à estrutura cognitiva do aprendiz mais fatores de disposição intrínseca serão mobilizados no aprendiz (os que estiverem a seu alcance, pois a motivação é multifatorial como vimos).

Usando, por exemplo, a história da ciência na apresentação de um conceito de física, o professor possa despertar a motivação intrínseca de algum estudante, pois, para ele, aquele objeto se torna relevante por ser relacionável àquela história. O mesmo pode ser deflagrado em outros estudantes (ou reforçado no mesmo) por meio da utilização de analogias ou de relações CTS, o que reforça (reitera) o aspecto de que por ser a motivação multifatorial,

quanto mais multifacetada for a apresentação do conteúdo, maior será a probabilidade de sucesso na aprendizagem.

Esses fatores que influem na motivação podem ser inclusive afetivos e também perpassam pela empatia.

Lidamos aqui com a disposição do aprendiz para relacionar o novo material de maneira substantiva e não-arbitrária, portanto o desafio nesse aspecto é seduzir, convencer o estudante a mobilizar-se mentalmente, a se comprometer numa aprendizagem não-mecânica.

Como evidência da aprendizagem significativa Ausubel aponta a posse de significados claros, precisos, diferenciados e transferíveis (MOREIRA, 2003, 2006).

E como maneira de se avaliar a aprendizagem, evitando uma simulação de aprendizagem significativa, Ausubel sugere formular questões de maneira não familiar que requeira máxima transformação do conhecimento adquirido (MOREIRA, 2003, 2006).

Uma forte evidência de aprendizagem significativa é, portanto, a habilidade de aplicar o conceito em uma situação não-familiar, podemos relacionar isso à habilidade de estabelecer relações de analogia entre domínios distintos, traçar padrões comuns entre domínios diferentes, que é, portanto, a habilidade que se deseja fomentar no aprendiz que lhe promoverá autonomia no enfrentamento da diversidade de situações onde ele poderá fazer uso daquele conceito.

São também três os tipos de aprendizagem significativa apontadas por Ausubel (MOREIRA, 2003, 2006).


A aprendizagem significativa representacional, onde o sujeito consegue atribuir um significado a um símbolo, quando por exemplo lemos a palavra “casa” e a ela conseguimos relacionar a idéia de uma casa (MOREIRA, 2003, 2006).

A aprendizagem significativa de conceitos, um tipo mais elaborado que o anterior, aqui o sujeito consegue atribuir um significado mais genérico, mais categórico a símbolos combinados, por exemplo, casa grande (MOREIRA, 2003, 2006).

A aprendizagem significativa proposicional é mais elaborada ainda, nela o sujeito atribui significado a idéias, significado que vai além da soma dos conceitos que compõem a proposição, por exemplo: a casa tornou-se grande quando eles partiram (MOREIRA, 2003, 2006).

Essa classificação da aprendizagem significativa em tipos é esquematizada na tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Representação esquemática da classificação da aprendizagem significativa.

REPRESENTACIONAL	DE CONCEITOS	PROPOSICIONAL
Atribuir significado a símbolos isolados (tipicamente palavras)	Atribuir significação, genérica ou categórica, a símbolos combinados	Atribuir significado a idéias, significado além da soma dos significados dos conceitos que compõem a proposição
Casa → 	casa grande; sujeito epistemológico	quando eles partiram a casa ficou grande.

Fonte: adaptada de MOREIRA, 2003, 2006.

Aqui consideramos ser clara a atuação do raciocínio analógico na construção dessas aprendizagens, sendo cada vez mais demandado quanto maior for o grau de abstração e complexidade da aprendizagem.

Segundo Ausubel a formação de novos conceitos por meio da aprendizagem significativa se dá em três processos: assimilação (ancoragem), diferenciação progressiva e reconciliação integrativa (MOREIRA, 2003, 2006).

Na definição de assimilação (ancoragem) percebemos que para o autor a assimilação de um novo conceito acontece quando o sujeito cognoscente encontra em sua estrutura

cognitiva um subsunçor que possa ancorar o novo conceito, ou seja, a habilidade de assimilar algo novo é na verdade a habilidade de relacioná-lo a algum elemento já conhecido, podemos então novamente inferir que essa habilidade é preponderantemente a própria habilidade de criar relações de analogia.

Com a introdução do conceito de diferenciação progressiva o autor ressalta um importante aspecto da aprendizagem que se sucede imediatamente à ancoragem, esse aspecto é a modificação do novo conceito e do próprio subsunçor, ou seja as relações estabelecidas entre o novo conceito e o subsunçor modificam ambos.

A reconciliação integrativa é resumido por Moreira:

Na etapa da reconciliação integrativa chega-se a um produto final estável quando o novo conceito não é mais apenas um adendo agregado à estrutura cognitiva do sujeito e sim um elemento incorporado ao subsunçor, formando com ele uma unidade. Nesse estágio esperamos que as contradições entre conceito assimilado e subsunçor tenham sido solucionadas, isto é, as discrepâncias, sejam reais ou aparentes entre eles, tenham sido reconciliadas, as substantividades de ambos tenham sido diferenciadas em suas diferenças e emparelhadas em suas similaridades e dessa forma, portanto, o conceito tenha sido obliterado pelo subsunçor (MOREIRA, 2003, 2006).

Essas três etapas (assimilação, diferenciação progressiva e reconciliação integrativa) estão esquematizadas nas tabelas 4 e 5, a seguir,

Tabela 4 – Representação esquemática das etapas de assimilação, diferenciação progressiva e reconciliação integrativa.

Nova informação significativa potencialmente	relacionada a, Assimilada por	existente Conceito subsunçor	Produto interacional	Subsunçor modificado e nova informação	Instabilidade	Sub-sunçor modificado e nova informação	Assimilação obliteradora	Subsunçor modificado
a	+	A	=	A' + a'	↔	A'	→	a'

Fonte: adaptada de MOREIRA, 2003, 2006.

Tabela 5 - Representação esquemática da diferenciação progressiva do subsunçor.

Conceito subsunçor existente na estrutura cognitiva	DIFERENCIAÇÃO PROGRESSIVA DO CONCEITO SUBSUNÇOR	Subsunçor modificado
A	→	A'

Fonte: adaptada de MOREIRA, 2003, 2006.

Na assimilação obliteradora o esquecimento (“desaparecimento” de a') é uma continuação temporal do processo de assimilação que facilita a aprendizagem e retenção de novos conceitos (MOREIRA, 2003, 2006).

O processo descrito se adequa perfeitamente ao que desejamos que o estudante execute na finalização de uma analogia. A analogia é um instrumento eficiente na promoção da assimilação de novos conceitos, mas que para não deixar “efeitos colaterais indesejados” requer alguns cuidados na sua finalização, cuidados esses que poderiam ser descritos como sendo exatamente esse processo de reconciliação integrativa entre o subsunçor e o conceito assimilado, ou seja, a analogia é estabelecida entre dois domínios distintos promovendo a assimilação de um novo conceito, mas no desenrolar desse processo de aprendizagem por meio da analogia deve-se necessariamente perpassar pelo estabelecimento das similaridades e diferenças entre os domínios e pela reconciliação entre as discrepâncias reais ou aparentes entre eles até que o novo conceito seja totalmente integrado. Inclusive a maioria das críticas que são feitas ao uso de analogia poderiam ser sanadas pela cuidadosa observância desses critérios.

O fato de emparelhamos o que se espera no estágio final da reconciliação integrativa (as contradições entre conceito assimilado e subsunçor tenham sido solucionadas, isto é, as discrepâncias, sejam reais ou aparentes entre eles, tenham sido reconciliadas, as substantividades de ambos tenham sido diferenciadas em suas diferenças e emparelhadas em suas similaridades) do que se espera na etapa de finalização da aplicação da analogia, leva-nos a emparelhar também o processo ensino-aprendizagem por meio do uso da analogia ao

processo de aprendizagem significativa. Veja, como a teoria de Ausubel é proposta como um modelo universal de aprendizagem, o processo descrito seria a finalização universal de um processo de aprendizagem, que é perfeitamente emparelhável a uma adequada finalização de uma analogia. E como na teoria de Ausubel o mecanismo de estabelecimento da relação entre o novo conceito e o subsunçor não é especificado, é possível, pelas semelhanças apontadas, emparelhar novo conceito com o domínio alvo, subsunçor com domínio base e relação entre conceito novo e subsunçor com analogia entre domínio alvo e domínio base.

O caráter didático trabalhado por Ausubel na aprendizagem significativa faz dela basicamente uma aprendizagem por recepção, pois ele focaliza a aprendizagem verbal significativa receptiva. A atenção de Ausubel está voltada para a aprendizagem, tal como ela ocorre na sala de aula, no dia-a-dia da grande maioria das escolas. Ele acredita que a recepção é por excelência o mecanismo humano da aprendizagem, desde bebê. O aprendiz não precisa descobrir para aprender algo e usá-lo significativamente (MOREIRA, 2003, 2006).

Aqui fazemos a ressalva de que recepção significativa para Ausubel não tem qualquer conotação de recepção passiva, pois a recepção dentro da aprendizagem significativa requer um processo cognitivo dinâmico, onde o envolvimento e elaboração mental do aluno é condição sine qua non nesse processo (MOREIRA, 2003, 2006).

Nesse aspecto também a teoria de Ausubel atende nossa proposta já que nosso foco está na forma de apresentação do conteúdo pelo professor e na interação do aprendiz com essa apresentação durante o processo ensino-aprendizagem. Assim como Ausubel acreditamos que a recepção é por excelência o mecanismo humano da aprendizagem. Essa forma de apresentação de conteúdo deve incentivar o estudante a estabelecer relações entre o novo objeto e aquilo que ele já sabe, relações que sugerimos universalmente envolver raciocínios analógicos.

Capítulo 2 - ANALOGIA

As primeiras teorias sobre a analogia e a metáfora surgiram na Grécia clássica e são atribuídas a Aristóteles (séc. IV AC), para quem a metáfora era "a marca dos génios". A analogia tem constituído, desde então, um recurso para os teóricos da argumentação, diferentemente utilizada pelos poetas, teólogos ou filósofos que lhe reservam uma intenção estética, procurando provocar a surpresa, na medida em que pode ser considerado um recurso estilístico que reflecte um modo original, diferente de ver e falar do mundo; para os cientistas, ela é interpretada como um guia das investigações empíricas, sendo posteriormente eliminada após ter exaurido o seu papel. (DUARTE, 2005)

O trabalho do físico inclui a tarefa de modelar, ou seja, a partir de um fenómeno observado ou mesmo imaginado, tentar criar um modelo que explique o fenómeno, estabelecer relações entre as grandezas envolvidas.

A abstracção e a capacidade de criar analogias são consideradas uma das mais sofisticadas habilidades cognitivas (DUARTE, 2005), portanto deveríamos incluir como alvo nos nossos cursos de ciências desenvolver no aprendiz essa habilidade (NERSESSIAN, 1992, 1995).

Isto é, uma das nossas metas explícitas deveria ser a de desenvolver no aprendiz a habilidade de modelar, talvez ao ponto do conteúdo formal ser visto como ferramenta por meio da qual essa habilidade seja construída; estaríamos assim trabalhando numa linha de promover a autonomia intelectual do sujeito, autonomia que capacite o aprendiz a fazer ciência, uma vez que o trabalho intelectual do cientista, especialmente do físico, inclui o aspecto de modelar o universo, e nas narrativas biográficas de físicos renomados encontramos frequentemente o relato explícito de que seus modelos físicos foram construídos a partir de analogias (NERSESSIAN, 1995).

O papel atribuído à analogia na descoberta científica está bem patente na seguinte afirmação proferida por Faraday, em 1845, numa carta que escreveu a um amigo (DUARTE, 2005):

"Difícilmente pode imaginar como luto para utilizar as minhas ideias poéticas na descoberta de analogias e figuras remotas relativas à terra, ao sol e a toda a classe de objectos – porque acredito que é a forma verdadeira (corrigida pelo discernimento) de levar a cabo uma descoberta".

Seria interessante, portanto, que, nas abordagens do desenvolvimento histórico dos conceitos que tenham registros do uso de analogias no seu processo de elaboração, explicitasse em que momento se lançou mão da analogia na construção desse conceito e como se deu esse uso. Poder-se-ia explicitar também a motivação desses sujeitos, suas crenças, seus padrões estéticos, envolvidos na construção desses modelos. Que relações esses sujeitos buscam? Por que eles as buscam? O que os leva a crer que essas relações existam? Por que eles desejam que essas relações existam? O que se passava na cabeça do cientista? Quais são os padrões comuns no *modus operandi* dos experts da ciência? Um traço que parece comum a todos eles é o uso da analogia, para criar, justificar ou ensinar seus modelos (NERSESSIAN, 1995). Quando o cientista tenta modelar algo ele já tem um viés e esse viés muitas vezes vem de uma expectativa de que o modelo que explica aquele fenômeno guarde relações de analogia com algo que já lhe é conhecido.

O raciocínio humano se baseia em algo conhecido, nos elementos já pertinentes à estrutura cognitiva do sujeito. Nós julgamos os novos elementos aos quais somos expostos, por meio de analogias à nossa experiência acumulada até então, nós usamos o arcabouço cognitivo que já possuímos para lidar com os dados novos, portanto o tratamento dessas novas informações vai ser elaborado nas relações que o sujeito estabelecer entre elas e sua estrutura cognitiva atual, e um dos mecanismos de construção dessas relações é o uso de analogias.

A analogia não pressupõe a existência de uma igualdade simétrica, mas antes uma relação que é assimilada a outra relação, com a finalidade de esclarecer,

estruturar e avaliar o desconhecido a partir do que se conhece. (DUARTE, 2005)

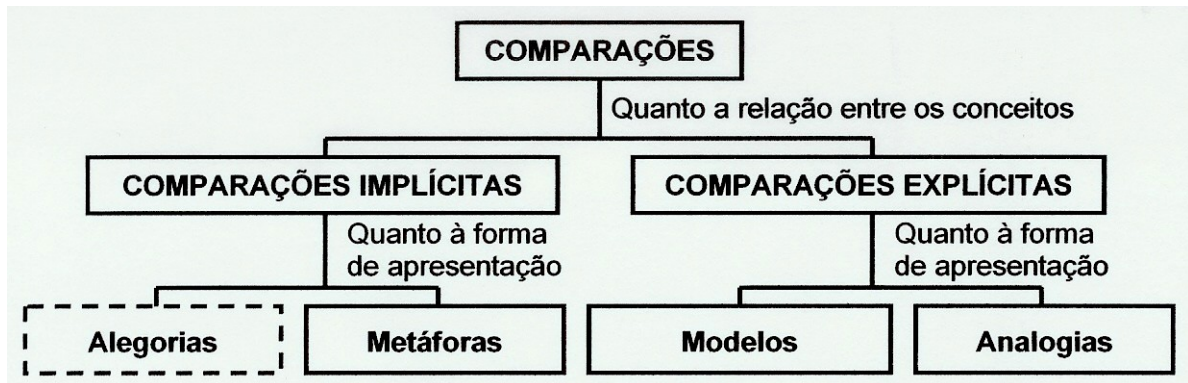
Essa conotação de analogia reforça a relação que tentamos estabelecer entre o uso da analogia como ferramenta de ensino e a teoria da Aprendizagem Significativa, uma vez que essa teoria afirma que todo novo conhecimento é incorporado na estrutura cognitiva do sujeito por meio de ancoragens em elementos já presentes em sua estrutura cognitiva que aquele sujeito identifica como relacionado ao novo conceito, então sempre buscamos alguma relação entre o novo conhecimento e o conhecimento que já nos é familiar. Sugerimos, então, que a teoria de Ausubel nos abre uma brecha para inferir que o uso da analogia poderia, portanto, ser o mecanismo preferencial da cognição, quase que natural na assimilação de um novo conceito ou ressignificação de um conceito.

Encontramos uma vasta bibliografia sobre analogia e suas implicações instrucionais. Dessa bibliografia apresentaremos primeiramente, uma proposta de sistema conceitual elaborada por Mol (MOL, 1999) para alguns termos que aparecem frequentemente associados à analogia no contexto do ensino de ciências.

Segundo ele:

... os conceitos de analogia, metáfora e modelo são empregados na literatura científica, mas sem uma boa distinção entre eles... Nossa intenção com esse trabalho é apresentar uma proposta de sistema conceitual que possibilite definições mais precisas, no contexto do ensino de Ciências, de cada um dos referidos conceitos e de outros relacionados. Pretende-se também que fiquem claras as relações existentes entre os conceitos. (MOL, 1999)

Que se resume no esquema a seguir:



Fonte: MOL, 1999.

Mol define (MOL, 1999):

Comparação é o ato de confrontar dois conceitos, com o objetivo de elucidar um conceito em estudo (alvo), através de características semelhantes a outro conceito (domínio).

Quanto ao tipo de relação:

- **Comparações implícitas** são comparações em que as relações entre os conceitos não são claras.

Quanto à forma de apresentação:

- **Metáforas** são comparações implícitas entre conceitos realizadas através de descrições que realçam qualidades que não coincidem;
- **Alegorias** são comparações implícitas entre conceitos através da representação de qualidades que não coincidem entre eles.
- **Comparações explícitas** são um tipo de comparação em que as relações entre os conceitos são enunciadas.

Quanto à forma de apresentação:

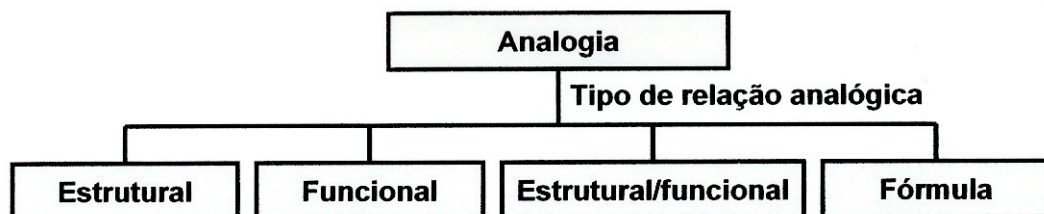
- **Modelos** são comparações explícitas feitas entre um conceito alvo e uma imagem ou objeto que o represente;

- **Analogias** são comparações explícitas feitas entre conceitos através da descrição de suas similaridades.

Mol também apresenta um sistema de classificação para as analogias, elaborado por CURTIS e REIGELUTH (apud MOL, 1999), segundo cinco critérios diferentes:

- 1- Tipo de relação analógica;
- 2- Nível de enriquecimento da analogia;
- 3- Nível de abstração;
- 4- Discurso do professor;
- 5- Formato da relação analógica.

1- Classificação quanto ao tipo de relação analógica (CURTIS e REIGELUTH apud MOL, 1999):

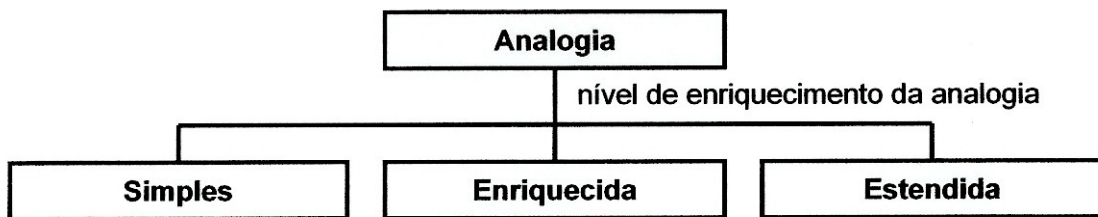


Fonte: MOL, 1999.

- **Analogias estruturais** são analogias em que a relação entre os conceitos se dá pela similaridade entre suas formas.
- **Analogias funcionais** são analogias em que os conceitos compartilham funções similares.
- **Analogias estruturais – funcionais** são analogias que combinam relações estruturais e funcionais entre os conceitos.

- **Analogias de fórmula** são analogias em que as similaridades entre os conceitos está na fórmula que os representa.

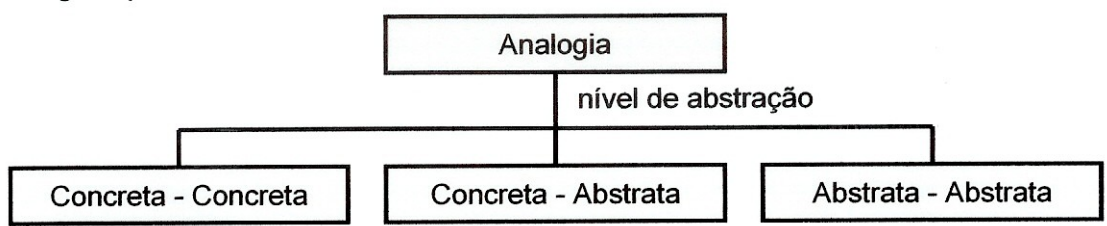
2- Classificação quanto ao nível de enriquecimento da analogia (CURTIS e REIGELUTH apud MOL, 1999):



Fonte: MOL, 1999.

- **Analogias simples** são analogias em que existe apenas uma pequena semelhança entre os conceitos.
- **Analogias enriquecidas** são analogias em que os conceitos compartilham alguns atributos.
- **Analogias estendidas** são analogias em que são utilizados vários domínios para descrever o conceito alvo.

3- Classificação quanto ao nível de abstração (CURTIS e REIGELUTH apud MOL, 1999):



Fonte: MOL, 1999.

- **Analogias concretas - concretas** são analogias em que os conceitos comparados são concretos.
- **Analogias concretas–abstratas** são analogias em que o conceito domínio é concreto e o conceito alvo é abstrato.
- **Analogias abstratas - abstratas** são analogias em que os conceitos comparados são abstratos.

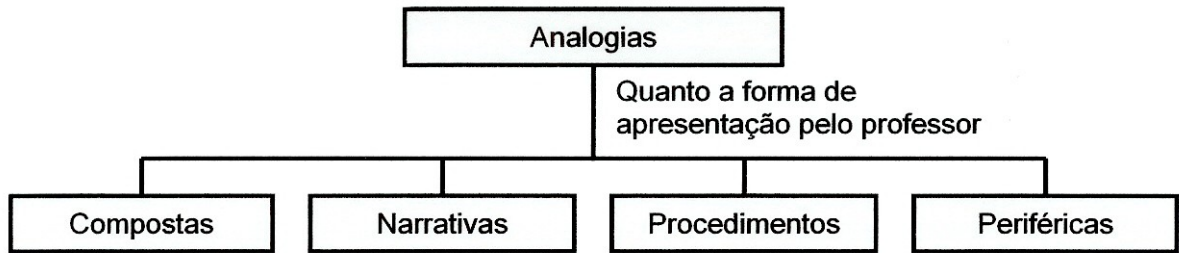
4- Classificação quanto ao discurso do professor (CURTIS e REIGELUTH apud MOL, 1999):

- **Organizador prévio** – apresentadas antes da instrução para fornecer informações fundamentais para o entendimento de algum conteúdo novo e não familiar;
- **Organizador embutido** – apresentada durante a instrução, no ponto da instrução que é considerado mais abstrato ou difícil para o aprendiz;
- **Organizador pós sintetizador** – apresentada após a instrução de um tópico novo, para melhorar sua compreensão.

5- Classificação quanto ao formato da relação analógica (CURTIS e REIGELUTH apud MOL, 1999):

Este critério divide as analogias em verbal, pictórica ou uma combinação das duas.

Mol ainda apresenta um sistema de classificação para as analogias, elaborado por DAGHER (apud MOL, 1999) que faz uso das três primeiras propostas de classificação de CURTIS e REIGELUTH (apud MOL, 1999):



Fonte: MOL, 1999.

Classificação para as analogias, quanto à forma de apresentação pelo professor DAGHER (apud MOL, 1999):

- **Analogias compostas** são comparações verbais caracterizadas pela utilização de mais de um domínio para explicar o conceito alvo;
- **Analogias narrativas** são comparações verbais caracterizadas pela utilização da descrição de uma história;
- **Analogias de procedimento** são comparações verbais caracterizadas pela utilização de episódios envolvendo processos científicos com forte presença do elemento humano;
- **Analogias periféricas** são comparações verbais caracterizadas pelo acompanhamento de comparações menores e pontuais.

Mol (MOL, 1999) conclui posicionando-se favorável ao uso de analogia como ferramenta de ensino:

Por fim, consideramos que as analogias desenvolvidas pelos professores, apresentadas nos livros didáticos ou em periódicos científicos, são importantes ferramentas para o processo de ensino-aprendizagem se forem utilizadas de forma consciente e adequada. (MOL, 1999)

A seguir, comentamos o artigo “Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências” (KRAPAS et al, 1997) cuja proposta é a de apresentar o estado da arte na área comentando alguns artigos representativos:

O tema dos modelos contribui para uma reflexão inovadora sobre a cognição humana. Em particular, o estudo de modelos mentais tem originado uma perspectiva de investigação sobre o raciocínio imagístico e analógico (NERSESSIAN 1992) que evidencia a dimensão figurativa, em oposição à versão operativa e formal _ proposta principalmente por Piaget _ do funcionamento cognitivo (KRAPAS et al, 1997).

Partindo da definição de modelo como uma representação de uma idéia, objeto, evento, processo ou sistema, e de modelagem como o processo de construção de modelos, são definidas cinco categorias de modelo (KRAPAS et al, 1997):

1) Modelo mental

Modelo pessoal e que pode se expressar por meio da ação, da fala, da escrita, do desenho.

2) Modelo Consensual

Modelo formalizado rigorosamente, compartilhado por grupos sociais com o propósito de compreender/explicar idéias, objetos, eventos, processos ou sistemas.

3) Modelo Pedagógico

Modelo construído com o propósito de promover a educação. No sentido amplo, um modelo pedagógico inclui os processos de mediação didática, isto é, os processos de transformação de conhecimento científico em conhecimento escolar.

4) Meta-modelo

Modelo formalizado rigorosamente, compartilhado por grupos sociais, e construído com o propósito de compreender/explicar o processo de construção e funcionamento de modelos consensuais ou de modelos mentais.

5) Modelagem como objetivo educacional

Enfatiza a promoção da competência em construir modelos como propósito central do ensino de ciências.

Da revisão feita do artigo *Mental Modelling* de Duit e Glynn (1996) destacamos que para eles, a estrutura através da qual podemos entender a elaboração de um modelo inclui um domínio fonte e um domínio alvo que compartilham atributos e partes de estruturas. (KRAPAS et al, 1997) e as relações que se estabelecem entre os dois domínios são relações de analogia, portanto “as relações analógicas são o coração dos modelos”, pois por meio delas é que os modelos mentais são construídos.

Duit e Glynn consideram as analogias como ferramentas de aprendizagem a serem utilizadas, com as devidas precauções, pelos professores, para incitar processos de raciocínio em seus alunos (KRAPAS et al, 1997).

Particularmente acreditamos que o raciocínio analógico seja indispensável na aprendizagem de conceitos científicos, embora finalizada a fase de aquisição do conceito, o aprendiz deva se emancipar da analogia inicial, pois o conceito uma vez integrado e operante na estrutura cognitiva do sujeito passa a estabelecer novas relações e conexões que lhe conferem identidade e sentidos próprios, independente das analogias utilizadas inicialmente para a sua apropriação por parte do aprendiz.

Da revisão feita do artigo “Should physicists preach what they practice? Constructive modelling in doing and learning physics.” (NERSESSIAN, 1995) destacamos que para Nersessian “teremos mais sucesso treinando estudantes a pensar cientificamente se eles forem

ensinados, explicitamente, a como se engajar nas práticas de modelagem daqueles considerados experts em física”.

Nersessian propõe que ser expert em física requer facilidade em práticas de modelagem construtiva, além dos conhecimentos de conteúdos específicos. (KRAPAS et al, 1997) Para ela, a “modelagem construtiva é um processo de raciocínio integrador que emprega modelagem visual e analógica e experiências de pensamento, criando e transformando representações informais dos problemas”.

Nersessian em seu trabalho de estudos de caso da história da ciência (NERSESSIAN, 1995) apresenta um exemplo de modelagem construtiva realizada por Maxwell a partir dos modelos herdados de Faraday (KRAPAS et al, 1997).

Da revisão feita do artigo “Um studio piloto sobre representaciones mentales , imágenes, proposiciones y modelos mentales respecto al concepto de campo eletromagnético em alumnos de Física general, estudiantes de postgrado y físicos profesionales.” (GRECA e MOREIRA, 1996) que investigou os modelos mentais de alunos universitários acerca do conceito de campo eletromagnético, destacamos a conclusão dos autores: “Os resultados obtidos sugerem que nos cursos introdutórios universitários de física a maioria dos alunos trabalha com proposições não integradas ou não interpretadas em um modelo mental. As proposições que eles usam são definições e fórmulas manipuladas mecanicamente para resolver problemas ou questões. Alguns, no entanto, dão evidências de construção de modelos e isso parece caracterizar uma aprendizagem significativa” (MOREIRA 1997).

Inferimos de nossa experiência em sala de aula que isso ocorra em função de um não engajamento psicológico do aprendiz na tentativa de compreender o conceito, concentrando seu foco na superficialidade da operacionalização das fórmulas para a resolução mecânica dos exercícios dos exames, o que aponta também para a fragilidade e inadequação do nosso modelo de ensino e avaliação nessas instâncias.

Acerca da relação entre a aprendizagem significativa e a modelagem, Moreira pontua:

“A aprendizagem do aluno é tanto mais significativa quanto maior for sua capacidade de modelar. Física é uma ciência de modelos e a modelagem é uma atividade sistemática dos físicos para construir e aplicar o conhecimento científico. Aprender Física implica, então, aprender o jogo da modelagem.” (MOREIRA 1997).

O artigo (KRAPAS et al, 1997) continua sua revisão apresentando as categorias de modelo distinguidas por Gilbert e Boulter no artigo “Learning science through models and modelling” (GILBERT e BOULTER, 1998, apud KRAPAS):

1) Modelo mental

Representação pessoal, privada de um alvo.

2) Modelo expresso

Modelo mental que é expresso por um indivíduo por meio da ação, fala ou escrita.

3) Modelo consensual

Modelo expresso, já submetido e avalizado por um grupo social.

4) Modelo pedagógico

Um modelo especialmente construído para auxiliar na compreensão de um modelo consensual.

Para Gilbert e Boulter a educação em ciências deveria incluir tanto a aprendizagem dos modelos quanto uma reflexão sobre o papel dos modelos, e ainda a aprendizagem dos processos de modelagem (KRAPAS et al, 1997).

Para Gilbert e Boulter o uso de modelos pedagógicos visa então promover “caminhos intelectuais” específicos de compreensão dos modelos consensuais pelos estudantes, de tal modo que “o modelo pedagógico se torna a fonte a partir da qual se desenvolve um modelo mental aceitável do modelo consensual” (KRAPAS et al, 1997).

Por fim ressaltamos a conclusão da autora de que há a necessidade de se elaborar referenciais teóricos que fundamentem as pesquisas que têm por meta compreender os processos mentais de modelização na aquisição de conceitos no processo de ensino-aprendizagem de ciências e desenvolver e implementar estratégias pedagógicas que conduzam a uma aprendizagem satisfatória (KRAPAS et al, 1997).

A seguir, discutiremos a questão da modelização e da transposição didática, por meio da revisão do texto “Modelização e Transposição Didática” de Alice Lopes (LOPES, 1999).

A prática científica, o conhecimento científico e o conhecimento escolar são distintos, em natureza e essência, cada um com características e identidades próprias, e essa distinção é que nos leva à necessidade de transpor didaticamente o conhecimento científico em conhecimento escolar (LOPES, 1999).

Entre os filósofos da ciência há diversas posturas em relação à diferenciação entre prática e conhecimento científico. Começando com os trabalhos de Popper que organizam critérios de distinção entre ciência e não-ciência, práticas científicas e não-científicas e com as contribuições dos trabalhos de Lakatos, distingue-se que o método de descoberta científica não é linear e sistemático como o método de justificativa dessa descoberta.

Popper e Lakatos analisam o tratamento judicativo que o cientista dá às suas descobertas. Esse tratamento transforma o objeto da descoberta em um novo objeto, “o objeto justificado”, formatado para a apresentação em adequação aos moldes exigidos pela comunidade científica.

Embora essa questão tenha sido objeto de análise de Popper e Lakatos, ela não constitui o cerne, o foco principal da investigação deles, ao contrário das investigações de Feyerabend. Feyerabend se debruça mais especificamente sobre esta questão, usando um discurso “polêmico” destaca, por exemplo, a característica “sanitarizada”, “pasteurizada” que o conhecimento científico adquire após o tratamento judicativo, e reforça, explicita, a

diferença entre o método de descoberta e o método de justificativa, atribuindo ao método da descoberta um caráter de pluralismo metodológico (alcançado de “vale-tudo”). O que gera por leituras equivocadas o falso confronto, divergência, entre o discurso de Popper e o de Feyerabend neste ponto, pois para Popper as exigências de sistematização às quais deve o conhecimento que se pode considerar científico atender são **pós-descoberta** (fase de justificação, formatação de sua descoberta para a submissão à validação da comunidade científica), o que, portanto, não entra em conflito com o “vale-tudo” feyerabendiano que se refere à **fase de descoberta**.

Portanto, da descoberta para a justificativa e sistematização, o objeto de conhecimento da descoberta se transforma, adquirindo características próprias que fazem dele um novo objeto de conhecimento científico.

Depois disso, esse objeto de conhecimento científico chega ao contexto escolar e passa por um novo processo que envolve os vários personagens que atuam nesse contexto, cada um, a sua vez, contribuindo para sua modificação e demandando modificações nesse objeto.

O professor digere esse conhecimento para servi-lo aos aprendizes, como um cantor (comparação usada por Lopes) que interpreta uma canção que não é de sua autoria. O aprendiz agrega à situação de ensino elementos que traz consigo, interferindo, modificando a situação. A comunidade com suas demandas e mecanismos de regulação reforçam abordagens e tratamentos que são dados ao objeto, legitimando o processo (LOPES, 1999).

No contexto escolar se estabelece uma dinâmica de modificações (conhecimento científico → conhecimento escolar) pelas quais passa o conhecimento científico, portanto, o conhecimento científico sofre modificações que o transformam em um novo objeto, objeto do conhecimento escolar.

“A constituição de um conhecimento escolar propriamente dito surge com a transposição didática, cuja função é a de tornar os saberes transmissíveis e assimiláveis. Essa interpretação garantiria a constituição de uma epistemologia escolar, por isso defende-se que o termo mediação didática é mais apropriado que transposição.” (LOPES, 1999)

Concordamos com a autora quando ela afirma que essa transformação do conhecimento científico em conhecimento escolar se dá essencialmente no processo de transposição didática. Por causa da função transformadora que essa transposição opera, ela prefere chamá-la de mediação didática (na tentativa de explicitar o caráter transformador que ela quer destacar nesse processo, contrapondo a impressão de passividade e inalteração que o termo “transposição didática” lhe transmite).

Na física a mediação didática é feita principalmente por meio das metáforas.

Duit (1996 apud LOPES, 1999) define analogia como comparação de estruturas entre dois domínios, enquanto que a metáfora ele define como comparação implícita que privilegia qualidades não coincidentes. Toda boa analogia tem um certo aspecto metafórico de surpresa que lhe confere a capacidade de motivar os alunos (1996 apud KRAPPAS, 1999). Por isso, segundo Duit, os professores devem partir das metáforas para as analogias.

Vantagens do uso das analogias no ensino, segundo Duit (1996 apud LOPES, 1999):

1. Abrem novas perspectivas de ensino;
2. Facilitam a compreensão de conceitos abstratos por similaridades com conceitos concretos;
3. Propiciam a visualização de conceitos abstratos;
4. Podem motivar os estudantes;
5. Forçam o professor a buscar os conhecimentos prévios dos estudantes;
6. Podem também revelar conceitos prévios dos alunos sobre áreas já estudadas.

Desvantagens do uso das analogias no ensino, segundo Duit (1996 apud LOPES, 1999):

1. Possibilidade de que características do domínio que não são compartilhadas sejam atribuídas ao conceito alvo;

2. Possibilidade de transferência de concepções prévias sobre o conceito domínio para o conceito alvo;
3. As similaridades superficiais podem se sobrepor aos aspectos estruturais provocando compreensão equivocada do conceito alvo.

Lopes aponta como limitação na análise de Duit (1996 apud LOPES, 1999) o fato de ele ter-se atido ao aspecto de, por meio do uso de uma analogia com algo que nos é familiar, sermos poupados do desconforto que seria gerado ao nos depararmos cruamente com o que é novo, desconhecido, intimidador e desafiador, mas não ter analisado o problema de se aproximar concepções científicas a concepções cotidianas, o que pode impedir que o aprendiz compreenda as imensas diferenças entre os dois contextos.

Além disso Lopes pontua:

No nível básico de ensino, a ausência de maior profundidade da matematização nas ciências físicas exige o maior apelo às metáforas, que **tendem**² a se constituir em distorções do conhecimento científico, reforçando, indevidamente, a continuidade com o conhecimento cotidiano. (LOPES, 1999)

Concordamos quando a autora aponta essa tendência, e julgamos tal desfecho evitável, quando se toma as precauções adequadas (MOL, 1999) na elaboração das metáforas.

Queremos também arrazoar o aspecto levantado por Lopes quando ela pontua que: “No nível básico de ensino, a ausência de maior profundidade da matematização nas ciências físicas exige o maior apelo às metáforas” estendendo essa questão aos resultados (GRECA e MOREIRA, 1996) obtidos por Greca e Moreira (na investigação dos modelos mentais de alunos universitários acerca do conceito de campo eletromagnético) “que sugerem que nos cursos introdutórios universitários de física a maioria dos alunos trabalha com proposições não integradas ou não interpretadas em um modelo mental. As proposições que eles usam são

² Grifo nosso.

definições e fórmulas manipuladas mecanicamente para resolver problemas ou questões. Alguns, no entanto, dão evidências de construção de modelos e isso parece caracterizar uma aprendizagem significativa” (GRECA e MOREIRA, 1996), essa conclusão (além da nossa própria experiência na formação em física) representa para nós um forte indício de que o alcance de profundidade na matematização da física não garante a compreensão dos modelos físicos, podendo, até mesmo, corresponder apenas a um reforço ao mero manuseio matemático das equações, sem qualquer consciência das implicações e do significado físico por trás delas. Não desconsideramos a possibilidade de que em algumas áreas da física nos baste a coerência dos resultados matemáticos (sem qualquer compromisso de interpretação ou implicações num modelo físico), no entanto, essa possibilidade (de os resultados matemáticos não interpretados bastarem) não pode ser cogitada para os níveis básicos de ensino de física, nos quais a correspondência dos resultados a um modelo e sua interpretação e implicações fenomenológicas são sempre desejáveis (até mesmo objetivadas) e é para atingir esse objetivo que freqüentemente lançamos mão das metáforas e analogias, o que não deve implicar a distorção do conhecimento científico, nem tampouco uma postura de continuidade do conhecimento cotidiano, uma vez que observemos os cuidados na elaboração dessas metáforas e analogias. Levantamos aqui, inclusive, que os resultados obtidos por Greca e Moreira (GRECA e MOREIRA, 1996) possam, entre outros fatores, dever-se ao fato de que os professores desses estágios acadêmicos mais avançados raramente ou nunca apelem para o uso de metáforas.

Além disso, concebemos como provisório o estágio no qual o estudante se ampara nas analogias e metáforas, pois espera-se que, após a apropriação do novo objeto de conhecimento, o estudante se independa da ferramenta de ensino utilizada na apresentação do mesmo e passe a trabalhar com o “produto final” por ele elaborado, que, “com sorte, se tudo deu certo”, deve corresponder satisfatoriamente ao modelo científico consensual (KRAPAS et

al, 1997) daquele objeto de conhecimento. Isto é, propomos trabalhar com a hipótese que a analogia deva ser usada apenas como uma “ama de leite” conduzindo o aprendiz a um estado de familiaridade com o novo conceito, a partir de então a “analogia que desempenhou o papel de aia” deve ser abandonada e o conceito reapropriado com base em suas características puras e em suas especificidades, atingindo assim níveis mais profundos de significação, salientando outros aspectos do conceito com os quais não se havia estabelecido analogias, ampliando assim a potência do conceito e reforçando seu estabelecimento integral emancipado da analogia que lhe serviu de aia. O que talvez seja uma proposta de conciliação entre se usar a analogia como facilitador de aprendizagem e se usar a analogia pra desenvolver no aprendiz a competência (pelo menos pelo exercício do contato com a analogia) do tratamento e raciocínio analógicos.

Lopes aponta que, diferentemente de outras linhas de análise do uso das analogias, que de maneira geral concentram seu foco na investigação do potencial facilitador que a analogia ofereceria ao processo de aquisição de novos conceitos no processo ensino-aprendizagem, Nersessian (1995 apud LOPES, 1999) vê as analogias como um elemento constituinte do escopo de objetivos do ensino de ciência, já que as técnicas de abstração são a base da construção do próprio conhecimento científico.

Quanto à essa proposta nersessiana, Lopes observa:

Nas ciências físicas, o uso da metáfora é muito bem situado. Existe como forma de expressão de conceitos que são construídos em estreita relação com a linguagem formal. A linguagem matemática possui nas ciências um caráter de fundamento, constituidor de teorias, mas a expressão em linguagem não-formal, necessária para a comunicação de resultados e explicações, se utiliza de metáforas... Por outro lado, a metáfora pode ser o marco inicial de um processo científico, como no exemplo de Maxwell... Todavia sempre que o uso da metáfora é feito para que não enfrentemos os raciocínios formais ou, ..., sempre que o uso da metáfora é feito sem que a consideremos como tal, incorremos em sérios problemas epistemológicos... Não se trata do uso de “técnicas de abstração”, em estreita relação com os processos racionais, como descreve Nersessian. Mas do uso de imagens que têm por objetivo um didatismo anticientífica. (LOPES, 1999)

Sobretudo o que gera cuidados quando se aborda a questão da transposição didática é a fronteira tênue entre o fazer adaptações ao conhecimento científico no intuito de socializá-lo, facilitar-lhe a compreensão, e o fazer-se um didatismo anticientífico que distorce os conceitos (LOPES, 1999).

Sobre este ponto nevrálgico, sutil e frágil da transposição didática, Lopes aponta duas posições distintas:

a) a escola não tem como superar essa contradição, pois o conhecimento científico em si apresenta uma dificuldade superável apenas pela via da simplificação e, por conseguinte, da distorção de conceitos, cabendo apenas às instâncias eminentemente produtoras de conhecimento o trabalho de veiculação do mesmo de forma correta; (LOPES, 1999)

b) a única forma de superar essa contradição é resgatar na escola seu papel de transmissora/reprodutora de conhecimentos produzidos em outras instâncias procurando estabelecer a correspondência entre conhecimento escolar e conhecimento científico. (LOPES, 1999)

Ao aspecto da letra “a” ela se opõe, rotulando-o de vulgarização da ciência, interpondo que ao invés de se trabalhar na adaptação do conhecimento poder-se ia investigar o porquê o aluno não compreende o conhecimento científico apresentado tal qual ele é, com o objetivo de se chegar à suplantação destes obstáculos epistemológicos. E quanto ao aspecto da letra “b”, Lopes se opõe a que se estabeleça que a escola seja uma instância meramente reprodutiva, propondo, ao invés disso, uma escola que assuma um papel produtor/reelaborador socializador de conhecimento, assumindo nessa questão a ótica marxista de que “o consumidor também produz” (aqui o consumidor se refere à escola que consome conhecimento científico e que pode, portanto, ser também produtora de conhecimento).

Lopes conclui que: “Cabe à escola o papel de tornar acessível um conhecimento para que possa ser transmitido... O trabalho de didatização acaba por implicar, necessariamente, uma atividade de produção original.”

A seguir, comentamos o artigo “Analogias na educação em ciências: contributos e desafios” (DUARTE, 2005) no qual a autora faz uma extensa revisão do tema.

Duarte aponta as seguintes potencialidades mais frequentemente atribuídas, pelos autores revisados, à analogia:

Potencialidades atribuídas à analogia (DUARTE, 2005):

1. Levam à activação do raciocínio analógico, organizam a percepção, desenvolvem capacidades cognitivas como a criatividade e a tomada de decisões;
2. Tornam o conhecimento científico mais inteligível e plausível, facilitando a compreensão e visualização de conceitos abstractos, podendo promover o interesse dos alunos;
3. Constituem um instrumento poderoso e eficaz no processo de facilitar a evolução ou a mudança conceptual;
4. Permitem perceber, de uma forma mais evidente, eventuais concepções alternativas;
5. Podem ser usadas para avaliar o conhecimento e a compreensão dos alunos.

Duarte aponta também as seguintes dificuldades/problemas mais frequentemente atribuídas, pelos autores revisados, à analogia:

Dificuldades/Problemas atribuídos à analogia (DUARTE, 2005):

1. A analogia pode ser interpretada como o conceito em estudo, ou dela serem apenas retidos os detalhes mais evidentes e apelativos, sem se chegar a atingir o que se pretendia;
2. Pode não ocorrer um raciocínio analógico que leve à compreensão da analogia;
3. A analogia pode não ser reconhecida como tal, não ficando explícita a sua utilidade;

4. Os alunos podem centrar-se nos aspectos positivos da analogia e desvalorizar as suas limitações.

Duarte conclui que, quanto à utilização e exploração didática das analogias, o que parece predominar são estudos no âmbito da física (quanto às áreas disciplinares investigadas) e que os estudos centram-se essencialmente no ensino secundário e que de uma forma geral os autores referem resultados positivos. Quanto a esse último aspecto ela faz a seguinte observação:

Estes resultados, fruto da revisão efectuada, parecem estar em concordância com os referidos nas revisões feitas por Dagher (1995b) e por Duit (1991), e podem constituir um sólido apoio à conclusão de que o raciocínio analógico pode facilitar a aprendizagem. Contudo, e como nos alerta Dagher (1995b), a aprendizagem via ensino com analogias não pode ser vista apenas em função da utilização de analogias, mas também de como elas são utilizadas, por quem, com quem e como são avaliadas. (DUARTE, 2005)

Por fim, Duarte alerta: “A utilização de analogias nos livros de texto escolares implica, portanto, acrescidos cuidados aos autores dos livros de texto, mas também aos professores quando procedem à sua exploração didáctica.” (DUARTE, 2005)

A seguir adotamos a seguinte estratégia: selecionamos três livros e um artigo e os apresentamos por meio de seus próprios resumos para depois introduzirmos a análise que fizemos de alguns trechos desse material, agrupados segundo critérios que serão explicitados a cada seção.

Nessa seleção destacamos alguns trechos que contêm apontamentos contundentes acerca da função protagonista que a analogia desempenha na cognição humana. Esses apontamentos vão muito além do escopo deste trabalho, mas não nos furtamos a reproduzi-

los, com o intuito de apresentá-los como argumento de alguma plausibilidade psicológica, neurológica, pedagógica ou didática para que se deva incluir como objetivo do processo ensino-aprendizagem, o desenvolvimento no aprendiz da habilidade de criar analogias, para que se deva fazer uso instrucional da analogia e para que se possa inferir que o uso instrucional da analogia realmente implique num desenvolvimento no aprendiz da habilidade de criar analogias.

O primeiro livro escolhido por nós nessa seleção é “Similarity and Analogical Reasoning” (VOSNIADOU; ORTONY, 1989) escolhido, porque ele faz uma revisão bibliográfica da área. O resumo do livro apresenta:

This interdisciplinary volume explores current development in research and theory from psychological, computational, and educational perspectives, and considers their implications for learning and instruction. The distinguished contributors examine the psychological processes involved in reasoning by similarity and analogy, the computational problems encountered in simulating analogical processing in problem solving, and the conditions promoting the application of analogical reasoning in everyday situations.³

Num dos capítulos do livro é feita a distinção entre analogia e similaridade e duas abordagens para a classificação dos tipos de similaridades são apresentadas:

- Surface similarity and deep similarity: when we argue that two things are similar in terms of readily accessible dimensions that are apparent on the “surface” or in terms of “deeper” underlying properties that are not.⁴
- Global and dimensional similarity: Being similar in terms of some holistic perception or in a more constrained way.⁵

Essas duas abordagens são apresentadas como sendo não-excludentes.

³ Esta obra interdisciplinar aborda o avanço atual na pesquisa e teoria oriundas das perspectivas psicológica, computacional e educacional, e considera suas implicações na aprendizagem e no ensino. Os distintos autores examinam os processos psicológicos envolvidos no raciocínio analógico e no raciocínio por similaridade, examinam também os problemas computacionais da simulação do processamento analógico envolvido na resolução de problemas, e examinam as condições que promovem a aplicação do raciocínio analógico nas situações cotidianas.

⁴ Similaridade de superfície (superficial) e similaridade de profundidade (profunda): quando consideramos que duas coisas são similares tomando por base dimensões de pronto acesso que aparentemente estão na “superfície” dos objetos ou tomando como base propriedades mais “profundas”, respectivamente.

⁵ Similaridade global e similaridade dimensional: quando se considera similar em termos de alguma percepção mais holística ou quando se considera similar num aspecto mais restrito, respectivamente.

Uma outra distinção entre os tipos de similaridades ainda é apontada:

Object attributes (one-place predicates characterizing simple descriptions of objects) and relations (two-or-more-place predicates characterizing relations).⁶

O texto distingue ainda dois tipos de analogias, um em que os itens relacionados analogicamente vêm de domínios remotos ou conceitualmente distintos (chamado *between-domain* ou *metaphorical analogies*⁷), e o outro tipo (chamado *within-domain* ou *literal analogies*⁸) quando os itens analogicamente relacionados são do mesmo domínio ou pelo menos de domínios conceitualmente muito próximos.

O próximo livro, “*Analogical Mind*” (GENTNER; HOLYOAK, KOKINOV, 2001), composto de uma coletânea de artigos, foi escolhido por causa do amplo espectro de áreas relacionadas ao tema da analogia que ele aborda. Seu resumo apresenta:

This is the first book to span the full range of disciplines concerned with analogy. Its contributors represent cognitive, developmental, and comparative psychology; neuroscience; artificial intelligence; linguistics; and philosophy.

The book is divided into three parts. The first part describes computational models of analogy as well as their relation to computational models of other cognitive processes. The second part addresses the role of analogy in a wide range of cognitive tasks, such as forming complex cognitive structures, conveying emotion, making decisions, and solving problems. The third part looks at the development of analogy in children and the possible use of analogy in nonhuman primates.⁹

O livro apresenta o processo de pensamento analógico dividido em etapas. O consenso acerca desse desmembramento é, como o próprio texto cita, comum entre os pesquisadores e aparece recorrentemente também nas demais publicações que selecionamos. Reproduzimos a seguir o trecho onde ele apresenta esse desmembramento.

⁶ Similaridade de atributos objetos (predicados caracterizando descrições simples dos objetos) e similaridades relacionais (dois ou mais predicados caracterizando relações).

⁷ Chamado de analogias inter-domínios ou metafóricas

⁸ Chamado de analogias intra-domínios ou literais

⁹ Este é o primeiro livro que varre todo o espectro de disciplinas relacionadas com a analogia. Seus autores representam a psicologia cognitiva, desenvolvimentalista e comparativa; neurociência; inteligência artificial; lingüística; e filosofia. O livro é dividido em três partes. A primeira parte descreve modelos computacionais de analogia e sua relação com os modelos computacionais de outros processos cognitivos. A segunda parte enfoca o papel da analogia num amplo leque de tarefas cognitivas, tais como a formação de estruturas cognitivas complexas, transferência emotiva, tomada de decisão, e resolução de problema. A terceira parte foca o desenvolvimento da analogia na criança e o possível uso de analogia por primatas não-humanos.

Since the late 1980s, the efforts of many cognitive scientists have contributed to an emerging consensus on many issues concerning analogy. The process of analogical thinking can be usefully decomposed into several basic constituent processes. In a typical reasoning scenario, one or more relevant analogs stored in long-term memory must be accessed. A familiar analog must be mapped to the target analog to identify systematic correspondences between the two, thereby aligning the corresponding parts of each analog. The resulting mapping allows analogical inferences to be made about the target analog, thus creating new knowledge to fill gaps in understanding. These inferences need to be evaluated and possibly adapted to fit the unique requirements of the target. Finally, in the aftermath of analogical reasoning, learning can result in the generation of new categories and schemas, the addition of new instances to memory, and new understandings of old instances and schemas that allow them to be accessed better in the future.¹⁰

O próximo artigo, “Neural principles of memory and a neural theory of analogical insight” (LAWSON, LAWSON, 1993), foi selecionado porque nele (e no livro seguinte do mesmo autor) é apresentado um estudo neurológico do processamento da analogia, Lawson apresenta também a implicação desses resultados para o ensino e para a aprendizagem. O resumo do artigo apresenta:

Grossberg's principles of neural modeling are reviewed and extended to provide a neural level theory to explain how analogies greatly increase the rate of learning and can, in fact, make learning and retention possible. In terms of memory, the key point is that the mind is able to recognize and recall when it is able to match sensory input from new objects, events, or situations with past memory records of “similar” objects, events, or situations. When a match occurs, an adaptive resonance is set up in which the synaptic strengths of neurons are increased; thus a long term record of the new input is formed in memory. Systems of neurons called outstars and instars are presumably the underlying units that enable this to occur. Analogies can greatly facilitate learning and retention because they activate the outstars (i.e., the cells that are sampling the to-be-learned pattern) and cause the neural activity to grow exponentially by forming feedback loops. This increased activity insures the boost in synaptic strengths of neurons, thus causing storage and retention in long-term memory (i.e., learning).¹¹

¹⁰ Desde o final da década de 80, os esforços de muitos cientistas cognitivistas têm contribuído para um emergente consenso acerca de várias questões concernentes à analogia. O processo de raciocínio analógico pode ser útilmente decomposto em vários processos constituintes básicos. Numa típica situação onde a habilidade de raciocinar é demandada, uma ou mais analogias relevantes armazenadas na memória de longo prazo têm que ser acessadas. Uma analogia familiar deve ser emparelhada à analogia alvo para que se possa identificar as correspondências sistemáticas entre as duas, alinhando, desse modo, as partes correspondentes de cada analogia. O mapeamento resultante permite que inferências analógicas sejam feitas acerca do domínio alvo, criando assim novos conhecimentos que podem preencher lacunas na compreensão. Essas inferências precisam ser avaliadas e possivelmente adaptadas para se ajustar às características específicas do domínio alvo. Finalmente, como consequência do raciocínio analógico, a aprendizagem pode resultar na geração de novas categorias e esquemas, no acréscimo de novas instâncias à memória, e em novas interpretações de antigas instâncias e esquemas que os permitem ser melhor acessados no futuro.

¹¹ Os princípios de modelamento neural de Grossberg são examinados e estendidos para prover uma teoria a nível neural para explicar como as analogias aumentam sensivelmente a taxa de aprendizagem e, de fato, fazem

Os autores afirmam que é a analogia quem possibilita a aprendizagem e a retenção e define aprendizagem como armazenamento e retenção na memória de longo prazo.

A seguir reproduzimos o resumo do livro “Neurological Basis of learning, the development and Discovery” (LAWSON, 2003) do mesmo autor do artigo anterior:

This book is for practicing science and math educators and researchers, including graduate students, science and math teachers, and other teachers interested in developing a sound theoretical and empirical basis for curriculum development and instruction grounded in what is known about how the brain works and develops. It links neural physiology and neural network theory with cognition and instructional practice. This book provides examples of scientifically-based research in education as a guide for science and math educators and graduate students.¹²

A seguir, dos textos anteriormente selecionados, reproduzimos alguns trechos que pudessem ser evocados como argumento de plausibilidade para a nossa abordagem, escolhidos segundo os seguintes critérios:

2.2.1 - Primeiro critério: analogia e cognição

com que a aprendizagem e a retenção sejam possíveis. Em termos de memória, o ponto principal é que a mente é capaz de reconhecer e acionar quando é possível emparelhar estímulos sensoriais oriundos de novos objetos, eventos ou situações com memórias anteriores de objetos, eventos ou situações “similares”. Quando um emparelhamento ocorre, uma ressonância adaptativa é ativada na qual as forças sinápticas dos neurônios são reforçadas, e por consequência um duradouro registro daquele novo objeto é formado na memória. Sistemas de neurônios chamados “estrelas externas” e “estrelas internas” são presumidamente as unidades-base que fazem com que isso ocorra. Analogias podem significativamente facilitar a aprendizagem e a retenção porque elas ativam as “estrelas externas” (i.e., as células que atuam no padrão de aprendizagem) e fazem com que atividade neural aumente exponencialmente por gerar “loops” recorrentes. Esse crescimento da atividade assegura o aumento da força sináptica dos neurônios, provocando armazenamento e retenção na memória de longo prazo (i.e., aprendizagem).

¹² Este livro tem como público alvo, educadores na área de ciências e matemática e pesquisadores, incluindo estudantes de graduação, professores de ciências e matemática, e outros professores interessados em desenvolver uma sólida base teórica e empírica para o desenvolvimento de currículo e ensino pautado no que já se descobriu acerca de como o cérebro funciona e se desenvolve. Relaciona fisiologia neural e a teoria de rede neural à cognição e prática instrucional. Esse livro fornece exemplos de pesquisa em educação com base científica como um guia para educadores na área de ciências e matemática e estudantes de graduação.

Trechos que destacam o papel crucial da analogia na cognição no sentido de (com o intuito de) validar a idéia de que se possa ter como objetivo instrucional o desenvolvimento no aprendiz da habilidade de criar analogias.

a) Do livro “Similarity and Analogical Reasoning” (VOSNIADOU; ORTONY, 1989)

Similarity and analogy are fundamental in human cognition. They are crucial for recognition and classification, and have been associated with scientific discovery and creativity. Any adequate understanding of similarity and analogy requires the integration of theory and data from diverse domains.¹³

The ability to perceive similarities and analogies is one of the most fundamental aspects of human cognition. It is crucial for recognition, classification, and learning, and it plays an important role in scientific discovery and creativity. Similarity and analogy have received increasing attention from cognitive scientists. This growth of interest is related to the realization that human reasoning does not always operate on the basis of content-free general inference rules, but, rather, is often tied to particular bodies of knowledge and is greatly influenced by the context in which it occurs. In a reasoning system of this kind, learning does not get accomplished by merely adding new facts and applying the same inference rules to them. Rather, successful learning often depends on the ability to identify the most relevant bodies of knowledge that already exist in memory so that this knowledge can be used as the starting point for learning something new. All the chapters in this volume have something to say about the role that similarity and analogy play in this process.¹⁴

Em outro artigo do mesmo compêndio, os autores Smith e Osherson atribuem a habilidade de classificar objetos à capacidade de relacionar as similaridades que o novo objeto mantém com um protótipo daquela determinada classe para o sujeito.

¹³ Similaridade e analogia são fundamentais na cognição humana. Elas são cruciais para o reconhecimento e a classificação e têm sido associadas com o processo de descoberta científica e com a criatividade. Qualquer compreensão adequada a respeito da similaridade e da analogia requer uma integração da teoria e dos dados de diversas áreas.

¹⁴ A habilidade de compreender similaridades e analogias é um dos mais fundamentais aspectos da cognição humana. É crucial para o reconhecimento, classificação, e aprendizagem, e desempenha um importante papel nas descobertas científicas e na criatividade. A similaridade e a analogia têm recebido cada vez mais atenção por parte dos cientistas cognitivistas. Esse crescimento de interesse está relacionado à percepção de que o raciocínio humano não opera sempre com base em inferências gerais desvinculadas do conteúdo, e sim, frequentemente está vinculado a troncos específicos do conhecimento e é significativamente influenciado pelo contexto em que isso ocorre. Num sistema de raciocínio desse tipo, a aprendizagem não acontece por mera adição de novos fatos e aplicação das mesmas regras de inferência a esses fatos. A aprendizagem bem sucedida depende muitas vezes da habilidade de identificar os mais relevantes troncos de conhecimento já presentes na memória para que esse conhecimento seja usado como base para a aprendizagem de algo novo. Todos os capítulos desse livro têm algo a dizer sobre o papel da similaridade e da analogia nesse processo.

When a problem cannot be solved with reference to an existing general rule or schema, people start searching for an analog that can provide a solution to the problem that satisfies the problem's goals without violating the target's solution constraints.¹⁵

Research on analogical access has important implications for training and instruction.¹⁶

Brian Ross's suggestion to enhance surface similarity among problems of the same problem type in order to increase the probability that they are placed in the same general category has its source in the finding that surface similarity is an important determinant of access.¹⁷

Given that novices often use analogical reasoning in problem solving, one important question with serious implications for learning is whether the successful application of analogical reasoning helps novices learn general rules and build schemata they lack. Many researchers believe so, although the question of how and when such generalizations are made is far from clear.¹⁸

A generalized rule is induced after the analogy is used to form an abstract problem schema.¹⁹

Reasoning by similarity and analogy itself can make the knowledge base more flexible and facilitate the learning of general rules and the acquisition of new schemata.²⁰

An analogy can produce new knowledge about the structure of the target system, in this respect, analogy can become an important mechanism in the acquisition of new knowledge. Children use analogical reasoning to acquire new knowledge about a domain just like adults do. What develops is not the analogical mechanism itself but the conceptual system upon which this mechanism operates.²¹

¹⁵ Quando um problema não pode ser resolvido por inferência a uma regra ou um esquema já existente, as pessoas começam a buscar uma analogia que forneça uma solução ao problema que satisfaça as demandas do problema sem violar as restrições da solução alvo.

¹⁶ Pesquisas acerca de como ocorre a mobilização de uma analogia têm importantes implicações para a instrução e o exercício.

¹⁷ A sugestão de Brian Ross de ressaltar a similaridade de superfície entre os problemas de um mesmo tipo para aumentar a probabilidade de eles serem colocados na mesma categoria geral tem sua origem na crença de que a similaridade de superfície é um importante fator determinante na hora de acessar um dado na memória.

¹⁸ Posto que novatos freqüentemente usam o raciocínio analógico na resolução de problemas, uma questão importante, com sérias implicações para a aprendizagem, é se a aplicação bem sucedida do raciocínio analógico ajuda os novatos a aprender regras gerais e esquemas que lhes faltam. Muitos pesquisadores acreditam que sim, embora a questão sobre como e quando tais generalizações são feitas está longe de ser esclarecida.

¹⁹ Uma regra generalizada é induzida depois que uma analogia é usada para formar um esquema a respeito de um problema abstrato.

²⁰ Raciocinar por similaridade e analogia por si só pode fazer com que o conhecimento de base se torne mais flexível e facilite a aprendizagem de novas regras e a aquisição de novos esquemas.

²¹ Uma analogia pode produzir novo conhecimento sobre a estrutura do sistema alvo, nesse sentido, a analogia pode se tornar um importante mecanismo na aquisição de novo conhecimento. Crianças usam o raciocínio analógico para adquirir novo conhecimento sobre domínios do mesmo jeito que os adultos. O que amadurece não é o mecanismo de analogia em si, mas o sistema conceitual sobre o qual esse mecanismo opera.

O texto também destaca alguns cuidados em relação ao uso de analogias:

Whereas analogies help novices gain a preliminary grasp of difficult concepts, they may later become impediments to fuller or more correct understandings.²²

It appears that analogical reasoning can fulfill a number of useful functions to facilitate learning. What is still lacking, however, is a systematic treatment of the differences and similarities among these various functions and of the unique problems and/or advantages each one presents.²³

b) Do livro “Analogical Mind” (GENTNER; HOLYOAK, KOKINOV, 2001)

Analogy has been the focus of extensive research in cognitive science over the past two decades. Through analogy, novel situations and problems can be understood in terms of familiar ones. Indeed, a case can be made for analogical processing as the very core of cognition.²⁴

What cognitive capabilities underlie our fundamental human achievements? The ability to pick out patterns, to identify recurrences of these patterns despite variation in the elements that compose them, to form concepts that abstract and reify these patterns, and to express these concepts in language. Analogy, in its most general sense, is this ability to think about relational patterns. Analogy lies at the core of human cognition.²⁵

The progression from highly specific single-case analogies to more abstract concepts or schemas is one of the most powerful roles that analogy plays in cognition. This progression has been observed not only for scientific, mathematical, and problem-oriented concepts but also for metaphorical concepts in everyday language.²⁶

²² Apesar de a analogia ajudar os novatos a superar uma dificuldade inicial de entender novos conceitos, elas podem mais tarde se tornarem um impedimento a uma compreensão mais profunda ou completa dos conceitos.

²³ Parece que o raciocínio analógico pode preencher várias e importantes funções no sentido de facilitar a aprendizagem. O que ainda está faltando, no entanto, é um tratamento sistemático das diferenças e similaridades entre essas várias funções e os problemas e/ou vantagens específicos que cada uma apresenta.

²⁴ A analogia tem sido o foco de uma extensa pesquisa em ciência cognitiva nessas duas últimas décadas. Por meio de analogia, novas situações e problemas podem ser compreendidos em termos de situações e problemas familiares. De fato, poderíamos até propor que o processamento analógico seja o aspecto crucial da cognição.

²⁵ Quais capacidades cognitivas subjazem a nossas aquisições humanas fundamentais? A habilidade de perceber padrões, identificar recorrências desses padrões a despeito de variações nos elementos que os compõem, formar conceitos que resumem e materializam esses padrões, e expressar esses conceitos por meio da linguagem. A analogia, no seu sentido mais geral, é essa habilidade de pensar sobre padrões relacionais. A analogia está no centro da cognição humana.

²⁶ A progressão entre a alta especificidade das analogias de uma situação particular para conceitos ou esquemas mais abstratos é um dos mais poderosos papéis que a analogia desempenha na cognição. Essa progressão tem sido observada não só em conceitos científicos, matemáticos e na resolução de problemas, mas também em conceitos metafóricos da linguagem cotidiana.

The role of analogy in thinking manifests itself in many different cognitive tasks, these include the use of metaphor, conceptual blends, translation, scientific reasoning, political debate, creative design, humor, empathy, computer-aided tutoring, decision-make and choice, mathematical problem-solving, high-level perception, memory recall and infant imitation.²⁷

Analog is certainly not the sole basis for cognition, but taken as a whole, these diverse manifestations of analogy support the claim that it forms a critical part of the core of cognition.²⁸

The philosopher Mary Hesse (1966) whose treatise on analogy in science argued that analogies are powerful forces in discovering and conceptual change.²⁹

Gick and Holyoak provide evidence that analogy can provide the seed for forming new relations categories, by abstracting the relational correspondences between examples into a schema for a class of problems. Analogy was viewed as a central part of human induction.³⁰

No trecho abaixo é destacado o papel da analogia na memória, qual seja, a memória é uma ilha de edição e essa edição é muitas vezes feita por meio da analogia.

Boicho Kokinov and Alexander Petrov take an integrative approach that tries to bring analogy and memory together. Their chapter addresses phenomena emphasized by constructivist approaches to memory, such as memory distortions and memory illusions, and show how these phenomena interact with analogy-making. They provide evidence for omissions, blending of episodes, intrusions from generic knowledge, and effects of context, priming, and order in analogical reminding, and they explain these phenomena in terms of interactions among memory, mapping, and perception.³¹

²⁷ O papel da analogia no pensamento se manifestas em diferentes tarefas cognitivas, o que inclui o uso de metáforas, fusões conceituais, traduções, raciocínio científico, debate político, produção criativa, humor, empatia, aquisição de habilidades no computador, tomada de decisão e escolhas, resolução de problemas matemáticos, percepção com alto grau de sofisticação, recuperação de informações armazenadas na memória, imitações comuns na infância.

²⁸ Certamente a analogia não é a única base da cognição, mas tomadas como um todo, essas diversas manifestações da analogia apóiam a idéia de que a analogia seja uma parte crítica no cerne da cognição.

²⁹ O tratado em analogia na ciência feito pela filósofa Mary Hesse (1966) argumenta que as analogias são forças poderosas nas descobertas e nas mudanças conceituais.

³⁰ Gick e Holyoak fornecem evidências de que a analogia pode prover a semente para a formação de novas categorias relacionais, por meio da abstração das correspondências relacionais entre exemplos de um esquema ou classe de problemas. A analogia é vista como uma parte central na habilidade humana de indução.

³¹ Boicho Kokinov e Alexander Petrov fazem uma abordagem integradora que tenta emparelhar analogia e memória. Os capítulos deles focam os fenômenos enfatizados por uma abordagem construtivista da memória, tais como distorções de lembranças e ilusões de memória, e mostram como esses fenômenos interagem com a capacidade de produzir uma analogia. Eles fornecem evidências para as omissões, fusão de episódios, invasões de conhecimentos gerais, e influências do contexto, priorização, e seqüenciamento das lembranças analógicas, e eles explicam esses fenômenos em termos de interações entre memória, mapeamento e percepção.

Experimental work described in Dunbar's chapter suggests that the task of producing meaningful analogs encourages deeper relational encodings than does simply comprehending an individual analog.³²

The chapter by Paul Thagard and Cameron Shelley explores the role played by analogy in situations that tap into emotions. These include the use of analogies as persuasive arguments, the use of metaphors in poetry, and the experience of empathy between one person and another.³³

Finally the book concludes with an essay by Douglas Hofstadter, in which he argues for a broad view of analogy as the very core of cognition. His chapter draws lines between analogy, high-level perception, and the formation of abstract categories. He emphasizes the fluidity of analogies and concepts _ the way in which they mold themselves to fit specific situations _ and suggests that this fluidity permits reminders that connect new experiences with memories of remote events that are relationally similar. Analogy, in the broad view taken in his chapter, encompasses tasks ranging from everyday application of simple concepts to the complex cross-linguistic mappings required to translate structured poetry from one language to another.³⁴

c) Do artigo “Neural principles of memory and a neural theory of analogical insight” (LAWSON, LAWSON, 1993)

Grossberg's principles of neural modeling are reviewed and extended to provide a neural level theory to explain how analogies greatly increase the rate of learning and can, in fact, make learning and retention possible.³⁵

d) Do livro “Neurological Basis of learning, the development and Discovery” (LAWSON, 2003)

³² O trabalho experimental descrito no capítulo de Dunbar sugere que a tarefa de produzir analogias significativas incentiva relações de dados mais profundas do que simplesmente a compreensão de uma analogia particular.

³³ O capítulo de Paul Thagard e Cameron Shelley explora o papel desempenhado pela analogia em situações que envolvem emoções. O que inclui o uso de analogias em argumentos de persuasão, o uso de metáforas na poesia, e na experiência de empatia de uma pessoa em relação à outra.

³⁴ Finalmente o livro conclui com ensaio de Douglas Hofstadter, no qual ele advoga a favor de uma visão mais ampla da analogia como o cerne da cognição. O capítulo dele esboça linhas entre a analogia, percepções com alto grau de sofisticação, e a formação de categorias abstratas. Ele enfatiza a fluidez das analogias e dos conceitos _ a maneira em que eles se moldam para encaixar-se a situações específicas _ e sugere que essa fluidez provê lembranças que conectam as novas experiências com memórias de eventos remotos que são relacionamente similares. A analogia, sob esse amplo ponto de vista adotado nesse capítulo, abarca tarefas que vão desde cotidianas aplicações de conceitos simples até complexos mapeamentos de cruzamentos de dados linguísticos demandados na tradução de uma estrutura poética de uma língua para outra.

³⁵ Os princípios de modelamento neural de Grossberg são examinados e estendidos para prover uma teoria a nível neural para explicar como as analogias aumentam sensivelmente a taxa de aprendizagem e, de fato, fazem com que a aprendizagem e a retenção sejam possíveis.

My answer to the question of how people learn is that we all learn by spontaneously generating and testing ideas. Idea generating involves analogies and testing requires comparing predicted consequences with actual consequences. We learn this way because the brain is essentially an idea generating and testing machine. But there is more to it than this. The very process of generating and testing ideas results not only in the construction of ideas that work (i.e., the learning of useful declarative knowledge), but also in improved skill in learning (i.e., the development of improved procedural knowledge). Thus, to teach most effectively, teachers should allow their students to participate in the idea generating and testing process because doing so allows them to not only construct “connected” and useful declarative knowledge, but also to develop “learning-to-learn” skills.³⁶

Chapter 5 presents a model of creative and critical thinking in which people use analogical reasoning to link planes of thought and generate new ideas that are then tested by employing hypothetico-predictive reasoning.³⁷

Analogies greatly facilitate learning and retention because they activate outstars (i.e., the cells that are sampling the to-be-learned pattern) and cause the neural activity to grow exponentially by forming feedback loops.³⁸

2.2.2 - Segundo critério: analogia e ciências

Trechos que destacam a relação entre ciências e analogia aqui postos no sentido de (com o intuito de) validar a idéia de que o contexto das aulas de ciências seja privilegiadamente adequado para o uso de analogias.

a) Do livro “Analogical Mind” (GENTNER; HOLYOAK, KOKINOV, 2001)

³⁶ A minha resposta à pergunta de como é que as pessoas aprendem é que todos aprendemos espontaneamente gerando e testando idéias. A formulação de idéias envolve analogias e o testá-las requer a comparação das conseqüências previstas com as conseqüências efetivas. Nós aprendemos dessa maneira porque nosso cérebro é essencial um mecanismo de gerar e testar idéias. Mas há mais que isso. O próprio processo de gerar e testar idéias resulta não só na construção de idéias que funcionam (i.e., a aprendizagem de conhecimento articulável útil), mas também desenvolve a capacidade de aprender (i.e., o desenvolvimento de um aumento no conhecimento de procedimentos). Por conseguinte, para se ensinar de maneira mais efetiva, os professores deveriam permitir que seus alunos participassem na geração das idéias e nos procedimentos de teste, porque fazendo isso propiciariam que seus alunos não só “construíssem” um conhecimento articulável, mas também desenvolvessem habilidades de “aprender como aprender”.

³⁷ O capítulo 5 apresenta um modelo de pensamento criativo e crítico no qual as pessoas usando o raciocínio analógico relacionam planos de pensamento e geram novas idéias que são então testadas por meio do emprego do raciocínio hipotético-predicativo.

³⁸ Analogias facilitam significativamente a aprendizagem e a retenção porque ativam as estrelas exteriores (i.e., células que constituem a base da aprendizagem de padrões) e fazem com que a atividade neural aumente exponencialmente por meio da formação de feedbacks cíclicos.

What cognitive capabilities underlie our fundamental human achievements? The ability to pick out patterns, to identify recurrences of these patterns despite variation in the elements that compose them, to form concepts that abstract and reify these patterns, and to express these concepts in language. Analogy, in its most general sense, is this ability to think about relational patterns. Analogy lies at the core of human cognition.³⁹

Essa habilidade é exaustivamente requerida do físico e conseqüentemente do estudante de Física. A busca pela identificação de padrões é atribuição (e paixão e crença) básica na atividade do físico.

The wave theory of sound became the seed of a new and insightful abstraction: the general conception of waves as a mode of transmission of patterns across space. This abstraction continued to be developed over the course of centuries. At first simply a qualitative explanation of sound transmission, the wave theory was eventually given a mathematical formulation. In the seventeenth century a wave theory of light was developed, by analogy with the wave theory of sound. The progression from highly specific single-case analogies to more abstract concepts or schemas is one of the most powerful roles that analogy plays in cognition. This progression has been observed not only for scientific, mathematical, and problem-oriented concepts but also for metaphorical concepts in everyday language.⁴⁰

In many situations, such as being faced with a series of unexpected findings, scientists will propose hypotheses based on analogical transfer from known examples.⁴¹

In psychology, Gentner began working on mental models and analogy in science. She was struck to the idea that in analogy, the key similarities lie in the relations that hold within the domains (e.g., the flow of electrons in an electrical circuit is analogically similar to the flow of people in a crowded subway tunnel), rather than in features of individual objects (e.g., electrons do not resemble people). Moreover, analogical similarities often depend on higher-order relations, relations between relations. For example, adding a resistor in series to a circuit

³⁹ Quais capacidades cognitivas subjazem a nossas aquisições humanas fundamentais? A habilidade de perceber padrões, identificar recorrências desses padrões a despeito de variações nos elementos que os compõem, formar conceitos que resumem e materializam esses padrões, e expressar esses conceitos por meio da linguagem. A analogia, no seu sentido mais geral, é essa habilidade de pensar sobre padrões relacionais. A analogia está no centro da cognição humana.

⁴⁰ A teoria ondulatória do som tornou-se a semente de uma nova e “*insightful*” abstração: a concepção geral das ondas como um meio de transmissão de padrões ao longo do espaço. Essa abstração continuou a ser desenvolvida ao longo do curso dos séculos. A princípio apenas como uma simples explicação qualitativa para a transmissão do som, a teoria ondulatória recebeu posteriormente uma formulação matemática. No século dezessete foi desenvolvida uma teoria ondulatória da luz por analogia com a teoria ondulatória do som. O avanço das analogias com alto grau de especificidade feitas para situações particulares para conceitos e esquemas mais abstratos é um dos papéis mais poderosos que a analogia desempenha na cognição. Esse avanço tem sido observado não só em conceitos científicos, matemáticos e na resolução de problemas, mas também em conceitos metafóricos da linguagem cotidiana.

⁴¹ Em várias situações, tais como se deparar com uma série de descobertas não esperadas, os cientistas propõem hipóteses baseadas em transferências analógicas de exemplos conhecidos.

causes (a higher-order relation) a decrease in flow of electricity, just as adding a narrow gate in the subway tunnel would decrease the rate at which people pass through.⁴²

2.2.3 - Terceiro critério: analogia e ensino-aprendizagem

Trechos que destacam o uso de analogia como estratégia pedagógica no intuito de validar essa estratégia.

a) Do livro “Similarity and Analogical Reasoning” (VOSNIADOU; ORTONY, 1989)

In considering the role of analogical reasoning in instruction, little attention has been paid to the process of understanding an explanatory analogy explicitly presented to facilitate knowledge acquisition in an unfamiliar domain. Because of their concern over the potential that analogies have for leading to false or oversimplified representations, Spiro and his collaborators focus on instructional strategies that might avoid such undesirable consequences. They recommend using explicit analogies to facilitate the process of knowledge acquisition in ill-structure domains where teaching rules is not possible (even it were desirable) and where there is considerable conceptual load. Their technique involves the use of integrated multiple analogies to counteract missing or misleading information that a single analogy might contain.⁴³

A result of a test is presented. Students were taught a theoretical concept with and without the use of physical analogies. The results support the hypotheses that physical analogies are helpful in theoretical concept construction and that higher-order, hypothetico-predictive reasoning skill facilitates conceptual change and successful concept application.⁴⁴

⁴² Em psicologia, Gentner começou trabalhando com modelos mentais e analogias na ciência. Ela acredita na idéia de que na analogia, a chave das similaridades está mais nas relações que se passam dentro dos domínios (e.g., o fluxo de elétrons num circuito elétrico é analogicamente similar ao fluxo de pessoas num lotado túnel de metrô), do que nas características individuais dos objetos (e.g., os elétrons não se assemelham a pessoas). Além disso, as similaridades analógicas freqüentemente dependem de relações mais sofisticadas, relações entre relações. Por exemplo, adicionar um resistor em série a um circuito provoca uma diminuição no fluxo de eletricidade, assim como adicionar um portão estreito no túnel do metrô diminuiria a taxa com que as pessoas o atravessam.

⁴³ No que tange o papel do raciocínio analógico para o ensino, pouca atenção tem sido dada ao processo de compreensão de uma analogia explicitamente apresentada para facilitar a aprendizagem de um domínio não-familiar. Por estarem convencidos do potencial que a analogia tem de levar a falsas representações ou representações simplificadas demais, Spiro e seus colaboradores se atêm à busca de estratégias instrucionais que evitem essas conseqüências indesejadas. Eles recomendam o uso de analogias para facilitar o processo de aquisição de conhecimento em domínios de estruturas intrincadas onde o ensino de regras não seja possível (mesmo se desejado) e onde haja uma carga conceitual extensa. A técnica deles envolve o uso de analogias múltiplas integradas para se contrapor à carência de informação ou à confusão de informação que uma analogia isolada possa produzir.

⁴⁴ É apresentado o resultado de um teste. Um conceito teórico foi ensinado a alguns estudantes com e sem o uso de analogias físicas. O resultado apóia a hipótese de que analogias físicas auxiliam a construção de conceitos teóricos e que habilidades de raciocínio de elevado grau de complexidade, raciocínio hipotético-preditivo, facilitam a mudança conceitual e o uso correto de conceitos.

2.2.4 - Quarto critério: analogia e aprendizagem significativa

Aqui gostaríamos ainda de comparar a descrição feita por Ausubel de como se processa a aprendizagem na estrutura cognitiva com as que encontramos nas publicações dos pesquisadores que trabalham com o tema da analogia.

O nosso intuito com isso é tentar traçar um paralelo entre elas, apontar-lhes as semelhanças, pois nos parece que as descrições se ratificam, se reforçam, se apresentam não só não-excludentes como também complementares, daí concluirmos com a inferência de que seria possível fundir as descrições. Nesse ponto destaco as pesquisas de caráter neurológico que parecem confirmar, apoiar e fundamentar a teoria de Ausubel, onde também poderíamos alegar complementaridade no aspecto de que Ausubel relata a necessidade de ancoragem entre o novo conhecimento e os subsunçores que o indivíduo já possui, mas ele não descreve qual seria a natureza dessas relações de ancoragem, daí que, tomando essa lacuna como base, não se pode excluir a possibilidade de que essas relações possam ser de natureza analógica.

a) Do livro “Similarity and Analogical Reasoning” (VOSNIADOU; ORTONY, 1989)

Ressaltamos os seguintes trechos:

The ability to perceive similarities and analogies is one of the most fundamental aspects of human cognition. It is crucial for recognition, classification, and learning, and it plays an important role in scientific discovery and creativity. Similarity and analogy have received increasing attention from cognitive scientists. This growth of interest is related to the realization that human reasoning does not always operate on the basis of content-free general inference rules, but, rather, is often tied to particular bodies of knowledge and is greatly influenced by the context in which it occurs. In a reasoning system of this kind, learning does not get accomplished by merely adding new facts and applying the same inference rules to them. Rather, successful learning often depends on the ability to identify the most relevant bodies of knowledge that already exist in memory so that this knowledge can be used as the

starting point for learning something new. All the chapters in this volume have something to say about the role that similarity and analogy play in this process.⁴⁵

Essa idéia também parece ser evocada pela teoria de Ausubel, quando ele afirma que a aprendizagem se dá no momento em que o aprendiz é capaz de identificar e mobilizar algum subsunçor disponível e adequado em sua estrutura cognitiva para a ancoragem de um novo conteúdo.

A idéia de que “a successful learning often depends on the ability to identify the most relevant bodies of knowledge that already exist in memory so that this knowledge can be used as the starting point for learning something new”⁴⁶ está presente na teoria de Ausubel, no entanto Ausubel não analisa a natureza da relação que se estabelece entre o conceito novo e o subsunçor ou os critérios que o aprendiz utiliza para selecionar um subsunçor adequado a determinada ancoragem. As relações de analogia nos parecem um bom conteúdo para preencher essa lacuna já que a descrição dos mecanismos de aprendizagem por meio de analogias apresenta tantas semelhanças ao mecanismo de aprendizagem apresentado por Ausubel em sua teoria da aprendizagem significativa.

There is general agreement that analogical reasoning involves the transfer of relational information from a domain that already exists in memory (usually referred to as the source or base domain) to the domain to be explained (referred to as the target domain).⁴⁷

⁴⁵ A habilidade de compreender similaridades e analogias é um dos mais fundamentais aspectos da cognição humana. É crucial para o reconhecimento, classificação, e aprendizagem, e desempenha um importante papel nas descobertas científicas e na criatividade. A similaridade e a analogia têm recebido cada vez mais atenção por parte dos cientistas cognitivistas. Esse crescimento de interesse está relacionado à percepção de que o raciocínio humano não opera sempre com base em inferências gerais desvinculadas do conteúdo, e sim, freqüentemente está vinculado a troncos específicos do conhecimento e é significativamente influenciado pelo contexto em que isso ocorre. Num sistema de raciocínio desse tipo, a aprendizagem não acontece por mera adição de novos fatos e aplicação das mesmas regras de inferência a esses fatos. A aprendizagem bem sucedida depende muitas vezes da habilidade de identificar os mais relevantes troncos de conhecimento já presentes na memória para que esse conhecimento seja usado como base para a aprendizagem de algo novo. Todos os capítulos desse livro têm algo a dizer sobre o papel da similaridade e da analogia nesse processo.

⁴⁶ A aprendizagem bem sucedida depende muitas vezes da habilidade de identificar os mais relevantes troncos de conhecimento já presentes na memória para que esse conhecimento seja usado como base para a aprendizagem de algo novo.

⁴⁷ Há um consenso geral que o raciocínio analógico envolve transferência de informação relacional de um domínio que já existe na memória (usualmente referido como domínio fonte ou domínio base) para o domínio a ser explicado (referido como domínio alvo).

O paralelo que queremos traçar aqui é entre novo conhecimento e domínio alvo e entre subsunção e domínio base.

One interesting finding is that for between-domain analogies access appears to be less of a problem for adults and experts than for children and novices. What is it about development and knowledge acquisition that allows easier access to analogs from remote domains? One possibility is that adults and experts are more likely to notice and use similarity with respect to relational as opposed to nonrelational properties – that there is what Gentner calls an “attribute-to-relations shift” with development and with the acquisition of knowledge. Another possibility is that the ability to notice and use similarity in relations is available to children and novices but that children’s and novice’s knowledge representations do not contain the relational information that is needed when it is needed. Yet a third possibility is that access is determined by salient similarity in the properties of the source and target, but what is salient similarity may change as people’s conceptual representations become reorganized with the acquisition of knowledge, as a result, what may be considered deep properties in the conceptual representations of novices may come to be salient and thus easily accessible to experts.⁴⁸

O processo descrito acima nos parece semelhante ao descrito por Ausubel nas etapas de diferenciação progressiva.

Research on analogical access has important implications for training and instruction.

Brian Ross’s suggestion to enhance surface similarity among problems of the same problem type in order to increase the probability that they are placed in the same general category has its source in the finding that surface similarity is an important determinant of access.⁴⁹

⁴⁸ Uma descoberta interessante é que acessar analogias inter-domínios é menos problemático para adultos e experts do que para crianças e novatos. O que é que tem no desenvolvimento e na aquisição de conhecimento que propicia um acesso mais fácil aos análogos de domínios remotos? Uma possibilidade é que adultos e experts são mais propensos a perceber e usar similaridade com caráter relacional do que propriedades não-relacionais – que é o que Gentner chama de “transferência de atributos relacionais” que ocorre com o desenvolvimento e a aquisição de conhecimento. Uma outra possibilidade é que a habilidade de perceber e usar similaridades nas relações também está disponível nas crianças e novatos, mas as representações do conhecimento nas crianças e novatos não contêm a informação relacional que é necessária quando é necessária. Ainda uma terceira possibilidade é que o acesso é determinado por similaridades salientes nas propriedades da fonte e do alvo, mas a percepção do que é saliente possa mudar conforme a representação conceitual das pessoas se reorganize com a aquisição de conhecimento, como resultado, aquilo que era considerado uma propriedade oculta no âmago do objeto na representação conceitual dos novatos passa a ser saliente e, portanto, mais facilmente acessível aos experts.

⁴⁹ Pesquisas acerca de como ocorre a mobilização de uma analogia têm importantes implicações para a instrução e o exercício. A sugestão de Brian Ross de ressaltar a similaridade de superfície entre os problemas de um mesmo tipo para aumentar a probabilidade de eles serem colocados na mesma categoria geral tem sua origem na crença de que a similaridade de superfície é um importante fator determinante na hora de acessar um dado na memória.

It is also important to encourage students to take multiple perspectives on the same problem and to understand how different concepts can illuminate it.⁵⁰

Esses dois últimos apontamentos anteriores ratificam uma das condições sugeridas por Ausubel para a ocorrência da aprendizagem significativa que é a do material ser “potencialmente significativo”, isto é, quanto mais relacionável a uma imagem, símbolo, conceito, proposição, em resumo quanto mais não-arbitrário for o novo conhecimento, maior será sua probabilidade de ancoragem.

An analogy can produce new knowledge about the structure of the target system, in this respect, analogy can become an important mechanism in the acquisition of new knowledge. Children use analogical reasoning to acquire new knowledge about a domain just like adults do. What develops is not the analogical mechanism itself but the conceptual system upon which this mechanism operates.⁵¹

Semelhante ao argumentado por Ausubel na diferenciação progressiva, o mecanismo num adulto ou numa criança é o mesmo, o que se desenvolve é o subsunçor, os subsunçores tornam-se mais elaborados. A ancoragem resulta em crescimento e modificação do subsunçor.

b) Do artigo “Neural principles of memory and a neural theory of analogical insight”

(LAWSON, LAWSON, 1993)

Grossberg's principles of neural modeling are reviewed and extended to provide a neural level theory to explain how analogies greatly increase the rate of learning and can, in fact, make learning and retention possible. In terms of memory, the key point is that the mind is able to recognize and recall when it is able to match sensory input from new objects, events, or situations with past memory records of “similar” objects, events, or situations. When a match occurs, an adaptive resonance is set up in which the synaptic strengths of neurons are increased; thus a long term record of the new input is formed in memory. Systems of neurons called outstars and instars are presumably the underlying units that enable this to occur. Analogies can greatly facilitate learning and retention because they activate the outstars (i.e.,

⁵⁰ É também importante incentivar os estudantes a ter múltiplas perspectivas do mesmo problema e entender como diferentes concepções podem esclarecê-lo.

⁵¹ Uma analogia pode produzir novo conhecimento sobre a estrutura do sistema alvo, nesse sentido, a analogia pode se tornar um importante mecanismo na aquisição de novo conhecimento. Crianças usam o raciocínio analógico para adquirir novo conhecimento sobre domínios do mesmo jeito que os adultos. O que amadurece não é o mecanismo de analogia em si, mas o sistema conceitual sobre o qual esse mecanismo opera.

the cells that are sampling the to-be-learned pattern) and cause the neural activity to grow exponentially by forming feedback loops. This increased activity insures the boost in synaptic strengths of neurons, thus causing storage and retention in long-term memory (i.e., learning).⁵²

Aqui comparando essa definição de aprendizagem (armazenamento e retenção na memória de longo prazo) com a apresentada por Ausubel, percebemos que elas são convergentes entre si, dentro da linha cognitivista na qual aprendizagem significa organização e integração do material na estrutura cognitiva.

Nesse artigo o autor por meio de evidências neurológicas explica porque o exercício mental de elaborar analogias aumenta a aprendizagem. O que nos chama atenção é a definição de aprendizagem que ele apresenta, qual seja, armazenamento e retenção na memória de longo prazo, combinada à afirmação de que o ponto chave em termos de memória é que a mente é capaz de reconhecer e acessar estímulos sensoriais de novos objetos, eventos ou situações quando é possível acoplá-los com registros anteriores de objetos, eventos e situações similares. Isso nos parece paralelo à teoria da aprendizagem de Ausubel, ratificando nela, por meio de dados neurológicos, o processo de aprendizagem do novo conceito por meio da ancoragem deste a subsunçores ativos na estrutura cognitiva do sujeito. Poderíamos talvez até sugerir que os resultados apresentados por Lawson desempenhariam o papel de fundamentação neurológica da teoria de Ausubel.

⁵² Os princípios de modelamento neural de Grossberg são examinados e estendidos para prover uma teoria a nível neural para explicar como as analogias aumentam sensivelmente a taxa de aprendizagem e, de fato, fazem com que a aprendizagem e a retenção sejam possíveis. Em termos de memória, o ponto principal é que a mente é capaz de reconhecer e acionar quando é possível emparelhar estímulos sensoriais oriundos de novos objetos, eventos ou situações com memórias anteriores de objetos, eventos ou situações “similares”. Quando um emparelhamento ocorre, uma ressonância adaptativa é ativada na qual as forças sinápticas dos neurônios são reforçadas, e por consequência um duradouro registro daquele novo objeto é formado na memória. Sistemas de neurônios chamados “estrelas externas” e “estrelas internas” são presumidamente as unidades-base que fazem com que isso ocorra. Analogias podem significativamente facilitar a aprendizagem e a retenção porque elas ativam as “estrelas externas” (i.e., as células que atuam no padrão de aprendizagem) e fazem com que atividade neural aumente exponencialmente por gerar loops recorrentes. Esse crescimento da atividade assegura o aumento da força sináptica dos neurônios, provocando armazenamento e retenção na memória de longo prazo (i.e., aprendizagem).

c) Do livro “Neurological Basis of learning, the development and Discovery” (LAWSON, 2003)

My answer to the question of how people learn is that we all learn by spontaneously generating and testing ideas. Idea generating involves analogies and testing requires comparing predicted consequences with actual consequences. We learn this way because the brain is essentially an idea generating and testing machine. But there is more to it than this. The very process of generating and testing ideas results not only in the construction of ideas that work (i.e., the learning of useful declarative knowledge), but also in improved skill in learning (i.e., the development of improved procedural knowledge). Thus, to teach most effectively, teachers should allow their students to participate in the idea generating and testing process because doing so allows them to not only construct “connected” and useful declarative knowledge, but also to develop “learning-to-learn” skills.⁵³

Mais uma vez isso nos parece semelhante ao processo descrito por Ausubel na etapa da diferenciação progressiva, onde os subsunçores do indivíduo passam por uma processo de maturação, desenvolvimento, tornando-se mais poderosos, mais disponíveis para uma ancoragem futura, desenvolvendo assim as “learning-to-learn’ skills”.

A nossa sugestão é, então, que a construção e desconstrução de analogias se torne um exercício mental comum ao estudante, que raciocinar por analogia se torne parte da rotina dele também no contexto das teorias científicas. O professor de ciências deve, portanto, usar analogias, pois por meio do uso de analogias pelo professor, o aprendiz pode adquirir o hábito de fazer relações entre domínios distintos.

Por isso selecionamos como produto desse trabalho um texto de apoio no qual o conceito de campo será apresentado por meio de analogia, por ser talvez o mais abstrato

⁵³ A minha resposta à pergunta de como é que as pessoas aprendem é que todos aprendemos espontaneamente gerando e testando idéias. A formulação de idéias envolve analogias e o testá-las requer a comparação das conseqüências previstas com as conseqüências efetivas. Nós aprendemos dessa maneira porque nosso cérebro é essencial um mecanismo de gerar e testar idéias. Mas há mais que isso. O próprio processo de gerar e testar idéias resulta não só na construção de idéias que funcionam (i.e., a aprendizagem de conhecimento articulável útil), mas também desenvolve a capacidade de aprender (i.e., o desenvolvimento de um aumento no conhecimento de procedimentos). Por conseguinte, para se ensinar de maneira mais efetiva, os professores deveriam permitir que seus alunos participassem na geração das idéias e nos procedimentos de teste, porque fazendo isso propiciariam que seus alunos não só “construíssem” um conhecimento articulável, mas também desenvolvessem habilidades de “aprender como aprender”.

conceito que faça parte do escopo do ensino escolar de física e que tem explicitamente em sua origem histórica menções ao uso de analogia por parte dos cientistas na criação do conceito, linhas elásticas de Faraday, por exemplo.

Capítulo 3 - CAMPO

Devo pedir-lhes que se dirijam para um território muito antigo e que voltem sua atenção para uma questão que tem sido levantada de tempos em tempos desde que os homens começaram a pensar. A questão é aquela referente à transmissão da força. Sabemos que dois corpos, separados por uma certa distância, exercem influência mútua sobre os movimentos um do outro. Dependerá esta ação da existência de uma terceira coisa, algum meio de comunicação ocupando o espaço entre os corpos ou será que os corpos agem uns sobre os outros imediatamente, sem a intervenção de nada? (MAXWELL apud SILVA, 2006)

Neste capítulo usamos como referência: ABRANTES, 1998, BEM-DOV, 1996, CRUZ, 2005, EINSTEIN, INFELD, 1938, MARTINS, 2006, NERSESSIAN, 1984 e SILVA 2006.

A discussão sobre o conceito de campo perpassa necessariamente pela discussão acerca da ação à distância e da ação mediada e também envolve necessariamente a discussão a respeito do éter.

A lei da gravitação universal de Newton expressa que massa atrai massa, como uma característica intrínseca da matéria, mas não explica como se processa essa interação, devido a essa lacuna essa interação é considerada uma ação à distância e instantânea.

Cabe aqui observar que a concepção pessoal de Newton não era de uma ação à distância, embora ele jamais tenha sugerido um modelo conceitual para as interações gravitacionais. Reproduzo a seguir um trecho de uma carta que Newton escreveu a um amigo, Richard Bentley:

“É inconcebível que a matéria bruta inanimada possa, sem a mediação de algo mais, que não seja material, afetar outra matéria e agir sobre ela sem contato mútuo. Que a gravidade seja algo inato, inerente e essencial à matéria, de tal maneira que um corpo possa agir sobre outro à distância através do vácuo e sem a mediação de qualquer outra coisa que pudesse transmitir sua força, é, para mim, um absurdo tão grande que não creio possa existir um homem capaz de pensar com competência em matérias filosóficas e nele incorrer. A gravidade tem de ser causada por um agente, que opera constantemente, de acordo com certas leis; mas se tal agente é material ou imaterial é algo que deixo à consideração dos meus leitores.” (ABRANTES, 1998)

Em sua obra *Óptica*,

“(...) Newton especula sobre a possibilidade de existência de um éter que explicasse a transmissão da ação gravitacional. Portanto, considera a possibilidade de que a ação seja transmitida pelo meio, mesmo que a substância que o preencha não seja a matéria ordinária.” (SILVA, 2006)

“Com o tempo, contudo, as reservas de Newton caíram no esquecimento e a maioria de seus sucessores aceitou o princípio de uma ação à distância da gravitação.” (BEN-DOV, 1996)

É o campo que finalmente assume o papel de ente mediador das ações à distância que passam assim a ser consideradas ações mediadas.

Mas a idéia de campo se origina no magnetismo e na eletricidade, ao contrário da seqüência consagrada nos cursos e livros de Física que apresenta primeiramente o campo gravitacional. Veremos, além disso, que a idéia de campo gravitacional ganha destaque após a formulação matemática das leis do eletromagnetismo por Maxwell e só recebe uma interpretação (geométrica) adequada que lhe confere relevância no tratamento físico dos fenômenos gravitacionais a partir dos trabalhos de Einstein. Veremos também que a discussão sobre a natureza do campo se atrela à polêmica concepção de éter.

Os fenômenos magnéticos e elétricos eram descritos por leis formuladas em analogia à lei de atração gravitacional de Newton, dentro de uma concepção newtoniana estritamente mecanicista, mas alguns eventos ao longo da história da Física foram mudando esse quadro.

Em 1780, Luigi Galvani observa o fenômeno da corrente elétrica, em seguida Alessandro Volta estuda o fenômeno e constrói sua pilha. Em 1820 Hans Christian Oersted observou que a passagem de corrente elétrica por um fio condutor alterava a orientação de uma agulha imantada posta em suas proximidades. A agulha ficava perpendicular ao fio, o que causava estranhamento, pois aplicando o modelo newtoniano de força para explicar o fenômeno, a orientação esperada para a agulha seria a paralela. Além disso, o sentido da

orientação se invertia quando o experimentador posicionava a agulha acima ou abaixo do fio, o que também contrariava o modelo newtoniano. Essa observação da interação entre a agulha imantada e o fio condutor sugeria que a linha de força que o fio exerce sobre a agulha tem a forma de um círculo em torno dele.

Posteriormente Ampère descobre que não só a eletricidade gera efeitos magnéticos como também o magnetismo gera efeitos elétricos e todas as tentativas de explicar essas novas descobertas em termos de modelos newtonianos fracassaram, até que Faraday, inspirado pela observação da configuração em linhas que a limalha de ferro adquire ao ser colocada sobre uma folha de papel sobreposta a um ímã, sugere um modelo de “linhas elásticas de força” e passa a aplicar essa idéia no magnetismo e na eletricidade.

A descrição das “linhas elásticas de força” feita por Faraday é o embrião da concepção de campo, mas o tratamento de Faraday é puramente conceitual, o formalismo para o campo só surge com os trabalhos de Maxwell. O éter, nessa época, era tratado como um meio que preenche todo o espaço e que seria transmissor de luz, a idéia de campo veio então reforçar a discussão acerca desse éter.

Maxwell formula hipóteses quanto a um éter eletromagnético a preencher o espaço e transmitir ações. A esse espaço no qual se processam fenômenos de interação física, Maxwell, e não Faraday - como afirmam vários livros didáticos – deu o nome de campo, e toda a teoria, com suas grandezas pensadas para a descrição das interações eletromagnéticas nesse espaço, foi chamada de Teoria do Campo Eletromagnético, tendo suas principais equações conhecidas como Equações de Maxwell, uma síntese dos principais fenômenos eletromagnéticos. (SILVA, 2006)

Maxwell unifica eletricidade e magnetismo e define o campo eletromagnético, e após algumas abordagens mecanicistas equivocadas ele abandona a tentativa de atribuir uma interpretação física ao campo eletromagnético e conseqüentemente suas implicações com o éter, influenciado também pelo positivismo do final do século XIX.

Maxwell publicou uma trilogia de trabalhos, fruto de sua imersão na obra de Faraday que ele menciona no prefácio do livro “Electricity and Magnetism”:

“[...] Na medida em que eu prosseguia meus estudos sobre Faraday, percebi que seus métodos de conceber os fenômenos eram também matemáticos, embora não fossem exibidos na forma matemática convencional. Descobri também que esses métodos podiam ser expressos na forma convencional de símbolos matemáticos e então ser comparados com os resultados dos denominadores matemáticos. (MAXWELL, apud CRUZ, 2005)

“Por exemplo, Faraday, em sua concepção, vê linhas de força atravessando todo o espaço, enquanto os matemáticos vêem centros de força atraindo à distância; Faraday vê um meio onde eles nada vêem além de distância; Faraday enxerga a base dos fenômenos na ação real que ocorre no meio; eles estão satisfeitos por terem encontrado isso numa força de ação à distância impressa nos fluidos elétricos.” (MAXWELL, apud CRUZ, 2005)

A obra de Faraday finalmente encontrou em Maxwell um homem capaz de levá-la adiante, matematizando-a. (SILVA, 2006)

Em “Faraday’s lines of force”, Maxwell matematiza o campo elétrico, tratando-o como um fluido, obtendo com esse método alternativo a mesma equação da lei de Coulomb. Nessa analogia entre campo e fluido, o potencial elétrico era equivalente à pressão.

Em “On Physical lines of force” Maxwell sofisticou seu modelo de campo para que este comportasse propriedades elásticas, o que acaba gerando uma intrincada e confusa representação. Ele mesmo faz as ilustrações do campo que mais se assemelham a tubos, compondo uma complicada engrenagem. Era sua tentativa de dar um tratamento newtoniano ao campo não-newtoniano de Faraday.

Já em “A dynamical theory of the electromagnetic field”, Maxwell se restringe à apresentação matemática do eletromagnetismo:

[...] Numa situação anterior (no artigo “on physical lines of force”), eu tentei descrever um certo tipo de movimento e um certo tipo de tensão arranjados de tal forma a darem conta dos fenômenos. No artigo atual eu evito qualquer hipótese desse tipo; e ao usar palavras como “momentum elétrico” e “elasticidade” em relação a fenômenos como

indução de correntes e polarização de dielétricos, eu desejo apenas direcionar a mente do leitor para fenômenos mecânicos que o ajudarão a compreender os fenômenos elétricos. Todas essas frases no presente artigo devem ser consideradas ilustrativas, e não, explanatórias. (MAXWELL, apud CRUZ, 2005)

Como o éter não entra de forma constitutiva na teoria de Maxwell, nem aparece como fator em suas equações, estas permanecem válidas com ou sem éter, no entanto, a idéia de éter subjaz à concepção que ele tinha a respeito da realidade física:

[...] Nós temos, portanto, razões para acreditar, a partir dos fenômenos da luz e do calor, que existe um meio etéreo preenchendo o espaço e permeando os corpos, capaz de ser colocado em movimento e de transmitir esse movimento de uma, parte para outra, e de comunicar esse movimento para a matéria aquecendo-a e afetando-a de várias formas [...] (MAXWELL, apud CRUZ, 2005)

Em 1887 Hertz produz ondas eletromagnéticas e mede sua velocidade que coincide com a velocidade da luz como previsto por Maxwell, com isso a concepção de éter de Maxwell ganha destaque, mas todas as tentativas de se detectar esse éter fracassam, até que em 1895, Poincaré afirma ser impossível medir a velocidade de qualquer corpo em relação ao éter, ou seja, por meio desse método é impossível detectar o éter. Essa hipótese recebe o nome de princípio da relatividade, formalmente enunciada por Poincaré da seguinte forma:

“É impossível medir o movimento absoluto da matéria, ou melhor, o movimento relativo da matéria em relação ao éter. Só se pode evidenciar o movimento da matéria em relação à matéria” (POINCARÉ apud MARTINS, 2006)

Mas, apesar de convencido desse princípio da relatividade, Poincaré continuava acreditando na existência do éter. Para Poincaré e Lorentz o fato de se não poder medir o éter não desqualificava sua existência. As transformadas de Lorentz são concebidas na tentativa de tornar as equações de Maxwell para o campo eletromagnético invariantes.

É finalmente com Einstein que o campo ganha uma interpretação geométrica. Para Einstein a massa deforma o espaço e o espaço deformado define a trajetória da massa. O físico John Wheeler resumiu essa idéia:

Ten years after his special relativity, Einstein gave us his 1915 battle-tested and still standard theory of gravitation. Its message comes in a single simple sentence: *Spacetime grips mass, telling it how to move; and mass grips spacetime, telling it how to curve.*⁵⁴ (TAYLOR, WHEELER, 1991)

Podemos afirmar que no modelo proposto por Einstein, a natureza do campo gravitacional é o próprio espaço-tempo.

Segundo Nersessian (NERSESSIAN, 1984), Einstein em sua teoria da Relatividade Especial, atribui ao campo propriedades antes pertinentes apenas à matéria (tais como energia e momentum) e, portanto, confere ao campo um status ontológico de matéria.

Quanto à questão do éter, a teoria de Einstein não exige nem rechaça a sua existência. Segundo Roberto de Andrade Martins (MARTINS, 2006), durante sua carreira Einstein se posicionou, tanto contra, como a favor da idéia de éter, sendo sua posição final a favor do éter. A seguir reproduzo trechos selecionados por Roberto de Andrade Martins de uma conferência dada por Einstein em 1920 na Holanda.

“A posição que poderia ser assumida em seguida parecia a seguinte: o éter não existe; os campos eletromagnéticos não são estados de um meio e não estão ligados a qualquer transportador, mas são realidades independentes que não podem ser reduzidas a nenhuma outra coisa, exatamente como os átomos da matéria”. (EINSTEIN apud MARTINS, 2006)

“Uma reflexão mais cuidadosa nos ensina, no entanto, que a teoria especial da relatividade não nos obriga a negar o éter. Podemos assumir existência de um éter; apenas devemos desistir de lhe atribuir um estado definido de movimento”. (EINSTEIN apud MARTINS, 2006)

⁵⁴ Dez anos depois da teoria da relatividade especial, Einstein nos presenteou com sua teoria da gravitação de 1915, exaustivamente testada e ainda padrão. O cerne dela está contido numa única e simples sentença: *A matéria diz ao espaço-tempo como se curvar, e o espaço-tempo diz à matéria como se deve deslocar.*

“negar o éter é, em última instância, assumir que o espaço vazio não tem nenhuma qualidade física; os fatos fundamentais da mecânica não se harmonizam com essa visão”. (EINSTEIN apud MARTINS, 2006)

“Newton poderia ter chamado seu espaço absoluto de ‘éter’; o essencial é apenas que, além dos objetos observáveis, há outra coisa, não perceptível, que deve ser considerada real, para podermos considerar a aceleração ou a rotação como algo real”. (EINSTEIN apud MARTINS, 2006)

“penso que podemos dizer que o éter da relatividade geral é o produto da relativização do éter de Lorentz.” (EINSTEIN apud MARTINS, 2006)

“Recapitulando, podemos dizer que, de acordo com a teoria geral da relatividade, o espaço é dotado de qualidades físicas; neste sentido, portanto, existe um éter. De acordo com a teoria da relatividade geral, espaço sem éter é impensável; pois em tal espaço, não haveria propagação de luz, nem possibilidade de padrões de espaço e tempo (réguas e relógios), nem intervalos de espaço-tempo no sentido físico. Mas esse éter não pode ser pensado como dotado de qualidade dos meios ponderáveis, que consistem em partes que podem ser seguidas ao longo do tempo. A idéia de movimento não pode ser aplicada a ele”. (EINSTEIN apud MARTINS, 2006)

No presente estado da arte na Física de Campos o campo eletromagnético não admite uma interpretação geométrica, embora haja uma tímida produção de esparsas (e de pouca repercussão) pesquisas nesse sentido. Encontramos apenas os seguintes trabalhos:

1. **Some electromagnetic consequences of a geometric unified theory of gravitation and electromagnetism.** Gustavo R. Gonzalez-Martin (Simon Bolivar U.). 1991. Published in Gen.Rel.Grav.23:827-841, 1991.
Com apenas 3 citações.
2. **Unified Geometric Theory of Electromagnetic and Gravitational Interactions.** M. Ferraris, J. Kijowski (Turin U.). 1982. Published in Gen.Rel.Grav.14:37-46, 1982.
Com 15 citações.
3. **Geometric Unification of Classical Gravitational and Electromagnetic Interaction In Five-Dimensions: A Modified Approach.** W.W. Osterhage. 1980. Published in Z.Naturforsch.35A:302-307, 1980.
Com apenas 3 citações.

Esse é sem dúvida mais um aspecto que desencoraja a utilização da analogia com o campo gravitacional para o ensino do conceito de campo eletromagnético.

Não se tem definição da natureza do campo eletromagnético!

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conceito de campo é sem dúvida um desafio aos professores. Trabalhos que analisam como esse conceito é ensinado pelos livros didáticos e pelos professores diagnosticam pluralidade de significados (polissemia) e formas no seu uso (SILVA, 2006).

Uma das principais dificuldades que nós encontramos ao tentar produzir um texto de apoio com a proposta de explicar o conceito de campo é justamente um aspecto criticado por M.C. Silva quando ele aponta o que ele considera uma falha encontrada nas obras que fazem transposição didática de campo: "... concepções da Física Moderna serem retiradas de seu reduto original e combinadas de maneira desconexa no texto didático." (SILVA, 2006)

Para nós, parece difícil não incorrer nesse padrão, uma vez que o conceito de campo pelo que se averigua na história da ciência é um conceito que se origina na Física Moderna com Maxwell e com Einstein. Maxwell sistematiza o conceito de campo eletromagnético (o próprio termo campo é cunhado por ele). Já a interpretação do campo gravitacional surge com Einstein na sua teoria da relatividade. Logo, a inclusão do conceito de campo no escopo do Ensino Médio, a nosso ver, associa inevitavelmente a inclusão de conceitos de Física Moderna.

Há uma vasta produção de pesquisa acerca do papel do raciocínio analógico e da analogia no ensino de ciências, e como vimos, embora não haja um consenso geral, há uma forte recorrência ao fato da analogia estar freqüentemente presente no discurso explanatório dos cientistas, nos relatos das descobertas de fenômenos, nos insights de novas teorias. É freqüente também a preocupação com os cuidados que são necessários ao se trabalhar com analogia, para que se deixem claras semelhanças e diferenças entre o domínio alvo e o domínio base.

Mas o aspecto que se destaca na literatura acerca do raciocínio analógico são os fortes indícios de que a analogia é a base do raciocínio humano o que nos apóia a propor que, independentemente do fato de que o uso de analogia no ensino de física facilite ou não a aprendizagem, a construção de analogias deve fazer parte do contexto da aula de ciências, pois a habilidade de modelar faz parte do próprio escopo da ciência. (NERSESSIAN, 1992, 1995)

Dentro do enfoque de uma formação integral do estudante, a possibilidade de se trabalhar a habilidade de modelar o universo, usando para isso como uma das ferramentas a analogia, vai de encontro a um dos anseios que são apresentados pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) (BRASIL, 2002) quanto ao ensino de Física:

“A Física deve apresentar-se, portanto, como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos.” (BRASIL, 2002)

Também dentro dos PCN+ (BRASIL, 2002) é explícita a atenção que se requer quanto ao desenvolvimento da capacidade de modelar. Na seção “As competências em Física” no subitem “Investigação e compreensão _ Modelos explicativos e representativos” é proposto: “Reconhecer, utilizar, interpretar e propor modelos explicativos para fenômenos ou sistemas naturais ou tecnológicos.”

Na seção “Relações entre conhecimentos disciplinares, interdisciplinares e interáreas”, há ainda uma menção em relação à compreensão integrada que se deseja construir entre as diferentes áreas da Física, o que inclui eletromagnetismo e gravitação:

“Construir uma visão sistematizada dos diversos tipos de interação e das diferentes naturezas de fenômenos da física para poder fazer uso desse conhecimento de forma integrada e articulada. Por exemplo, reconhecer que as forças elástica, viscosa, peso, atrito, elétrica, magnética etc. têm origem em uma das quatro interações fundamentais: gravitacional, eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca.” (BRASIL, 2002)

Acreditamos que o nosso trabalho contribui nesse sentido. Já que observamos uma escassez de material didático dentro dessa concepção integradora. No aspecto específico do tratamento que é dado ao conceito de campo, a situação é ainda pior, pois há pouquíssimos autores que se propõem a trabalhar esse conceito e quando o fazem a apresentação é quase que meramente matemática, a dimensão conceitual é abordada de forma muito tímida e superficial, o que não condiz com os parâmetros que se deseja para a educação brasileira:

“O ensino de Física vem deixando de se concentrar na simples memorização de fórmulas ou repetição automatizada de procedimentos, em situações artificiais ou extremamente abstratas, ganhando consciência de que é preciso lhe dar um significado, explicitando seu sentido já no momento do aprendizado, na própria escola média.” (BRASIL, 2002)

Diante dessa demanda o texto de apoio que apresentamos no Apêndice 2 constitui um exemplo de como a analogia pode ser usada no tratamento conceitual da Física, principalmente em conceitos com elevado grau de abstração como o de campo.

Como continuação desse trabalho, sugerimos a inclusão do histórico do desenvolvimento do conceito de campo ao texto de apoio, para, entre outros aspectos, explicitar e organizar a “*mélange*” cronológica e de abordagens da qual lançamos mão para apresentar o conceito de campo. Também pela História da Ciência se relaciona o conceito de campo à discussão sobre ação à distância e ação mediada e à discussão do éter, pois como vimos o conceito de campo está intrinsecamente associado a essas discussões e sem elas é impossível compor o contexto desse conceito na Física.

Dever-se-ia também, a exemplo do que Brian Greene faz no seu livro “O Universo Elegante” (GREENE, 2001), acrescentar ao texto de apoio uma seção de “resolução de conflitos” para se pontuar a relação entre o tempo e os campos e a velocidade com que a massa/carga/dipolo comunica (confere) modificações ao campo.

Num estágio final o estudante também deveria ser alertado sobre as diferenças entre a natureza do campo eletromagnético e do campo gravitacional.

Destaco ainda, que nosso texto de apoio foi produzido sob a perspectiva da teoria de Ausubel e que, portanto, a aprendizagem é configurada (se dá) quando o conceito é incorporado à estrutura cognitiva do aprendiz por ancoragem em algum subsunçor, notam-se por isso inúmeras recorrências no texto que assumem quase que um papel de organizador prévio do conteúdo a ser tratado imediatamente; também dentro dessa perspectiva a seqüência em que os conteúdos são apresentados segue os parâmetros de uma construção lógica que vai formar ou mobilizar (ativar, colocar os subsunçores de prontidão) os subsunçores num grau crescente de complexidade, sempre apoiando o conteúdo subsequente.

Nesse trabalho não objetivamos fazer avaliações do material em sala de aula, pois partimos da idéia que é “taken-for-granted”, que sempre que se trabalha um conteúdo por meio de um material especial e com alta especificidade, a produção de pesquisa nessas avaliações é consensual em, por fim, demonstrar que um grupo de estudantes exposto a tal trabalho específico demonstra um desempenho superior nos testes elaborados a partir dos objetivos almejados pelo material especial em questão, resultado esse que nos parece, em função dessa metodologia, garantido *ad hoc*: produz-se um material especial com objetivos específicos, um grupo é exposto a esse material e outro não, elabora-se um teste para avaliar o desempenho dos estudantes nos objetivos específicos propostos pelo material especial elaborado, o grupo que não teve contato com esse material tem um desempenho inferior em relação ao grupo que teve contato com o material.

No nosso caso teríamos uma dificuldade extra que tornaria a comparação com o grupo de controle ainda mais disparate, pois o que percebemos é que o conceito de campo apesar de estar oficialmente no escopo do ensino de Física tem recebido um tratamento que é na maioria das vezes puramente matemático, ou associado a uma contextualização conceitual

extremamente superficial, e a preocupação de integração conceitual e matemática entre os campos gravitacional e elétrico como apresentamos no texto de apoio é mesmo inédita no material didático mais recorrente.

Acreditamos que esse exemplo em torno do conceito de campo possa ser usado como base para que os professores produzam mais materiais que dêem um enfoque maior ao tratamento e integração conceitual do conteúdo escolar das ciências dentro da perspectiva de promover o raciocínio analógico e por meio dele desenvolver a autonomia intelectual do sujeito para interagir, compreender e criticar a sociedade e suas tecnologias, contribuindo, portanto, para a formação cultural holística do indivíduo que perpassa por sua alfabetização científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, Paulo. **Imagens de natureza, imagens de ciência**. Campinas: Papyrus, 1998.

BEM-DOV, Yoav. **Convite à Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1996.

BOULTER, C.; GILBERT, J. (1996) **Texts and Contexts: Framing Modeling in the Primary Science Classroom**. In Welford, G.; Osborne, J.; Scott, P. (Eds) **Research in Science Education in Europe: Current Issues and Themes**. London, Falmer Press (177-188).

CHEVALLARD, Yves. **La transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné**. Paris, Ed. La Pensée Sauvage, 1991.

BRASIL. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCN + Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares**. Brasília: MEC/SEMTEC, 2002.

CRUZ, Frederico Firmo de Souza. **Faraday & Maxwell – Luz sobre os campos**. São Paulo: Odysseus Editora, 2005.

DUARTE, Maria da Conceição. **Analogias na educação em ciências: contributos e desafios**. Investigações em ensino de Ciências, vol. 10, n. 1, março de 2005.

DUIT, R., GLYNN, S. (1996) **Mental Modelling**. In WELFORD, G.; OSBORNE, J.; SCOTT, P. (Eds). **Research in Science Education in Europe: Current Issues and Themes**. London, Falmer Press (166-176).

EINSTEIN, Albert; INFELD Leopold. **A evolução da Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1938.

GENTNER, Dedre; HOLYOAK, Keith James; KOKINOV Boicho N. **Analogical Mind**. Cambridge: MIT Press, 2001.

GRECA, I; MOREIRA, M. A. **Un estudio piloto sobre representaciones mentales, imágenes, proposiciones y modelos mentales respecto al concepto de campo**

eletromagnético en alumnos de Física general, estudiantes de postgrado y físicos profesionales. *Investigações em Ensino de Ciências*, 1(1), 95-108. 1996.

GREENE, Brian. **O Universo elegante: supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva.** São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

KRAPAS, S. ; QUEIROZ, G. ; COLINVAUX, D ; FRANCO, C. . **Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências.** *Investigações em Ensino de Ciências (UFRGS)*, Porto Alegre, v. 2, n. 3, p. 185-2005, 1997.

LAWSON, David I., LAWSON, Anton E. **Neural principles of memory and a neural theory of analogical insight.** *Journal of Research in Science Teaching*, v30 n10 p1327-48 Dec 1993.

LAWSON, Anton E. **Neurological Basis of learning, the development and Discovery.** Berlin: Springer Publisher, 2003.

LOPES, Alice Ribeiro Casimiro. **Conhecimento escolar: ciência e cotidiano.** Rio de Janeiro: EdUERJ, 1999.

MARTINS, Roberto de Andrade. **Do éter ao vácuo e de volta ao éter.** *Scientific American História* (6): 92-98, 2006.

MOL, G.S. **O Uso de Analogias no Ensino de Química.** 1999. Tese (Ensino de Química) – Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem.** São Paulo: EPU, 2003.

MOREIRA, Marco Antonio. **A teorias d aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula.** Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2006.

MORTIMER, E. F.; SCOTT, P. **Atividade discursiva nas salas de aula de ciências: uma ferramenta sociocultural para analisar e planejar o ensino.** *Investigações em Ensino de Ciências*. Porto Alegre, v.7, n.3. 2002.

NERSESSIAN, Nancy J. **Faraday to Einstein: constructing meaning in scientific theories.** Berlin: Springer Publisher, 1984.

NERSESSIAN, Nancy J. **Constructing and instructing: The role of 'abstraction techniques' in developing and teaching scientific theories**, in *Philosophy of Science, Cognitive Science, & Educational Theory and Practice*, R. Duschl & R. Hamilton, eds. (Albany, NY: SUNY Press, 1992), pp. 48-68.

NERSESSIAN, Nancy J. **How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science**. In Giere, R. N. (ed.) **Cognitive Models of Science**. University of Minnesota Press. Minneapolis, MN. 3-45. 1992

NERSESSIAN, Nancy J. **Should physicists preach what they practice? Constructive modelling in doing and learning physics**. *Science & Education*, 4, 203-226. 1995.

SILVA, Marcos Corrêa. **A controvérsia ação à distância versus ação mediada como subsídio para o desenvolvimento de propostas didáticas para o ensino de campo**. 2006. Dissertação (Mestrado em Educação) - Centro de Estudos Sociais Aplicados, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

TAYLOR, Edwin F.; WHEELER, John Archibald. **Spacetime Physics**: introduction to special relativity. New York: W. H. Freeman Company, 1991.

VOSNIADOU, Stella; ORTONY, Andrew. **Similarity and Analogical Reasoning**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

APÊNDICE 1

APÊNDICE 2

OBSERVAÇÕES ACERCA DO TEXTO DE APOIO

O texto se destina aos estudantes que estejam cursando o terceiro ano do Ensino Médio, portanto, com exceção do conceito de campo elétrico, parte-se do pressuposto que os demais temas tratados já sejam de seu conhecimento, por isso muitas vezes quando mencionamos conteúdos do primeiro e segundo anos do Ensino Médio não temos a preocupação de defini-los de maneira detalhada.

Nosso objetivo ao produzir este texto de apoio é apresentá-lo como sugestão ao professor de como trabalhar o conceito de campo. Partimos, inclusive, do princípio que cada professor produzirá o seu próprio material, portanto a reprodução *ipse litteris* da nossa versão para aplicação em sala de aula não é recomendada, uma vez que o tom pessoal do trabalho deve ser substituído (ditado) pelo estilo próprio de dar aula de cada professor.

Uma vez que essa produção não tem o compromisso de se destinar ao mercado editorial, aproveitamos essa liberdade para incluir no texto elementos diversos do leque cultural, não restrito ao âmbito do escopo do conteúdo escolar de física, pois acreditamos que o hábito de “enxugar o texto” em cada disciplina para restringi-lo ao objeto de estudo específico tem, ao longo do tempo, contribuído para uma visão compartimentalizada do conhecimento. Por isso é comum em nosso texto citações em língua estrangeira (o que não é nenhum bicho-de-sete-cabeças, pois com o recurso dos “sites” de busca da internet, o significado de quaisquer uma das expressões é revelado num clique), letras de músicas que guardam relação com o tema (mas não necessariamente uma relação didática), menções sobre cinema de décadas passadas... Além disso, nosso objetivo nesse trabalho não é o de facilitar a aprendizagem e sim de promover aprendizagem, assim não nos intimidamos (não nos furtamos) a usar frases longas, parágrafos longos, construções intrincadas no texto, uma vez que no último estágio do Ensino Médio, consideramos plausível apresentar ao aluno um texto

mais elaborado, como tantos que ele vai ter de lidar caso escolha prosseguir seus estudos com o ingresso na universidade.

Essa proposta nos parece semelhante, em alguns aspectos, à proposta apresentada pelo GREF (Grupo de Reelaboração do Ensino de Física) nas “Leituras de Física”, quando, por exemplo, no trecho que reproduzimos na página 31, é escolhido um homem chamado Hércules, e não, por exemplo, João ou José, que seria regionalmente mais comum no Brasil e também para a ilustração é escolhido o cenário de uma fachada de templo greco-romano e não a fachada da Catedral da Sé, por exemplo; é clara, então, a referência que o GREF faz à famosa lenda da mitologia greco-romana dos 12 trabalhos de Hércules (embora o GREF não justifique nem sequer mencione a referência). Parece-nos razoável inferir que a intenção deles ao fazer isso é incentivar a leitura da mitologia greco-romana pelos estudantes. Encontramos então nas “Leituras de Física” do GREF, essa tendência de enriquecer o texto de elementos da cultura geral (não restrita ao escopo do conteúdo escolar de física) ampliando, assim, o leque de estímulos para a formação cultural do leitor.

Embora contraditório à proposta de se produzir um texto “culto”, o tom de linguagem falada foi mantido. A conciliação dessas duas posturas aparentemente contraditórias é feita mediante a idéia de que não se precisa ser necessariamente formal (por isso adotamos o tom de linguagem falada que é mais dinâmico), para apresentar elementos da cultura humana (informações gerais).

Outra preocupação subjacente a essa proposta é que se possa quebrar até mesmo o estereótipo de que o autor (professor de ciências exatas) é um ser “artificialóide” que se ocupa de situações sempre recortadas da realidade, impermeável aos elementos corriqueiros da cultura. Pois esse estereótipo pode gerar desinteresse, afastando das ciências exatas o estudante.

Procuramos também manter um tom lúdico, por isso muitas vezes ilustrações, citações, letras de música, ou parêntesis, cujos conteúdos são paralelos ao texto, mas totalmente dispensáveis ao entendimento restrito do conceito que está sendo tratado, são mantidos. Poder-se-ia argumentar que uma vez dispensáveis, quando mantidos esses elementos atrapalham mais do que ajudam, a essa crítica contra-argumentaríamos que o tom lúdico torna o texto agradável ao estudante, e a inclusão de elementos diversos, ainda que com um certo tom caótico, pode despertar a simpatia do estudante, principalmente porque em geral nossos estudantes estão habituados a esse tom caótico em diversas formas de linguagem moderna, como por exemplo, os videoclipes, os desenhos animados, os “cartoons”...

Na página quatro do material de apoio, o texto é apresentado no original em inglês seguido da sua tradução no próprio corpo do texto e não em nota de rodapé, com o intuito de incentivar que o estudante faça a leitura de ambos, e até mesmo para habituá-lo à idéia que textos em língua estrangeira estarão embutidos em qualquer área de estudo que ele escolha. Além disso, julgamos obrigatório constar o texto original no trabalho, já que o texto citado é da “wikipedia” e o conteúdo da “wikipedia” é provisório por definição, atualizado constantemente.

A respeito da nota de rodapé número 2, na qual afirmamos que: “O termo “corpo de prova” remete à tentativa de que por meio do “corpo de prova” se “prove” alguma coisa a respeito do sistema, por isso no texto usarei o termo em inglês, que prioriza a idéia “mais suave” de testar algo e não necessariamente de provar algo.” Gostaríamos de frisar que neste ponto supomos que o estudante já deva estar familiarizado com o termo “corpo de prova”, afinal ele está no terceiro ano do Ensino Médio, portanto consideramos que este seria um momento apropriado para aprofundar sua compreensão do termo, acrescentando a conotação do mesmo em inglês.

Pelo mesmo motivo citado acima, não consideramos a comparação de elétrons a formigas e prótons a elefantes perigosa, pois ainda que em física seja a primeira vez que o estudante se depare com esse conteúdo, certamente a química já, desde o último ano do ensino fundamental (antes mesmo do aluno ingressar no ensino médio), vem trabalhando com esses conceitos.

Reconhecemos como importante, mas não incluímos neste material: a distinção vetorial e escalar das grandezas físicas abordadas, nem tampouco os conceitos de campo escalar e campo vetorial, como também o desenvolvimento histórico do conceito de campo.

Por fim, recomendamos ao professor alguns cuidados¹ importantes que devem ser tomados ao se utilizar um material como esse que faz uso de analogias:

- aos estudantes deve ser dada a condição de interagir com as analogias apresentadas;
- devem ser explicitadas as razões para o uso das analogias;
- as analogias devem ser exploradas em interação com o professor;
- os limites das analogias devem ser explicitados.

¹ DUARTE, Maria da Conceição. **Analogias na educação em ciências: contributos e desafios**. Investigações em ensino de Ciências, vol. 10, n. 1, março de 2005.

FÁBULAS PARA O ENSINO DE FÍSICA

Estórias fantásticas aplicadas ao ensino de uma Física fantástica

“FÁBULA CAMPESINA”
sobre o conceito de campo



ÍNDICE

ÍNDICE DE GRANDEZAS E UNIDADES CITADAS NO TEXTO	3
1) INTRODUÇÃO	4
2) INTERAÇÃO À DISTÂNCIA VERSUS INTERAÇÃO MEDIADA	10
3) GRAVITAÇÃO _ Força Gravitacional (Significado Físico)	14
4) GRAVITAÇÃO _ Força e Campo (Fórmulas)	19
5) ELETRICIDADE _ Força e Campo (Fórmulas)	22
6) MECÂNICA _ Teorema Trabalho-Energia e Fórmula do Trabalho	29
7) GRAVITAÇÃO E ELETRICIDADE _ Energia Potencial (Fórmulas)	34
8) ELETRICIDADE _ Potencial Elétrico (Fórmulas)	38
9) GRAVITAÇÃO _ Potencial Gravitacional (Fórmulas)	42
10) GRAVITAÇÃO _ Potencial Gravitacional (Significado Físico)	44
11) ELETRICIDADE _ Potencial Elétrico (Significado Físico)	46
11.1) Cargas Elementares	47
11.2) Corrente Eletrônica versus Corrente Convencional	49
12) ANÁLISE DA TABELA COMPLETA COM AS FÓRMULAS DA ELETRICIDADE E DA GRAVITAÇÃO	52
13) REPULSÃO MEDIADA PELO CAMPO	58
14) CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES	60

GRANDEZAS FÍSICAS E UNIDADES DE MEDIDA DAS GRANDEZAS:

NOME DA GRANDEZA	SÍMBOLO DA GRANDEZA	UNIDADE DE MEDIDA	SÍMBOLO DA UNIDADE
aceleração	a		$\frac{m}{s^2}$
aceleração da gravidade	g		$\frac{m}{s^2}$
altura	h	metro	m
campo elétrico	E		$\frac{V}{m}$
campo gravitacional	g		$\frac{m}{s^2}$
carga elétrica	q	coulomb	C
constante elétrica	k		$\frac{Nm^2}{C^2}$
constante gravitacional	G		$\frac{Nm^2}{kg^2}$
corrente elétrica	i	ampère	A
distância	d	metro	m
energia	energia	joule	J
energia potencial elétrica	<i>energia_{Pe}</i>	joule	J
energia potencial gravitacional	<i>energia_{Pg}</i>	joule	J
força	F	newton	N
força elétrica	F _{el}	newton	N
força gravitacional	F _g	newton	N
força peso	P	newton	N
massa	m	quilograma	kg
potencial elétrico	U	volt	V
potencial gravitacional	U _g		$\frac{m^2}{s^2}$?
tempo	t	segundo	s
trabalho	τ	joule	J

FÁBULAS PARA O ENSINO DE FÍSICA

Estórias fantásticas aplicadas ao ensino de uma Física fantástica

Episódio de hoje: “FÁBULA CAMPESINA” _ sobre o conceito de campo

1) INTRODUÇÃO

Nossa estória começa com uma gaiola labirinto (também conhecida como trepa-trepa). Se o termo gaiola labirinto não lhe diz nada, veja as figuras abaixo:



http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Jungle_gym1.jpg



<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Jungle-gym.jpg>

As imagens explicam o termo, mas vou traduzir para você a definição de gaiola labirinto que eu encontrei no site da Wikipedia em inglês:

“The **jungle gym**, also known as **monkey bars** or **climbing frame**, is a piece of playground equipment made of many pieces of thin material, such as metal pipe or, in more current playgrounds, rope, on which children can climb, hang, or sit.

The first jungle gym was invented in 1920 and patented by lawyer Sebastian Hinton in Chicago. It was sold under the trademarked name Junglegym. The term "monkey bars" was first documented in 1955 ((2003) *Merriam-Webster's Collegiate Dictionary*, 11th ed., Merriam-Webster, Inc.. ISBN 0-87779-807-9), though Hinton's initial patent of 1920 appeals to the "monkey instinct" in claiming the benefits of climbing as exercise and play for children. Hinton's chief goal, however, was to enable children to achieve an intuitive understanding of 3-dimensional space through a game in which numbers for the x, y and z axes were called out and each child tried to be the first to grasp the indicated junction. Thus the abstraction of Cartesian coordinates could be grasped as a name of a tangible point in space.”

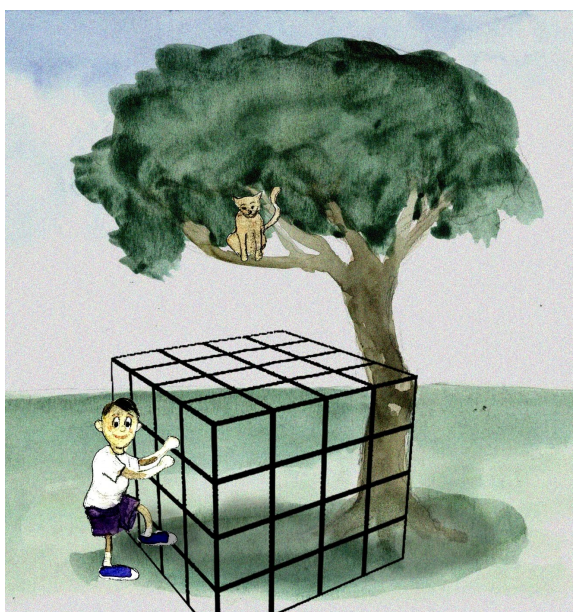
http://en.wikipedia.org/wiki/Jungle_gym

“A ‘ginástica da selva’ (gaiola labirinto), também conhecida como ‘barras da macaco’ ou ‘estrutura de escalada’ ‘armação para escalar’ é uma peça de ‘playground’ feita de muitos pedaços de material fino, como tubos de metal ou, mais comum atualmente, cabos, onde as crianças podem escalar, pendurar-se ou sentar.

A primeira gaiola labirinto foi inventada em 1920 e patenteada pelo advogado Sebastian Hinton em Chicago. Foi vendido com o nome comercial de Junglegym. O termo “barras de macaco” foi documentado pela primeira em 1955 ((2003) *Merriam-Webster's Collegiate Dictionary*, 11th ed., Merriam-Webster, Inc.. ISBN 0-87779-807-9), apesar da patente inicial de 1920 de Hinton apelar aos “instintos de macaco” asseverando os benefícios da escalada como exercício e recreação para as crianças, o principal objetivo de Hinton era na verdade, possibilitar que as crianças adquirissem uma compreensão intuitiva do espaço tridimensional por meio de um jogo no qual números para os eixos x, y e z fossem ditados e cada criança tentaria ser o primeiro a alcançar a junção indicada. Assim a abstração das coordenadas cartesianas poderia ser entendida como um ponto tangível no espaço.”

http://en.wikipedia.org/wiki/Jungle_gym

Meu interesse aqui na gaiola labirinto é parecido com o de Hinton, quero usar a imagem da gaiola labirinto para lhe ajudar a construir a abstração de uma estrutura tridimensional regular, para isso preciso de uma gaiola labirinto especial, cujas barras estão dispostas como as arestas de um cubo, veja a figura:

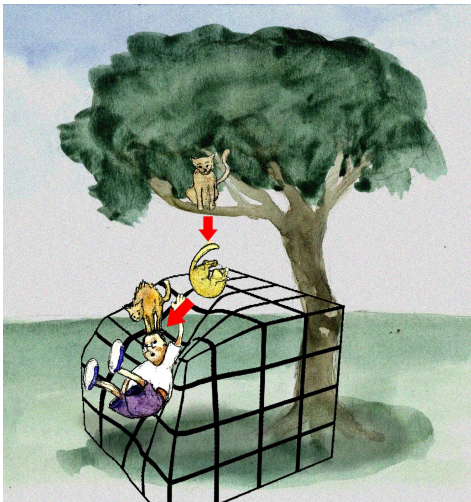


Imagine uma criança brincando num parquinho nessa gaiola labirinto, o Joãozinho. O Joãozinho pinta o sete na gaiola: sobe, se¹ pendura, se balança, escala, passa de uma barra para a outra... enfim, em todos e quaisquer movimentos do Joãozinho, a gaiola dá o suporte à performance dele. A gaiola é o cenário que promove a atuação da criança no espaço. É o cenário onde a criança está contida.

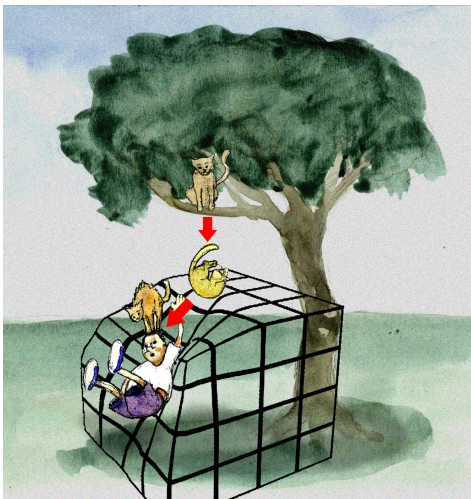
Agora imagine que essa gaiola labirinto fosse

elástica, maleável como uma cama de gato:

¹ A colocação pronominal aqui está errada, pois na linguagem escrita, após a vírgula nesse caso, a ênclise é obrigatória, mesmo assim mantivemos a próclise porque queremos estabelecer com você uma conversa ao pé do ouvido num tom de linguagem falada. ☺



Agora, assim elástica, a estrutura da gaiola ainda lhe sustenta, como uma malha, como uma rede, como uma teia, mas a presença da criança deforma essa teia.



Agora corpos que caiam nessa teia podem deslizar em direção ao corpo do Joãozinho por causa da deformação na teia gerada por ele.

Nessa situação chamaremos Joãozinho de corpo deformador e o gato de corpo de prova, porque Joãozinho é quem deformou a rede e o gato é quem sofreu os efeitos dessa deformação.

- O deslizar do gato na rede é uma consequência do menino ter deformado a rede.
- O gato desliza porque a rede está deformada.
- As consequências que observamos no corpo do gato demonstram o efeito ao qual os corpos que estiverem próximos ao corpo do menino, nessa região da rede deformada por ele, sofrerão.
- O efeito que observamos no gato (corpo de prova) demonstra que a rede está deformada.
- Em inglês o termo “corpo de prova” é “testing body”, ou seja, a idéia é que, na verdade, a finalidade do corpo de prova é testar alguma coisa no sistema que você está estudando, quero dizer, portanto, que aqui nosso gato é apenas um “testing cat”.²

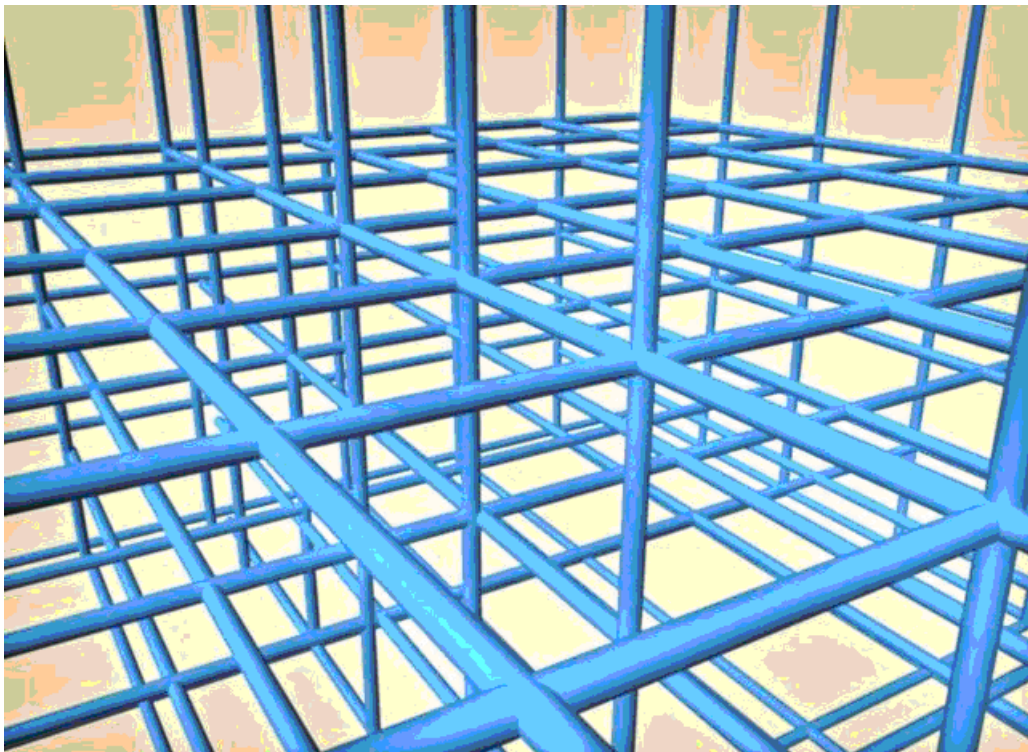
² O termo “corpo de prova” remete à tentativa de que por meio do “corpo de prova” se “prove” alguma coisa a respeito do sistema, por isso no texto usarei o termo em inglês, que prioriza a idéia “mais suave” de testar algo e não necessariamente de provar algo.

É claro que o corpo do gato também deforma a teia, mas usando o argumento fraquíssimo de que, por ser o gato muito menor que o menino, a massa do gato é desprezível em relação à massa do menino, vou considerar a deformação gerada pelo gato na teia também desprezível em comparação à deformação gerada pelo menino. Faço isso na verdade porque meu intuito aqui é o de estudar essa deformação que o menino gera na teia, o gato é só meu “testing body”.

Bom, toda essa situação imaginária que eu criei foi com o objetivo de traçar uma analogia entre o fenômeno relatado envolvendo a gaiola, o menino e o gato e o modelo de campo que explica os fenômenos gravitacionais.

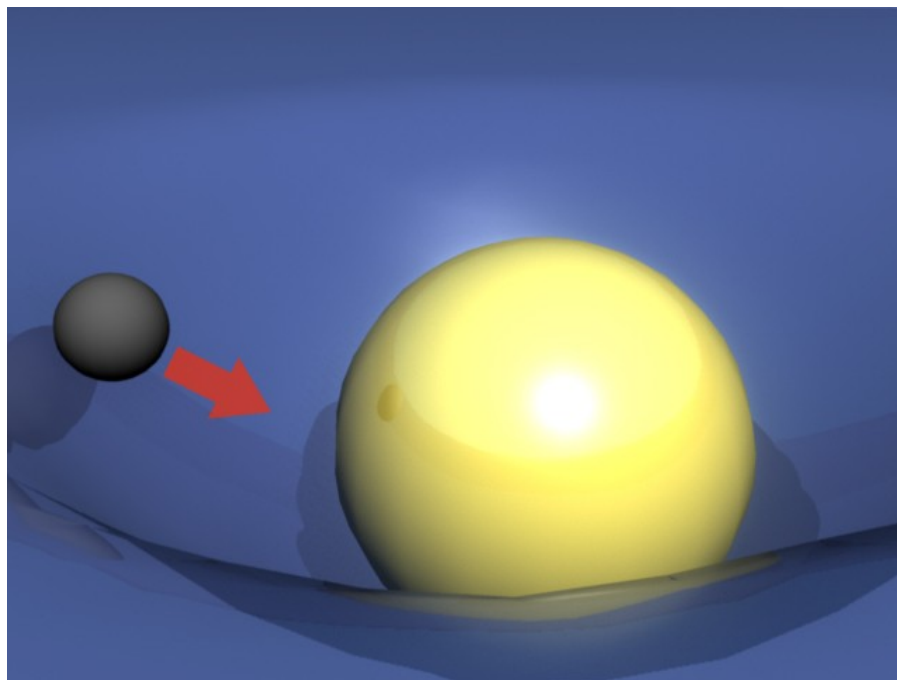
A gaiola representa o campo gravitacional, o menino representa o corpo deformador e o gato, o corpo de prova.

Por todo o universo se estende uma rede tridimensional regular (podemos, entre tantas outras maneiras, imaginar isso como uma gaiola labirinto que é tridimensional, suas células na verdade são cubos onde só aparecem suas arestas, que são as barras; e as barras entre elas estão sempre em ângulo de 90 graus, como o sistema de eixos cartesiano). Essa rede os físicos chamam de CAMPO, esse é o nome que eles deram, daí tem o CAMPO GRAVITACIONAL e o CAMPO ELETROMAGNÉTICO também (falaremos do campo eletromagnético mais para frente). E a área da Física que mexe com isso (estuda) se chama FÍSICA DOS CAMPOS.



O termo campo vem da idéia de campo mesmo: “olhai os lírios do campo”, campo de futebol, campo de golfe, campo. Então, a analogia entre a gaiola e o campo é a seguinte: tem o campo que se estende por todo o universo e ele estaria lá todo uniforme e regular (todo esticadinho), mas a presença de massa deforma esse campo (neste caso, campo gravitacional), se a massa for grande a deformação é grande, se a massa for pequena, a deformação é pequena.

E em consequência dessa deformação um corpo de prova, posto inicialmente em repouso nessa região deformada do espaço, “deslizará” pela curvatura da deformação até encostar no corpo deformador ou ser detido por algum anteparo. Dessa forma o corpo de prova foi atraído para junto do corpo deformador. É esse o modelo que temos para explicar a força gravitacional, massa atrai massa, por exemplo, a força de atração gravitacional que a Terra exerce sobre os corpos “próximos” a ela.



Uma figura muito citada em livros de física para explicar o campo gravitacional (da Terra, por exemplo) é a de uma superfície (uma membrana) de borracha (representando o campo) sobre a qual se coloca uma bola de boliche (representando o planeta Terra).

Se pusermos uma pequena bola de gude nessa membrana assim deformada, ela desliza na curvatura da deformação até encostar na superfície da bola de boliche. A bola de boliche “exerceu uma força de atração sobre a bola de gude”, a bola de gude foi obrigada a acelerar em direção à bola de boliche. É assim, por meio da deformação da membrana, que a bola de boliche atrai gravitacionalmente a bola de gude.

Do mesmo jeito se você deixar cair uma pedra (soltar uma pedra, em Física usamos o termo “abandonar” uma pedra) do alto da Torre de Pisa³, a pedra é obrigada⁴ a acelerar em direção ao planeta Terra até encostar o chão ou ser barrada por algum anteparo. O planeta Terra exerceu uma força de atração sobre a pedra, a pedra foi obrigada a acelerar em direção ao planeta. É assim, por meio da deformação do campo gravitacional, que a Terra atrai gravitacionalmente a pedra.

E foi por onde começamos a nossa estória onde o menino, na gaiola labirinto elástica por ele deformada, atraiu o gato. Capisce?

É esse modelo que usamos para explicar os fenômenos gravitacionais MASSA ATRAI MASSA. É por meio da curvatura da deformação do campo gravitacional que MASSA ATRAI MASSA. “Como cair do céu é tão simples...” Lobão

A Queda (Lobão)

Quantos sonhos em sonhos acordo aterrado,
A terrores noturnos minha alma se leva,
É um insight soturno é o futuro passando,
Na velocidade terrível da queda.

Ante o colapso final, a vertigem,
próximo ao chão a penúltima descoberta
Que a lógica violenta das cores tinge
A velocidade terrível da queda.

Como cair do céu é tão simples,
Queda que a tudo e a todos transtorna.
Ah! As bombas, a chuva, os anjos e seus loucos,
O mundo todo na velocidade terrível da queda.

Resvalando em abismos um pôr do sol furioso
Que a sensação de perda ao ver exagera,
É o desespero vermelho de um apocalipse luminoso
Ejaculado na velocidade terrível da queda.

Diante do medo um sorriso aeróbico,
Nas bochechas a câibra de uma alegria incompleta,
Nada como um sorriso burro e paranóico
Para não perceber a velocidade terrível da queda.

<http://www.youtube.com/watch?v=9FwWI4L43e8>⁵

³ Escolhemos a Torre de Pisa para atirar a pedra e não a janela da sua casa, a fim de lhe trazer a memória o episódio lendário acerca da torre inclinada de Pisa, de onde Galileu Galilei atira duas balas de canhão, uma dez vezes mais pesada que a outra, para demonstrar que o tempo de queda dos corpos (cuja queda não for afetada pela resistência do ar) é o mesmo independente de suas massas.

⁴ Lembre-se que como explica a 1ª Lei de Newton, a Lei da Inércia, se nenhuma força atuasse sobre a pedra ela permaneceria lá, com sua velocidade inicial inalterada, a velocidade só muda pela ação de uma força (2ª lei de Newton), no exemplo então a pedra é LITERALMENTE FORÇADA (por uma força!) a acelerar em direção à Terra, por isso usamos a expressão “a pedra foi obrigada a acelerar em direção ao planeta”. É a ação da força gravitacional que determina a aceleração e a trajetória da pedra.

⁵ Esse “link” do “youtube” mostra o cantor e compositor Lobão numa apresentação acústica. Como você sabe, “links” do “youtube” são muitas vezes provisórios, por exemplo, minha versão preferida era do Acústico da MTV, “no longer available due to a copyright claim by MTV Brasil”, portanto se o link acima não funcionar faça uma nova busca.

2) INTERAÇÃO À DISTÂNCIA VERSUS INTERAÇÃO MEDIADA

Então essa idéia de campo foi um modelo que os físicos criaram para explicar os fenômenos gravitacionais e eletromagnéticos, que são aparentemente INTERAÇÕES À DISTÂNCIA, já reparou isso? Por exemplo, uma pedra está caindo porque a Terra a está atraindo, mas como é que a Terra está puxando a pedra? Ela tem um braço que vai lá pega a pedra e a puxa para baixo? Não, não há contato físico (de toque) entre a pedra e a Terra, elas não se tocam durante essa queda, tem uma distância entre elas (que está diminuindo), mas elas ainda mantêm distância uma da outra, só se tocam quando a pedra chegar ao solo, mas antes disso, durante todo o tempo da queda, a pedra e a Terra estão interagindo, mas a interação é à distância, daí o nome, INTERAÇÃO À DISTÂNCIA.

O mesmo acontece com o ímã: já reparou que antes de você colocar o ímã em contato com a porta da geladeira já dá para sentir que existe uma força de atração entre eles? Como é que eles se puxam se ainda não há contato entre eles?

O mesmo também acontece com a eletricidade: você já deve ter feito o famoso experimento de picotar um pedacinho de papel em pedaços ainda menores, esfregar um pente de plástico no cabelo e daí quando você aproxima o pente dos papeizinhos, os papeizinhos “saem voando” e grudam no pente. Como é que tudo isso acontece sem encostar, sem contato físico?

Bom os três exemplos que eu acabei de dar, não foram escolhidos à toa, esses são os três tipos de interação à distância que estudamos na escola: a interação gravitacional, a interação elétrica e a interação magnética. E foi para explicá-las que os físicos criaram a idéia de campo, ou seja, essas interações aparentemente à distância são na verdade mediadas pelo campo. Mas como não enxergamos o campo, vemos apenas os corpos interagindo à distância, denominamos essas interações de interações à distância.

Então precisamos distinguir dois tipos de força: as forças em que a interação entre os corpos é visivelmente por contato, que chamamos FORÇAS DE CONTATO (faz sentido), e as forças em que as interações acontecem aparentemente de maneira “mágica”, sem contato físico, aparentemente interações à distância, essas nós hoje chamamos de FORÇAS DE CAMPO.

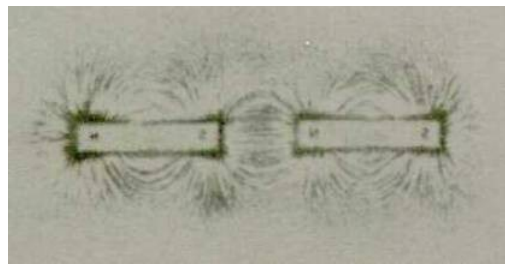
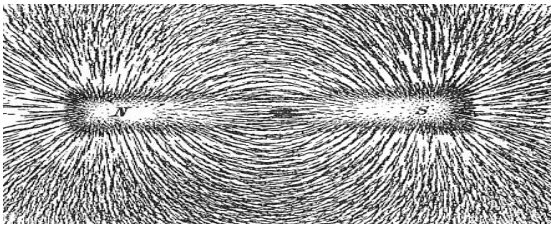
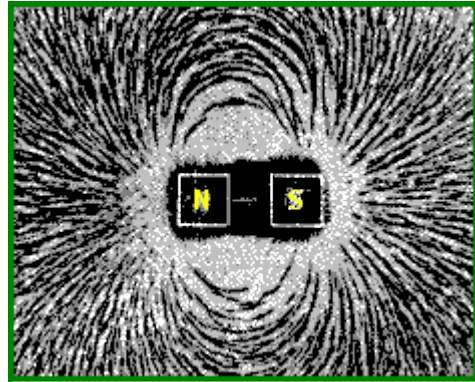
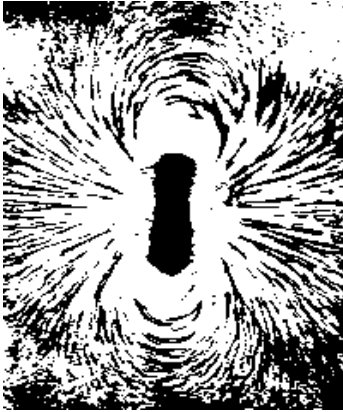
Com esse modelo em mente vamos agora repensar o fenômeno da queda da pedra. A Terra, que é ENORRRRME em comparação à pedra, deformou o campo gravitacional em torno dela (esqueça a deformação que a massa da pedra gera, porque ela é desprezível em comparação à deformação que a Terra gerou), então a queda da pedra na verdade é a pedra

deslizando nesse campo (como aquela membrana elástica) deformado pela big massa do planeta Terra.

O formato da deformação (e pasme, isso não é um “pleonasma redundante”, uma vez que a deformação pode ter diferentes formatos) depende do formato do corpo que a gerou, explico: é como na areia da praia, imagine a areia bem fofinha, qualquer objeto que você puser sobre ela imprimirá nela seu formato, então se você pisar, o formato do seu pé ficará impresso, ou se você sentar o formato do seu “bumbunzinho” ficará impresso lá também, ou ainda se você apoiar um balde com fundo em formato de estrela a deformação produzida na areia terá o formato de uma estrela (o formato da deformação, portanto, reflete, expressa, o formato do corpo deformador), então vamos considerar que a Terra seja uma esfera perfeita (aproxime o formato geóide da Terra a o de uma esfera), então a deformação que ela gera no campo gravitacional tem o formato como se fosse de um poço, aí a pedra vai deslizando pelas paredes desse poço (ela desliza na curvatura da deformação) em direção ao fundo do poço onde está o planeta e esse deslizar cessa, quando a pedra encosta a superfície do planeta, porque ambos são sólidos e daí a própria barreira física impede que o movimento continue, mas a atração entre elas (deformação) continua lá, mantendo as duas “grudadas” uma na outra.

Então, a interação à distância entre as duas acontece por meio do campo gravitacional, mas você só enxerga a Terra e a pedra, você não enxerga o campo entre elas, por isso a interação é denominada interação à distância, mas os físicos de campo acreditam que o modelo seja esse: o campo está lá, apesar de você não o ver, por isso eles preferem chamar essa interação de INTERAÇÃO MEDIADA (mediada pelo campo).

Até dá quase para ver campo, bem fácil até, se for fácil conseguir um ímã forte e limalha de ferro, veja, abaixo estão fotos que retratam a disposição espacial que as limalhas de ferro espontaneamente tomam quando espalhadas sobre uma folha de papel posta por cima de um forte ímã. As limalhas de ferro espontaneamente se posicionam nessa configuração, “revelando” a forma do campo magnético do ímã.



Note que só há fenômenos associados ao campo quando eles estão deformados, por exemplo. O campo só pode ser uniforme no vácuo, onde não houver massa, carga ou dipolos magnéticos, (eles têm de estar infinitamente longe), para que não haja nenhuma deformação do campo naquele espaço.

É por isso inclusive que se chega a dizer que a massa (no caso do campo gravitacional) CRIA o campo gravitacional em torno dela, mesmo nos enunciados dos exercícios nos é comum escrever: “calcule a intensidade do campo gerado pela massa tal...”. O professor escreve assim nos exercícios, mas quando ele apresenta a explicação teórica, ele diz que o campo estava lá o tempo todo, a massa não gera o campo, o campo já está lá, o que a massa fez foi deformar o campo que já estava lá.

Então, por que essa confusão de expressões? E por que esse vício de dizer que a massa gera o campo? É que o campo só tem importância, deformado; na verdade só existem fenômenos associados a esse campo depois que ele é deformado. Campo sem deformação, não dá para medir, não acontece nada nele, então é mesmo como se ele nem existisse, mas o modelo é que ele já está lá, os corpos vão apenas deformá-lo, e só depois de deformado é que o campo se manifesta.

Apesar dessa ressalva, por tradição, manterei o uso viciado da expressão “gerar campo”.

Organizando algumas informações: massa gera campo gravitacional, carga gera campo elétrico e dipolo magnético gera campo magnético. Mas espere aí, não já se juntou campo

elétrico com o campo magnético? Já sim, por isso a gente fala hoje em dia de campo eletromagnético, e já se percebeu que carga elétrica em movimento gera o campo magnético e que variações no campo magnético geram corrente elétrica. Ótimo, o desafio agora é juntar o campo gravitacional ao campo eletromagnético.

Einstein tentou, mas não conseguiu.

Uma das diferenças entre os fenômenos eletromagnéticos e os fenômenos gravitacionais é a seguinte: já reparou que tanto na eletricidade quanto no magnetismo você tem dois tipos de interação? A interação pode ser de atração ou de repulsão, cargas de sinais opostos se atraem e cargas de mesmo sinal se repelem na eletricidade, e pólos opostos se atraem e pólos iguais se repelem no magnetismo; mas na gravidade, massa atrai massa e pronto, e a “antimatéria”⁶? Cadê uma “antimatéria” que apresente o comportamento de repulsão? Tipo assim: matéria atrai matéria e “antimatéria” atrai “antimatéria” e “antimatéria” e matéria se repelem, cadê a “antimatéria” e cadê essa interação de repulsão? Estamos trabalhando nisso.

Por que esperamos que essa “antimatéria” exista e que essa interação de repulsão também aconteça na gravitação? Porque quanto mais simetria (semelhança) houver entre o eletromagnetismo e a gravitação, quanto mais semelhantes forem os dois sistemas, mais fácil se torna a fusão deles numa única teoria e num único modelo de campo, o campo “eletromagneticogravitacional” (whatever!).

Em relação à natureza das manifestações, você pode achar esquisito que se cogite que os fenômenos gravitacionais tenham a mesma origem dos fenômenos eletromagnéticos, mas esse seu estranhamento poderia ser dirigido (direcionado) também à união da eletricidade com o magnetismo, pois, ora, que relação haveria entre as pedrinhas magnéticas e um relâmpago? E como vimos esses fenômenos estão hoje unificados (ambos contidos) no eletromagnetismo.

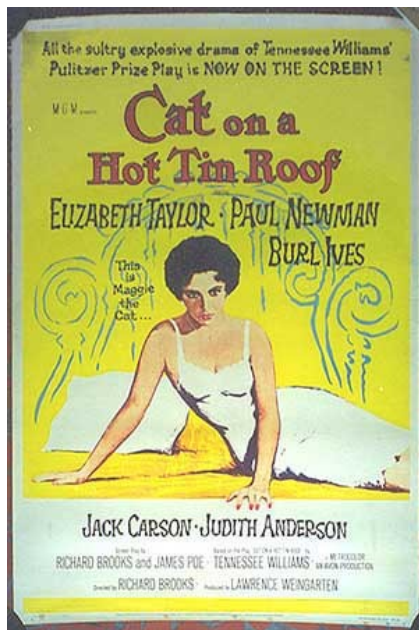
⁶ Aqui o termo “antimatéria” não nos serve, por isso estamos usando o termo “antimatéria”. Antimatéria designa os átomos formados por antipartículas, núcleo negativo e eletrosfera positiva (pósitrons). A força gravitacional não diferencia entre matéria e antimatéria. Usamos então o termo “antimatéria” para designar um corpo cujo comportamento gravitacional é oposto ao da matéria.

3) GRAVITAÇÃO Força Gravitacional (Significado Físico)

As semelhanças entre a teoria eletromagnética e a teoria gravitacional são muitas, você deve ter estudado primeiramente a gravitação. Vamos recordar:

O que é peso? É uma força de atração entre as massas, massa atrai massa, e a intensidade dessa força de atração é tão maior quanto forem as massas (envolvidas), então todas as massas próximas a você exercem atração e se sentem atraídas por você, tudo bem, mas o problema aqui é que você nunca sentiu isso!

Por exemplo, o teto “puxa” você para cima e o chão “puxa” você para baixo, mas você não “gruda” no teto (diga-se de passagem, você nem sequer sente que existe força de atração entre você e o teto), mas você “gruda” no chão, por quê? Porque no chão, ou seja, debaixo de seus pés (você está de pé, ok?) tem um planeta inteiro de massa deformando o campo, enquanto que no teto sobre sua cabeça, estão apenas algumas toneladas de material de construção, ou até mesmo apenas umas telhinhas, ou (na melhor das hipóteses) sobre sua cabeça tem a massa de uma gata em teto de zinco quente (não se tem dúvida, aliás, da atração



que a massa da gata exerce sobre sua massa, principalmente sendo a gata a Elizabeth Taylor aos 26 anos (ok, você nunca nem ouviu falar de Elizabeth Taylor? Pesquise no Google! Ela tem, inclusive, olhos lilases, o que é explicado pelo albinismo de íris, sexy não?)), daí, como explicamos, quanto maior a massa maior a deformação, como a massa do teto é desprezível quando comparada à massa do chão, a deformação que o teto provoca é desprezível em comparação à deformação que o chão (planeta Terra) provoca, daí que você sempre sentiu que o chão lhe “puxa” e nunca sentiu que o teto lhe “puxa”.

É provável inclusive que já tenham lhe dito que peso ou força gravitacional é a força de atração que a Terra exerce sobre os corpos que estiverem próximos a ela, mas a força de atração gravitacional da Terra é apenas um exemplo de força gravitacional, mas que JAMAIS deveria ser usada dessa forma como definição. Um exemplo não é uma definição, capisce?

É fácil apontar vários problemas que podem surgir quando se adota o exemplo da força gravitacional da Terra como definição de força gravitacional, por exemplo, se peso é a força de atração que a Terra exerce sobre os corpos que estiverem próximos a ela, se um

astronauta for a Marte, ele tem o que lá? Não tem peso não? Tem, mas ele tem peso devido a Marte, agora é com Marte a principal interação gravitacional dele, e não mais com o planeta Terra, mas a definição equivocada afirma que peso é uma força de atração que a TERRA exerce sobre os corpos que estiverem próximos dela, aí complicou tudo.

Outro problema que surge, na verdade um mito e um ponto obscuro que essa definição equivocada cria, é que só se faz menção ao campo gravitacional da Terra, daí que campo gravitacional começa a tomar forma de uma entidade esotérica de propriedade exclusiva do planeta Terra, ou na melhor das hipóteses, propriedade dos planetas (só eles têm a capacidade mediúmica de incorporarem essa tal dessa entidade denominada campo gravitacional), a pergunta é: o que é que eles têm que eu não tenho que lhes capacita a “ter” campo gravitacional e eu não?

Bom, é importante para desfazer esse equívoco, enfatizar que peso é uma força de atração entre as massas, matéria atrai matéria e a intensidade dessa força de atração depende do tamanho dessas massas, quanto maior forem as massas, maior será a força de atração entre elas, e como a sua massa, leitor, em comparação com a da Terra não dá nem para fazer “cosquinha”, eu não sinto a atração que existe entre nós (pelo menos não a gravitacional), “pero que la hay, la hay”, ou seja, eu, você, qualquer massa “tem” sim seu campo gravitacional. Um bom exercício seria o de calcular o seu próprio campo gravitacional, alguma vez você já fez isso? Talvez fazendo isso pelo menos uma vez na vida, poderíamos nos apropriar melhor do conceito correto de que gravidade é uma propriedade intrínseca da matéria, matéria atrai matéria.

Isso explica também uma pergunta infantil muito comum:



“Por que o chinês que está do outro lado do planeta não cai ‘para baixo’ para fora da Terra?”

Nós vimos que a força gravitacional é uma atração entre as massas, massa atrai massa, simples assim (pero no mucho). Então todos os corpos massivos do universo atraem você, puxam você para perto deles, mas a intensidade dessa força de atração é tão maior quanto maior for a massa do corpo que estiver lhe atraindo e é também tão maior quanto menor for a distância entre vocês (mais perto vocês estiverem um do outro).

Daí imagine a seguinte situação (aqui me dirijo especialmente às leitoras desse texto): você livre, leve e solta no espaço sideral, Reynaldo Gianecchini por perto (fixo num ponto desse espaço vazio, e não me pergunte como pode alguém estar fixo num ponto do espaço vazio; sei lá, deve ser no mínimo com pó de pirlimpimpim). O fato é que a massa do Gianecchini atrai a sua massa (isso você já sabia há muito tempo) e agora a melhor parte: A SUA MASSA TAMBÉM ATRAI A MASSA DO GIANECCHINI!!! (Nada melhor do que amor correspondido!). Logo, por atração gravitacional entre as massas, você será acelerada em direção ao Gianecchini até encostar nele, não é o máximo?

MAS, contudo, entretanto, todavia, tão próximo de você quanto o Reynaldo Gianecchini, só que no sentido oposto, encontra-se o Jô Soares (também fixo num ponto desse espaço vazio, e também não me pergunte como) e sinto lhe informar que a massa do Jô Soares atrai a sua massa e a sua massa também atrai a massa do Jô Soares.

E agora o trágico desfecho final: para que lado você será acelerada? A força de atração gravitacional depende tanto da distância quanto da massa (mas aqui o fator distância não é determinante, pois a distância entre você e o Gianecchini é a mesma que entre você e o Jô), sobra então o fator massa. A massa do Jô Soares é bem maior que a do Gianecchini, logo a força de atração gravitacional que o Jô exerce sobre você é maior que a força de atração gravitacional que o Gianecchini exerce sobre você, conclusão: você será acelerada em direção ao Jô Soares até encostar nele e vai ficar lá grudada até que a morte os separe e vocês virem poeira cósmica, amém.



Conclusão você acaba “grudando” no maior corpo que lhe estiver próximo, assim, retornando à pergunta original sobre o chinês: vimos que os fatores que determinam a

intensidade da força gravitacional são a massa e a distância, em nenhum momento o referencial de “para cima”, “para baixo”, “para o lado”, etc, faz qualquer diferença no fenômeno, aliás todos esses referencias são inclusive relativos (subjetivos), logo você “gruda” no maior e mais próximo corpo que houver, não importa a posição que você esteja (você pode até estar de cabeça para baixo), e é evidente que nas nossas dimensões terrestres o maior corpo por perto é, sem dúvida, o próprio planeta Terra, n’est-ce pas?

Se você plantar bananeira, você fica “grudada” na Terra pelas mãos; se você ficar numa posição deitada de bruços, você vai ficar “grudada” na Terra pela barriga e se você ficar em pé você fica “grudada” na Terra pelos pés.

Com essa perspectiva em mente, reflita sobre as duas ilustrações abaixo:



Observação: na verdade a força gravitacional entre você e o Jô Soares ou o Gianecchini existe, mas é desprezível, pois as massas são muito pequenas e acabam sendo “engolidas” pela constante gravitacional é que de $G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$, e haja massa para compensar 10^{-11} ! Percebe? A massa do planeta Terra é de $5,98 \times 10^{24}$ kg, massas dessa ordem de grandeza sim, é que, sem dúvida, fazem frente aos 10^{-11} da ordem de grandeza da constante gravitacional.

Outra observação: não é a China que está do outro lado do planeta em relação a nós os brasileiros e sim a Austrália (tomando Brasília como referência). A China é o país que fica diametralmente oposto aos EUA, mas como a maioria dos desenhos animados que vemos na televisão são “made in USA”, acabamos por assimilar no nosso imaginário que a China nos fica diametralmente oposta. E para aproveitar essa imagem que já está construída no nosso imaginário, foi que eu usei o chinês mesmo.

4) GRAVITAÇÃO Força e Campo (Fórmulas)

Bom, agora, vamos revisar as fórmulas da gravitação.

Vamos simbolizar força gravitacional por F_g (F maiúsculo com o sub-índice “g” de gravitação), e vamos usar a letra grega alfa (α) para simbolizar a relação de proporcionalidade, daí esse primeiro conceito fica assim:

A força gravitacional é a força de atração entre as massas e quanto maiores forem essas massas maior será essa força,

ou seja, a força gravitacional é diretamente proporcional a massa do corpo 1 (m_1):

$$F_g \propto m_1$$

(EXPRESSÃO 1)

e a força gravitacional é diretamente proporcional a massa do corpo 2 (m_2):

$$F_g \propto m_2$$

(EXPRESSÃO 2)

Portanto, a força gravitacional (a força de atração entre os corpos) é diretamente proporcional às massas dos corpos que estão se atraindo:

$$F_g \propto m_1 m_2$$

(EXPRESSÃO 3)

E o outro fator que influi nessa interação é a distância entre os corpos, quanto menor for a distância entre eles, maior será a força de atração entre eles (e quanto mais longe ele estiver de você, menor será a atração entre vocês: “sonho meu, sonho meu, vai buscar quem mora longe, sonho meu...”), então a força gravitacional é inversamente proporcional à distância entre os corpos, vamos escrever isso matematicamente:

$$F_g \propto \frac{1}{d}$$

(EXPRESSÃO 4)

onde a letra d é o símbolo que estamos usando para representar a distância entre os corpos.

Com experimentos averiguou-se que essa relação não é apenas de inversamente proporcional à distância, mas, mais precisamente, inversamente proporcional ao quadrado da distância:

$$F \propto \frac{1}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 5)

Agora que analisamos a relação que todas as variáveis que influem no fenômeno têm com a grandeza (F_g) que estamos investigando (estamos supondo que não há outras variáveis que influam nesse fenômeno), vamos juntar todas elas numa só, ou seja, juntando a (EXPRESSÃO 3)

($F_g \propto m_1 m_2$) à (EXPRESSÃO 5) $\left(F_g \propto \frac{1}{d^2} \right)$ podemos escrever que:

$$F_g \propto \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 6)

Daí, medindo (dentro de um determinado sistema de unidades de medida) esses valores num laboratório e ajustando os dois membros da proporcionalidade por meio de uma constante, estabelecemos a seguinte relação de igualdade:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 7)

onde G é o símbolo que utilizamos para a constante gravitacional

A força gravitacional tem ainda outra representação (ela pode ser expressa por meio de outra fórmula). A força gravitacional (sinônimo de força peso) pode ser expressa pela segunda lei de Newton:

$$F = ma$$

(EXPRESSÃO 8)

Basta substituir, na expressão acima, a força (F) pela força peso (P) e substituir a aceleração (a) pela aceleração da gravidade (g), veja:

$$P = mg$$

(EXPRESSÃO 9)

Pára tudo! Silêncio total! Muita calma nessa hora!

Observação importante sobre a expressão anterior, (EXPRESSÃO 9) $P = mg$:

Atente que g é ao mesmo tempo aceleração da gravidade e campo gravitacional!

Por que?

O que acelera o corpo (na fenomenologia gravitacional) é a **deformação** do campo (que por vício nós chamamos simplesmente de campo), ou seja, o que acelera o corpo é o campo gravitacional, então g é aceleração e campo.

Perceba que estamos utilizando dois símbolos distintos para representar a mesma coisa F_g é a força gravitacional que é a mesma coisa que peso (P), daí que nessa nossa notação:

$$P = F_g$$

(EXPRESSÃO 10)

Portanto, podemos igualar as expressões 9 ($P = mg$) e 7 ($F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$):

$$mg = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 11)

Agora estabeleço⁷ que:

$$m = m_1$$

(EXPRESSÃO 12)

⁷ No primeiro membro da EXPRESSÃO 11 $\left(mg = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \right)$, m é o corpo de prova, portanto m pode ser tanto m_1 como m_2 , dependendo do que você estabelecer no seu estudo do fenômeno como sendo o corpo que sofre a aceleração devido à deformação que o outro corpo gerou no campo, nessa notação vou definir que m_1 é o corpo de prova, ou seja, o corpo que sofre os efeitos do campo deformado pelo corpo m_2 .

Portanto cancelo m e m_1 nos dois lados da igualdade da (EXPRESSÃO 11) $\left(mg = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \right)$,

chegando à seguinte relação:

$$g = G \frac{m_2}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 13)

que é a expressão para o campo gravitacional.

Você pode agora usar essa última expressão para calcular seu campo gravitacional, por exemplo, a um metro de distância ao seu redor (compare o valor do seu resultado com o g da Terra que é $9,8 \text{ m/s}^2$ aproximadamente, e veja que na comparação, o seu campo gravitacional não dá nem pra fazer “cosquinha”).

5) ELETRICIDADE - Força e Campo (Fórmulas)

O tratamento dos fenômenos elétricos é igual ao dos fenômenos gravitacionais que apresentamos.

Na verdade você vai perceber que as fórmulas da gravitação que acabamos de revisar são iguais às fórmulas da eletricidade, basicamente só vamos trocar os elementos:

GRAVITAÇÃO	
Campo Gravitacional	Força Gravitacional
$g = G \frac{m_2}{d^2}$	$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$
↓	↓
$E = k \frac{q_2}{d^2}$	$F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$
Campo Elétrico	Força Elétrica
ELETRICIDADE	

m (massa) vira q (carga elétrica)

F_g (força gravitacional) e P (força peso), que são a mesma coisa, viram F_{el} (força elétrica)

g (campo gravitacional) vira E (campo elétrico)

G (constante gravitacional) vira k (constante elétrica)

O que faz todo o sentido (sentido pelo menos etimológico, por enquanto, depois vamos explorar os significados físicos), veja:

m vira q, por que isso faz sentido?

Porque massa, que é o que gera campo gravitacional, vai ser substituída pela carga que é o que gera campo elétrico.

F_g (e P que são a mesma coisa) vira F_{el} , por que isso faz sentido?

Porque no trato dos fenômenos elétricos vamos nos referir à força elétrica onde antes no trato dos fenômenos gravitacionais nos referíamos à força gravitacional ou força peso.

g vira E, por que isso faz sentido?

Porque no trato dos fenômenos elétricos vamos nos referir ao campo elétrico onde antes no trato dos fenômenos gravitacionais nos referíamos ao campo gravitacional.

G vira k, por que isso faz sentido?

Porque no trato dos fenômenos elétricos vamos nos referir à constante elétrica onde antes no trato dos fenômenos gravitacionais nos referíamos à constante gravitacional.

Bom, vamos então revisar as fórmulas da eletricidade:

Vamos simbolizar força elétrica por F_{el} (F maiúsculo com o sub-índice “el” de eletricidade), e vamos continuar usando a letra grega alfa (α) para simbolizar a relação de proporcionalidade: A força elétrica é a força de atração/repulsão entre as cargas elétricas e quanto maiores forem os módulos dessas cargas maior será essa força,

ou seja a força elétrica é diretamente proporcional à carga do corpo 1 (q_1):

$$F_{el} \propto q_1$$

(EXPRESSÃO 14)

e a força elétrica é diretamente proporcional à carga do corpo 2 (q_2):

$$F_{el} \propto q_2$$

(EXPRESSÃO 15)

Portanto, a força elétrica (a força de atração/repulsão entre as cargas) é diretamente proporcional às cargas que estão interagindo:

$$F_{el} \propto q_1 q_2$$

(EXPRESSÃO 16)

E o outro fator que influi nessa interação é a distância entre as cargas, quanto menor for a distância entre elas, maior será a força de atração/repulsão entre elas, então a força elétrica é inversamente proporcional à distância entre as cargas, vamos escrever isso matematicamente:

$$F_{el} \propto \frac{1}{d}$$

(EXPRESSÃO 17)

onde a letra d é o símbolo que estamos usando para representar a distância entre as cargas

Com experimentos averiguou-se que essa relação não é apenas de inversamente proporcional à distância, mas, mais precisamente, inversamente proporcional ao quadrado da distância:

$$F_{el} \propto \frac{1}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 18)

Agora que analisamos a relação que todas as variáveis que influem no fenômeno têm com a grandeza (F_{el}) que estamos investigando (estamos supondo que não há outras variáveis que

influem nesse fenômeno), vamos juntar todas elas numa só, ou seja, juntando a (EXPRESSÃO 16)

($F_{el} \propto q_1 q_2$) à (EXPRESSÃO 18) $\left(F_{el} \propto \frac{1}{d^2} \right)$ podemos escrever que:

$$F_{el} \propto \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 19)

Daí, medindo (dentro de um determinado sistema de unidades de medida) esses valores num laboratório e ajustando os dois membros da proporcionalidade por meio de uma constante, estabelecemos a seguinte relação de igualdade:

$$F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 20)

onde k é o símbolo que utilizamos para a constante elétrica

Quando chegamos a esse ponto no tratamento da força gravitacional apresentamos uma outra forma de se expressar a força peso usando a segunda lei de Newton, lembra? Ficou assim:

A força gravitacional (sinônimo de força peso) pode ser expressa pela segunda lei de Newton:

$$F = ma$$

(EXPRESSÃO 8)

Bastando substituir, na expressão acima, a força (F) pela força peso (P) e substituir a aceleração (a) pela aceleração da gravidade (g). Vamos agora adotar o mesmo procedimento para a força elétrica, já pegando a expressão da força peso como atalho, ou seja, vamos partir da relação que:

$$P = mg$$

(EXPRESSÃO 9)

i.e., a força peso é igual à massa multiplicada pelo campo gravitacional

Para (usando o artifício de que P vira F_{el} e g vira E) estabelecer analogamente que:

$$F_{el} = qE$$

(EXPRESSÃO 21)

i.e., a força elétrica é igual à carga multiplicada pelo campo elétrico

Observação importante sobre a expressão anterior, (EXPRESSÃO 21) $F_{el} = qE$:

O que acelera o corpo (na fenomenologia elétrica) é a deformação do campo elétrico, que por vício nós chamamos simplesmente de campo elétrico, ou seja o que acelera o corpo é o campo elétrico, daí que E , assim como o g da gravitação, cumpre (ocupa) a função (o papel) da aceleração da segunda lei de Newton.

Bom, já que temos duas expressões para a força elétrica podemos igualá-las; vamos, então,

igualar a (EXPRESSÃO 21) ($F_{el} = qE$) à (EXPRESSÃO 20) ($F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$) obtendo:

$$qE = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 22)

Agora estabeleço⁸ que:

$$q = q_1$$

(EXPRESSÃO 23)

Portanto cancelo q e q_1 nos dois lados da igualdade da (EXPRESSÃO 22) $\left(qE = k \frac{q_1 q_2}{d^2} \right)$,

chegando à seguinte relação:

$$E = k \frac{q_2}{d^2}$$

(EXPRESSÃO 24)

que é a expressão para o campo elétrico.

⁸ No primeiro membro da EXPRESSÃO 22 $\left(qE = k \frac{q_1 q_2}{d^2} \right)$, q é a carga de prova, portanto q pode ser tanto q_1 como q_2 , dependendo do que você estabelecer no seu estudo do fenômeno como sendo a carga que sofre a aceleração devido à deformação que a outra carga gerou no campo, nessa notação vou definir que q_1 é a carga de prova, ou seja, a carga que sofre os efeitos do campo deformado pela carga q_2 .

Vamos começar a organizar essa analogia entre gravitação e eletricidade em tabelas com as fórmulas que temos até agora, uma tabela com as fórmulas da gravitação e outra tabela com as fórmulas da eletricidade.

Veja a página seguinte.

Observe que em todas as tabelas a diferença entre as fórmulas de campo e força é apenas o fator corpo de prova, isto é, basta você acrescentar o corpo de prova à fórmula do campo que você terá a fórmula da força.

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
g	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$P = mg$

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
$g = G \frac{m_2}{d^2}$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
E	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = qE$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
$E = k \frac{q_2}{d^2}$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$

Então **É COMO SE A FORÇA FOSSE A MANIFESTAÇÃO DO CAMPO**, explico: o campo está lá, deformado por algum corpo, e você não enxerga esse campo, mas quando você põe um corpo de prova nesse campo, esse corpo sofre a ação de uma força e isso revela, demonstra, manifesta, que existe um campo lá e que ele está deformado. É isso que eu quero dizer quando afirmo que: **A FORÇA MANIFESTA O CAMPO**. Daí que faz muito sentido que baste você adicionar o corpo de prova à fórmula do campo para obter a fórmula da força.

Meu objetivo aqui é comparar as fórmulas da gravitação e da eletricidade, colocando-as nessas tabelas agrupadas que facilitem a visualização das semelhanças entre elas.

Uma grandeza crucial na física é sem dúvida a energia, vamos agora revisar a fórmula da energia na gravitação, mas antes vamos lembrar a fórmula da energia na mecânica. Para isso, voltaremos à fórmula de trabalho que você estudou lá na mecânica.

Por que é que para chegarmos à fórmula da energia começaremos com a expressão para o trabalho?

Trabalho e energia são intercambiáveis, ou seja, é “como se eles fossem a mesma coisa”, até mesmo por causa disso, em alguns livros de física acaba surgindo uma infeliz definição cíclica que diz que energia é a capacidade de realizar trabalho e que trabalho é a energia sendo gasta!!!

Bom, é vero que quando você realiza trabalho você gasta energia:

$$\tau = \Delta \text{energia}$$

(EXPRESSÃO 25)

As unidades de medida de trabalho e energia são as mesmas (tem que ser, caso contrário, teríamos uma incoerência na análise dimensional da fórmula acima).

Uma unidade de medida comum de energia e trabalho no nosso cotidiano é a kcal (que por um bizarro vício infame chamamos em geral apenas de “caloria” e não quilocaloria que é, na verdade, ao que se está fazendo referência quando se menciona “caloria”).

Então, todos precisamos de energia para manter as nossas vidas. Nós obtemos essa energia dos alimentos, os alimentos podem ser mais energéticos ou menos energéticos e nossa referência para valorar isso é a quantidade de quilocalorias contida no alimento, então a unidade de medida de energia nessa situação é a quilocaloria. Quando realizamos trabalho estamos queimando essa energia que consumimos, e o trabalho também é medido em quilocalorias, em algumas academias, por exemplo, as esteiras te avisam (a partir dos parâmetros de velocidade que você desenvolveu e tempo e “distância” que você andou) quantas calorias foram gastas até então (o que pode se converter em uma neurose do tipo: antes de você comer aquele saquinho de deliciosas pipocas de isopor (pipoquinhas Nhak) você lê no rótulo a quantidade de quilocalorias que aquele pacote contém e você pensa: “Meu, para gastar isso eu vou ter de correr duas horas na esteira!!! Deus do céu!!!”).

Bom, mas a “unidade de medida oficial”, quero dizer a unidade de medida adotada pelo sistema internacional de unidades para a energia e o trabalho não é a quilocaloria e sim o joule (se acostume, nem sempre, ou quase nunca, a unidade que lhe é mais familiar é a unidade oficial da grandeza (“você vai morrer e não vai pro céu, é bom aprender a vida é cruel”, Titãs)).

Uma outra maneira de se perceber a relação direta entre energia e trabalho é, além da que vimos que para realizar trabalho você gasta energia, é perceber a relação no sentido de que quando eu realizo trabalho sobre um objeto eu altero a energia dele.

Uma boa explicação dessa relação está no livro Física e Realidade dos autores Gonçalves e Toscano:

Trabalho é a medida da energia transferida e/ou transformada.
Como se dá a transferência de energia?

Considere um balde pendurado por uma corda e o planeta Terra como partes de um sistema. Quando uma pessoa puxa a corda suspendendo ainda mais o balde, uma **força** é feita no balde, **deslocando-o**. Fisicamente, há uma **transferência de energia** da pessoa para o sistema Terra-balde. Esta energia ficará armazenada no sistema, provocando uma mudança em sua energia potencial: houve uma variação da **posição** do balde em relação à Terra.

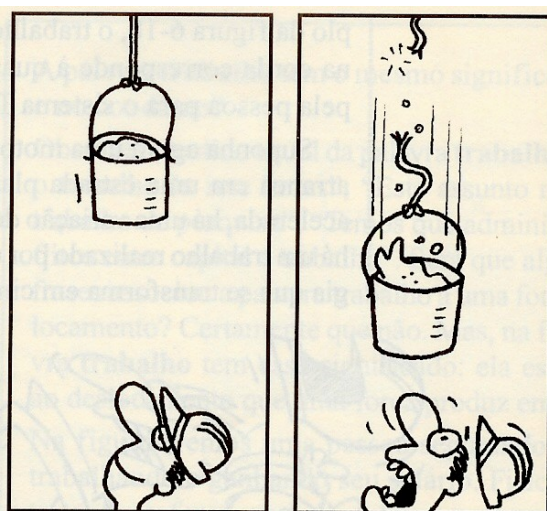
Por que podemos afirmar que a energia foi armazenada no sistema Terra-balde?

Se a corda for solta e o balde cair, sua energia cinética vai aumentar com o passar do tempo. De acordo com o princípio da conservação da energia, uma outra forma de energia deve estar se transformando em cinética. Essa energia, que estava armazenada no sistema Terra-balde enquanto eles estavam afastados, é a energia potencial de interação gravitacional.

Quando o balde é afastado da Terra pela ação de uma **força**, uma quantidade de energia é **transferida** (no caso, a pessoa que puxa a corda transfere energia para o sistema Terra-balde). Quando o balde cai, a ação da força peso provoca a **transformação** de energia (energia potencial de interação gravitacional → energia cinética).

O **deslocamento** provocado pela aplicação de uma força, na subida e na descida, é responsável pela transferência da energia ou por sua transformação.

Em física, a aplicação de uma força provocando um deslocamento corresponde ao conceito de **trabalho**. Isto é, dizemos que há transferência ou transformação de energia quando uma força realiza trabalho, deslocando um objeto. Para um objeto em queda livre, o trabalho da força peso indica a quantidade de energia potencial de interação gravitacional transformada em energia cinética. No exemplo do balde pendurado, o trabalho realizado pela força aplicada na corda corresponde à quantidade de energia transferida pela pessoa para o sistema Terra-balde.



Suponha agora uma moto, inicialmente em repouso, que arranca em uma estrada plana e horizontal. Quando ela é acelerada, há uma variação de sua energia cinética; portanto, há um trabalho realizado por uma força. De onde vem a energia que se transforma em cinética durante a arrancada?

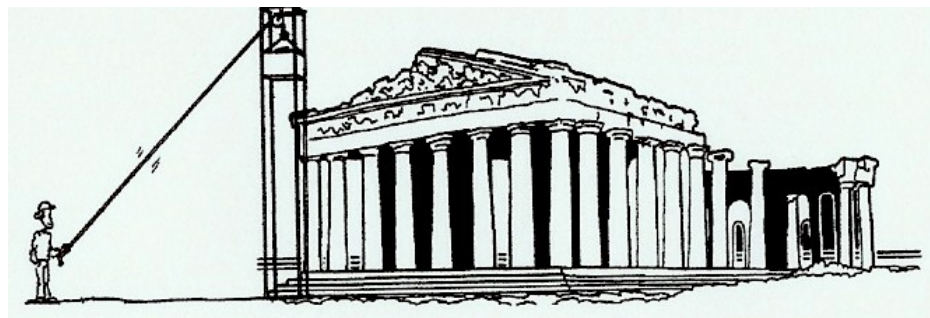
Essa energia cinética é resultado do trabalho realizado pelo motor. A queima do combustível (reação de combustão) transforma parte da energia química armazenada em energia cinética.

Existem situações, entretanto, em que isto não acontece. Por exemplo: um carro parado em um semáforo, com o motor ligado, em ponto morto. O combustível fornece energia ao movimento dos pistões, mas não move o carro. Não há força de interação entre o carro e o solo, impulsionando-o e realizando trabalho. Desse modo, a energia proveniente do combustível acaba se transferindo quase que totalmente para o ambiente, aquecendo-o, e não há realização de trabalho sobre o carro, já que seu deslocamento é nulo.

O **trabalho** de uma força é uma maneira de medir a quantidade de energia **transferida**, ou **transformada**, de um sistema para outro ou, em certos casos, a quantidade de energia transformada dentro de um mesmo sistema.

Agora que relembramos essas relações, precisamos recordar a fórmula para o trabalho.

Uma boa apresentação para a expressão do trabalho está nas Leituras em Física do GREF disponível no site da USP:



A Física fornece uma forma geral de medir o trabalho de máquinas, ou de qualquer outra coisa. Digamos que esta coisa seja o Sr. Hércules Pereira da Silva, trabalhador da construção civil, que no cumprimento do seu dever, transporta materiais de construção para o alto de um prédio em construção, com o auxílio de um elevador manual.

No começo do dia, Hércules está totalmente envolvido com o seu dever e lota o elevador com 50 kg de areia, para elevá-la ao alto do prédio, a 6 metros de altura. É um trabalho e tanto. Na segunda viagem, ele decide que vai transportar só 25 kg de areia de cada vez. Nesse caso, em cada viagem ele realiza metade do trabalho. Outra maneira de realizar somente metade do trabalho, é descarregar a areia em um andaime, a 3 metros de altura. A idéia de trabalho que a Física usa é igual à do Hércules. Quanto maior a força e a distância percorrida, maior o trabalho. Isso pode ser expresso assim:

$$\tau = Fd$$

(EXPRESSÃO 26)

Na mesma obra, logo a seguir, é feita uma ressalva para ressaltar que na expressão acima o valor da força é o da componente paralela ao deslocamento. O tópico é intitulado: “Como fazer força sem realizar trabalho”

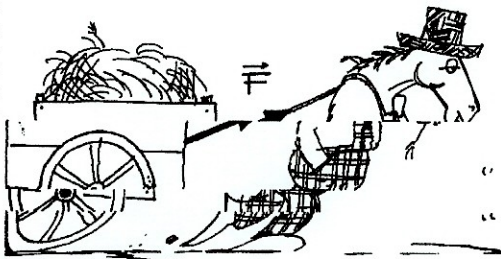
Como fazer força sem realizar trabalho

Claro que o que todo mundo quer saber é como realizar trabalho sem fazer força. Mas isso ainda nós não sabemos.

Porém, é possível fazer força e não realizar trabalho. Forças que realizam trabalho têm que provocar deslocamento. Se não houver deslocamento, não há trabalho, no sentido físico do termo.

Portanto, quando você segura um saco de cimento na cabeça, não está realizando trabalho, apesar da grande força necessária para isso. Fisicamente, quer dizer que você não está transferindo energia para o saco de cimento.

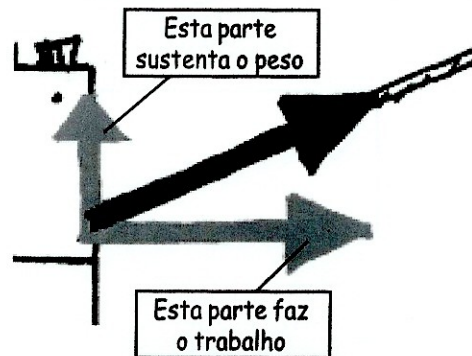
Um exemplo clássico é alguém arrastando um carrinho com uma cordinha, como na figura:



Neste caso, nem toda a força que o nosso amigo faz está servindo para realizar o trabalho de puxar a carroça.

Isso porque a força está inclinada em relação ao movimento. Somente uma parte dela, a componente horizontal está realmente

puxando a carroça. A outra, digamos assim, está sustentando parte do peso da carroça:



Portanto, para se calcular corretamente o trabalho sempre precisamos saber que parte da força realmente está realizando este trabalho. Somente as forças que fornecem ou retiram energia cinética do corpo é que realizam trabalho. Forças que apenas sustentam ou desviam não estão realizando qualquer trabalho.

Para se obter o valor da parte da força que realiza o trabalho, às vezes é necessário usar um cálculo matemático chamado co-seno. No exemplo da carroça, se a corda estiver inclinada de 20 graus, o valor do co-seno será 0,94. Quer dizer que se a força total for de 100 newton, apenas 94 newton serão realmente utilizados para realizar o trabalho. Esse valor se obtém multiplicando 0,94 por 100 newton. Você pode obter valores de co-senos para outros ângulos em uma tabela apropriada.

Mais uma observação importante, dessa vez do livro Fundamentos de Física, do autor Ramalho:

Em Física, **trabalho** está associado a forças, e não a corpos: diz-se “trabalho de uma força” e não “trabalho de um corpo”.

Finalmente para memorizar a expressão:

$$\tau = Fd$$

(EXPRESSÃO 26)

Proponho a seguinte fábula:

Bom, os primeiros físicos que adotamos como marco na nossa história ocidental, são os filósofos da Grécia Antiga, aliás, a física e a filosofia eram uma coisa só, por isso os filósofos gregos dessa época são também considerados físicos.

A palavra para “**natureza**” em grego é “**physiké**”, então **física** é o estudo da **natureza**, a tentativa de compreensão do funcionamento, dos padrões de comportamento da **natureza**, a fim de prevê-la, dominá-la ou apenas contemplar, admirar sua estética. É prazeroso ao físico desvendar, perceber padrões que estavam ocultos até então, é excitante desnudar a **natureza** ainda que em pequenos detalhes. Esse estudo é tão fascinante que pode provocar paixões lancinantes nesses sujeitos suscetíveis que são os físicos, alguns acabam mesmo dedicando as suas vidas inteiras à física (cuidado: essa paixão pode acabar se revelando avassaladora, “you gimme fever, fever when you kiss me, fever when you hold me tight, fever...” Peggy Lee, dê uma olhada no youtube: Fever Peggy Lee)

A palavra filosofia por sua vez significa o gosto (amizade) pelo saber o que nessa concepção engloba todos os tipos de conhecimento, então, esse grupo de pessoas (os filósofos da Grécia Antiga) estava tentando entender o universo ao redor deles, em todas as suas dimensões, estudando, produzindo sistematizando o conhecimento, daí terem sido estabelecidos como “pais” das várias áreas do conhecimento, do ponto de vista da história ocidental.

Daí, podemos associar à nossa definição de trabalho na mecânica, a concepção de trabalho desses filósofos: o nobre grego, o intelectual grego, não se auto atribuía a idéia de trabalho, o ideal grego é ter tempo livre, ocioso para filosofar sobre o universo (pensar, pesquisar, modelar, estudar) sozinho ou, sob a tutoria de mestres, em grupos de estudo que se reuniam em lugares chamados escolas, “*scholé*” que significa lugar de ócio.

Aproveite esse ensejo e reflita sobre sua concepção de escola. Compare com o ideal dos antigos gregos, que poderia modernamente ser apresentado nos seguintes termos: “A sociedade (ou mais diretamente seus responsáveis imediatos) me sustenta durante esse período na escola e nesse período eu não estou trabalhando, eu estou num “lugar de ócio” onde minha atividade é intelectual, onde sob a tutoria de mestres e por meio da troca de idéias

com meus colegas, eu amplio minha compreensão sobre a vida”. Esse momento de ócio para o desenvolvimento de seus estudos é um direito assegurado pela Constituição à criança e ao adolescente por isso o trabalho infantil é um crime, pois cerceia do jovem esse direito.

Voltando aos gregos: enquanto isso, para manter o grego nessa condição, existia uma massa (classe) de escravos que trabalhavam para lhe sustentar. Daí que na concepção grega antiga de trabalho: quem trabalha é o escravo ou o animal. Proponho, então, como artifício mnemônico, associar esse trabalho escravo à idéia de “fazer força na mesma direção de um deslocamento”. Escravos carregando seus senhores em liteiras, cavalos puxando carroças, bois movendo moendas... A imagem de um boi movendo uma moenda é, aliás, recorrente no filme Abril Despedaçado (assista) para comparar (emparelhar) a rotina bovina servil mantendo a máquina funcionando à condição bovina miserável servil daquelas pessoas mantendo o status quou de miserabilidade e dependência econômica da região (pelo menos essa foi minha interpretação pessoal do filme e a sua?).

Na definição de trabalho da mecânica temos que: trabalho é a força multiplicada pelo deslocamento.



E a princípio quando somos apresentados pela primeira vez à fórmula do trabalho não conseguimos em geral fazer uma conexão direta imediata com o nosso conceito interno de trabalho (hoje muito mais comumente associado à idéia de trabalho intelectual).

7) GRAVITAÇÃO E ELETRICIDADE *Energia Potencial (Fórmulas)*

Bom, então, adotamos que trabalho é a força multiplicada pelo deslocamento:

$$\tau = Fd$$

(EXPRESSÃO 26)

Daí que a relação $\Delta energia = \tau$ (EXPRESSÃO 25) acrescida da expressão anterior me autoriza a escrever que:

$$\Delta energia = Fd$$

(EXPRESSÃO 27)

Que equivale a:

$$energia_f - energia_i = Fd$$

(EXPRESSÃO 28)

o sub-índice “i” significa inicial
o sub-índice “f” significa final

Se considerarmos a energia inicial sempre como nula:

$$energia_i = 0$$

(EXPRESSÃO 29)

Podemos admitir que:

$$energia = Fd \text{ se } energia_i = 0$$

(EXPRESSÃO 30)

Tomo o atalho da expressão anterior (EXPRESSÃO 30), para, a partir da fórmula do trabalho, demonstrar as fórmulas de energia.

Voltando à gravitação, uma vez que (na condição da EXPRESSÃO 30) a energia é o produto (escalar) entre força e deslocamento, a energia potencial gravitacional é o produto entre força peso e altura. Ou seja, é só substituir na EXPRESSÃO 30 a força “genérica” pela força peso e o deslocamento “genérico” pela altura.

$$energia_{p_g} = Ph$$

(EXPRESSÃO 31)

como $P = mg$ (EXPRESSÃO 9) podemos reescrever a expressão anterior assim:

$$\text{energia}_{p_g} = mgh$$

(EXPRESSÃO 32)

ou usando a outra expressão para a força gravitacional $F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$ (EXPRESSÃO 7) podemos reescrever a EXPRESSÃO 30 ($\text{energia} = Fd$ se $\text{energia}_i = 0$) assim:

$$\text{energia}_{p_g} = G \frac{m_1 m_2}{d}$$

(EXPRESSÃO 33)

Repetindo (seguindo) o mesmo procedimento (raciocínio) para a eletricidade, temos que:

basta substituir, na EXPRESSÃO 30, a força “genérica” pela força elétrica para obtermos:

$$\text{energia}_{p_{el}} = F_{el} d$$

(EXPRESSÃO 34)

como $F_{el} = qE$ (EXPRESSÃO 21) podemos reescrever a expressão acima assim:

$$\text{energia}_{p_{el}} = qEd$$

(EXPRESSÃO 35)

ou usando a outra expressão para a força elétrica $F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$ (EXPRESSÃO 20) podemos reescrever a EXPRESSÃO 34 ($\text{energia}_{p_{el}} = F_{el} d$) assim:

$$\text{energia}_{p_{el}} = k \frac{q_1 q_2}{d}$$

(EXPRESSÃO 36)

vamos acrescentar essas expressões àquelas nossas tabelas agrupadas:

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
g	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$P = mg$
		↓ Multiplica por d
		Energia Potencial Gravitacional
		$energia_{p_g} = mgh$

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
$g = G \frac{m_2}{d^2}$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$
		↓ Multiplica por d
		Energia Potencial Gravitacional
		$energia_{p_g} = G \frac{m_1 m_2}{d}$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
E	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = qE$
		↓ Multiplica por d
		Energia Potencial Elétrica
		$energia_{p_{el}} = qEd$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
$E = k \frac{q_2}{d^2}$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$
		↓ Multiplica por d
		Energia Potencial Elétrica
		$energia_{p_{el}} = k \frac{q_1 q_2}{d}$

Observe que em todas as tabelas a diferença entre as fórmulas de força e energia é apenas o fator distância (altura no caso da gravitação), isto é, basta você multiplicar pela distância a fórmula da força que você terá a fórmula da energia.

Meu objetivo aqui é comparar as fórmulas da gravitação e da eletricidade, colocando-as nessas tabelas agrupadas que facilitem a visualização das semelhanças entre elas.

Até aqui eu adotei como estratégia, primeiramente revisar as fórmulas da gravitação, depois as da eletricidade para então agrupá-las, mas daqui em diante vou mudar de estratégia e fazer o contrário, ou seja, vamos adicionar mais fórmulas nessas tabelas, mas agora eu vou primeiro na eletricidade e depois na gravitação.

Um conceito importante na eletricidade é o de potencial elétrico (“voltagem”⁹), embora bem abstrato, nos é muito comum fazer referência à “voltagem” no nosso dia a dia.

Assim como as demais fórmulas que revisamos até agora, a “voltagem” também pode ser expressa de duas maneiras:

$$U = Ed$$

(EXPRESSÃO 37)

$$U = k \frac{q_2}{d}$$

(EXPRESSÃO 38)

Uma vez aceita a expressão $U = Ed$ para a “voltagem”, a expressão $U = k \frac{q_2}{d}$ vem a reboque,

é só substituir o E da (EXPRESSÃO 37) por $E = k \frac{q_2}{d^2}$ (EXPRESSÃO 23), veja:

$$U = Ed = k \frac{q_2}{d^2} \times d = k \frac{q_2}{d} \Rightarrow U = k \frac{q_2}{d} \text{ (EXPRESSÃO 38), voilà!}$$

É comum as pessoas preferirem escrever a fórmula $U = Ed$ com os membros na posição $Ed = U$ como artifício mnemônico para fazer referência ao apelido dos Eduardos, Edu.

⁹ Usarei o termo “voltagem” sempre entre aspas, porque apesar de ser o termo mais popular para o potencial elétrico, ele não é o termo oficial (correto) da grandeza, assim como o termo “amperagem” para a corrente elétrica.

Vamos tentar extrair algum significado físico para o potencial elétrico a partir dessa definição que $U = Ed$ (EXPRESSÃO 37)

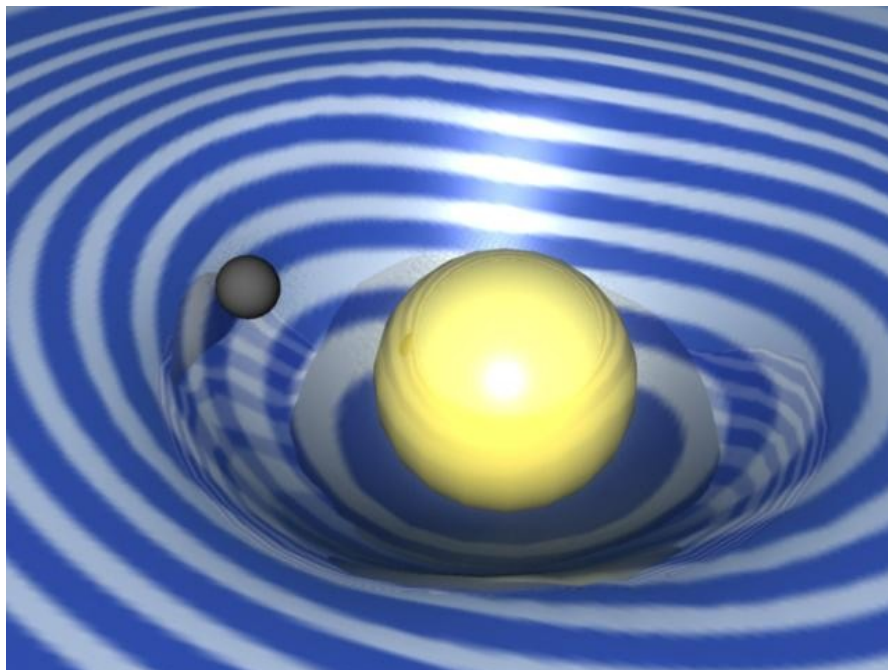
A “voltagem” parece representar uma grandeza do campo E localizada numa determinada posição d .

É como se a “voltagem” fosse um olhar “pontual” sobre o campo elétrico, uma grandeza que investiga a topologia desse campo.

Como $U = Ed$ (EXPRESSÃO 37) o valor da “voltagem” depende do valor do campo e do valor da distância, daí surge outro conceito muito citado pelos físicos que são as superfícies equipotenciais, regiões do campo que possuem a mesma “voltagem” (o mesmo valor de potencial elétrico) em todos os pontos. São regiões do campo que têm a mesma topologia, regiões que possuem a mesma deformação, que estão igualmente deformadas, o amassado daquele ponto é o mesmo amassado do outro ponto.

Essas superfícies equipotenciais expressam a simetria da deformação.

Vamos voltar à figura da membrana elástica que está deformada por uma bola de boliche gerando como se fosse um poço nessa membrana. Em determinadas distâncias (ou alturas dessa membrana deformada) a curvatura da deformação é a mesma.



Numa mesma linha da figura não há ddp, só há ddp entre uma linha e outra.

A posição que as fórmulas $U = Ed$ (EXPRESSÃO 37) e $U = k \frac{q_2}{d}$ (EXPRESSÃO 38) ocupam na nossa tabela é mostrada a seguir.

Assim como as demais fórmulas que revisamos até agora, a “voltagem” também pode ser expressa de duas maneiras:

$U = Ed$ e $U = k \frac{q_2}{d}$ e a posição que essas fórmulas ocupariam na tabela que montamos é a seguinte:

ELETRICIDADE			ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui “gerado” pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)	Campo Elétrico (Aqui “gerado” pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
E	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = qE$	$E = k \frac{q_2}{d^2}$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d	↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
Potencial Elétrico		Energia Potencial Elétrica	Potencial Elétrico		Energia Potencial Elétrica
$U = Ed$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$energia_{pel} = qEd$	$U = k \frac{q_2}{d}$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$energia_{pel} = k \frac{q_1 q_2}{d}$

Quero frisar algumas relações entre essas fórmulas, observe a tabela:

Tudo começa com o campo elétrico.

Se você colocar um corpo de prova no campo, o campo é manifesto por meio da força que vai passar a atuar sobre o corpo de prova.

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
E	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = qE$

Se você for investigar o campo localizadamente, que se traduz matematicamente por multiplicar o campo pela distância, você chega à "voltagem".

Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)
E
↓ Multiplica por d
Potencial Elétrico
$U = Ed$

Mas antes de exaurir essas relações quero agora completar as tabelas da gravitação e só então analisar todas as relações.

Então vamos lá.

9) GRAVITAÇÃO Potencial Gravitacional (Fórmulas)

Faltou à gravitação expressões de potencial, equivalentes às expressões 37 e 38 que acabamos de acrescentar à eletricidade, ou seja, fórmulas de “voltagem”. Faltou e em geral fica assim, faltando mesmo, não se fala de um potencial gravitacional que desempenharia na gravitação o mesmo papel que a “voltagem” desempenha na eletricidade. Mas, vamos desenvolvê-las para completar nossa tabela:

Então, partindo das fórmulas do potencial elétrico:

$U = Ed$	$U = k \frac{q_2}{d}$
(EXPRESSÃO 37)	(EXPRESSÃO 38)

para chegar às fórmulas do potencial gravitacional, vamos simplesmente usar aquele artifício de substituir os termos:

E vira g

d vira h (apenas na EXPRESSÃO 37)

k vira G

q vira m

ELETRICIDADE	
Potencial Elétrico	Potencial Elétrico
$U = Ed$	$U = k \frac{q_2}{d}$
↓	↓
$U_g = gh$	$U_g = G \frac{m_2}{d}$
“Potencial Gravitacional”	“Potencial Gravitacional”
GRAVITAÇÃO	

Resultando nas fórmulas:

$U_g = gh$	$U_g = G \frac{m_2}{d}$	onde U_g é o símbolo que criamos para designar o “potencial gravitacional”
(EXPRESSÃO 39)	(EXPRESSÃO 40)	

E as tabelas completas para a gravitação ficariam assim:

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
g	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$P = mg$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
"Potencial Gravitacional"		Energia Potencial Gravitacional
$U_g = gh$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$energia_{P_g} = mgh$

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
$g = G \frac{m_2}{d^2}$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
"Potencial Gravitacional"		Energia Potencial Gravitacional
$U_g = G \frac{m_2}{d}$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$energia_{P_g} = G \frac{m_1 m_2}{d}$

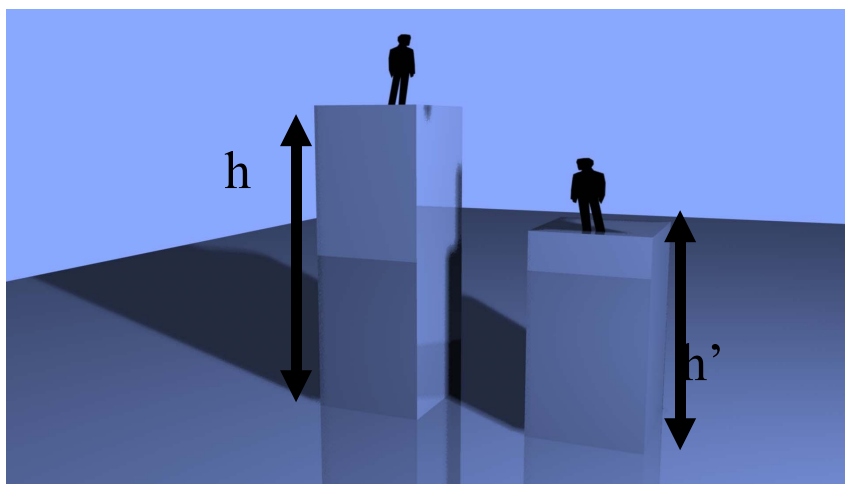
10) GRAVITAÇÃO Potencial Gravitacional (Significado Físico)

Agora vou usar um último artifício, para dar significado ao potencial gravitacional. Que energia potencial gravitacional é mgh , ainda que por osmose, estamos carecas de saber. Agora observe que para chegar à fórmula que desenvolvemos para o potencial gravitacional basta tirar o m da energia, ou seja, o potencial gravitacional é a energia gravitacional sem a massa, sem o corpo de prova.

GRAVITAÇÃO		
Energia Potencial Gravitacional		“Potencial Gravitacional”
$energia_{p_g} = mgh$	retirando corpo de prova m →	$U_g = gh$

Vamos imaginar dois edifícios um ao lado do outro, um mais baixo, outro mais alto, e cada um tem uma pessoa no teto, sobre o edifício mais alto há uma mulher e sobre o edifício mais baixo há um homem.

O homem e a mulher têm a mesma massa (para igualar as massas do homem e da mulher imagine uma mulher corpulenta como a Luciana Gimenez e um homem magrelo como o Mick Jagger, mas o que importa mesmo é que os dois tenham a mesma massa).



Aplicando a expressão que nos é familiar, $energia_{p_g} = mgh$ (EXPRESSÃO 32), a essa situação, concluímos que a mulher tem mais energia potencial gravitacional que o homem, porque os dois têm a mesma massa, mas a mulher está num lugar mais alto.

Então, nessa situação em que a massa é igual em ambos objetos de estudo (estamos analisando Luciana e Mick Jagger), o fator que determinou essa diferença de energia entre os dois é que eles estão em posições diferentes do campo, veja: o mg dos dois é o mesmo, mas a altura (h) do prédio em que a Luciana está é maior que a altura (h') do prédio em que o Mick Jagger está.

Bom, então vamos analisar melhor o mgh dos dois, a massa (m) da Luciana é a mesma massa (m) do Mick Jagger, e os dois estão imersos no campo gravitacional da Terra, g , mas a posição (h) que Luciana ocupa nesse campo é diferente da posição (h') que o Mick Jagger ocupa nesse campo, aqui é onde eu quero introduzir o conceito de “potencial gravitacional”, perceba que antes mesmo de colocar o corpo de prova lá (seja o corpo da Luciana ou do Mick Jagger) aquela região do espaço sobre o edifício mais alto já tem um potencial gravitacional maior (ainda não posso falar de energia porque a energia só se manifesta depois que eu colocar um corpo de prova lá) do que a região do espaço sobre o edifício mais baixo.

Então é como se uma região do espaço já fosse potencialmente mais “energética” do que outra, é uma característica puramente do espaço, antes mesmo de colocar qualquer corpo de prova lá.

Então a “voltagem gravitacional”, o “potencial gravitacional” é gh :
(o valor da voltagem é dado pela posição h dentro do campo gravitacional g)

$$U_g = gh$$

(EXPRESSÃO 39)

E prédios com a mesma altura, teriam o mesmo potencial gravitacional sobre seus tetos, ou seja, são regiões equipotenciais gravitacionalmente.

E para haver movimentação de massa você precisa de uma diferença de potencial gravitacional, de uma ddp gravitacional, veja: um corpo não cai de uma altura para mesma altura, ele cai de alturas maiores para alturas menores, o corpo só cai se houver uma diferença de altura.

Agora vamos fazer uma analogia da idéia de potencial elétrico com a idéia de potencial gravitacional que acabamos de criar para re-significar o potencial elétrico:

$$U = Ed$$

(EXPRESSÃO 37)

O potencial elétrico, assim como o potencial gravitacional, é uma característica da região do espaço, na verdade, de uma determinada posição do campo elétrico. A característica já existe antes mesmo de você colocar qualquer carga de prova lá, e daí quando você tem dois pólos com diferentes potenciais elétricos a carga (positiva) “cai” do potencial maior para o potencial menor. É por isso que para colocar cargas elétricas em movimento (dizemos: para “gerar” corrente elétrica) nós precisamos de uma ddp (diferença de potencial) assim como corpos só caem se houver uma diferença de altura.

Quando você compra um gerador (pilha, bateria...) a característica desse gerador que mais interessa é a ddp dele (bateria de 12V, pilha de 1,5V), você está comprando a ddp dele, porque estabelecida uma ddp no seu circuito, estabelecer-se-á a corrente elétrica, a carga “cai” do potencial maior para o potencial menor (carga positiva), a carga começa a “correr” (corrente elétrica).

Já a carga negativa “cai” do potencial menor para o potencial maior.

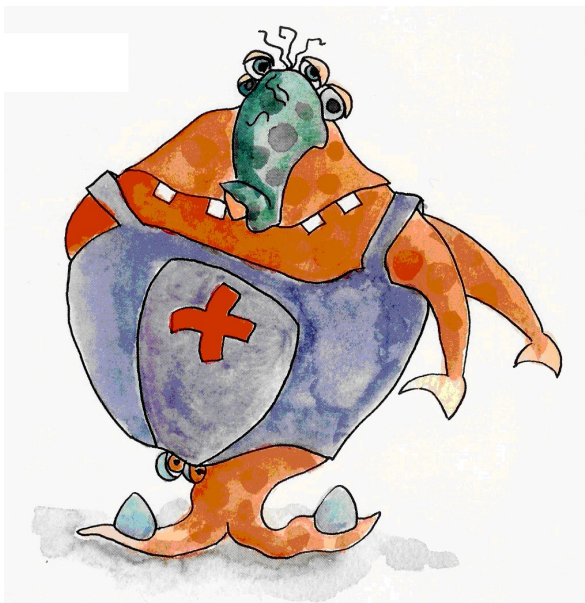
Na nossa analogia com a gravidade, é como se carga positiva equivalesse à matéria normal, que cai de cima para baixo, mas para a carga negativa nós não teríamos um equivalente gravitacional, a não ser que usássemos a tal “antimatéria” que por sentir repulsão por massa, ao invés de “cair para baixo”, “cairia para cima”.

Na leitura de seus livros didáticos de física do Ensino Médio, a analogia entre as cargas das correntes elétricas com as massas caindo de alturas maiores para alturas menores para vai funcionar, pois a corrente elétrica (i) que usamos nos livros é positiva e tal como a massa vai migrar espontaneamente do potencial maior para o potencial menor.

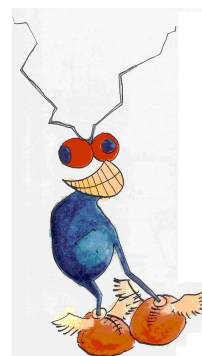
Mas a corrente elétrica fenomenológica não é positiva como a corrente (i) que usamos comumente nos textos.

Então, a seguir, discutiremos a diferenciação entre a corrente eletrônica (corrente fenomenológica) e corrente convencional (corrente i).

11.1) Cargas Elementares



A carga elementar positiva é a carga do próton, o próton é uma partícula grande (a massa dele é aproximadamente 1936 vezes maior que a massa do elétron) e o próton está preso no núcleo atômico (e aqui não queremos tratar de fenômenos nucleares, mas sim de fenômenos elétricos).



A carga elementar negativa é a carga do elétron, o elétron é uma partícula pequena (a massa dele é aproximadamente 1936 vezes menor que a massa do próton) e o elétron está “soltinho” circulando na nuvem eletrônica em torno do núcleo atômico.

Enquanto o grandalhudo (massivo) e sedentário próton está preso no âmago do átomo, o leve e ágil elétron circula “livre” na periferia, daí lidarmos ordinariamente com fenômenos elétricos que apenas “arranham perifericamente” o átomo e não com fenômenos nucleares, que precisam mobilizar partículas gigantescas agrupadas (coesas) lá no interior mais profundo do átomo.

A carga elementar negativa é igual em módulo à carga do próton, ou seja, um elétron é “eletricamente” “tão poderoso” quanto um próton, tanto que a carga de um elétron neutraliza a carga de um próton. As cargas do elétron e do próton são iguais em tamanho (módulo), só são de sinal contrário; e aqui o sinal negativo da carga do elétron não significa que o elétron é “menos elétrico” que o próton, significa apenas que o elétron e o próton têm naturezas elétricas opostas, o sinal é só uma convenção (poder-se-ia ter convencionado o contrário: que o elétron é o positivo e o próton é o negativo, que não faria a menor diferença).

É como se o elétron fosse uma formiguinha e o próton um elefante, só que essa formiguinha é tão forte quanto esse elefante. “Lá vai a triônica... Formiga Atômica!”



	PRÓTON	ELÉTRON	comentário
Massa ¹⁰	1 u	$\frac{1}{1936}$ u	A massa do elétron está para a massa do próton “assim como a massa de uma formiguinha está para a massa de um elefante”.
Carga	$1,6 \times 10^{-19} \text{C}$	$-1,6 \times 10^{-19} \text{C}$	As cargas do próton e do elétron tem o mesmo tamanho, ou seja, são iguais em módulo.
Módulo da Carga	$ 1,6 \times 10^{-19} \text{C} $ $1,6 \times 10^{-19} \text{C} = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$	$ -1,6 \times 10^{-19} \text{C} $	

Em resumo: apesar de em tamanho o elétron ser miudinho em comparação ao tamanho do próton, eletricamente ele tem o mesmo poder do próton, pois suas cargas são iguais em módulo.

¹⁰ Usaremos aqui, como unidade de massa, o u (unidade de massa atômica, uma) que corresponde, aproximadamente, a $1,67 \times 10^{-27} \text{kg}$.

11.2) Corrente Eletrônica versus Corrente Convencional

Aconteceu que nós dominamos a técnica dos circuitos elétricos muito antes de conhecermos a fundo a natureza do átomo, daí que quando fomos estabelecer um sinal para a corrente elétrica, estabelecemos-lhe o sinal positivo, como se no circuito fossem os prótons que corresse, mas não são! São os elétrons que correm (constituindo a corrente elétrica), porque os elétrons são tão “poderosos” eletricamente quanto os prótons, mas são quase duas mil vezes menores, não estão presos no núcleo do átomo, mas em movimento constante na eletrosfera do átomo, ou seja na periferia do átomo, sendo de mais fácil acesso e de “fácil” mobilização quando estabelecida a ddp (aliás diga-se de passagem que você só consegue “acessar” os prótons em reações nucleares, imagina se a cada vez que você fosse ligar a televisão da sua casa você tivesse que deflagrar uma reação nuclear antes!!!)

Mas por tradição mantivemos a convenção de sinais e a corrente “i” que usamos nas fórmulas e resolução de exercícios é como se fosse uma corrente de prótons (céus!) porque a corrente elétrica convencional é positiva.

Fenomenologicamente essa convenção é também absurda, porque ainda que você conseguisse arrancar os prótons do núcleo e os fizesse andar em fila indiana por dentro de um condutor, esse fluxo de prótons arrebataria o pobre do coitado do condutor. O altíssimo gasto energético para movimentar esses prótons (que nem se compara à energia necessária para se extrair um próton de dentro do núcleo, que é muito maior) por dentro de um condutor e o aquecimento que esse movimento provocaria nesse condutor, por si só inviabilizam o fenômeno, que já estava mesmo inviabilizado há muito tempo, porque não é fácil tirar um próton de dentro do núcleo.

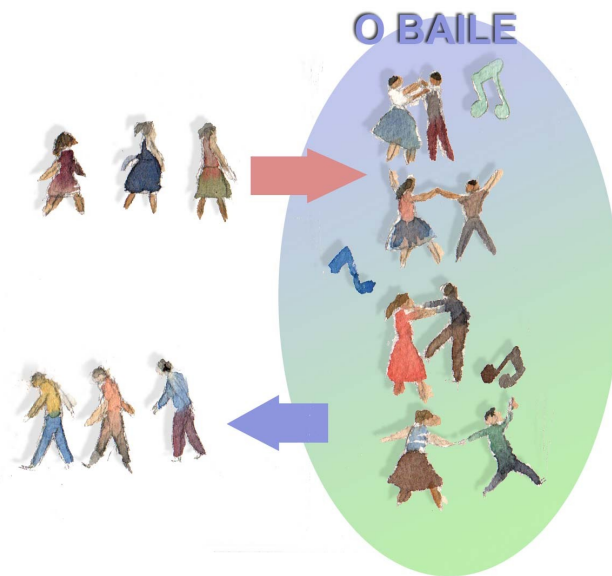
Imaginar um fluxo de prótons por dentro de um condutor (um fio, por exemplo), é como imaginar uma manada de elefantes passando espremida por um túnel, pense no estrago! O fluxo é de formiguinhas (elétrons). Formiguinhas essas que carregam consigo tanta carga elétrica quanto uma manada de elefantes (prótons).

Se fenomenologicamente é tão absurdo, por que podemos usar a corrente convencional? Porque matematicamente dá no mesmo, veja:

Imagine um baile, onde temos 10 homens e 10 mulheres, e você só tem interesse em ir ao baile se tiver bastante mulher disponível para dançar com você (aqui me dirijo especialmente aos leitores do sexo masculino, pois este baile é “old fashion”, reza pela cartilha de Tim Maia: “não vale dançar homem com homem, nem mulher com mulher, o resto

vale tudo”), então até agora a situação do baile não lhe é convidativa, já que pelo menos numericamente os casais estão emparelhados.

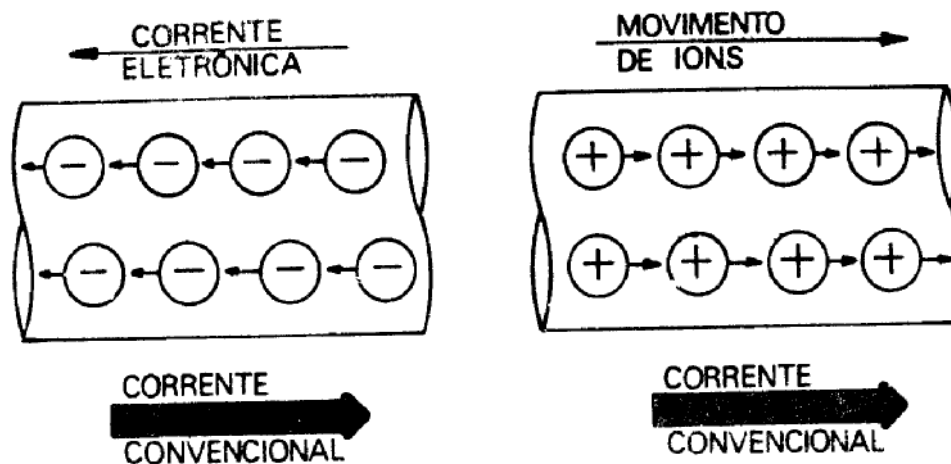
Agora perceba que há duas situações possíveis para que sobrem mulheres nesse baile, digamos que o pré-requisito mínimo para que você se anime a ir ao baile seja um excesso de pelo menos 3 mulheres em relação ao número de homens no baile. Se três mulheres chegarem, seu pré-requisito estará satisfeito e você se anima a ir, ou também se três homens saírem do baile seu pré-requisito estará satisfeito e você se anima a ir. Ou seja, numericamente um fluxo de entrada de mulheres equivale a um fluxo de saída de homens.



Traçando uma analogia, imagine a mulher como o próton e o homem como o elétron. Num sistema inicialmente neutro se 3 prótons forem acrescentados, a carga final desse sistema passa a ser de +3e, da mesma forma se 3 elétrons forem retirados do sistema, a carga final desse sistema passa a ser de +3e, assim numericamente tanto faz você imaginar um fluxo de entrada de prótons ou saída de elétrons e vice-versa.

Situação 1: não tinha mulher sobrando e chegaram três mulheres			
Quantidade inicial de mulher sobrando	chegada (+) ou saída (-)	mulher (+) ou homem (-)	quantidade final de mulher sobrando
0	chegada	mulher	3
0	+	+3	+3
Matematicamente:			
0	+	+3	= +3
$(0) + (+3) = +3$			

Situação 2: não tinha mulher sobrando e saíram três homens			
Quantidade inicial de mulher sobrando	chegada (+) ou saída (-)	mulher (+) ou homem (-)	quantidade final de mulher sobrando
0	saída	homem	3
0	-	-3	+3
Matematicamente:			
0	-	-3	= +3
$(0) - (-3) = +3$			



Mas fenomenologicamente a corrente real é a corrente eletrônica (e não a convencional) constituída de um fluxo de elétrons (portanto negativa e não positiva como a convencional).

O fenômeno real é o de fluxo de elétrons e não de prótons, logo a corrente elétrica positiva (de prótons) é uma mera convenção, a corrente elétrica real é a corrente negativa (fluxo de elétrons). Ou seja, fenomenologicamente a corrente não é positiva nem migra dos potenciais grandes para os pequenos, mas sim negativa e migra dos potenciais pequenos para os potenciais grandes. Isso, na verdade, acaba atrapalhando bastante nossa tentativa de estabelecer uma analogia gravitacional para os fenômenos elétricos, já que nós não temos dois tipos de naturezas gravitacionais para as massas, onde massas de natureza opostas se atraem e massas de naturezas iguais se repelem, nossas massas (até onde conhecemos) são todas da mesma natureza e só apresentam o comportamento de atração (massa atrai massa), e a massa só se movimenta por ação gravitacional de potenciais grandes para potenciais menores, daí que nossa massa só serve para fazer analogia à corrente convencional (que não é a fenomenológica), mas você pode tentar imaginar uma “antimassa” que sempre que submetida a uma diferença de altura “caísse” da altura pequena para mais alta, “antimassa” poderia então ser usada para traçar a analogia para o comportamento do elétron (corrente eletrônica, corrente fenomenológica).

12) ANÁLISE DA TABELA COMPLETA COM AS FÓRMULAS DA ELETRICIDADE E DA GRAVITAÇÃO

Agora nossa tabela está completa, veja:

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
g	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$P = mg$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
"Potencial Gravitacional"		Energia Potencial Gravitacional
$U_g = gh$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$energia_{P_g} = mgh$

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
$g = G \frac{m_2}{d^2}$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
"Potencial Gravitacional"		Energia Potencial Gravitacional
$U_g = G \frac{m_2}{d}$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$energia_{P_g} = G \frac{m_1 m_2}{d}$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
E	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = qE$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
Potencial Elétrico		Energia Potencial Elétrica
$U = Ed$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$energia_{P_{el}} = qEd$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
$E = k \frac{q_2}{d^2}$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
Potencial Elétrico		Energia Potencial Elétrica
$U = k \frac{q_2}{d}$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$energia_{P_{el}} = k \frac{q_1 q_2}{d}$

Agora sim podemos exaurir as relações ressaltadas nas tabelas.

Relações horizontais:

Acompanhe na tabela abaixo. Tudo começa no campo. O campo já está lá, daí quando colocamos o corpo de prova no campo, aparece uma força que atua sobre esse corpo de prova, o que manifesta que o campo existe, está lá e está deformado.

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
g	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$P = mg$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
E	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = qE$

Agora vamos analisar o potencial ("voltagem"), acompanhe na tabela abaixo. Antes mesmo de imergirmos qualquer corpo de prova no campo, cada ponto desse campo já tem potenciais diferentes, dependendo de sua topologia, e se você colocar o corpo de prova nessas posições esses corpos de prova vão "ser energizados" com energias cujo módulo vão revelar, manifestar a topologia desse campo, que você calculava pela expressão da "voltagem".

GRAVITAÇÃO		
"Potencial Gravitacional"		Energia Potencial Gravitacional
$U_g = gh$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$energia_{p_g} = mgh$

ELETRICIDADE		
Potencial Elétrico		Energia Potencial Elétrica
$U = Ed$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$energia_{p_{el}} = qEd$

Relações verticais:

O potencial é o “olhar topológico” sobre o campo. Acompanhe na tabela abaixo.

GRAVITAÇÃO
Campo Gravitacional (Aqui “gerado” pela massa m_2)
g
↓ Multiplica por d
“Potencial Gravitacional”
$U_g = gh$

ELETRICIDADE
Campo Elétrico (Aqui “gerado” pela carga q_2)
E
↓ Multiplica por d
Potencial Elétrico
$U = Ed$

A energia potencial é o “olhar topológico” sobre a força. Acompanhe na tabela abaixo.

GRAVITAÇÃO
Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
$P = mg$
↓ Multiplica por d
Energia Potencial Gravitacional
$energia_{p_g} = mgh$

ELETRICIDADE
Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
$F_{el} = qE$
↓ Multiplica por d
Energia Potencial Elétrica
$energia_{p_{el}} = qEd$

Resumindo

Relações horizontais:

O corpo de prova posto no campo manifesta o campo por meio da força.

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
g	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$P = mg$
ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
E	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = qE$

O corpo de prova posto na "voltagem" manifesta a topologia do campo por meio da energia.

GRAVITAÇÃO		
"Potencial Gravitacional"		Energia Potencial Gravitacional
$U_g = gh$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$energia_{p_g} = mgh$
ELETRICIDADE		
Potencial Elétrico		Energia Potencial Elétrica
$U = Ed$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$energia_{p_{el}} = qEd$

Resumindo

Relações verticais:

O campo (vetorial) “observado pontualmente” (= multiplicado pela distância) é o potencial (escalar).

GRAVITAÇÃO	ELETRICIDADE
Campo Gravitacional (Aqui “gerado” pela massa m_2)	Campo Elétrico (Aqui “gerado” pela carga q_2)
g	E
↓ Multiplica por d	↓ Multiplica por d
“Potencial Gravitacional”	Potencial Elétrico
$U_g = gh$	$U = Ed$

A força (vetorial) “observada pontualmente” (= multiplicada pela distância) é a energia potencial (escalar).

GRAVITAÇÃO	ELETRICIDADE
Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)	Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
$P = mg$	$F_{el} = qE$
↓ Multiplica por d	↓ Multiplica por d
Energia Potencial Gravitacional	Energia Potencial Elétrica
$energia_{P_g} = mgh$	$energia_{P_{el}} = qEd$

A seguir, novamente, todas as tabelas juntas e completas:

GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
g	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$P = mg$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
"Potencial Gravitacional"		Energia Potencial Gravitacional
$U_g = gh$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$energia_{P_g} = mgh$

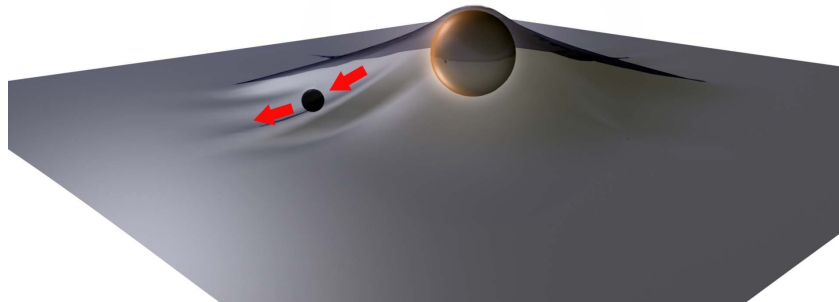
GRAVITAÇÃO		
Campo Gravitacional (Aqui "gerado" pela massa m_2)		Força Gravitacional (Interação entre m_1 e m_2)
$g = G \frac{m_2}{d^2}$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
"Potencial Gravitacional"		Energia Potencial Gravitacional
$U_g = G \frac{m_2}{d}$	Acrescentando corpo de prova m_1 →	$energia_{P_g} = G \frac{m_1 m_2}{d}$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
E	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = qE$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
Potencial Elétrico		Energia Potencial Elétrica
$U = Ed$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$energia_{P_{el}} = qEd$

ELETRICIDADE		
Campo Elétrico (Aqui "gerado" pela carga q_2)		Força Elétrica (Interação entre q_1 e q_2)
$E = k \frac{q_2}{d^2}$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$F_{el} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$
↓ Multiplica por d		↓ Multiplica por d
Potencial Elétrico		Energia Potencial Elétrica
$U = k \frac{q_2}{d}$	Acrescentando carga de prova q_1 →	$energia_{P_{el}} = k \frac{q_1 q_2}{d}$

13) REPULSÃO MEDIADA PELO CAMPO

Depois disso tudo, voltamos ao ponto de partida: uma das dificuldades de juntar o campo gravitacional ao campo eletromagnético é que na gravitação nós temos o fenômeno de atração, mas não o de repulsão como acontece com a eletricidade e magnetismo, então voltando à figura da gaiola labirinto é como se no eletromagnetismo houvesse dois tipos de menino, um que provoca uma deformação de poço, e um outro menino (“antimassa” desse menino, como o Bizarro é o negativo do Super-Homem) que provocasse na malha da gaiola uma deformação às avessas, o negativo da deformação poço que seria uma deformação montanha:



Daí que se agora fosse esse antimenino que deformasse a malha, o gato que cai da árvore não mais deslizaria na deformação em direção ao colo do menino (comportamento de atração), mas sim deslizaria na deformação para fora, se afastando do menino, esse seria o comportamento de repulsão.

Espero que com tudo isso sua noção de campo tenha sido ampliada.

Mas para finalizar reproduzo aqui uma ressalva de Feynman¹¹ (Feynman's lectures on Physics):

In the first place, what you do mean by time and space? It turns out that these deep philosophical questions have to be analyzed very carefully in physics, and this is not so easy to do. The theory of relativity shows that our ideas of space and time are not as simple as one might think at first sight. However, for our present purpose, for the accuracy that we need at first, we need not to be very careful about defining things precisely. Perhaps you say, "That's a terrible thing – I learned that in science we have to define everything precisely." We cannot define anything precisely! If we attempt to, we get into that paralysis of thought that comes to philosophers, who sit opposite each other, one saying to the other, "You don't know what you are talking about!" The second one says, "What do you mean by *know*? What do you mean by *talking*? What do you mean by *you*?" and so on. In order to be able to talk constructively, we have to agree that we are talking about roughly the same thing. You know as much about time as we need for the present, but remember that there are some subtleties that have to be discussed; we shall discuss them later.

Em primeiro lugar, o que você quer dizer com tempo e espaço? Isso traz à tona que aquelas profundas questões filosóficas precisam ser analisadas com muito cuidado em física, e isso não é tão fácil de fazer. A teoria da relatividade mostra que as nossas idéias sobre tempo e espaço não são tão simples como a princípio se poderia imaginar. Todavia, para nosso presente propósito, para a acurácia que precisamos nesse início, nós não precisamos ser cuidadosos a respeito de definir as coisas com precisão. Talvez você diga: "Que coisa horrível – eu aprendi que em ciência nós temos que definir tudo precisamente! Se nós tentarmos isso, vamos cair na paralisia de pensamento que acontece com os filósofos, que se sentam um de frente para o outro, e um deles diz, "Você não sabe sobre o que está falando!" O outro diz, "O que você quer dizer com *saber*? O que você quer dizer com *falando*? O que você quer dizer com *você*?", E assim por diante. Para podermos conversar de modo construtivo, temos que concordar que estamos falando grosseiramente sobre a mesma coisa. Você sabe o suficiente sobre o que é tempo para o que precisamos nesse momento, mas lembre-se que há algumas sutilezas que devem ser discutidas, nós devemos discuti-las depois.

Entrou por uma porta e saiu pela outra e quem quiser que conte outra.

Sela boi, "vamossimbóra"!

¹¹ Richard Phillips Feynman (1918-1988), ganhador do prêmio Nobel de Física em 1965.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

PÁGINA	FIGURA	AUTORIA
1	única	? ¹²
4	primeira	?
4	segunda	?
5	única	Lui Lobão
6	primeira	Lui Lobão
6	segunda	Lui Lobão
7	única	Lui Lobão
8	única	Lui Lobão
12	primeira	?
12	segunda	?
12	terceira	?
12	quarta	?
14	única	?
15	única	Lui Lobão
16	primeira	?
16	segunda	?
16	terceira	?
17	primeira	Lui Lobão
17	segunda	Lui Lobão
30	única	Artur Kenji Ogawa, Maria Azevedo, Villaça
31	única	Fernando Chui de Menezes, Mário Kano
32	única	Fernando Chui de Menezes, Mário Kano
34	única	?
39	única	Lui Lobão
44	única	Lui Lobão
47	primeira	Sergio Kon ¹³
47	segunda	Sergio Kon
48	única	?
50	única	Lui Lobão
51	única	? ¹⁴
57	única	Lui Lobão

¹² Encontradas por meio da ferramentas de busca de imagens do Google.

¹³ Do livro O Discreto Charme das Partículas Elementares, Maria Cristina Batoni Abdalla, Ed UNESP, 2006.

¹⁴ Do livro Circuitos Básicos em Eletrônica e Eletricidade, Tucci e Brandarff, Ed. Nobel.