

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

**FAZENDO CONEXÕES COM O MUNDO REAL: USO DE
CONCEITOS E MODELOS DA FÍSICA NO CONTEXTO DA
ZOOLOGIA**

Camila Akemi Nakamura Shiguematu

Orientadora: Prof^a. Dra. Alzira C. M. Stein-Barana

Rio Claro – SP

2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

Camila Akemi Nakamura Shiguematu

Fazendo conexões com o mundo real:
Uso de conceitos e modelos da Física no contexto da Zoologia.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título em Licenciatura em Física.

Orientadora: Prof^a. Dra. Alzira C. M. Stein-Barana

Rio Claro – SP

2011

Camila Akemi Nakamura Shiguematu

Fazendo conexões com o mundo real:
Uso de conceitos e modelos da Física no contexto da Zoologia.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas do campus
de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, como parte dos requisitos para
obtenção do título em Licenciatura em Física.

Comissão Examinadora

Prof^a. Dra. Alzira C. M. Stein-Barana (Orientadora)

Prof^a. Dra. Maria Antônia Ramos de Azevedo

Prof^a. Dra. Deisy Piedade Munhoz

Rio Claro, 07 de novembro de 2011.

Aluno(a)

Orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me iluminou, me deu forças e me ajudou a não desistir diante das dificuldades.

Aos meus pais Helena e Mário, pelo apoio, compreensão, ajuda e por todo carinho e incentivo ao longo deste percurso.

Aos meus queridos irmãos Guilherme e Karina, pelo carinho e apoio. Vocês me proporcionaram grandes alegrias, mesmo estando longe.

Aos meus avós maternos Kazuko e Paulo (*in memorian*) que sempre cuidaram de mim, mesmo estando perto ou longe, agradeço por todo carinho e amor ao longo de toda minha vida.

Aos meus avós paternos Luiza e Sadao (*in memorian*) pelo carinho.

Ao meu namorado Alexandre, que em todos os momentos esteve ao meu lado me apoiando e me incentivando, por todo o carinho, amor e companheirismo nesta etapa de minha vida.

Aos colegas de curso pelos momentos felizes passados nesses anos de graduação, ao cursinho ATHO pela experiência proporcionada e a todos os professores que contribuíram para a minha formação.

À Prof^a. Dra. Alzira C. M. Stein-Barana pela dedicação, paciência e orientação neste trabalho de conclusão de curso.

"Sem a curiosidade que me move, que me inquieta,
que me insere na busca, não aprendo nem ensino".

(Paulo Freire)

RESUMO

Há considerações de que o ensino de Física da maneira como vem sendo conduzido nos livros didáticos e consequentemente em sala de aula, está distanciado e distorcido de seu real propósito. Notamos que o ensino desta ciência através da disciplina escolar Física, tem assumido um caráter de preparação para resolução de exercícios de vestibulares, primando pela memorização de fórmulas e pelas soluções matemáticas, fato que parece levar à desmotivação e ao desinteresse dos alunos com relação aos seus conteúdos. Uma vez que estamos rodeados por fenômenos, acontecimentos, elementos da natureza, novas tecnologias, objetos e tantos outros que podem ser explicados e muitas vezes até aplicados e/ou reproduzidos por meio de conceitos físicos, não há razão para se tratar a Física como algo acadêmico-teórico e afastado da realidade. O pouco interesse dos alunos do ensino médio pela disciplina de Física e o baixo desempenho na aprendizagem de seus conteúdos tem levado à busca de novos caminhos, recursos e estratégias que promovam uma aprendizagem mais significativa. Levando em conta estes fatos, buscamos neste trabalho de conclusão de curso, observar, analisar e aplicar conceitos da Física em múltiplos elementos do nosso cotidiano, fazendo uso da interdisciplinaridade como um possível mecanismo. Os animais exercem fascínio sobre a maioria das pessoas. Muito do que observamos em sua maneira de ser e se comportar pode ser explicado por leis e modelos da Física. Sua constituição física, seu comportamento e atividades envolvem tanto diversidade de movimentos, comunicação e sensoriamiento como limitações físicas variadas. Físicos e zoólogos constroem modelos na tentativa de explicar ou entender o comportamento animal usando princípios físicos bem estabelecidos. A criação de modelos físicos tenta abordar um problema, identifica as informações fundamentais e retira todos os detalhes irrelevantes. Um exemplo contextualizado seria como tratar a força peso no movimento de um mamífero de grande porte ou de um pequeno inseto. As leis da Física por sua vez nos ajudam a compreender a vida animal, saber como eles usam essas leis para aperfeiçoar determinados processos metabólicos e/ou comportamentais. Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta uma pesquisa sobre como e quais leis físicas influenciam na natureza e no comportamento de alguns animais. Baseia-se inicialmente na seleção de animais cujo comportamento, locomoção, alimentação ou técnicas de sobrevivência estejam relacionados com temas próprios da Física. Posteriormente buscamos identificar dentre eles quais são os conteúdos da disciplina de Física no ensino médio e então fazemos um estudo relacionando ambas as partes: o comportamento animal e a Física. Como elemento ilustrativo e motivador faz-se uso de mídias disponíveis e de fácil acesso pela internet, anexando ao estudo uma coletânea de vídeos que exibem o comportamento animal em análise.

Palavras-chave: Física em sistemas biológicos – Ensino de Física – Biomimética

ABSTRACT

There are considerations of that the education of Physics of the way as comes being driven us textbooks and consequently in classroom, is distant and distorted of their real purpose. We notice that the education of this science through the Physical school discipline, has I assume a character of preparation for university entrance exams exercises resolution, exceling for the memorization of formulae and by the mathematical solutions, fact that looks to cause to it is lacking of motivation and to the disinterest of the students regarding his contents. Since we are surrounded by phenomena, events, elements of the nature, new technologies, objects and so many others that can be explained and many times until applied and/or reproduced by means of physical concepts, there is no reason for treat to Physical as somewhat academic and remote of the reality. The little interest of high school students by the discipline of Physics and their poor performance in the learning of his contents has led to the search of new paths, resources and strategies that promote a more meaningful learning. Taking into account these facts, we seek in this course conclusion work, observe, analyze and apply concepts of the Physical one in multiple elements of ours routine, doing use of the interdisciplinary nature as a possible mechanism. The animals exert a fascination on most people. Much of what we see in their way of being and behaving can be explained by the laws of Physics and its models. Their physique, behavior and activities involve diverse movements, communication and sensing as physical limitations varied. Zoologists and physicists build models in an attempt to explain or understand animal behavior using well-established physical principles. The creation of physical models is going to approach a problem, identifies the fundamental information and removing all of the irrelevant details. An example put into context would be like treat the weight force in the movement of a large-scale mammal or of a small bug. The laws of Physics one by his time help us to understand the animal life, know as they use those laws for optimize determined metabolic and/or behavioral trials. This Course Conclusion Work presents a research about as and which physical laws influence in the nature and in the behavior of some animals. It based itself initially in the selection of animals whose behavior, locomotion, food or techniques of survival be related with own subjects of the Physical one. Subsequently we are going to identify among them which they are the contents of the discipline of Physics in the secondary education and then we do a study relating both the part: the animal behavior and Physics. As an illustrative and motivating tool, media content available through the internet is used, as we add to the study a collection of videos that show animal behavior in question.

Keywords: Physics in biological systems – Physics Teaching – Biomimetics

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Parâmetros Curriculares Nacionais: a interdisciplinaridade e contextualização	2
1.2. Modelos Físicos e a Biomimética.....	3
2. AS FORÇAS E A ESCALADA VERTICAL DAS LAGARTIXAS	5
2.1. Força	5
2.1.1. Interações fundamentais da natureza	5
2.1.1.1. Interação gravitacional: Força Peso.....	5
2.1.1.2 Interação eletromagnética.....	8
2.1.1.3. Interação nuclear fraca.....	11
2.1.1.4. Interação nuclear forte	12
2.2. As leis de Newton.....	13
2.2.1. Primeira lei de Newton.....	13
2.2.2. Segunda lei de Newton.....	14
2.2.3. Terceira lei de Newton	16
2.3. Diagrama do corpo livre	17
2.4. Força de atrito	18
2.5. Ação das forças no deslocamento das lagartixas.....	21
2.6. O estudo das forças no mecanismo de locomoção das lagartixas	25
2.7. Mecanismo intermolecular da adesão das lagartixas.....	30
2.7.1. Análise física da força de Van der Waals.....	30
2.7.1.1. Força de indução.....	30
2.7.1.2. Força de orientação.....	32
2.7.1.3. Força de dispersão	32
2.7.1.4. Cálculo da força entre a espátula e a superfície.....	33
2.8. Cálculo do momento angular da lagartixa.....	35
2.9. Biomimética	38
2.9.1. Robôs com pés de lagartixa.....	38
2.9.2. Adesivos secos.....	39
2.10. A natureza das lagartixas.....	41
3. A FÍSICA DO CAMINHAR DE ARTRÓPODES E INSETOS SOBRE A ÁGUA	43
3.1. Fluidos	43
3.1.1. Massa específica	43
3.1.2. Pressão	44

3.1.2.1. Pressão no interior de um líquido	45
3.2. Propriedades dos líquidos	46
3.2.1. Viscosidade.....	46
3.2.2. Tensão superficial.....	47
3.2.3. Capilaridade.....	50
3.3. Princípio de Arquimedes: Empuxo.....	52
3.4. Locomoção sobre a água: a influência da tensão superficial.....	55
3.4.1. Condição para que a aranha não afunde	61
3.4.2. Massa máxima do animal que pode ser suportada pela tensão superficial.....	62
3.4.3. Cálculo do ângulo de contato pata/menisco para que o animal seja suportado pela tensão superficial	63
3.5. Robôs que caminham sobre a água	64
3.6. A natureza das aranhas	67
4. A DINÂMICA DOS FLUIDOS E OS CÃES DA PRADARIA	70
4.1. Fluidos em movimento	70
4.2. Equação da Continuidade	71
4.3. Equação de Bernoulli	73
4.3.1. Efeito Venturi	76
4.3.2. Escoamento viscoso.....	78
4.4. Movimento de fluidos em tocas de animais	81
4.5. A natureza dos cães da pradaria	85
5. CONCLUSÃO.....	87
REFERÊNCIAS	88

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos vem sendo discutido e questionado o processo de formação dos estudantes do ensino médio. Um dos enfoques dessas discussões que nos interessa é o processo ensino-aprendizagem em Física.

Vem sendo debatido que o ensino de Física, da maneira como vem sendo conduzido nos livros didáticos e conseqüentemente em sala de aula, está distanciado e distorcido de seu real propósito. Notamos que o ensino desta disciplina tem assumido um caráter de preparação para resolução de exercícios de vestibulares, ou seja, primam pela memorização de fórmulas e pelas soluções matemáticas, fato que pode levar à desmotivação e, conseqüentemente, ao desinteresse dos alunos com relação a esta disciplina. Porém a Física não se resume somente em fórmulas e cálculos, estamos diariamente rodeados por fenômenos, acontecimentos, elementos da natureza, novas tecnologias, objetos, e tantos outros que podem ser explicados e muitas vezes até aplicados e/ou reproduzidos por meio de conceitos básicos desta área do conhecimento chamada Física.

O papel do professor no processo de ensino é muito importante, ele é responsável por possibilitar mecanismos de eficácia deste sistema, ou seja, o professor deve ser mediador na compreensão do conteúdo da disciplina de forma a abranger todos, ou na maior parte, os objetivos a que o ensino se propõe. Nesse sentido, a busca permanente por parte do professor por uma formação continuada, por uma atualização, a retomada reflexiva na sua ação docente e a flexibilidade nas discussões em torno do fazer pedagógico lhe permitirá atingir mais rapidamente o seu objetivo no processo ensino-aprendizagem.

O pouco interesse dos alunos do ensino médio pela disciplina de Física e o baixo desempenho na aprendizagem de seus conteúdos têm levado à busca de novos caminhos, recursos e estratégias que promovam uma aprendizagem mais significativa. Preocupados com essa situação, buscamos um meio diferenciado para o ensino de Física, que é o tema deste trabalho de conclusão de curso. Nele procuramos observar, analisar e aplicar conceitos da Física em múltiplos elementos do nosso cotidiano. Propõe-se a associação entre Física e Zoologia, onde físicos e zoólogos pesquisam diversos temas na tentativa de explicar ou entender o comportamento dos animais através de princípios físicos, como os da mecânica, termodinâmica, ótica, eletricidade e magnetismo, entre outros.

Os animais não têm como alterar certos fatores da natureza como a gravidade terrestre, propriedades dos fluidos como o ar e a água, certas variações de temperatura no ambiente, com isso, para sua sobrevivência na natureza, desenvolveram certos mecanismos de comportamento para conviver com esses fatores. A observação dos mecanismos desenvolvidos por esses animais e seu estudo pode levar à compreensão de muitos conceitos físicos. Podemos também elaborar modelos físicos aplicados à vida animal, que irão ajudar na compreensão do conteúdo abordado. Através desta relação entre comportamento animal e conceitos físicos é que tentamos instigar e despertar o interesse dos alunos para a disciplina de Física, de uma maneira que foge do atual padrão de como a Física é ensinada nas escolas. Além disso, fazendo também com que os alunos percebam que a Física não está presente somente dentro da sala de aula como uma simples disciplina escolar, mas está presente em seu cotidiano, mais do que se possa imaginar.

Portanto, este Trabalho de Conclusão de Curso, como o próprio PCN (Parâmetros Curriculares Nacionais) recomenda, traz em si a valorização da contextualização, a articulação de várias áreas por meio da prática interdisciplinar e a elaboração de modelos que auxiliam na melhor compreensão ou aplicação do conteúdo aprendido.

1.1. Parâmetros Curriculares Nacionais: a interdisciplinaridade e contextualização

Um dos objetivos dos Parâmetros Curriculares Nacionais, conhecido como PCN's, é o de orientar os professores, na busca de novas metodologias e abordagens. Outro destaque dos PCN's é que a formação de um aluno deve ter como ponto principal a aquisição de conhecimentos básicos, a preparação científica e a capacidade de usar as diversas tecnologias relativas às áreas de atuação.

É proposta também para o ensino médio a formação geral, em contraposto à formação específica. Além disso, é importante que se trabalhe o desenvolvimento da capacidade de pesquisa, da busca de informações, de sua análise e seleção; a capacidade de criar, formular e aprender ao invés da simples memorização de conteúdos.

A cidadania e o trabalho são os principais alicerces no qual a capacidade de continuar aprendendo deve se aplicar, com o intuito de que o aluno possa adaptar-se às condições e às constantes mudanças na sociedade. Portanto, ao invés de estabelecer conteúdos e disciplinas específicas, destacam-se as competências de caráter geral. São elas:

Capacidade de abstração, do desenvolvimento do pensamento sistêmico, ao contrário da compreensão parcial e fragmentada dos fenômenos, da criatividade, da curiosidade, da capacidade de pensar múltiplas alternativas para a solução de um problema, ou seja, do desenvolvimento do pensamento divergente, da capacidade de trabalhar em equipe, da disposição para procurar e aceitar críticas, da disposição para o risco, do desenvolvimento do pensamento crítico, do saber comunicar-se, da capacidade de buscar conhecimento (BRASIL, 2000, p. 12).

Outro ponto que os Parâmetros Curriculares Nacionais abordam e que é de grande importância é a interdisciplinaridade. Ela deve ir além de uma união entre as disciplinas, deve dar a possibilidade de relacionar as disciplinas em projetos ou atividades escolares, e que seja adequada aos objetivos do ensino médio.

É importante a motivação da elaboração de relações entre as disciplinas visando um ensino em que haja a troca da passividade, dependência e da memorização por um aprendizado motivador, reflexivo e contextualizado. Dizem os PCN's:

A aprendizagem significativa pressupõe a existência de um referencial que permita aos alunos identificar e se identificar com as questões propostas. Essa postura não implica permanecer apenas no nível de conhecimento que é dado pelo contexto mais imediato, nem muito menos pelo senso comum, mas visa a gerar a capacidade de compreender e intervir na realidade, numa perspectiva autônoma e desalienante. Ao propor uma nova forma de organizar o currículo, trabalhado na perspectiva interdisciplinar e contextualizada, parte-se do pressuposto de que toda aprendizagem significativa implica uma relação sujeito-objeto e que, para que esta se concretize, é necessário oferecer as condições para que os dois pólos do processo interajam (BRASIL, 2000, p. 22).

O importante da interdisciplinaridade é ampliar as possibilidades de relações não apenas entre as disciplinas de uma mesma área, mas também entre essas áreas do conhecimento. A contextualização pode ser um recurso para que isso aconteça. Contextualizar um assunto que se quer ser aprendido exprime que todo conhecimento envolve uma relação entre sujeito e objeto.

O tratamento contextualizado é um meio que se tem para tirar o aluno da condição de mero espectador passivo. Se for bem trabalhado, a contextualização pode ajudar o aluno, ao

longo do tempo, a ter uma aprendizagem significativa, fazendo com que aluno e objeto de conhecimento estabeleçam uma relação recíproca.

Conhecer o corpo humano não é apenas saber como funcionam os muitos aparelhos do organismo, mas também entender como funciona o próprio corpo e que consequências isso tem em decisões pessoais da maior importância tais como fazer dieta, usar drogas, consumir gorduras ou exercer a sexualidade. A adolescente que aprendeu tudo sobre aparelho reprodutivo, mas não entende o que se passa com seu corpo a cada ciclo mensal não aprendeu de modo significativo. O mesmo acontece com o jovem que se equilibra na prancha de surfe em movimento, mas não relaciona isso com as leis da Física aprendidas na escola (BRASIL, 2000, p. 79).

Interdisciplinaridade e Contextualização são recursos complementares para ampliar as inúmeras possibilidades de interação entre disciplinas e entre as áreas nas quais disciplinas venham a ser agrupadas. Juntas, elas se comparam a um trançado cujos fios estão dados, mas cujo resultado final pode ter infinitos padrões de entrelaçamento e muitas alternativas para combinar cores e texturas. (BRASIL, 2000, p. 84).

A interdisciplinaridade e contextualização não devem ser vistas como a solução para os problemas do ensino-aprendizagem do aluno, mas sim como um tipo de auxílio para que se consiga trazer a motivação e o conhecimento para dentro da sala de aula.

1.2. Modelos Físicos e a Biomimética

Na tentativa de compreender um fenômeno físico, a Física se baseia em modelos simplificados desses fenômenos. Estabelecido em pensamento, no plano das representações ideais, um modelo é apenas uma representação, uma interpretação da realidade.

Neste trabalho vamos apresentar modelos simplificados para representar e descrever as situações que abordaremos sobre o comportamento dos animais, fazendo diversas análises físicas e matemáticas. Não se espera que os valores numéricos encontrados a partir desses modelos revelem exatamente as situações e o comportamento real desses animais. A importância destes cálculos é que eles nos mostrem que há princípios físicos gerais inerentes; e também que existe a possibilidade dos alunos relacionarem diferentes áreas do conhecimento contribuindo com a construção de ideias sobre o assunto abordado.

Além dos modelos físicos, existem também os chamados modelos biomiméticos, porém estes são bem mais detalhados e sofisticados. A área da ciência relacionada a estes modelos é a Biomimética, que tem como objetivo estudar as estruturas biológicas, o comportamento de seres da natureza e utilizar esse conhecimento em diferentes domínios da ciência, ou seja, aplicá-los às novas tecnologias.

A designação desta promissora área de estudo provém da combinação das palavras gregas *bíos*, que significa vida e *mímesis* que significa imitação. De modo simples, podemos dizer que a Biomimética é a ciência que “imita a vida”. Trata-se de uma área multidisciplinar que pode envolver diversos ramos da ciência, tais como a Física, a Biologia, a Química, a Informática, a Matemática e a Eletrônica. Pesquisas já se basearam no estudo do comportamento de cobras, minhocas, aranhas, lagartixas, peixes, centopeias, entre outros, para estudar sua locomoção, estabilidade, fixação e esse estudo tem sido aplicado em novas tecnologias ou aperfeiçoado as já existentes, e que muitos estão presentes em nosso dia-a-dia. Atualmente, com a popularização da

Biomimética nos estudos científicos, ela já está sendo aplicada em diversas áreas que vão desde micro/nano-eletrônicos até a engenharia estrutural.

Na crescente lista de modelos biomiméticos desenvolvidos atualmente, alguns podem ser citados como destaque. O mais conhecido entre eles é o velcro. Ele foi desenvolvido a partir de 1941, pelo engenheiro suíço George de Mestral com a observação de uma planta chamada *Aparine Galium*, ou popularmente conhecido como carrapicho. Os frutos dessa planta possuem estruturas que se parecem com garras que fazem com que grudem em certas superfícies, como nos pêlos de um animal. Com isso, em 1955, Mestral patenteou o velcro que nada mais é que uma superfície coberta por ganchos duros de nylon e outra por laços macios, quando as duas partes são pressionadas entre si se prendem uma na outra.

Outra criação que teve grande repercussão na mídia nos últimos tempos foram as superfícies de baixo atrito, que são inspiradas na maneira como a pele dos peixes se comporta em contato com a água. Esse tipo de tecnologia foi aplicado nos trajes de natação do nadador Michael Phelps, que fazia com que diminuísse o atrito da água com seu corpo. A mesma tecnologia tem sido aplicada também em cascos de navios, submarinos e em alguns aviões.

Finalizamos citando um terceiro modelo biomimético no qual as patas da lagartixa são a principal fonte de inspiração para a o desenvolvimento de adesivos. Foram criados em 2009 adesivos feitos com nanotubos de carbono que são 10 vezes mais eficientes do que o adesivo natural encontrado nos pés desses animais capazes de sustentar suspensos no teto. Apesar de toda essa força, o adesivo é reversível e reutilizável, soltando-se facilmente com uma pequena força aplicada numa direção determinada. Além desta utilização, o novo material poderá levar ao desenvolvimento de pequenos robôs capazes de se locomoverem sobre qualquer superfície, inclusive andando pelas paredes ou pelo teto.

Mark Cutkosky, professor de engenharia mecânica, colaborou com cientistas durante os últimos cinco anos para construir robôs que escalam superfícies verticais ásperas, como paredes de tijolo e concreto. Ultimamente, dirigiu a pesquisa para a escalada em superfícies lisas, como vidro e metal, utilizando o método de adesão seca, que é a técnica usada pela lagartixa. Robôs que escalam paredes verticais podem ser úteis para se chegar a locais de acesso difícil e perigoso, como por exemplo, no trabalho de reparação de danos na parte externa de naves espaciais.

A presença de tópicos multidisciplinares associados aos conceitos e fenômenos físicos, também é um estímulo tanto para alunos do nível médio como superior, pois lhes abre portas para novos rumos e aplicações tecnológicas, partindo o olhar para natureza e da sua imitação.

2. AS FORÇAS E A ESCALADA VERTICAL DAS LAGARTIXAS

2.1. Força

Na linguagem cotidiana, exercer uma força quer dizer empurrar ou puxar alguma coisa que está se deslocando. Esta ideia é parcialmente correta. Pode existir força sem haver movimento, como é o caso de uma mesa, um edifício, onde muitas forças estão presentes de modo a manter a estrutura destes. No estudo do movimento dizemos então que força é uma ação ou influência externa sobre um corpo, que causa uma mudança na velocidade deste, ou melhor, provoca uma aceleração do corpo em relação a um referencial inercial, onde referencial inercial é qualquer referencial em que sua aceleração conserva-se nula.

Força é uma grandeza física vetorial, ou seja, para que seu efeito fique bem definido é preciso estabelecer o módulo, a direção e o sentido em que a força está agindo. A sua unidade no SI é o Newton (N).

Sendo a força uma grandeza vetorial, podemos representá-la como um segmento de reta orientado que indica a direção e o sentido, e cujo comprimento indica o módulo que é proporcional à intensidade da grandeza (Figura 2.1).

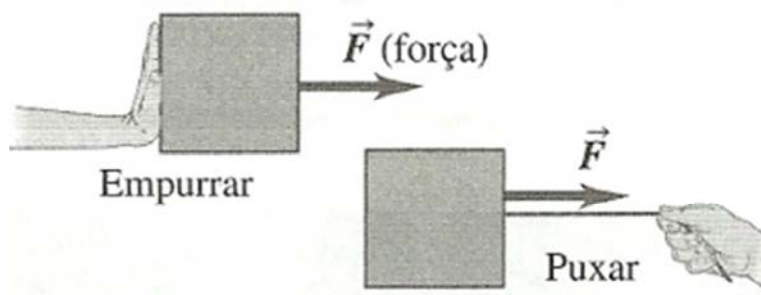


Figura 2.1 - Força $\vec{F}$ representada com um vetor. Fonte: Young e Freedman (2008, p.106).

2.1.1. Interações fundamentais da natureza

Podemos dizer que força é uma interação entre partículas. Existem na natureza dois tipos gerais de força: as fundamentais e as não-fundamentais. As forças fundamentais são aquelas que conseguem explicar todas as interações observadas na natureza. Tradicionalmente existem quatro interações básicas: interação gravitacional, interação eletromagnética, interação fraca e interação forte. De acordo com a Física Moderna a força é interação.

2.1.1.1. Interação gravitacional: Força Peso

É um tipo de interação de longo alcance que ocorre entre corpos devido às massas de cada um deles.

Se deixarmos um objeto próximo à superfície terrestre, ele cairá em direção à Terra devido uma força que atua sobre ele fazendo-o acelerar. Esta força é conhecida como força gravitacional ($\vec{F}_g$) ou força peso. O peso de um corpo surge devido à existência da atração gravitacional da Terra. O peso sempre age para baixo, na direção do centro terrestre. A unidade de peso no SI é o Newton (N).

A aceleração gravitacional, provocada pela força gravitacional, é semelhante a quaisquer tipos de aceleração. Sendo essa força a única atuante sobre um corpo de massa m , podemos dizer que ele se encontra em queda livre, e aplicando a segunda lei de Newton, temos:

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{g} \quad (2.1)$$

Além dessa relação obtida através da segunda lei de Newton, foi proposto por ele uma relação entre a força gravitacional com a lei da gravitação universal. Esta lei diz que toda e qualquer partícula no universo exerce uma força de atração sobre partículas vizinhas. Para duas partículas de massas m_1 e m_2 que estão a uma distância r uma da outra, a força que é exercida entre elas tem direção da reta que passa pelas partículas e módulo dado pela seguinte equação:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (2.2)$$

Onde G é a constante gravitacional universal, cujo valor é $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$. O valor desta constante foi medido pela primeira vez em um experimento realizado por Henry Cavendish (1731-1810).

A Figura 2.2 ilustra várias características da lei da gravitação universal de Newton. As partículas de massas m_1 e m_2 estão separadas por uma distância r . Supomos que a força apontando para a esquerda é positiva. As duas forças possuem mesmo módulo e direção, porém sentidos contrários, elas estão atuando em corpos diferentes, mas se atraindo mutuamente, formando então um par ação-reação, como enuncia a terceira lei de Newton.

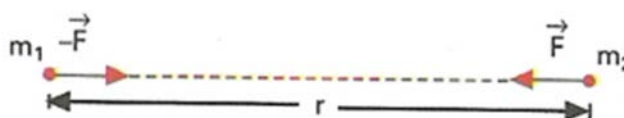


Figura 2.2 - $\vec{F}$ é a força gravitacional exercida sobre a partícula 2 exercida pela partícula 1 e $-\vec{F}$ é a força gravitacional exercida sobre a partícula 1 pela partícula 2. Fonte: Gaspar (2008, p.186)

Porém a maior parte dos corpos é grande demais para serem consideradas partículas, mas Newton conseguiu provar que um corpo pode ser considerado uma partícula se sua massa estiver uniformemente distribuída numa superfície esférica a partir de seu centro. Assim, podemos utilizar a equação 2.2 para determinarmos a força gravitacional entre dois corpos.

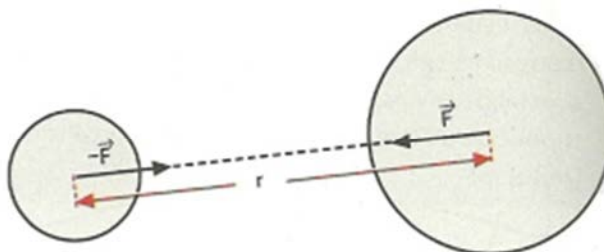


Figura 2.3 – Em corpos extensos, esféricos com uma distribuição uniforme de massa, a distância r é medida a partir do centro da esfera. Fonte: Gaspar (2008, p.186)

Vimos anteriormente a definição de peso, utilizando P para representar o módulo dessa força, m para a massa de um corpo qualquer e m_T para a massa da Terra, podemos reescrever a equação 2.2 da seguinte forma:

$$P = G \cdot \frac{m_T \cdot m}{r^2} \quad (2.3)$$

O peso de um corpo de massa m depende do valor da constante gravitacional universal G , da massa m_T da Terra e da distância r . os três parâmetros correspondem ao valor da aceleração gravitacional g .

Então temos que:

$$G \cdot \frac{m_T}{r^2} = g \quad (2.4)$$

Substituindo a expressão (2.4) na equação (2.3), temos:

$$P = m \cdot g \quad (2.5)$$

Esta última equação é análoga à equação (2.1), que determinamos a partir da segunda lei de Newton.

Próximo da superfície da Terra, aceleração da gravidade g tem o valor:

$$g = 9,81N / kg = 9,81m / s^2$$

A gravidade decresce à medida que a distância r aumenta consequentemente o peso de um mesmo objeto acompanha essa diminuição. Porém, a massa desse objeto independe desses efeitos, portanto não muda. A massa é uma propriedade intrínseca do corpo.

Podemos citar algumas características importantes da força gravitacional:

- Age em todas as coisas que tem massa ou energia, pois de acordo com Albert Einstein, $E = mc^2$. Até hoje, nada se conhece como forma de proteção contra a ação do campo gravitacional sobre um corpo.
- Einstein mostrou que a gravidade está diretamente relacionada à geometria do espaço. Propriedades locais da gravidade podem ser bem diferentes em grande escala, ou seja, o Universo como um todo.
- Como propriedade local, a gravidade sempre atrai as coisas, ela nunca as repele.
- Como efeito local, a gravidade não se extingue com a distância.
- A força gravitacional mantém ligados ao Sol os planetas do nosso Sistema Solar.
- Em grandes comprimentos, a gravidade é a força dominante. Ela é a força responsável pela estrutura em grande escala do universo.
- A partícula portadora de força gravitacional é chamada gráviton.

2.1.1.2 Interação eletromagnética

É uma interação de longo alcance entre partículas carregadas eletricamente envolvendo troca de fótons que inclui as forças elétricas e magnéticas.

A força eletromagnética determina a maneira com que partículas eletricamente carregadas interagem umas com as outras, e com campos magnéticos. Esta força pode ser atrativa ou repulsiva. Cargas elétricas com o mesmo sinal repelem-se e cargas com sinais diferentes atraem-se. Essa força controla o comportamento de partículas com carga elétrica e de plasmas, como por exemplo, em proeminências solares, laços coronais, luminâncias e outros tipos de atividade solar.

A força eletromagnética também governa a emissão e absorção de luz e outras formas de radiação eletromagnética.

Uma das formas de interação eletromagnética que nos interessa no momento são as forças intermoleculares, conhecidas também como forças de Van der Waals. Elas surgem de uma atração elétrica entre nuvens de elétrons e de núcleos atômicos. São forças de intensidade fraca se comparadas às outras forças como a iônica.

As forças intermoleculares mantêm as moléculas unidas nos estados sólido e líquido. São fundamentalmente de três tipos: interação dipolo-dipolo, ligação de hidrogênio e forças de dispersão de London. A primeira delas ocorre quando moléculas polares eletricamente neutras de certos materiais podem possuir dipolo elétrico permanente. Devido a alguma diferença na distribuição da carga elétrica, um dos lados da molécula se torna um pouco mais negativo e o outro mais positivo. Com isso, essas moléculas tendem a se alinhar por atração eletrostática entre dipolos opostos, como vemos na Figura 2.4. Esta é uma interação chamada de dipolo-dipolo, que é geralmente bem mais fraca que as ligações iônicas ou covalentes.

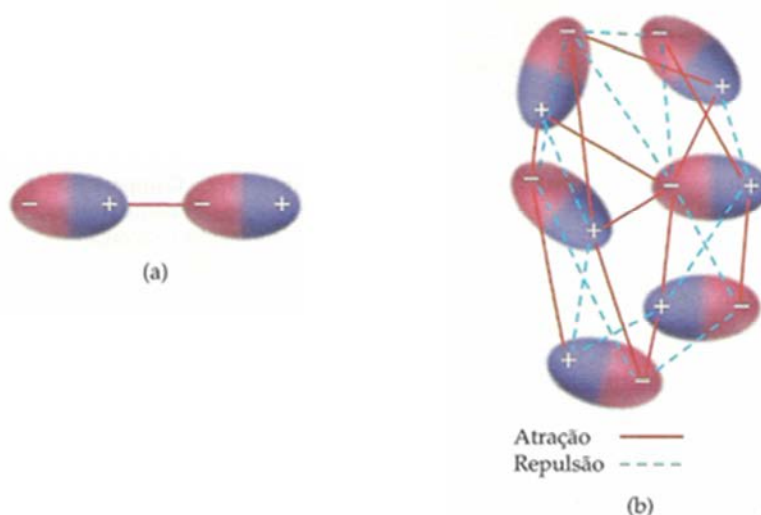


Fig. 2.4 – (a) Forças dipolo-dipolo: moléculas carregadas com sinais opostos se mantêm próximos uns aos outros. (b) Interação de muitos dipolos. Fonte: Brown, Lemay e Bursten (2005, p.378)

Vamos observar a Figura 2.5, que mostra os pontos de ebulição de alguns compostos de hidrogênio. Geralmente o ponto de ebulição aumenta conforme há o aumento da massa molecular. Porém vemos que há uma exceção notável no gráfico que é o caso do H_2O , cujo ponto de ebulição é maior do que o esperado com relação a sua massa molecular. Os compostos NH_3 e

HF também têm esse tipo de comportamento. Isso ocorre devido às forças intermoleculares muito fortes chamadas ligações de hidrogênio, também conhecidas como pontes de hidrogênio.

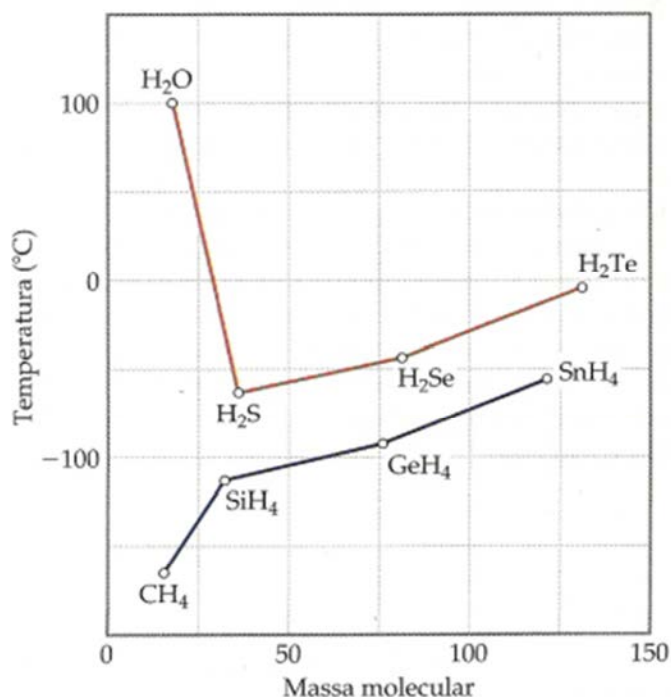


Figura 2.5 – Gráfico representativo de ponto de ebulição em função da massa molecular de alguns compostos de hidrogênio. Fonte: Brown, Lemay e Bursten (2005, p.380)

Esse tipo de interação ocorre quando, em uma molécula, um átomo de hidrogênio fizer uma ligação com outro átomo pequeno e de eletronegatividade muito baixa, como é o caso dos elementos flúor (F), oxigênio (O) e nitrogênio (N). A ligação do hidrogênio com qualquer um desses três elementos gera uma grande polarização, que produzirá um forte pólo positivo no hidrogênio.

Essa polarização faz com que o hidrogênio interaja com o par de elétrons de outra molécula vizinha, provocando uma interação muito intensa entre essas moléculas. Essa interação é a mais intensa dentre as forças intermoleculares.

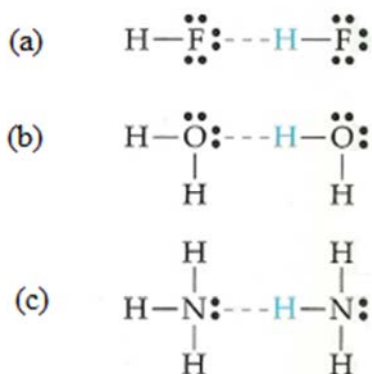


Figura 2.6 – Representação das ligações de hidrogênio com (a) flúor, (b) oxigênio e (c) nitrogênio. Fonte: Peruzzo e Canto (2007, p.136).

Por fim, temos a interação intermolecular do tipo forças de London, ou também chamadas de forças de dispersão, que geralmente são menos intensas. É preciso recorrer à mecânica quântica para fazermos uma correta descrição da natureza dessas forças, e isso foi primeiramente descrito em 1930 por Fritz Wolfgang London, um físico americano de origem alemã. Ele descreveu que essas forças originam-se de flutuações momentâneas que ocorrem nas nuvens eletrônicas em uma molécula ou átomo, ou seja, em determinado instante o centro de carga positiva do núcleo do átomo e de carga negativa dos elétrons poderia não coincidir. Essa flutuação poderia transformar as moléculas apolares em dipolos tempo-dependentes, estes dipolos instantâneos não conseguem se orientar para alinhar suas moléculas, mas podem induzir a polarização de moléculas vizinhas, dando origem a forças atrativas, que são as chamadas forças de London, como podemos ver na Figura 2.6.



Figura 2.6 - (a) Representação de dipolos instantâneos em átomos de hélio. (b) Outras representações de dipolos instantâneos. Fonte: Brown, Lemay e Bursten (2005, p.378)

Podemos citar algumas características importantes da interação eletromagnética:

- Atua sobre qualquer coisa que tenha carga elétrica. Objetos que não têm carga em excesso não sentem qualquer força eletromagnética.
- Objetos carregados com cargas opostas sempre se atraem enquanto carregados com cargas de mesmos sinais se repelem.
- O raio de ação da força eletromagnética é infinito, mas ela se extingue com a distância.

- Mantém os átomos juntos e a força eletromagnética residual nos átomos é responsável por manter as moléculas unidas.
- A partícula portadora da força eletromagnética é o fóton.

2.1.1.3. Interação nuclear fraca

A força nuclear fraca atua nas partículas chamadas léptons como também nos bárions e mésons. Dados experimentais sobre os léptons implicam que estas partículas não têm tamanho sob qualquer condição.

Esta força é responsável pelo decaimento radioativo envolvendo um membro da família de partículas léptons chamado elétron. Este tipo de decaimento radioativo é chamado decaimento beta e é crucial para que o Sol emita energia. Henry Becquerel, em 1896, obteve os primeiros sinais de força nuclear fraca responsável pelo decaimento radiativo de alguns elementos. Na época em que essa ideia surgiu, havia dois problemas a serem resolvidos na Física, um deles era relacionado à conservação total de energia no decaimento beta e o outro era relacionado à conservação do momento linear e angular no decaimento do nêutron.

Pensando nesses problemas, o físico alemão Wolfgang Pauli, em 1930, detectou a existência de uma partícula neutra que era emitida junto com o elétron pelo núcleo radioativo. Alguns anos depois Enrico Fermi denominou essa partícula neutra de neutrino, atualmente conhecida como anti-neutrino. Este foi inicialmente postulado para garantir os princípios de conservação de energia e de momento. Somente alguns anos depois foi comprovada a sua existência.

Fermi percebeu que todos os elementos que sofriam decaimento beta (Figura 2.7), ou seja, emitiam um elétron e um neutrino (ν), apresentavam um longo tempo de vida. Isso quer dizer que a interação responsável pelo decaimento teria uma intensidade muito pequena, necessitando de um tempo muito longo para a desintegração. Foi assim que Fermi deu a essa interação o nome de força fraca.

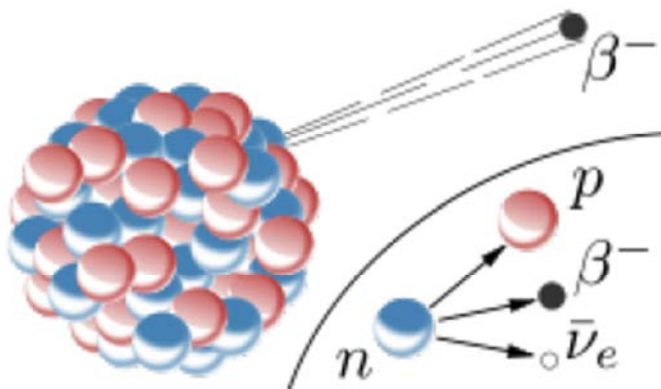


Figura 2.7 – Decaimento de um nêutron em um elétron e um neutrino. Fonte: Decaimento atômico. Disponível em: <<http://pamgodoy.blogspot.com>>. Acesso em: 14 mai. 2011

É um tipo de interação de curto alcance, da ordem de 10^{-18}m , entre partículas subnucleares que envolve a produção e a troca de bósons W e Z. Os bósons aparecem em três tipos carregados eletricamente positivas, carregados eletricamente negativas e uma versão sem

qualquer carga elétrica. As partículas mediadoras que são usadas para os bósons são W^+ , W^- e Z^0 , que foram encontradas pelos cientistas nos aceleradores de partículas em 1983.

Podemos citar algumas características importantes da força fraca:

- Esta força atua nos Léptons (não tem tamanho, ou seja, são partículas pontuais) como também nos Bárions e Mésons.
- É responsável pelo decaimento radioativo (beta) de elétron.
- A partícula Lépton que exclusivamente interage via força fraca é o neutrino.
- A partícula que tem sido mostrada ser a portadora da força fraca é chamada Intermediário Vetor Bóson. Ele aparece de três tipos: uma versão carregada eletricamente positiva, outra eletricamente negativa, e outra sem carga elétrica.

2.1.1.4. Interação nuclear forte

É uma força forte atua dentro do núcleo atômico de modo a mantê-lo estável. Esta força faz a união entre prótons e nêutrons e impede a repulsão entre os prótons evitando a desintegração do núcleo.

A força forte pode ser de dois tipos: a força forte residual, que é responsável pela estabilidade do núcleo atômico; e a força forte fundamental, responsável pela união dos quarks dentro de prótons e nêutrons.

Em 1932, alguns cientistas propuseram que o núcleo atômico era formado por um mesmo tipo de componente, os núcleons. Em 1935, Hideki Yukawa propôs um modelo onde a força entre os núcleons era gerada pela troca de partículas entre eles. Esse tipo de partícula foi denominado méson, que deveria ter uma massa 200 vezes maior que a do elétron. Em 1947, finalmente foi detectada a existência dessa partícula que passou a ser chamada de méson π . A partir dessas novas descobertas, o conceito de partícula elementar teve que ser revisto. Surgiu então a Teoria da Cromodinâmica Quântica, onde as partículas fundamentais são chamadas de quarks e glúons.

A força forte é uma interação de curtíssimo alcance, da ordem de 10^{-15} a 10^{-18} m.

Podemos citar algumas características importantes da força forte:

- Esta força é também conhecida como a força nuclear e recentemente tem sido chamada de força colorida.
- Atua em qualquer coisa que tem uma carga colorida. Somente os quarks, encontradas no núcleo dos átomos, têm carga colorida.
- A carga colorida aparece em três tipos: carga verde, vermelha, azul. Lembrando que não possuem qualquer correlação com a definição de luz com estas cores.
- Partículas coloridas existem em estados de dois tipos: um estado com três partículas coloridas chamadas Bárions e um estado com duas partículas coloridas chamadas Mésons.
- O efeito das cargas coloridas desaparece extremamente rápido e, portanto a interação forte opera sobre distâncias muito curtas.
- Esta força mantém todas as partículas como prótons e nêutrons juntos e a força colorida residual deixada em excesso nestas partículas é responsável por manter o núcleo unido. O núcleo se mantém tão junto que enormes quantidades de energia podem ser liberadas no processo. Esta energia pode criar estrelas que podem sustentar a vida ou produzirem bombas de hidrogênio que podem destruir a vida.

2.2. As leis de Newton

O estudo da Dinâmica se inicia com as leis de Newton. Esta área da Mecânica além de analisar o movimento dos corpos, estuda o que provoca, o que mantém e o que varia esse movimento.

Há aproximadamente três séculos atrás, Isaac Newton, físico e matemático, formulou três princípios fundamentais do movimento, que inicialmente foram chamadas de Leis do Movimento. Elas foram publicadas na famosa obra de Newton, *Princípios matemáticos da filosofia natural*, em 1686. De acordo com a ordem em que apareceram na obra, estas leis ficaram conhecidas como 1º, 2º e 3º leis de Newton.

Vimos no início do capítulo o conceito de força. Quando uma força é exercida sobre um corpo por outro corpo e há contato físico entre eles, dizemos que é uma força de contato. Já outras forças agem sobre um corpo sem a necessidade de contato físico com um segundo corpo, estas forças são chamadas de forças de ação à distância como, por exemplo, a força gravitacional.

2.2.1. Primeira lei de Newton

Experiências realizadas por Galileu o levaram a atribuir a todos os corpos uma propriedade denominada inércia. A inércia é uma resistência à mudança ou variação de seu estado de repouso ou movimento retilíneo uniforme.

Newton estruturou os estudos dos princípios da Mecânica, incluindo os estudos feitos por Galileu, formulando sua primeira lei de Newton, também denominada de lei da inércia de Galileu. Esta lei diz que na ausência de forças, ou quando a resultante das forças for nula, um corpo permanecerá em seu estado de repouso ou em movimento retilíneo uniforme até que uma força externa atue sobre ele.

Como vimos, uma das condições necessárias para a primeira lei de Newton é que a resultante das forças sobre um corpo seja nula, ou seja, o corpo deve estar em uma condição de equilíbrio de forças.

$$\vec{R} = 0 \text{ ou } \sum \vec{F} = 0$$

Vamos observar a Figura 2.8, nela temos uma partícula que está sob ação de um sistema de forças $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ e $\vec{F}_3$. Decompondo essas forças nos eixos Ox e Oy, temos suas componentes, como mostra a figura abaixo.

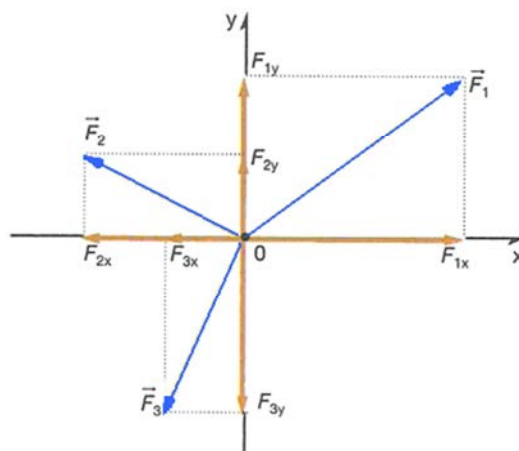


Figura 2.8 – Diagrama de forças e suas respectivas componentes sobre uma partícula situada na origem. Fonte: Luz e Álvares (2005, p.111)

Para que haja equilíbrio é necessário que a somatória das forças no eixo Ox seja igual à zero.

$$\sum \vec{F}_x = \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x} + \vec{F}_{3x} = 0 \quad (2.6)$$

Assim como é necessário que a somatória das forças no eixo Oy também seja igual à zero.

$$\sum \vec{F}_y = \vec{F}_{1y} + \vec{F}_{2y} + \vec{F}_{3y} = 0 \quad (2.7)$$

Concluimos que a condição para que uma partícula esteja em equilíbrio é que $\sum \vec{F}_x = 0$ e $\sum \vec{F}_y = 0$, que são equivalentes à equação de força resultante $\vec{R} = 0$.

2.2.2. Segunda lei de Newton

Como vimos na seção anterior, a primeira lei de Newton diz que se a resultante das forças sobre um corpo for nula, este corpo estará em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, ou seja, em ambas as situações a aceleração é zero.

Para entendermos a segunda lei de Newton vamos observar a Figura 2.9, nela há um disco que desliza para a direita sobre uma superfície de atrito desprezível, portanto não há forças na horizontal atuando sobre o disco. Na vertical, sobre o corpo há a força gravitacional atuando na direção para baixo e a força normal na direção para cima da superfície, consequentemente a força resultante neste caso é nula. Portanto o disco está em movimento retilíneo uniforme, ou seja, com velocidade constante e, consequentemente, aceleração zero.

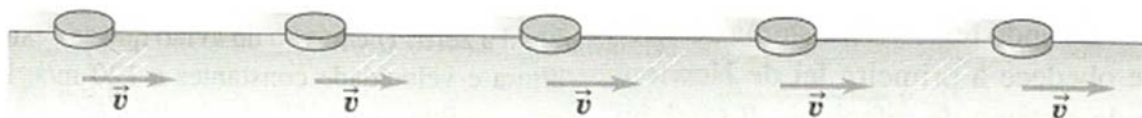


Figura 2.9 – Um disco em movimento retilíneo uniforme (em equilíbrio). Fonte: Young e Freedman (2008, p.114).

Na Figura 2.9 nota-se, portanto, que o vetor velocidade do corpo em diferentes posições é representado como tendo a mesma direção, sentido e módulo.

Na Figura 2.10, observamos que uma força $\vec{F}$ constante é aplicada sobre o disco no mesmo sentido que sua velocidade. Enquanto a força estiver atuando sobre o disco, a velocidade desse corpo varia a uma mesma taxa, ou seja, o disco adquire uma aceleração constante.

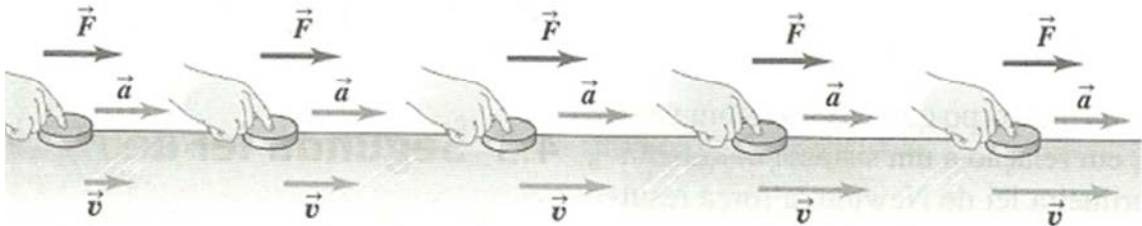


Figura 2.10 – Uma força constante é aplicada sobre o disco, provocando uma aceleração constante no mesmo sentido da força resultante. Fonte: Young e Freedman (2008, p.114).

Nota-se que o vetor velocidade varia em módulo para cada posição do corpo, crescendo para a direita.

Concluimos então que um corpo, sob ação de uma força, adquire uma aceleração. Essa força que atua sobre um corpo é diretamente proporcional à aceleração produzida. Se dobrarmos a força aplicada sobre um objeto a aceleração também dobra, ou seja, se variarmos a força sobre um corpo a aceleração irá variar na mesma proporção. Esse comportamento é mostrado no gráfico abaixo (Figura 2.11).

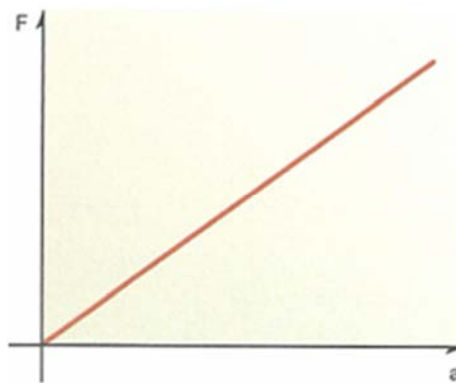


Figura 2.11 – Gráfico da aceleração adquirida em função da força aplicada sobre um corpo. Fonte: Luz e Álvares (2005, p.146).

Analisando este gráfico notamos que a relação F/a é constante. Este valor é constante para cada corpo, sendo assim característico de cada objeto. O quociente dessa relação é denominado massa (m) do corpo. Logo:

$$m = \frac{F}{a} \quad (2.8)$$

Da relação (2.8), obtemos:

$$a = \frac{F}{m} \quad (2.9)$$

Notamos, analisando a relação (2.9), que para determinada força, quanto maior for a massa do corpo menor será a aceleração adquirida por ele. Dizemos então que a massa de um corpo caracteriza a dificuldade que ele tem de adquirir uma aceleração, ou seja, quanto maior a massa de um corpo maior será sua inércia.

A segunda lei de Newton estabelece, portanto, que quando uma força resultante age sobre um corpo de massa m , que provoca uma aceleração a que é diretamente proporcional à força aplicada e inversamente proporcional à massa. A direção e o sentido da aceleração coincidem com a direção e sentido da força resultante.

Esta lei é representada da seguinte forma:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (2.10)$$

Como já vimos anteriormente, a unidade de força no SI é o newton (N). Sabemos também que $1\text{N} = 1\text{ kg.m/s}^2$.

2.2.3. Terceira lei de Newton

Newton percebeu em seus estudos que as forças sempre aparecem quando há interação entre corpos, ou seja, a ação de uma força não pode se manifestar sem que haja um outro corpo que provoque esta ação. Ele também observou que as forças sempre aparecem aos pares. Isso quer dizer que para toda ação de um corpo sobre outro, haverá uma reação de igual intensidade, porém contrária em sentido. Essas observações feitas por Newton ficaram conhecidas como a terceira lei de Newton, ou lei da ação e reação.

Vamos observar a Figura 2.12, nela um patinador está em repouso. Para conseguir se movimentar ele empurra a parede para frente e como consequência o patinador se desloca para trás. Pela terceira lei de Newton tanto o patinador quanto a parede exerceram forças. O patinador exerceu uma força de certa intensidade contra a parede, e a parede exerceu uma força de reação contra o patinador de mesma intensidade e sentido contrário.

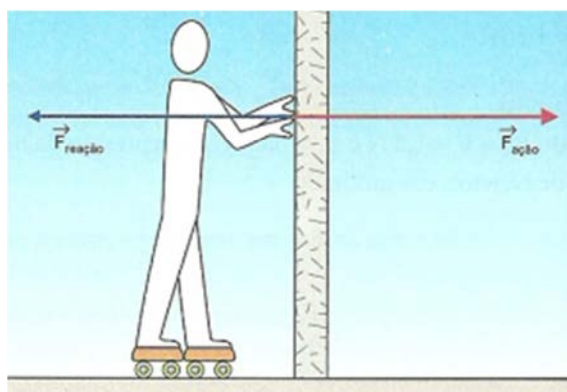


Figura 2.12 – Um par ação-reação entre patinador e parede. Fonte: Gaspar (2004, p.84)

Portanto, a terceira lei de Newton estabelece que se um corpo A exerce sobre um corpo B uma força $\vec{F}_{AB}$, este exerce sobre A uma força $\vec{F}_{BA}$ de mesma intensidade e direção, porém sentido contrário.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA} \quad (2.11)$$

É importante ressaltar alguns pontos sobre essa lei. O primeiro é que as forças de ação e reação sempre agem em corpos diferentes, portanto não se anulam. O segundo é que o fato dessas forças terem o mesmo módulo não significa que terão o mesmo efeito sobre os corpos, isto é, não produzirão a mesma aceleração, pois a aceleração de cada corpo depende de sua massa.

2.3. Diagrama do corpo livre

As três leis de Newton contêm todos os princípios básicos necessários para o entendimento de diferentes situações físicas envolvendo movimento. Essas leis têm formas muito simples, mas em certos casos podem apresentar situações desafiadoras. Uma maneira de facilitar a compreensão dessas situações é fazendo uso de um recurso chamado diagrama de corpo livre, também conhecido como diagrama de forças.

Os diagramas de corpo livre são essenciais para auxiliar a identificação de forças relevantes. Esse tipo de diagrama mostra o corpo escolhido e vetores desenhados sobre ele, que servem para mostrar o módulo, a direção e o sentido de todas as forças que atuam sobre o corpo.

A Figura 2.13 mostra um exemplo de diagrama de corpo livre, onde o corpo analisado é a caixa que está sendo empurrada pela pessoa e assumimos que o atrito é desprezível. Sobre o corpo analisado temos todas as forças nele atuantes: a força normal (N), a força peso (P) e a força (F) exercida pela pessoa.

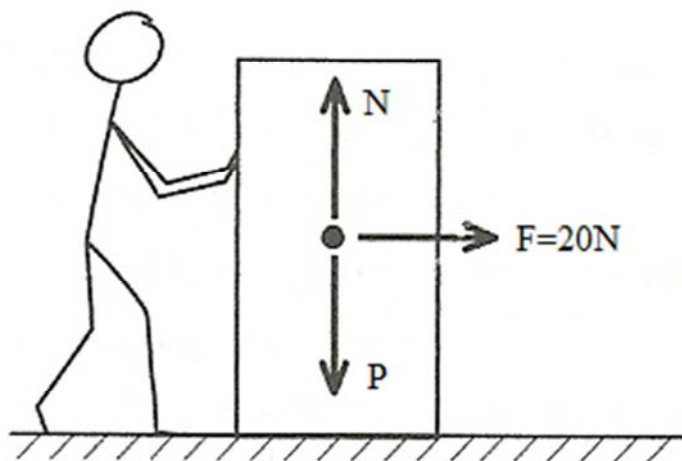


Figura 2.13 – Exemplo de diagrama de corpo livre. Todas as forças representadas sobre o corpo analisado, a caixa.
Fonte: Young e Freedman (2008, p.117)

Dois pontos importantes devem ser ressaltados. Primeiro, deve-se ter cuidado de incluir todas as forças que estão atuando sobre o corpo e de não incluir as forças que esse corpo exerce sobre outros corpos. Segundo, um par de forças de ação e reação nunca deve aparecer em um diagrama de corpo livre, pois elas atuam sempre em corpos diferentes.

Além disso, é importante lembrar que forças que o corpo exerce sobre si mesmo também não aparecem neste tipo de diagrama, porque forças internas não interferem no movimento do corpo.

Quando um sistema a ser estudado envolver mais de um corpo, deve-se estudar cada corpo separadamente, ou seja, apresentar um diagrama para cada caso, como na Figura 2.14, que mostra dois jogadores de basquete. O da esquerda está numa situação de queda livre, portanto só atua a força peso sobre ele, já o jogador da direita está apoiado sobre o chão, então além da força peso, há a força normal sobre ele.

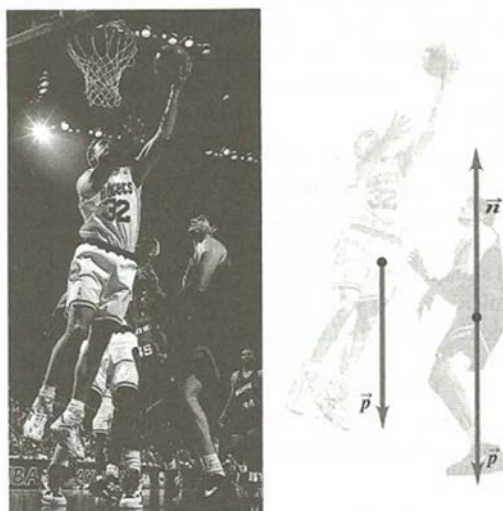


Figura 2.14 - Um sistema com dois corpos a serem estudados: dois jogadores de basquete. Cada corpo deve apresentar um diagrama de corpo livre separadamente. Fonte: Young e Freedman (2008, p.126).

2.4. Força de atrito

Vimos até agora várias situações onde um corpo fica em repouso ou em movimento sobre superfícies que exercem forças sobre ele. Quando corpos interagem através de contato direto entre si, chamamos essas interações de forças de contato. Há vários tipos de forças de contato, mas estudaremos agora a força de atrito.

O atrito é importante em vários aspectos do nosso cotidiano. Se não fôssemos capazes de vencer a força de atrito, não conseguiríamos colocar nem manter qualquer corpo em movimento bem como qualquer eixo em rotação. Sem o atrito não conseguiríamos fazer coisas simples do nosso dia-a-dia como caminhar, andar de bicicleta, nem segurar qualquer tipo de objeto, pregos e parafusos não teriam utilidade.

As primeiras observações sobre o atrito, que não foram divulgadas na época, devem-se a Leonardo da Vinci. Ele propôs que o atrito entre corpos não depende da área da superfície de contato entre os eles, mas sim da força que é exercida um contra o outro. Aproximadamente dois séculos depois se percebeu que para corpos deslizando sobre uma superfície o atrito não depende da velocidade. Um carro movimentando-se lentamente sofre o mesmo atrito que se movimentando rapidamente.

Tempos depois, o francês Charles de Coulomb retomou os trabalhos sobre atrito, e classificou-os em dois tipos: o atrito estático para corpos que estão em repouso e o atrito cinético para corpos em movimento.

Mesmo quando superfícies aparentam ser altamente polidas, microscopicamente elas podem ser bastante ásperas. Esta análise revela que duas superfícies em contato se tocam em pequenos pontos, como podemos ver na Figura 2.15. Observando a região microscópica entre as superfícies podemos notar que a área de contato nessa região é muito menor que a área macroscópica de contato entre as superfícies. Nestes pequenos pontos de contato, as moléculas das duas superfícies estão muito próximas exercendo forças intermoleculares entre si, formando o que chamamos de “solda a frio”.

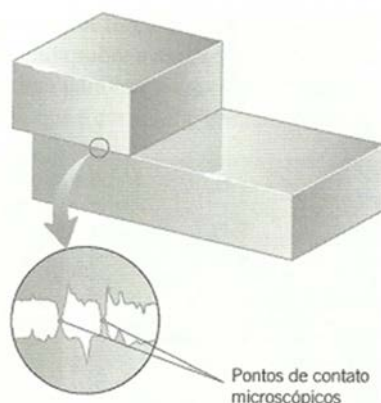


Figura 2.15 – Duas superfícies mesmo altamente polidas possuem, microscopicamente, alguns pontos de contato.
Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.106)

Quando um objeto está apoiado numa superfície sabemos que as forças atuando sobre o corpo são a força normal e a peso. Contudo, quando tentamos movê-lo exercendo sobre ele uma força $\vec{F}$, dependendo da superfície, percebemos que há certa resistência ao movimento. Concluimos então que existe uma componente da força que causa essa resistência chamada de força de atrito $\vec{f}$. Esta força é paralela à superfície e aponta no sentido oposto à força $\vec{F}$ aplicada (Figura 2.16).

Se aumentarmos o valor da força e o corpo permanecer em repouso, podemos concluir que a força de atrito $\vec{f}$ está equilibrando a força $\vec{F}$, ou seja, à medida que aumentamos a força exercida sobre o corpo, a força de atrito também aumenta até certo valor limite.

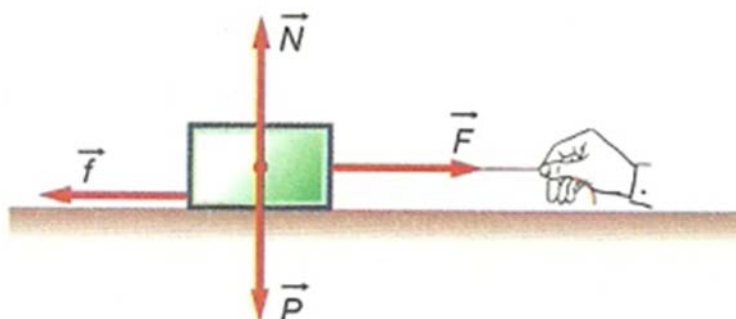


Figura 2.16 – Diagrama que ilustra todas as forças que atuam sobre o corpo. Neste caso o bloco permanece em repouso, pois as forças $\vec{f}$ e $\vec{F}$ estão equilibradas. Fonte: Luz e Álvares (2005, p.117).

A força de atrito que atua sobre um corpo em repouso é denominada de força de atrito estático ($\vec{f}_e$). Vimos que à medida que aumentamos a força exercida sobre um corpo, a força de atrito estático também aumenta até um valor limite, este limite é chamado de força de atrito estático máximo ($\vec{f}_{eM}$). Quando o valor da força $\vec{F}$ ultrapassa esse valor máximo o corpo começa a se movimentar.

A força de atrito estático máxima é proporcional à força normal que um corpo exerce sobre a superfície. Podemos dizer então que:

$$f_{eM} \propto N \quad (2.12)$$

A constante de proporcionalidade entre a força de atrito estático máxima e a força normal é o coeficiente de atrito estático (μ_e). O valor deste coeficiente depende de diversos fatores como a natureza da superfície, o polimento, entre outros.

Então a força de atrito estático máxima é dada por:

$$f_{eM} = \mu_e \cdot N \quad (2.13)$$

Agora suponhamos que a força $\vec{F}$ tenha valor maior que a força de atrito estático máxima, então o corpo estará em movimento (Figura 2.17). Todavia, percebemos que a força de atrito ainda continua a agir sobre o corpo, sempre se opondo ao movimento. Esta força de atrito que atua sobre um corpo em movimento é chamada de força de atrito cinético ($\vec{f}_c$).

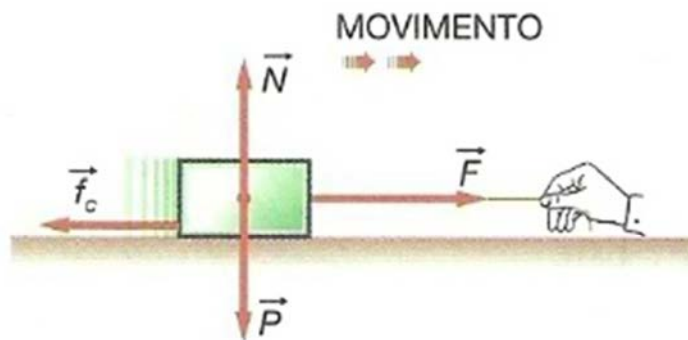


Figura 2.17 – Quando um corpo está em movimento ainda há uma força de atrito atuando sobre ele chamada de força de atrito cinético f_c . Fonte: Luz e Álvares (2005, p.118).

Em geral, o módulo da força de atrito cinético, que age quando há movimento, é menor que a força de atrito estático máxima, que atua quando o corpo está parado. O valor da força de atrito cinético é aproximadamente constante durante todo o movimento, independente da velocidade, e é proporcional à força normal entre as superfícies.

$$f_c \propto N \quad (2.14)$$

A constante de proporcionalidade da relação (2.14) é o coeficiente de atrito cinético (μ_c). Então a força de atrito cinético é dada pela relação:

$$f_c = \mu_c \cdot N \quad (2.15)$$

O valor desta constante depende dos mesmos fatores que a constante de atrito estático. Os valores de μ_c e μ_e são adimensionais e devem ser determinados experimentalmente para cada superfície.

A tabela 2.1 mostra alguns valores aproximados do coeficiente de atrito estático e cinético de alguns materiais.

Tabela 2.1 - Valores dos coeficientes de atrito estático e cinético de alguns materiais.

Materiais	Coeficiente de Atrito Estático, μ_s	Coeficiente de Atrito Cinético, μ_c
Aço com aço	0,74	0,57
Alumínio com aço	0,61	0,47
Cobre com aço	0,53	0,36
Latão com aço	0,51	0,44
Zinco com ferro doce	0,85	0,21
Cobre com ferro doce	1,05	0,29
Vidro com vidro	0,94	0,40
Cobre com vidro	0,68	0,53
Teflon® com Teflon®	0,04	0,04
Teflon® com aço	0,04	0,04
Borracha com concreto (seco)	1,0	0,8
Borracha com concreto (úmido)	0,30	0,25

Fonte: Young e Freedman (2008, p.149)

2.5. Ação das forças no deslocamento das lagartixas

As lagartixas são conhecidas como a elite dos escaladores da natureza, elas possuem a habilidade de se mover em superfícies verticais e, até mesmo, em tetos. Além de desafiarem a gravidade, estes animais são muito ágeis, escalando em um segundo distâncias equivalentes a 15 comprimentos de seu corpo e executando 30 passos. Desde a Antiguidade, o comportamento da lagartixa impressiona observadores, sendo que Aristóteles (380-322 a.C.) em seu texto “História dos animais” deixou registros sobre o assunto. Passados mais de 2000 anos, físicos e biólogos se propõem a pesquisar a biomecânica e a evolução da locomoção da lagartixa buscando entender o segredo das forças de adesão das suas patas não apenas pelo conhecimento da morfologia, mas também por outros interesses como aplicações tecnológicas variadas.

Estudos desde século mostram que um dos fatores que possibilita esse tipo de habilidade de escalar paredes é a existência de estruturas diferenciadas em suas patas, que se utilizam de alguns tipos de forças para exercerem a aderência com a superfície de contato. Possíveis mecanismos de aderência incluem interações superficiais como, por exemplo, a capilaridade e a viscosidade; e a adesão molecular (forças de Van der Waals).

Para tentar explicar a locomoção destes animais, Kellar Autumn e Anne Peattie (2002), do Departamento de Biologia da Lewis e Clark College estudaram o comportamento da lagartixa da espécie Tokay (Figura 2.18) e da lagartixa doméstica *Hemidactylus garnotii*. Eles usaram como

base estudos feitos por Von Anton Haase que observou que a aderência é dependente da carga e ocorre em uma única direção: ao longo do eixo da pata. Ele também foi o primeiro a sugerir que as lagartixas se fixavam nas paredes através de forças intermoleculares, onde a força de atração deve aumentar à medida que o espaço entre as patas e a superfície diminuir.



Figura 2.18 – Lagartixa Tokay, espécie originária da Malásia. Fonte: The Malaysian Life. Disponível em: <<http://themalaysianlife.blogspot.com>>. Acesso em: 05. jul. 2011.

O segredo da capacidade de aderência das lagartixas está na estrutura e função das suas patas e nas estruturas presentes nos dedos. Essas estruturas são semelhantes a finas lâminas, como podemos ver na Figura 2.19. Cada lâmina presente nos dedos da lagartixa é coberta por milhões de estruturas semelhantes a finíssimos pelos, formadas por β -queratina, denominadas setas.



Figura 2.19 – Estruturas semelhantes a finas lâminas presentes nas patas das lagartixas, que permitem a aderência em superfícies verticais. Fonte: Autumn e Peattie (2002, p.1082).

Autumn e Peattie (2002) estudaram uma lagartixa da espécie Tokay, cujas cerdas ou setas têm aproximadamente 100 μm de comprimento e 5 μm de diâmetro (Figura 2.20a). Nas extremidades de cada seta existem de 100 a 1.000 pequenas ramificações denominadas espátulas.

Cada espátula consiste de uma haste com a extremidade achatada e triangular, onde o vértice do triângulo se conecta com a haste da espátula, como podemos observar na Figura 2.20b.

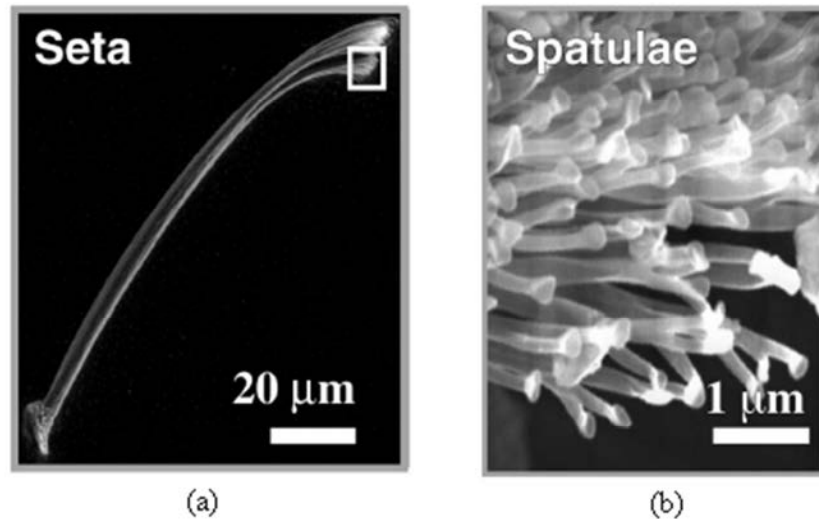


Figura 2.20 – (a) Estrutura semelhante a uma cerda chamada seta, presente nas lâminas nos dedos das patas das lagartixas. (b) Na extremidade de cada seta possui uma grande quantidade de uma estrutura denominada de espátula. Fonte: Autumn e Peattie (2002, p.1082).

A base triangular e achatada das espátulas favorece o contato delas com a superfície a ser escalada, intensificando a ação das forças de adesão molecular ou Van der Waals.

Outros estudiosos também formularam suas hipóteses sobre o papel das setas na locomoção das lagartixas. Dellit, em 1934, disse que as setas presentes nas patas da lagartixa são como ganchos que se fixam em superfícies irregulares (microinterligação). Está implícita, então, que a aderência é mais forte ou mais eficiente em superfícies ásperas, e que a locomoção invertida (caminhar no teto, por exemplo) deve ser difícil, se não impossível, uma vez que o atrito só funciona paralelamente ao plano de locomoção, não deixando nenhuma componente de força vertical para se opor à força gravitacional.

Estudos mostram que as duas patas dianteiras de uma lagartixa Tokay produzem uma força de aproximadamente 20,1 N paralela à superfície de contato com a área da pata de 227mm². As patas dessa lagartixa possuem aproximadamente 14.400 setas por mm². Consequentemente cada seta pode produzir em média uma força de 6,2 μN, e uma tensão média de cisalhamento de 0,090 N/mm².

Uma das dificuldades que Autumn e Peattie (2002) encontraram foi isolar e manipular uma única seta, e também em encontrar um instrumento capaz de medir uma força de microneutons. Para esse procedimento, eles usaram uma nova técnica de medida de força, o sistema microeletromecânico (MEMS). A Figura 2.21 mostra uma seta isolada aderindo ao sensor do MEMS que é capaz de medir forças paralelas e perpendiculares à superfície. A flecha branca (apontada para baixo) desenhada na figura indica a direção de manipulação durante o experimento, simulando forças paralelas geradas durante o movimento vertical da lagartixa.

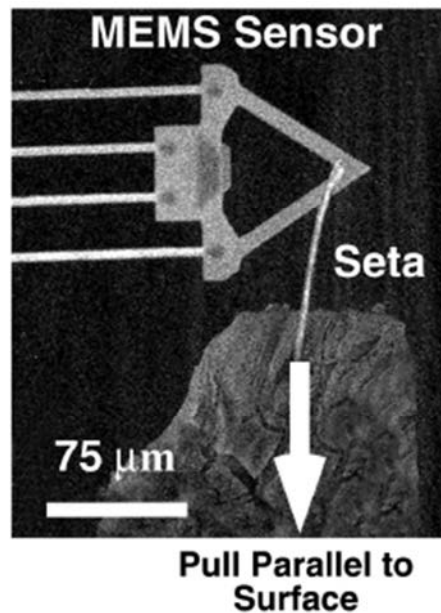


Figura 2.21 – Sensor do sistema microeletromecânico (MEMS) sendo aplicado em uma seta para simular a medida de forças paralelas à superfície de contato. Fonte: Autumn e Peattie (2002, p.1082).

Percebeu-se que o ângulo das hastes das setas é muito importante para se conseguir uma boa aderência. Como podemos ver a Figura 2.22 mostra uma seta em contato com um fio de alumínio que tem a capacidade de medir forças perpendiculares à superfície. A flecha preta desenhada à esquerda indica a direção do movimento durante o experimento, simulando o movimento perpendicular que a lagartixa realiza quando suas patas deixam de ter contato com a superfície e α é o ângulo formado entre a haste da seta e o fio de medição.

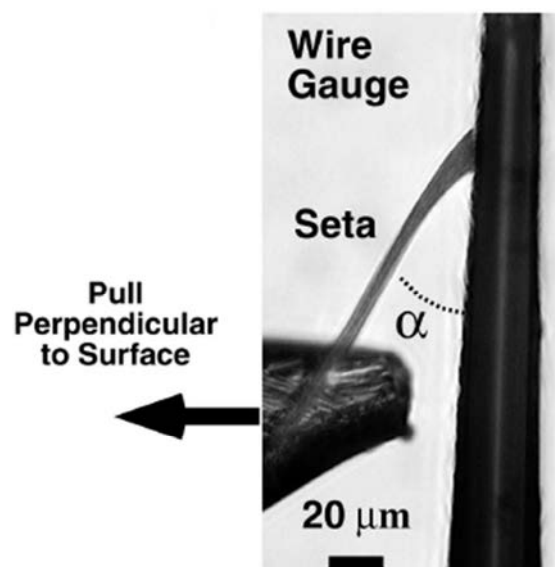


Figura 2.22 – Fio de alumínio em contato com a seta para simular a medida de forças perpendiculares no momento em que as patas da lagartixa deixam de ter contato com a superfície. Fonte: Autumn e Peattie (2002, p.1082).

Todas as 6,5 milhões de setas presentes numa lagartixa Tokay de aproximadamente 50 g podem gerar, teoricamente, uma força de adesão de 1.300 N, força suficiente para suportar o peso de duas pessoas. Isso mostra que a lagartixa necessita somente de 3% de suas setas para gerar a maior força medida no animal e menos de 0,04% das setas são necessárias para suportar o seu peso em uma superfície vertical.

Deve haver grande vantagem em ter uma enorme quantidade dessas estruturas presentes nas patas da lagartixa. É improvável que todas as setas tenham a capacidade de se orientar na mesma direção simultaneamente. A quantidade de espátulas anexadas às setas pode ser fortemente reduzida em superfícies ásperas, particularmente naquelas com rugosidade na mesma escala que as espátulas ou as cerdas. Em superfícies com poeira ou esfoliantes não são todas as setas que tem a capacidade de manter o contato com a superfície. Deste modo, a lagartixa precisa usar a maior quantidade possível de setas em contato com a superfície.

Grandes forças geradas por perturbações durante a locomoção (por exemplo, ao se recuperar de uma queda, evitar predadores ou para se manter estática em ventos fortes) também requerem uma maior capacidade de aderência das lagartixas.

2.6. O estudo das forças no mecanismo de locomoção das lagartixas

Como foi destacada na seção anterior a incrível habilidade das lagartixas de caminhar em superfícies verticais se deve, principalmente, às estruturas diferenciadas presentes em suas patas que permitem a ação de forças intermoleculares, e conseqüentemente as forças de adesão. Mas não podemos deixar de lado a influência de outras forças que atuam sobre a lagartixa durante seu movimento e são estas que estudaremos nesta seção. Ao analisarmos o movimento de locomoção vertical deste animal, o modelo físico deste deve atender pelo menos três desafios físicos. Primeiro, é que a soma das forças na direção vertical (subida e descida) deve ser igual ao peso de seu corpo para que a velocidade escalar média se mantenha constante. Segundo, é preciso ter um mecanismo eficaz e rápido de fixação. E por fim, o momento de rotação da cabeça da lagartixa quando ela está mais distante da superfície deve ser estabilizada.

A dinâmica do movimento desses animais estudada por um grupo de pesquisadores liderados por Kellar Autumn (2006), do Departamento de Biologia da Lewis e Clark College, em Portland, Estados Unidos, destaca os testes com lagartixas do tipo *Hemidactylus garnotii*. Esses animais têm massa de aproximadamente 2,0 gramas e de 4,6 a 5,8 centímetros de comprimento. O experimento de Autumn e suas conclusões é descrito a seguir.

Para medir as forças que atuam sobre o animal durante a escalada foi utilizada uma montagem experimental como mostra a Figura 2.23, que é composta de uma pista feita de madeira compensada onde foi inserida uma plataforma de força. Foi fixada uma faixa com paredes de acrílico para conter os animais. As lagartixas tinham que caminhar até uma caixa de plástico escurecida situada 20 cm acima da plataforma de força.

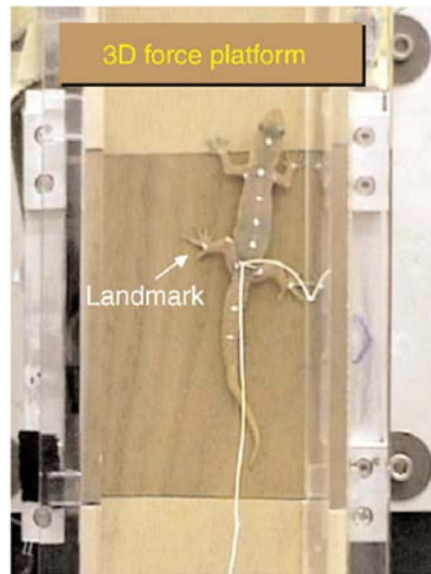


Figura 2.23 – Plataforma utilizada para medir a dinâmica de escalada das lagartixas *Hemidactylus garnotii*. Fonte: Autumn et al. (2006, p.263).

A plataforma de força nada mais é do que um sistema de medição de força ou de impacto através da deformação sofrida por um elemento sensor, cujos dados são enviados e interpretados por um software específico. Ela fornece a força de reação exercida pela superfície de contato durante a fase de apoio do corpo durante o movimento. Na sua maioria, as plataformas têm células de carga ou sensores tridimensionais para medir as três componentes da força; todas as forças captadas pelos sensores são somadas de modo a fornecer o vetor força resultante. A Figura 2.24 ilustra as forças em uma destas plataformas.

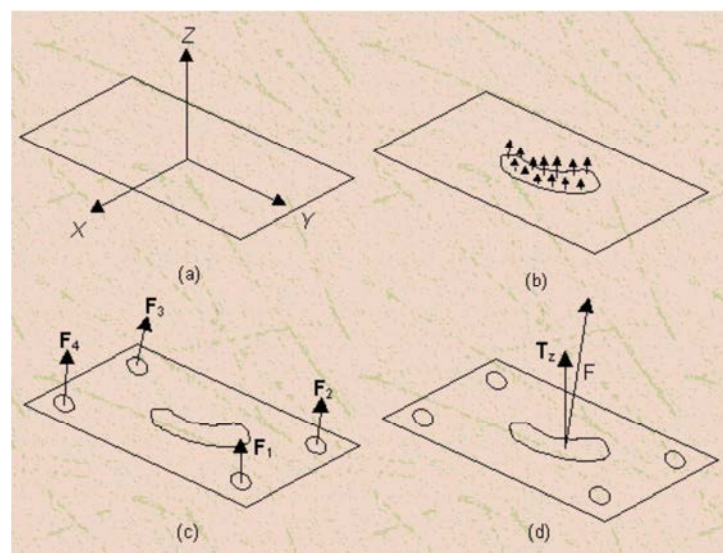


Figura 2.24 – Forças de reação. A força F é o vetor força de reação da superfície e T_z é o torque livre. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/3899/2903>>. Acesso em: 04 out. 2011.

Um total de vinte pontos foram marcados sobre o corpo da lagartixa para servir como pontos de referencia para a digitalização. Oito desses pontos estavam sobre a linha média dorsal

da lagartixa (Figura 2.23). Foram filmados do ponto de vista dorsal e mais outros dois pontos simultaneamente, usando câmeras de vídeo que capturam de 500 a 1000 frames por segundo. Os frames que foram capturados e as coordenadas de várias posições sobre o corpo foram digitalizadas por um computador utilizando um sistema de análise de vídeo.

Durante a realização dos testes, os pesquisadores observaram um modo de caminhar bem peculiar. A lagartixa colocava primeiro, sobre a superfície, o calcanhar de seus pés e em seguida seus dedos hiperestendidos. Logo depois da fixação com a superfície, ela retira os dedos hiperestendidos antes do calcanhar (Figura 2.25).



Figura 2.25 – Uma lagartixa vista através de uma superfície transparente. Ela fixa na superfície primeiro seu calcanhar depois os dedos, ao retirar ela inverte, primeiro os dedos, em seguida o calcanhar. Fonte: Hansen e Autumn (2004, p.386).

Para o estudo da dinâmica do movimento, foram convencionados alguns eixos, como podemos ver na Figura 2.26. O eixo azul corresponde às forças de subida e descida, sendo positivo para cima e negativo para baixo. O vermelho é o eixo das forças normais, que corresponde às forças de reação da superfície sobre a lagartixa. Quando o corpo se aproxima da superfície dizemos que a força normal tende a ser negativa e quando ela se afasta da superfície a força torna-se positiva. Já o eixo verde corresponde às forças laterais, ela será positiva quando o corpo for acelerado para a direita e negativa quando o corpo acelerar para a esquerda.

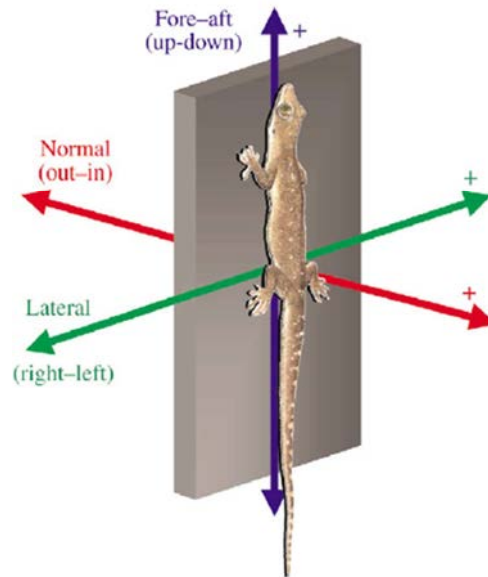


Figura 2.26 – Foram convencionados eixos para o estudo da dinâmica da lagartixa. Fonte: Autumn et al. (2006, p.263).

Observou-se também que as lagartixas utilizam um modo de caminhar conhecido como trote (Figura 2.27A). Elas atingiram velocidades de 0,29 a 0,77 m/s e uma frequência média de passos de $12,5 \pm 2,2$ Hz.

A Figura 2.27B mostra que as forças de subida-descida tiveram dois valores máximos distintos correspondentes a cada par de pernas na diagonal. Entre esses picos de máximo, as forças registraram um valor próximo mas diferente de zero. Portanto, as lagartixas conseguiam manter uma velocidade média vertical constante e positiva, com uma variação menor que 10%, como podemos observar na Figura 2.27C.

Com relação à força lateral, a Figura 2.27B mostra que durante a primeira fase da postura da lagartixa, os valores dessa força foram negativos. Isso ocorreu pois nessa fase a lagartixa curvou seu corpo de maneira que o lado convexo estava à sua esquerda, então seu centro de massa foi acelerado também para esse lado. À medida que ele se endireitou e começou a encurvar seu corpo de modo que o lado convexo ficasse à direita, então seu centro de massa foi acelerado também para a direita, fazendo com que as forças tornassem positivas.

Referente à força normal, a Figura 2.27B mostra que no início da primeira fase de postura de cada par de pernas na diagonal, as forças de reação normal tendem a ser positivas, indicando que a lagartixa estava afastando seu centro de massa da superfície. Logo após essa fase, quando ocorreu a troca do par de pernas durante o passo, as forças tornaram-se negativas, indicando que o animal estava aproximando seu centro de massa da superfície.

Na Figura 2.27D, a energia cinética de subida e descida variou ciclicamente ao longo do passo, diminuindo durante a postura inicial e logo em seguida aumentando, mostrando que a lagartixa estava produzindo forças que a aceleravam. As energias cinéticas normal e lateral juntas contribuíram com menos de 10% do valor da energia cinética total. A energia potencial gravitacional do centro de massa da lagartixa aumentou ao longo do passo.

A energia mecânica total do centro de massa também aumentou ao longo de um passo, e o seu valor médio foi apenas $8,5 \pm 6,9\%$ maior que a variação da energia potencial (Figura 2.27E).

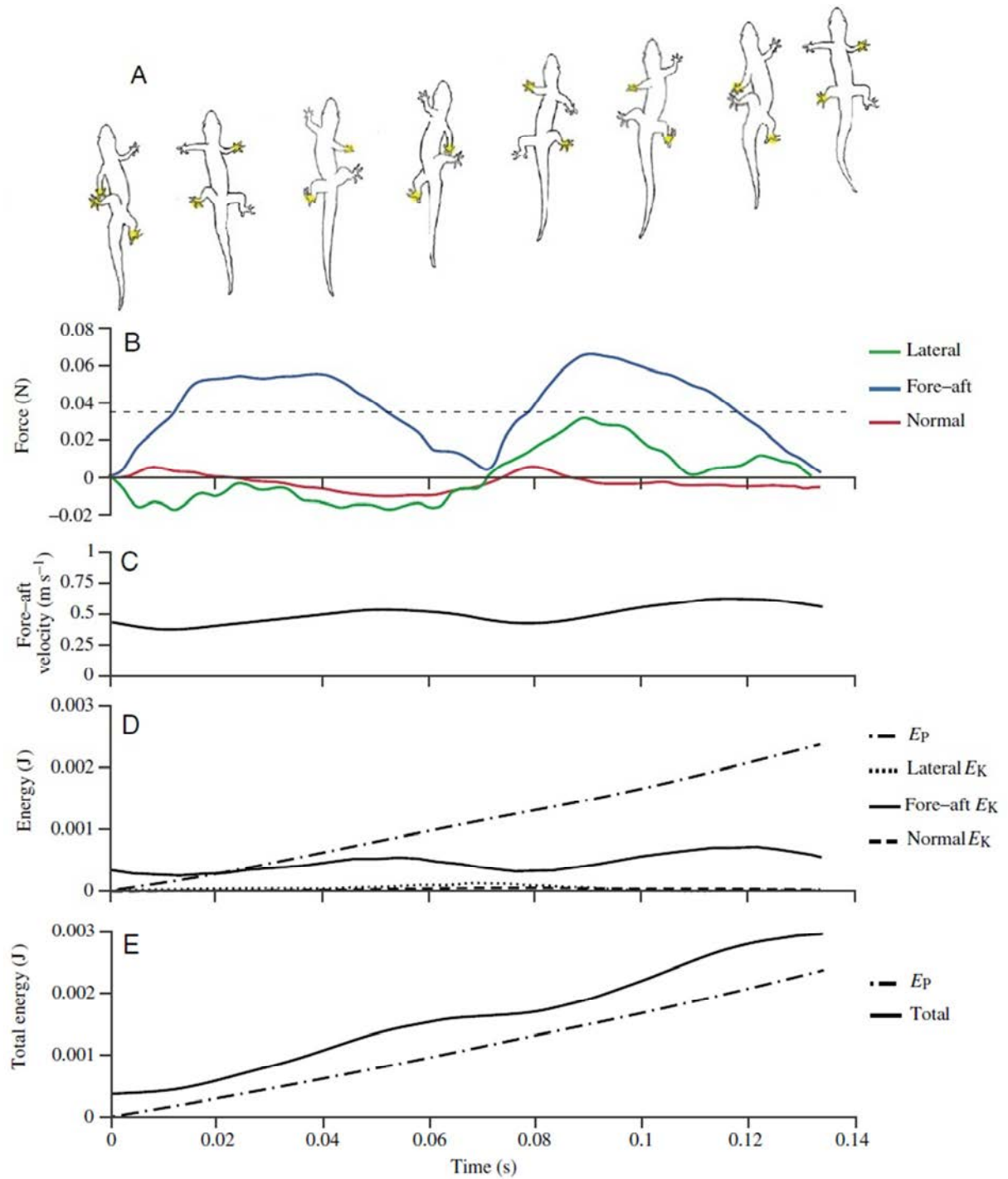


Figura 2.27 – (A) Modo de caminhar utilizado pelas lagartixas conhecido como trote. (B) Gráfico de força em função do tempo. (C) Gráfico de velocidade em função do tempo. (D) Gráfico de energia em função do tempo. (E) Gráfico de energia mecânica total em função do tempo. Fonte: Autumn et al. (2005, p.265).

2.7. Mecanismo intermolecular da adesão das lagartixas

Qual a natureza das forças de adesão utilizadas pelas lagartixas? Alguns tipos de insetos, sapos e até mesmo alguns mamíferos têm mecanismos de lubrificação nas patas de modo que a adesão com a superfície se faz através das forças de adesão de Stefan e da força de capilaridade. Porém, ao contrário desses animais, as lagartixas não possuem glândulas na superfície de seus pés e um mecanismo alternativo são as forças ou interações de Van der Waals.

Estudos feitos por Autumn e Peattie (2002) mostraram que uma grande quantidade dessas interações teria que operar simultaneamente, para que se gerasse uma quantidade significativa de força, ou seja, deve haver uma grande área de contato entre a superfície e o organismo. Então, as setas altamente ramificadas nos dedos da lagartixa têm a função de maximizar a área de contato. Quando isso ocorre, a morfologia das setas tem um efeito maior sobre a força de adesão do que a química envolvida na superfície delas.

A força de atração de Van der Waals é altamente dependente da distância entre as superfícies. Esta força aumenta com a polarizabilidade das duas superfícies, porém não é diretamente proporcional à polaridade da superfície. A observação de que as lagartixas não podem aderir ao politetrafluoroetileno (PTFE) é consistente com a hipótese de Van der Waals, uma vez que o politetrafluoroetileno é fracamente polarizado. A equação a seguir nos dá a força (por área), devido às interações de Van der Waals entre duas superfícies planas.

$$F = \frac{A}{6\pi D^3} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.16)$$

Nesta equação (2.16), A representa a constante de Hamaker, em função do volume e da polarizabilidade das moléculas envolvidas. Para a maioria dos sólidos e líquidos, a constante de Hamaker encontra-se entre $4 \cdot 10^{-20}$ e $4 \cdot 10^{-19}$ J. Um parâmetro muito mais importante é a distância D de separação entre as superfícies, já que a força de adesão é inversamente proporcional com a terceira potência desta distância. Isso mostra que para separações muito pequenas, a força de adesão é mais intensa.

2.7.1. Análise física da força de Van der Waals

Existem três tipos de forças de Van der Waals: orientação, indução e de dispersão. Todas elas contribuem para a força de Van der Waals, mas normalmente a força de dispersão é a mais intensa. Reproduz-se a seguir a análise de cada uma dessas forças segundo Peterman (2006).

2.7.1.1. Força de indução

A força entre uma molécula polar e uma apolar é chamada força de indução. Moléculas polares são capazes de induzir um dipolo em uma molécula apolar. Estas são polarizadas mais facilmente quanto maior for a quantidade de elétrons ao redor do átomo, que é uma característica conhecida como polarizabilidade do elétron (α). Altos valores de α mostram que um pequeno campo elétrico modifica a distribuição de elétrons ao redor do átomo.

Seja o caso onde uma molécula apolar está sujeita a um campo elétrico produzido por um dipolo permanente.

O campo elétrico produzido por um dipolo permanente p_1 é expresso por:

$$\vec{E}_1 = -\nabla\phi_1 \quad (2.17)$$

Onde ϕ_1 é dado por:

$$\phi_1 = \frac{\vec{p}_1 \cdot \vec{r}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} \quad (2.18)$$

Substituindo (2.18) em (2.17), temos:

$$\vec{E}_1 = -\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \nabla \frac{\vec{p}_1 \cdot \vec{r}}{r^3} \quad (2.19)$$

Desenvolvendo matematicamente a equação acima, vem:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= -\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left[(\vec{p}_1 \cdot \vec{r}) \nabla \left(\frac{1}{r^3} \right) + \left(\frac{1}{r^3} \right) \nabla (\vec{p}_1 \cdot \vec{r}) \right] \\ \vec{E}_1 &= -\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left[-3(\vec{p}_1 \cdot \vec{r}) \frac{\vec{r}}{r^5} + \frac{1}{r^3} \vec{p}_1 \right] \\ \vec{E}_1 &= -\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left[\frac{\vec{p}_1}{r^3} - \frac{3(\vec{p}_1 \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} \right] \end{aligned} \quad (2.20)$$

A relação (2.20) também pode ser expressa na forma:

$$\vec{E}_1 = \frac{p_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} (3 \cos \theta \sin \theta, 3 \cos^2 \theta - 1) \quad (2.21)$$

A interação entre uma molécula polar e apolar fornece a energia de Debye.

$$W_{(r,\theta)} = -\frac{1}{2} \alpha E_1^2$$

$$W_{(r,\theta)} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha p_1^2}{(4\pi\epsilon\epsilon_0)^2 r^6} (3 \cos^2 \theta + 1) \quad (2.22)$$

Então:

$$W_{Debye(r)} = \int_0^\pi W_{(r,\theta)} d\theta = -\frac{\alpha p_1^2}{(4\pi\epsilon\epsilon_0)^2 r^6} \quad (2.23)$$

2.7.1.2. Força de orientação

A força de orientação atua entre moléculas polares. Em geral, os dipolos têm orientação aleatória $\langle p \rangle = 0$, mas se aplicarmos um campo elétrico externo, os dipolos se alinham parcialmente $\langle p \rangle \neq 0$.

O problema é semelhante ao caso da força de indução, exceto que os dipolos estão flutuando em torno de uma posição de equilíbrio causado pela temperatura. A distribuição de Boltzmann de uma molécula é dada por:

$$\langle p \rangle = \frac{\int p_0 \cos \theta e^{\frac{p_0 E \cos \theta}{k_B T}} dV}{\int e^{\frac{p_0 E \cos \theta}{k_B T}} dV} \approx \frac{p_0^2}{3k_B T} E \quad (2.24)$$

Onde p_0 é o momento dipolo de uma molécula. Usando a distribuição de Boltzmann e substituindo na equação (2.24) encontramos a energia de Keesom.

$$W_{Keesom(r)} = \frac{p_1^2 p_2^2}{3k_B T (4\pi\epsilon\epsilon_0)^2 r^6} \quad (2.25)$$

2.7.1.3. Força de dispersão

A força de dispersão é a única força que atua entre duas moléculas apolares. Dentro desses átomos, os elétrons se movem desordenadamente e em algum instante um dipolo temporário é criado, sendo assim possível a atração entre essas moléculas.

A energia entre duas moléculas com uma energia de ionização $h\nu_1$ e $h\nu_2$ nos dá a energia de London.

$$W_{London(r)} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{\alpha_{01}\alpha_{02}}{(4\pi\epsilon\epsilon_0)^2} \cdot \frac{h\nu_1\nu_2}{(\nu_1 + \nu_2)r^6} \quad (2.26)$$

A equação acima pode ser simplificada se ambas as moléculas forem iguais.

$$W_{London(r)} = -\frac{3}{4} \frac{\alpha_0^2 h\nu}{(4\pi\epsilon\epsilon_0)^2 r^6} \quad (2.27)$$

Onde ν é a frequência de absorção elétrica e α_0 é a polarizabilidade do elétron.

Como mencionado anteriormente, todas as três forças contribuem para a força de Van der Waals, então:

$$W_{vdW}(r) = W_{Debye}(r) + W_{Keesom}(r) + W_{London}(r) = -\frac{A}{r^6} \quad (2.28)$$

2.7.1.4. Cálculo da força entre a espátula e a superfície

Usando a equação (2.28) e a Figura 2.28, pode-se calcular a energia entre uma molécula a uma distância L da superfície e todas as moléculas presentes na superfície.

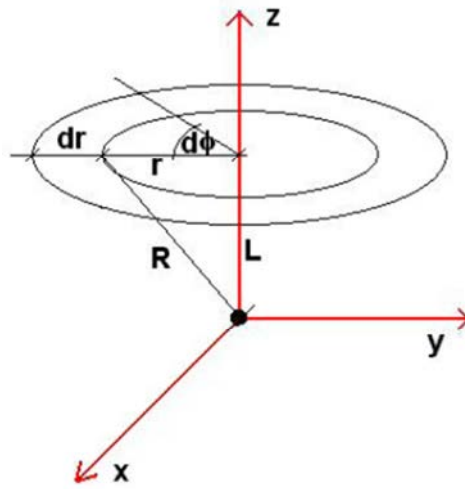


Figura 2.28 – Cálculo da interação entre molécula e superfície. Fonte: Peterman (2006, p.12).

A uma distância R , temos dN moléculas em um volume infinitesimal dV da superfície se acordo com a relação $dN = \rho dV$, onde ρ é a densidade molecular da superfície.

Usando coordenadas polares, temos:

$$W_{vdW(L)} = \int_N W_{vdW(R)} dN = - \int_V \frac{A}{R^6} \rho dV$$

$$W_{vdW(L)} = -A\rho \int_0^{2\pi} d\phi \int_L^\infty dz \int_0^\infty \frac{r}{(r^2 + z^2)^3} dr$$

$$W_{vdW(L)} = -\frac{A\rho\pi}{2} \int_L^\infty \frac{dz}{z^4}$$

$$W_{vdW(L)} = -\frac{A\rho\pi}{6} \frac{1}{L^3} \quad (2.29)$$

Nota-se que a energia de Van der Waals entre uma molécula e a superfície é proporcional a L^{-3} e não a L^{-6} como na relação entre duas moléculas. A partir dessa equação pode-se calcular a força de adesão:

$$F_{vdW} = -\frac{\partial W_{(L)}}{\partial L} = -\frac{A\rho\pi}{2L^4} \quad (2.30)$$

Com esta relação pode-se finalmente calcular a força entre as espátulas de uma lagartixa e a superfície. Para isso, aproxima-se a extremidade da espátula a uma forma esférica (Figura 2.29).

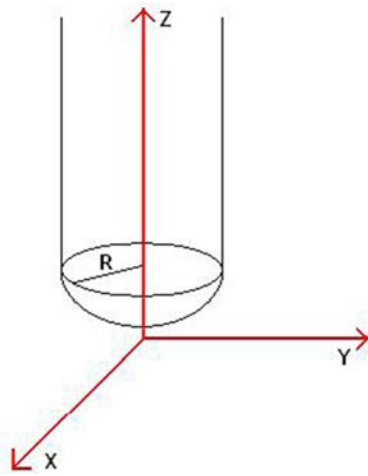


Figura 2.29 – Representação de uma espátula como um longo cilindro com a extremidade esférica. Fonte: Peterman (2006, p.13).

Todas as moléculas da espátula têm energia de acordo com a equação 2.29. O número de moléculas em um volume é dado por $dN = \rho_{\text{espátula}} dV$. Utiliza-se a equação 2.29 para calcular o número de moléculas presentes na extremidade esférica da espátula que contribuem para a energia.

$$\begin{aligned} W_{\text{espátula}(L)} &= \int W_{vdW} dN = \int W_{vdW} \rho_{\text{espátula}} dV \\ W_{\text{espátula}(L)} &= -\frac{A\pi\rho_{\text{superfície}}\rho_{\text{espátula}}}{6} \int \frac{1}{z^3} dV \\ W_{\text{espátula}(L)} &= -\frac{A\pi^2\rho_{\text{superfície}}\rho_{\text{espátula}}}{6} \left[\frac{R}{L} - \frac{1}{2} + \frac{L(L+2R)}{2(L+R)^2} + \ln\left(\frac{L}{L+R}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.31)$$

Se $R \gg L$, neste caso pode-se simplificar a equação (2.31):

$$W_{\text{espátula}(L)} \approx -\frac{A\pi^2\rho_{\text{superfície}}\rho_{\text{espátula}}}{6} \frac{R}{L} \quad (2.32)$$

Finalmente, a força de adesão entre uma espátula e a superfície.

$$F_{\text{espátula-superfície}(L)} = \frac{\partial W_{\text{espátula}(L)}}{\partial L} \approx \frac{A\pi^2 \rho_{\text{superfície}} \rho_{\text{espátula}}}{6} \frac{R}{L^2}$$

$$F_{\text{espátula-superfície}(L)} = \frac{H_{\text{espátula-superfície}} R}{6L^2} \quad (2.33)$$

Onde $H_{\text{espátula-superfície}}$ é uma constante, dependente do material, chamada constante de Hamaker e definida como:

$$H_{\text{espátula-superfície}} = A\pi^2 \rho_{\text{superfície}} \rho_{\text{espátula}} \quad (2.34)$$

Supondo que $H_{\text{espátula-superfície}} = 10^{-19} \text{J}$, $R = 0,5 \mu\text{m}$, $L = 0,3 \text{nm}$ e que uma lagartixa tem aproximadamente 2 milhões de setas e que em cada seta tenha em torno de 500 espátulas. A força de adesão que atua neste caso é:

$$F_{\text{lagartixa-superfície}(L)} = 2 \cdot 10^6 \cdot 500 \cdot F_{\text{espátula-superfície}} = 10^9 \frac{H_{\text{espátula-superfície}} R}{6L^2}$$

$$F_{\text{lagartixa-superfície}(L)} \approx 93 \text{N}$$

Portanto, neste caso, a força de adesão que atua entre as espátulas dos dedos da lagartixa e a superfície tem intensidade de aproximadamente 93N. Se a lagartixa tem massa de 20 gramas, a força peso atuando nela é de aproximadamente 2N, em cada pata a força de adesão é aproximadamente 23,5 N, como ela tem 20 dedos no total, a força de adesão em cada dedo é de 4,7N. Portanto, a força de adesão de um único dedo é suficiente para equilibrar todo o seu corpo e vencer a força peso.

2.8. Cálculo do momento angular da lagartixa

Além das patas com suas setas adesivas, a habilidade locomotora das lagartixas também conta com a contribuição do rabo, que tem papel significativo para prevenir quedas durante a escalada. Observações mostram que ele não é apenas uma estrutura passiva que serve para armazenar gordura, mas também proporciona o equilíbrio nas “acrobacias” que as lagartixas desenvolvem ao escalar as paredes verticalmente, andar no teto ou mesmo caminhar na superfície horizontal. O movimento do rabo em relação ao ponto em que ele está unido ao corpo será analisado a seguir do ponto de vista das leis da Física e do momento angular.

O momento angular de um corpo é uma grandeza física associada à rotação e/ou translação desse corpo. Quando estudamos especificamente um corpo em rotação em torno de seu próprio eixo, relacionamos a distribuição da massa do corpo e a velocidade angular.

O momento angular $\vec{L}$ de uma partícula é definido por:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \quad (2.35)$$

Sabendo que a quantidade de momento linear é expressa pelo produto da massa pela velocidade do corpo $\vec{p} = m.\vec{v}$ e a velocidade é dada por $\vec{v} = r.\vec{\omega}$, a expressão para o momento angular fica:

$$\vec{L} = \vec{r} \times m.\vec{v} = m.r^2.\vec{\omega} \quad (2.36)$$

Como $m.r^2$ é o momento de inércia de uma partícula única, então temos:

$$\vec{L} = I.\vec{\omega} \quad (2.37)$$

Mas a velocidade angular é definida em termos do arco de circunferência descrito pelo ponto material ou partícula, varrendo um ângulo $\Delta\theta$ em um intervalo de tempo Δt , assim $\vec{\omega}$ é expresso por $(\Delta\theta/\Delta t)$, resultando:

$$L = I.\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right) \quad (2.38)$$

Para estudar as acrobacias da lagartixa, vamos analisar este animal em duas partes: o corpo e o rabo. Quando uma lagartixa está em queda livre sem ação de torques externos sobre seu corpo, a soma dos momentos angulares do segmento do corpo L_C e o rabo L_R deve ser igual a zero para que o momento angular total seja conservado. Para um eixo fixado longitudinalmente ao corpo, a rotação ocorre em relação a este eixo, então:

$$L_C + L_R = 0$$

$$I_C.\left(\frac{\Delta\theta_C}{\Delta t}\right) + I_R.\left(\frac{\Delta\theta_R}{\Delta t}\right) = 0 \quad (2.39)$$

Onde I_C e I_R são os momentos de inércia do corpo e do rabo, respectivamente. Para encontrarmos os valores dos momentos de inércia vamos supor que o corpo da lagartixa seja um cilindro e o rabo seja um cone, como mostra a Figura 2.30. Sendo assim, o momento de inércia de um cilindro em relação a um eixo em uma de suas extremidades (ponto de fixação rabo-corpo) é dado por $\frac{1}{3}MR^2$ e o do cone em relação ao eixo central é $\frac{3}{10}MR^2$.



Figura 2.30 – Representação do corpo de uma lagartixa em duas partes: o rabo é representado por um cone e o corpo por um cilindro.

Através da equação (2.39), podemos chegar à razão entre o ângulo de rotação do rabo e o ângulo de rotação do corpo.

$$\left(\frac{\Delta\theta_R}{\Delta\theta_C} \right) = - \left(\frac{I_C}{I_R} \right) \quad (2.40)$$

O *Hemidactylus garnotii* utilizados nos estudos de Kellar Autumn (2006) tinha aproximadamente 2,0g. O rabo representa em torno de 10% a massa total da lagartixa, portanto a massa do rabo (M_R) é de 0,2g e a massa do restante do corpo (M_C) é de 1,8g. Para os nossos cálculos vamos supor que o raio do corpo (R_C) é de aproximadamente 0,5cm e o raio do rabo (R_R), representado por um cone, é de 0,1cm.

Utilizando a equação (2.40), os dados acima e os momentos de inércia, podemos chegar à relação:

$$\left(\frac{\Delta\theta_R}{\Delta\theta_C} \right) = \left(\frac{\frac{1}{3} M_C R_C^2}{\frac{3}{10} M_R R_R^2} \right)$$

$$\left(\frac{\Delta\theta_R}{\Delta\theta_C} \right) = 250$$

Este cálculo indica que a variação do ângulo de rotação é em torno de 250 vezes maior que a do corpo, mostrando o importante papel do rabo em uma possível queda.

2.9. Biomimética

A interessante habilidade que as lagartixas têm de caminhar em superfícies verticais tem inspirado o desenvolvimento de robôs, pequenos veículos escaladores, espaçonaves de vários segmentos e tecnologias em diversas áreas.

2.9.1. Robôs com pés de lagartixa

Como vimos, os dedos dos pés das lagartixas possuem centenas de estruturas que se parecem com finas lâminas. Na extremidade de cada lâmina existem milhões de pequenas estruturas chamadas setas. Cada seta divide-se em diversas ramificações denominadas espátulas. Como estas são estruturas muito pequenas, elas interagem com as moléculas da superfície por onde o animal está andando.

A interação entre as moléculas das estruturas presentes nos dedos do pé da lagartixa e as moléculas das superfícies verticais por onde a lagartixa caminha dá-se por meio de uma atração molecular chamada força de Van der Waals. Essa força é tão significativa que uma lagartixa pode pendurar e suportar todo o seu peso em um único dedo do pé.

Estudando e analisando essa incrível habilidade deste animal, um grupo de pesquisadores americanos liderados por Mark Cutkosky, da Universidade de Stanford, nos Estados Unidos, desenvolveu um robô capaz de subir superfícies de vidros extremamente lisas.

Os resultados foram tão promissores que agora eles pretendem usar a tecnologia para que pessoas possam escalar paredes e até andar pelo teto.

O robô, chamado de Stickybot (Figura 2.31), é capaz de escalar superfícies lisas graças ao material usado nos seus pés, inspirado no desenho intrincado dos dedos das lagartixas.



Figura 2.31 – O robô Stickybot, que reproduz a habilidade das lagartixas, é capaz de subir em paredes lisas. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

Copiou-se o desenho das estruturas das patas desse animal e utilizou-se a mesma técnica da adesão seca, usada pela lagartixa. Deste modo os fios microscópicos, cerca de 100 vezes menor do que um fio de cabelo, presentes nas pontas dos dedos, foram substituídos por material de borracha com fios de polímero feitos em micro-escala.

Mark Cutkosky e seu grupo de pesquisadores pretendem fabricar esses adesivos em escalas maiores, capazes de serem utilizados por seres humanos. Eles também estão estudando para criar um sucessor do Stickybot, uma versão capaz de fazer curvas durante a caminhada.

Essa mesma tecnologia está sendo pesquisada pela equipe do Dr. Metin Sitti, da Universidade Carnegie Mellon, nos Estados Unidos. Eles estão projetando robôs capazes de se locomover em qualquer tipo de terreno. Dr. Sitti acredita que esses robôs com pernas flexíveis e adaptáveis podem explorar locais desconhecidos, como planetas e asteroides.



Figura 2.32 – Protótipo do robô-lagartixa que poderá ir a missões espaciais, onde a pouca gravidade permitirá que eles carreguem todos os equipamentos necessários. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

A grande vantagem da utilização espacial desses robôs é que em ambientes de baixa gravidade os robôs tendem a ser mais ágeis e carregarem toda a carga útil necessária para realizar os experimentos.

Como esses robôs são montados com circuitos pequenos, são menores e mais leves, reduzindo o custo das missões espaciais, onde o peso dos equipamentos a serem levados nas missões é sempre uma limitação.

2.9.2. Adesivos secos

Pesquisadores do Instituto da Geórgia, nos Estados Unidos, utilizando a técnica das lagartixas de subir em paredes, criaram um novo material que é capaz de produzir uma força adesiva anisotrópica, que varia sua direção.

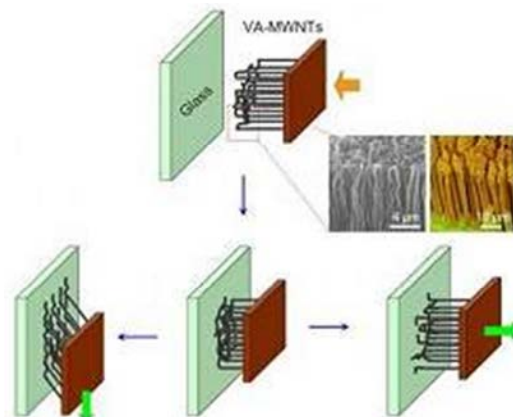


Figura 2.33 - Adesivo feito com nanotubos de carbono que é mais eficiente do que o adesivo natural encontrado nos pés das lagartixas. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br>>. Acesso em: 04 jun. 2011.

O adesivo, que é feito com nanotubos de carbono, possui uma força adesiva dez vezes maior que a força de adesão dos pés das lagartixas. É um material reversível e reutilizável, bastando uma pequena força aplicada numa determinada direção para fazê-lo soltar-se da superfície em que está fixada.

Quando pressionado em superfícies, os nanotubos curvam-se, aumentando a área de contato e, consequentemente, maximizando a ação das forças de Van der Waals. E quando o filme é puxado na direção paralela à superfície (Figura 2.33), somente as pontas ficam em contato minimizando a atração e permitindo que o adesivo se solte. A Figura 2.34 mostra uma imagem, feita por um microscópio de varredura, dos nanotubos.

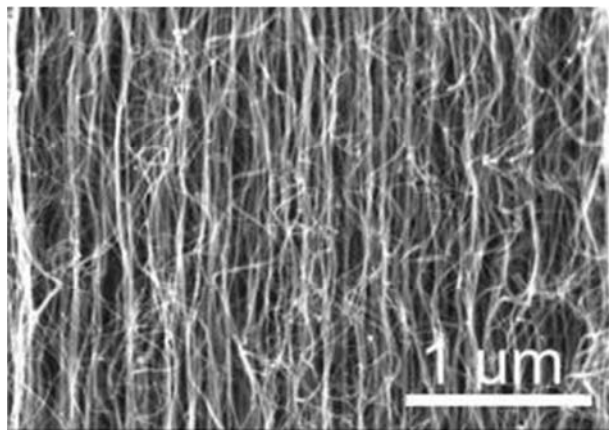


Figura 2.34 – Visão microscópica dos nanotubos de carbono. Disponível em: <<http://www.sciencedaily.com>>. Acesso em: 01 out. 2011.

Microestruturas semelhantes às citadas acima podem ter inúmeras aplicações, que variam do desenvolvimento de fitas aderentes à construção de robôs com pernas. Pesquisadores do MIT (Massachusetts Institute of Technology) criaram um curativo interno que pode ser usado em cirurgias ou ferimentos internos, tendo por base uma microestrutura similar à que torna as patas da lagartixa extremamente aderentes.

2.10. A natureza das lagartixas

As lagartixas pertencem à classe *Reptilia* do filo *Chordata*, encontram-se dentro da ordem *Squamatae* família *Gekkonidae*.

A classe *Reptilia* surgiu sobre a Terra há cerca de 320 milhões de anos no Período Carbonífero. Os répteis foram os primeiros vertebrados a se adaptarem em ambientes de baixa umidade na terra, pois sua pele córnea e seca revestida por escamas ou placas de queratina evita a perda excessiva de umidade do corpo.

Os répteis são vertebrados que conquistaram efetivamente o meio terrestre, pois são de fecundação interna, ovíparos na maioria, vivíparos ou ovovivíparos, e seus ovos apresentam anexos embrionários complexos (âmnion, córion e alantoide), que são estruturas que permitem a independência da água para a reprodução.

Ao contrário das aves e dos mamíferos, que conseguem manter a temperatura corpórea através do calor produzido pelo metabolismo, os répteis necessitam de fontes externas de calor para regularem sua temperatura.

São animais adaptados a morar na água ou na terra, porém todos respiram através de pulmões. O tamanho dos répteis atuais varia de 5 cm a 10 m, mas a maioria mede entre 25 e 150 cm.



Figura 2.35 – *Hemidactylus mabouia*. A lagartixa doméstica tropical. Disponível em: <<http://www.biotabrasil.com.br>>. Acesso em: 03 out. 2011.

A circulação dos répteis é parecida com a dos anfíbios. O coração possui dois átrios e um ventrículo, e com dois tipos de circuitos: circulação sistêmica e pulmonar. Como o coração possui um único ventrículo, ele é parcialmente dividido pelo septo de Sabatier, que torna a mistura de sangue arterial e venoso apenas parcial. A circulação também é dupla e incompleta.

Possuem dentes na boca, com exceção das tartarugas. O tubo digestório é completo e termina na cloaca. Os répteis, assim como todos os animais posteriores a essa classe, apresentam rins metanefros, onde a capacidade de filtrar o sangue é muito melhor que nos rins mesonefros presentes nos anfíbios.

As lagartixas comem pequenos insetos. São muito importantes para o meio ambiente porque, como insetívoros, funcionam como "controladores" de pragas domésticas. Algumas lagartixas da Austrália e da Ásia sobrevivem à hibernação e à falta de comida, usando a gordura armazenada nas suas caudas, que se dilatam como balões.

Na natureza vivem geralmente em árvores. Se sentem perigo, deixam a cauda para trás para enganar o predador. Depois a cauda cresce novamente. Uma espécie de lagartixa, encontrada em Porto Rico, apresenta uma variação interessante: Ela espalha pedaços de pele de todas as partes do corpo, ou mesmo toda sua cobertura externa, e sai em busca de segurança.

Algumas espécies se comunicam entre si através de ruídos, o que não é muito comum entre lagartos e lagartixas.

Uma característica interessante de algumas espécies de lagartixas é o mimetismo que consiste na presença, por parte de determinados organismos denominados mímicos, de características que os confundem com outro grupo de organismos, os modelos. Essa semelhança pode se dar principalmente no padrão de coloração, textura, forma do corpo, comportamento e características químicas, e deve conferir ao mímico uma vantagem adaptativa.

Por mais próximas que estejam do perigo, muitas criaturas simplesmente se mantêm abaixadas e imóveis, sabem por instinto que nada atrai mais a atenção que o movimento. Alguns animais confiam tanto na sua capacidade de "desaparecer" que ficam imóveis em lugares bem expostos.

Os animais de sangue frio que precisam aquecer-se ao sol, até mesmo os que têm coloração e textura elaboradas, podem ser traídos pela claridade da sombra que projetam.

A lagartixa de rabo de folha de Madagascar (Figura 2.36) tem dobras irregulares na pele dos flancos e das pernas que modificam seu contorno e o contorno da sua sombra. Com essa característica e com sua incrível imitação da cor e textura dos galhos onde toma sol, essa lagartixa sente-se confiante em aquecer-se sem se esconder. Esta espécie foi descoberta em Andasibe-Mantadia National Park em Madagascar.



Figura 2.36 – Lagartixa rabo de folha de Madagascar. Disponível em: <<http://www.mundogump.com.br/>>. Acesso em: 11 mai. 2011.

3. A FÍSICA DO CAMINHAR DE ARTRÓPODES E INSETOS SOBRE A ÁGUA

3.1. Fluidos

O ar que respiramos, a água que flui nos rios e mares, a gasolina que abastece nossos veículos, o óleo usado na cozinha são todos exemplos de fluidos, assim como tantas outras substâncias com características de líquido ou de gás.

Líquidos livres escoam horizontalmente enquanto aqueles contidos em recipientes escoam verticalmente para a região inferior do recipiente. Os gases, por sua vez, se expandem até preencherem totalmente o espaço que os contém. A compreensão do comportamento dos fluidos significa a compreensão de diversos fenômenos e interações presentes no mundo.

Neste capítulo estudaremos o comportamento dos fluidos para melhor entendermos um fenômeno bastante interessante encontrado na natureza: como alguns tipos de insetos e aranhas conseguem caminhar sobre a água?

3.1.1. Massa específica

Uma das grandezas físicas importantes associadas aos fluidos é a massa específica, a qual determina grande parte de seu comportamento. Ela é definida como a razão entre a massa de um corpo sobre seu volume e é representada pela letra grega ρ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

A unidade de massa específica, no Sistema Internacional, é o quilograma por metro cúbico (kg/m^3).

A distância média entre moléculas em um gás é grande se comparado ao tamanho de uma molécula, ou seja, as moléculas têm baixa influência umas sobre as outras, exceto quando há breves colisões entre elas. Devido a esse grande espaçamento entre as moléculas os gases possuem massas específicas menores que os líquidos. Nos líquidos, as moléculas estão mais próximas e conseqüentemente têm maiores massas específicas.

Medidas precisas da massa específica devem levar em conta a temperatura e a pressão, porque na maior parte das substâncias ela varia com estas grandezas.

Quando a massa específica de um sólido é maior que a da água, por exemplo, ele afunda, e quando é menor, ele flutua. A razão entre a massa específica de uma substância e a de uma substância tomada como referência, geralmente a água, é chamada de densidade.

Volumes iguais de substâncias diferentes geralmente possuem massas diferentes, fazendo com que a massa específica dependa da natureza do material, como podemos ver na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 - Massas específicas de algumas substâncias.

Substância	Massa Específica ρ (kg/m ³)
Sólidos	
Alumínio	2 700
Chumbo	11 300
Cobre	8 890
Concreto	2 200
Diamante	3 520
Ferro (aço)	7 860
Gelo	917
Latão	8 470
Madeira (pinho amarelo)	550
Ouro	19 300
Prata	10 500
Quartzo	2 660
Líquidos	
Água (4 °C)	$1,000 \times 10^3$
Álcool etílico	806
Mercurio	13 600
Óleo (hidráulico)	800
Sangue (total, 37 °C)	1 060
Gases	
A	1,29
CO ₂ (dióxido de carbono)	1,984
Hélio	0,179
Hidrogênio	0,0899
Nitrogênio	1,25
Oxigênio	1,43

Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.328).

3.1.2. Pressão

Quando um fluido está em contato com alguma superfície sólida, ele exerce sobre ela uma força perpendicular F em cada ponto desta superfície. Essa força por unidade de área A é denominada pressão, representada por P e dada por:

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

A unidade de pressão, no SI, é o newton por metro quadrado (N/m²), também chamado de pascal (Pa), em homenagem ao físico, matemático e filósofo francês Blaise Pascal (1623-1662).

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$$

3.1.2.1. Pressão no interior de um líquido

A pressão exercida por um líquido sobre um recipiente que o contém é tanto maior quanto maior for a profundidade, como podemos ver nas setas indicativas na figura 3.1.

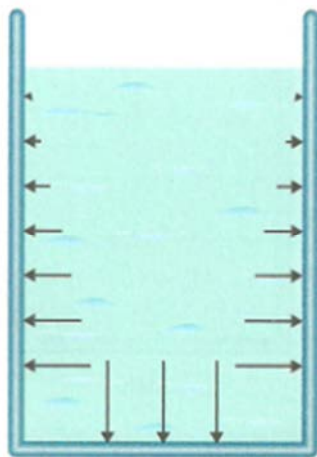


Figura 3.1 – A pressão no interior do líquido é tanto maior quanto maior for a profundidade. Fonte: Gaspar (2008, p.195).

Essa variação na pressão no interior de um líquido é explicada pela Lei de Stevin, que diz que a diferença de pressão (ΔP) entre dois pontos é uma função da diferença de altura (Δh) entre esses pontos no interior do líquido, da densidade (ρ) e da aceleração gravitacional (g).

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.3)$$

Onde $\Delta P = P_B - P_A$, e é diretamente proporcional ao desnível vertical entre os dois pontos (Figura 3.2).

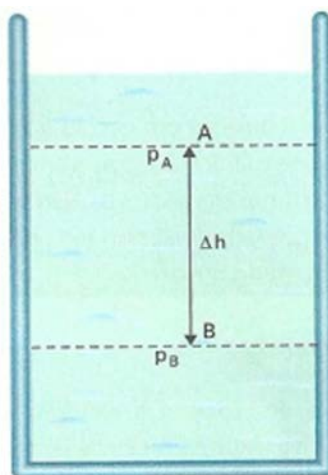


Figura 3.2 – A diferença de pressão entre os pontos A e B é diretamente proporcional ao desnível entre esses dois pontos. Fonte: Gaspar (2008, p.196).

Em alguns casos, além da pressão exercida pelo próprio líquido, também devemos levar em consideração a pressão exercida pela atmosfera sobre a superfície livre do líquido, chamada de pressão atmosférica. A ação da pressão atmosférica sobre a superfície do líquido influi na pressão interna deste, o que pode ser calculado pela Lei de Stevin. Para isso vamos levar em consideração dois pontos, um na superfície sujeita à pressão atmosférica (P_0) e outro em um ponto arbitrário (P) no interior do líquido a certa altura (h) da superfície.

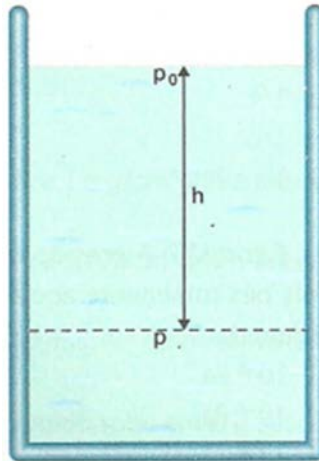


Figura 3.3 – A ação da pressão atmosférica sobre a superfície livre do líquido influi em sua pressão interna. Fonte: Gaspar (2008, p.197).

Sendo $\Delta P = P - P_0$ a diferença de pressão entre os dois pontos e $\Delta h = h$, podemos dizer que a pressão total no interior do líquido pode ser expressa por:

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h \quad (3.4)$$

3.2. Propriedades dos líquidos

Os líquidos possuem importantes propriedades, que podem ser explicadas a partir da ação das forças intermoleculares, como as forças de Van der Waals.

3.2.1. Viscosidade

Algumas substâncias líquidas como o óleo de motor fluem com dificuldade e lentamente, já outros líquidos como a água e o álcool escoam facilmente, o que se deve à resistência de cada um deles para fluir. Essa resistência dos líquidos é chamada de viscosidade. Quanto mais viscoso for o líquido mais lentamente ele fluirá. A unidade comum de viscosidade é o *poise*.

A seguir temos uma tabela com valores da viscosidade de algumas substâncias.

Tabela 3.2- Valores de viscosidade para alguns líquidos para uma temperatura de 20°C.

	viscosidade (Pa·s)
álcool etílico	$0,248 \times 10^{-3}$
acetona	$0,326 \times 10^{-3}$
metanol	$0,597 \times 10^{-3}$
álcool propílico	$2,256 \times 10^{-3}$
benzeno	$0,64 \times 10^{-3}$
água	$1,0030 \times 10^{-3}$
nitrobenzeno	$2,0 \times 10^{-3}$
mercúrio	$17,0 \times 10^{-3}$
ácido sulfúrico	30×10^{-3}
óleo de oliva	81×10^{-3}
óleo de rícino	0,985
glicerol	1,485
polímero derretido	10^3
piche	10^7
vidro	10^{40}
Sangue	4×10^{-3}

Fonte: Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Viscosidade>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

A viscosidade tem relação com a facilidade de todas as moléculas se movimentarem em relação às outras, consequentemente, ela depende da força de atração entre essas moléculas e a estrutura delas. Por isso, para muitos compostos, a viscosidade aumenta com a massa molecular. Em alguns casos, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. A temperaturas mais altas, quanto maior a energia cinética das moléculas, maior facilidade de vencer as forças de atração entre elas.

3.2.2. Tensão superficial

Quando há contato entre duas substâncias, sendo elas sólido, líquido ou gasoso, surgem as chamadas propriedades de superfície. Essas propriedades aparecem devido à assimetria das forças entre as moléculas dos dois meios na superfície. Estudaremos aqui uma propriedade de superfície que existe quando há contato entre líquido e gás.

Na figura 3.4, temos um recipiente aberto que contém um líquido. No interior do líquido há uma enorme quantidade de moléculas, cada uma cercada por muitas outras que se atraem mutuamente e em todas as direções, e quando em repouso a força resultante sobre cada molécula é nula. Isso não ocorre da mesma forma na superfície deste líquido, a força resultante que atua em cada molécula tem direção para o interior do líquido, consequentemente a força resultante não é nula, e é essa força que as mantém as moléculas ligadas à superfície.

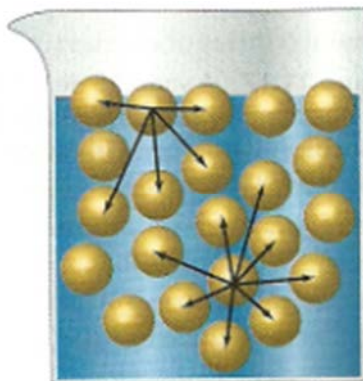


Figura 3.4 – Visão no nível molecular faz forças intermoleculares agindo sobre cada molécula na superfície e no interior do líquido. Fonte: Brown, Lemay e Bursten (2005, p.385).

Define-se uma energia potencial de superfície que é proporcional à sua área e essa energia por unidade de área é chamada de tensão superficial (γ). Então, para que a energia potencial da superfície seja mínima é necessário que haja uma redução da área superficial do líquido. A forma que apresenta a menor área é a esférica, assim os líquidos tendem a assumir, quando livres, a forma de uma esfera (Fig. 3.5).

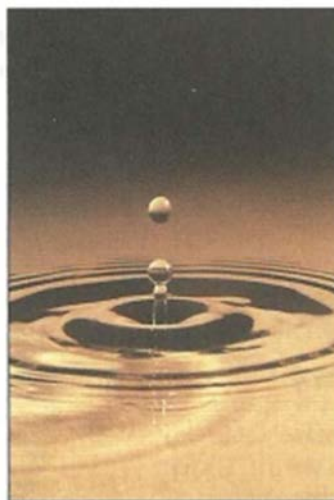


Figura 3.5 – O impacto produzido por uma gota d'água que cai sobre um líquido forma uma coluna chamada de jato de Rayleigh. A tensão superficial puxa o topo do jato formando uma gota esférica. Fonte: Kotz, Treichel e Weaver (2009, p.540).

Para cada substância há um valor constante da tensão superficial a uma dada temperatura e em geral, ela diminui com o aumento da temperatura. Isso acontece porque a temperatura está relacionada com a energia do movimento das moléculas presentes em certa substância. Quando aumentamos a temperatura, as colisões entre as moléculas também aumentam, consequentemente a força de interação entre elas diminui assim como a tensão superficial. A superfície do líquido se comporta então como uma membrana submetida a uma tensão.

Para aumentar a superfície de um líquido é preciso que algumas moléculas do interior do seu volume sejam levadas para a superfície. Isso só ocorrerá se houver um aumento da energia potencial devido ao aumento da área. A figura 3.6 mostra uma maneira de fazer medidas

quantitativas da tensão superficial. Um quadro de arame fixo em forma de U e um arame deslizante de comprimento L são mergulhados em uma solução de água e sabão, formando uma fina película na parte interna desse quadro.

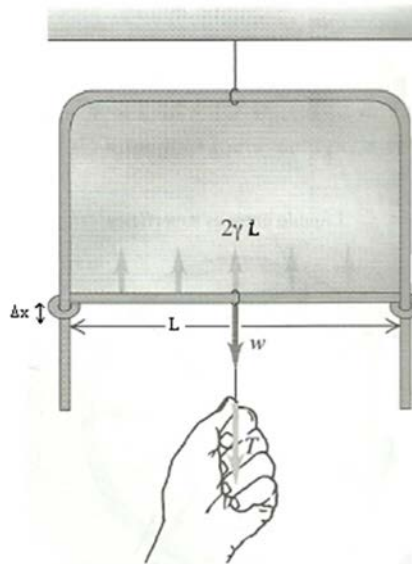


Figura 3.6 – Medida da tensão superficial de uma película com água e sabão, que está indicada pela região sombreada. Fonte: Young e Freedman (2003, p.77).

O trabalho W realizado pela força F , que é perpendicular ao arame deslizante, para esticar a película de um comprimento Δx é:

$$W = F \cdot \Delta x \quad (3.5)$$

O trabalho realizado por unidade de área é dado por:

$$\frac{W}{A} = \frac{F \cdot \Delta x}{2 \cdot (L \cdot \Delta x)} \quad (3.6)$$

Onde $(L \cdot \Delta x)$ é o aumento na área e o fator 2 corresponde às duas faces da película dentro do quadro de arame. A razão entre o trabalho e a área de aumento nos fornece a tensão superficial (γ). Então, para uma película de face dupla temos a relação:

$$\gamma = \frac{F}{2 \cdot L} \quad (3.7)$$

Consequentemente, para uma película de única face teremos a relação:

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad (3.8)$$

Dessa forma, podemos observar que a tensão superficial exprime a força por unidade de comprimento que é necessária para manter o perímetro da superfície fechada. Essa força age perpendicularmente ao perímetro e tangencialmente à superfície do líquido.

A tabela 3.3 mostra alguns valores típicos de tensão superficial, que dependem da natureza das substâncias em contato e da temperatura.

Tabela 3.3 – Alguns valores de tensão superficial

LÍQUIDO EM CONTATO COM O AR	TEMPERATURA (°C)	TENSÃO SUPERFICIAL (mN/m ou dyn/cm)
Benzeno	20	28,9
Tetracloreto de carbono	20	26,8
Álcool etílico	20	22,3
Glicerina	20	63,1
Mercurio	20	465,0
Óleo de oliva	20	32,0
Solução de sabão	20	25,0
Água	0	75,6
Água	20	72,8
Água	60	66,2
Água	100	58,9
Oxigênio	-193	15,7
Neônio	-247	5,15
Hélio	-269	0,12

Fonte: Young e Freedman (2003, p.78).

A tensão superficial permite, por exemplo, que uma agulha seja colocada com cuidado sobre a superfície da água sem que ela afunde e também que alguns tipos de insetos “caminhem” sobre a água. Este último é o assunto muito intrigante e interessante que estudaremos mais a frente neste capítulo.

3.2.3. Capilaridade

Ao colocarmos ou retirarmos um tubo de vidro de diâmetro muito estreito de dentro de algum líquido, este líquido tende a subir ou descer pelo tubo. Podemos perceber que o líquido se encurva para cima ou para baixo nas vizinhanças da interface do tubo de vidro. A essa superfície curva da superfície dá-se o nome de menisco. Neste processo, forma-se um ângulo θ entre o líquido e a parede do tubo chamado de ângulo de contato.

Quando as moléculas de um líquido são atraídas entre si dizemos que está atuando sobre elas uma força de coesão. Na atração entre as moléculas e o sólido, no caso o tubo de vidro, está agindo uma força que chamamos de força de adesão. Se as forças de adesão forem maiores que as forças de coesão, dizemos que o líquido adere na superfície do vidro, portanto a interface forma um menisco côncavo e θ é menor que 90° . Agora, se as forças de coesão forem maiores que as de adesão, como no caso do mercúrio o ângulo θ é maior que 90° e forma-se um menisco convexo. Podemos observar esse efeito na figura 3.7.

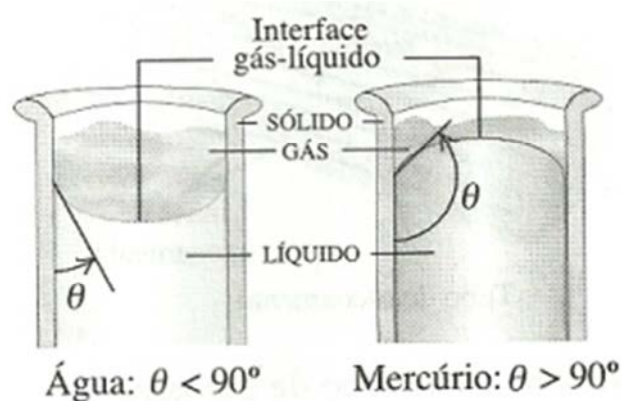


Figura 3.7 – A interface de um gás-líquido quando entra em contato com uma superfície sólida, a interface pode se encurvar para cima ou para baixo. Fonte: Young e Freedman (2003, p.79).

Esse comportamento do líquido de subir ou descer num tubo capilar tem grande relação com a tensão superficial e é denominado capilaridade. A altura alcançada depende das características do líquido, do tubo e do raio do tubo capilar. O líquido sobe até que as forças de adesão e coesão sejam equilibradas pela força gravitacional que nele atua. A presença da capilaridade na natureza pode ser vista, por exemplo, no movimento ascendente de água e nutrientes nas árvores.

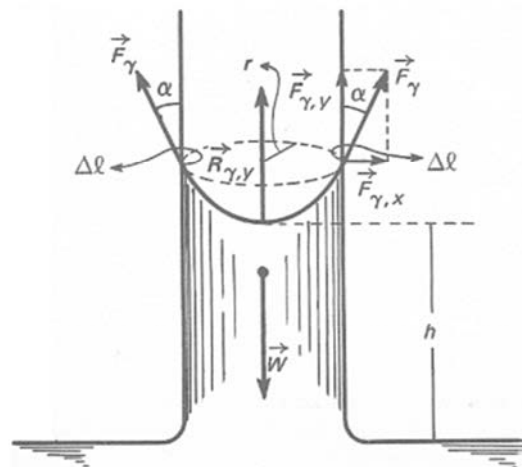


Figura 3.8 – Um líquido no interior de um tubo capilar atinge certa altura, quando a força da tensão superficial do líquido equilibra o peso W da coluna de líquido. Fonte: Okuno, Caldas e Chow (1982, p.331).

Considere um líquido de densidade ρ que subiu até uma altura h , e sua coluna tal como mostra a Figura 3.8. Se o líquido estiver em equilíbrio, a força da tensão superficial deve contrabalancear o peso da coluna do líquido. A força resultante devido à tensão superficial agindo sobre toda a superfície de contato é:

$$R_{\gamma} = 2\pi r \gamma \quad (3.9)$$

Onde r é o raio do tubo capilar e γ é a tensão superficial do líquido. Como as contribuições horizontais diametralmente opostas se anulam, a componente $R_{\gamma,x}$ é nula. A componente vertical é expressa por:

$$R_{\gamma,y} = 2\pi r \gamma \cos \alpha \quad (3.10)$$

O peso da coluna de líquido é:

$$\begin{aligned} W &= mg \\ W &= \rho \pi r^2 h g \end{aligned} \quad (3.11)$$

Quando as forças se equilibram temos:

$$\begin{aligned} R_{\gamma} &= W \\ 2\pi r \gamma \cos \alpha &= \rho \pi r^2 h g \\ 2\gamma \cos \alpha &= \rho r h g \end{aligned} \quad (3.12)$$

Portanto a altura alcançada pelo líquido dentro do tubo capilar é:

$$h = \frac{2\gamma \cos \alpha}{r \rho g} \quad (3.13)$$

Quando o ângulo α é muito pequeno, a equação (3.13) se reduz a:

$$h = \frac{2\gamma}{r \rho g} \quad (3.14)$$

A altura h varia de líquido para líquido, dependendo da tensão superficial, do raio do tubo capilar e da densidade.

3.3. Princípio de Arquimedes: Empuxo

Quando mergulhamos um corpo denso na água, percebemos que seu peso aparente quando mergulhado é menor que o peso real do corpo. Isso acontece porque a água exerce uma força para cima equilibrando parcialmente a força gravitacional. Essa força é mais evidente se mergulharmos um corpo menos denso na água. Quando o corpo estiver completamente imerso, nele atuará uma força para cima maior que a força gravitacional, de modo que ao soltarmos o corpo, ele acelera em direção à superfície. A força que um fluido exerce sobre um corpo total ou parcialmente imerso nele é denominada força de empuxo.

Na Figura 3.9, um pequeno cilindro de altura h está dentro de um líquido. Na face superior a coluna de líquido acima dela exerce uma pressão P_1 que gera uma força F_1 para baixo. Assim como a pressão P_2 gera uma força F_2 para cima na face inferior do cilindro. Ambas as faces do cilindro tem área A . A figura abaixo mostra ainda a localização do sistema de referência em relação ao qual as discussões abaixo serão elaboradas.

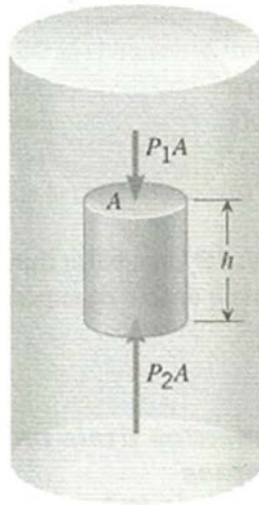


Figura 3.9 – Em um corpo cilíndrico de altura h submerso em um líquido atuam duas forças, uma na parte superior e outra na parte inferior do cilindro. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.337)

Como a pressão é maior em profundidades maiores, a força F_2 é maior que a força F_1 . Portanto, o líquido aplica sobre o cilindro uma força resultante para cima, também chamada de força de empuxo (E). Para determinarmos a relação que nos fornece a força de empuxo, temos que:

$$E = F_2 - F_1 \quad (3.15)$$

Sabendo que a força devido à pressão do líquido é dada pelo produto $P.A$, onde P é a pressão e A é a área da face do cilindro, substituímos na equação (3.15).

$$\begin{aligned} E &= P_2 A_2 - P_1 A_1 \\ E &= (P_2 - P_1) A \end{aligned} \quad (3.16)$$

Pela Lei de Stevin temos que $\Delta P = \rho gh$, substituindo esta relação na equação (3.16), temos:

$$E = \rho ghA \quad (3.17)$$

A grandeza hA é o volume de líquido que um corpo, neste caso o cilindro, desloca ao ser submerso. Finalmente chegamos à relação de empuxo:

$$E = \rho gV \quad (3.18)$$

Onde ρ é a densidade do líquido e não do material do corpo submerso.

A forma do corpo submerso não é importante. Independente de sua forma, a força de empuxo empurra o corpo para cima de acordo com o princípio de Arquimedes.

O princípio de Arquimedes afirma que um corpo total ou parcialmente submerso em um fluido sofre um empuxo de baixo para cima de módulo igual ao peso do fluido (P_f) por ele deslocado:

$$E = P_f \quad (3.19)$$

O efeito da força de empuxo depende de seu módulo em relação às outras forças que também estão atuando sobre um corpo. Na Figura 3.10, um corpo pesando 100 N está submerso parcialmente e, portanto desloca uma pequena quantidade de líquido. Este aplica uma força de empuxo E ao corpo. Enquanto o objeto é segurado pela mão, há equilíbrio entre a força peso, a tração da mão e o empuxo. Imediatamente quando soltamos o corpo, ele começa a afundar no líquido, pois a força de empuxo não possui módulo grande o suficiente para equilibrar o peso do bloco.

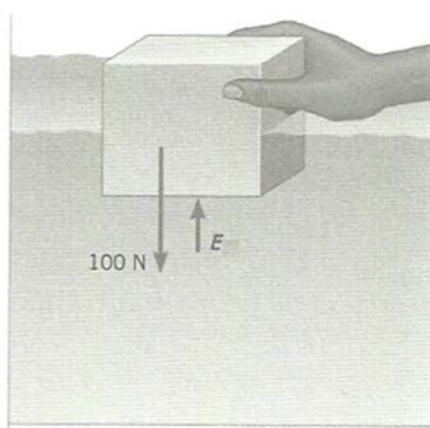


Figura 3.10 – Um corpo de peso 100 N está sendo imerso em um líquido. Neste caso a força de empuxo E é menor que o peso do corpo. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.338).

Depois de certo tempo, a maior parte do bloco está submersa. O empuxo e o peso estão equilibrados, fazendo com que ele flutue. Se a força de empuxo não fosse grande o suficiente para equilibrar o peso do corpo totalmente submerso, quando solto o corpo afundaria. Esta situação é mostrada na Figura 3.11.

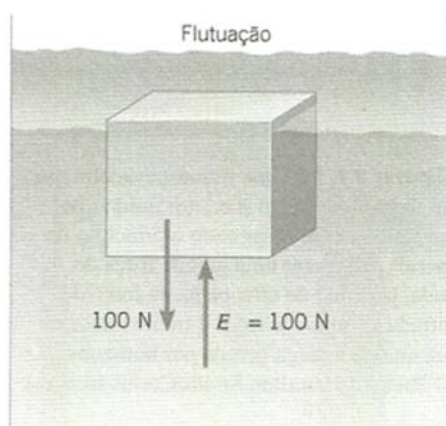


Figura 3.11 – A força de empuxo é suficiente para equilibrar o peso do corpo, portanto o objeto flutua. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.338).

3.4. Locomoção sobre a água: a influência da tensão superficial

Há 100 milhões de anos, insetos terrestres começaram a colonizar a superfície da água. Hoje, aproximadamente 1.200 espécies de insetos e 300 espécies de aranhas, variando em comprimento de 0,1 a 30 centímetros, habitam a superfície de rios, lagos e oceanos ao redor do mundo. Isso só é possível pela capacidade desses insetos de caminharem sobre a superfície da água, capacidade esta que se baseia tanto na estrutura de revestimento de seus corpos como nas leis físicas envolvidas nesse fenômeno.

Um dos fatores que permite às aranhas caminharem sobre a água é a presença de pernas cobertas por uma grande quantidade de pelos que tem a textura de um veludo muito fino, tornando-as hidrofóbicas. As pernas dessas aranhas têm duas camadas de pelos distintos como mostra a Figura 3.12, uma camada é aquela que repele a água representada por pelos mais longos. Já os pelos mais curtos, chamados de plastrão, servem para manter uma camada de ar quando a aranha está submersa.

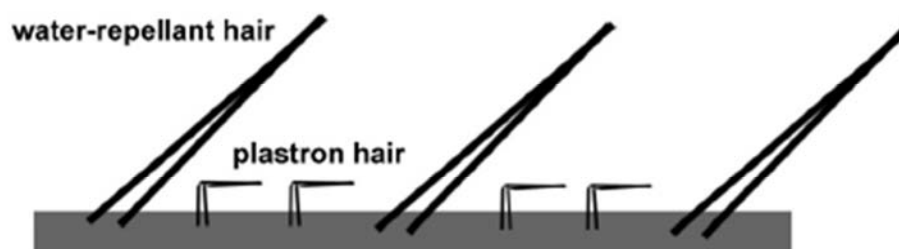


Figura 3.12 – Existem duas camadas de pelos nas pernas da aranha. Uma delas, a mais longa, dá a característica hidrofóbica. Já os pelos mais curtos (plastrão) servem para manter a camada de ar quando a aranha está submersa. Fonte: Hu (2006, p.33).

A geometria da camada de pelos é semelhante para a maioria das aranhas e insetos que caminham sobre a água, mas a densidade varia. Para as espécies mais rápidas, a densidade de pelos é maior. A densidade também varia entre as pernas. Em uma aranha, a densidade de pelos nas pernas dianteiras é de aproximadamente 4.000 a 6.000 pelos por mm^2 , nas pernas medianas varia entre 12.000 a 16.000 por mm^2 e nas pernas traseiras a densidade varia de 8.000 a 10.000 pelos por mm^2 . Note que a densidade nas pernas do meio é maior, pois são elas que sustentam pressões mais elevadas.

Quanto à locomoção dois fatos são igualmente interessantes:

- A mesma hidrofobicidade que permite que o peso do animal seja suportado pela tensão superficial da água também torna seu estilo terrestre de caminhar muito difícil sobre a água. A fraca interação entre as moléculas de cera dos pelos das patas e as moléculas da água reduz o atrito a uma pequena fração do valor que ele tem quando o animal caminha em substrato sólido.
- O peso do animal, quando suportado pela tensão superficial, empurra os pontos de contato para baixo, criando covas ou ondulações na superfície da água (Figura 3.13). Quando as patas se movem para trás para deslocar seu corpo para frente, as patas e as covas se deslocam junto para trás. Assim, considera-se o conjunto pata-cova na interação com o meio fluido.

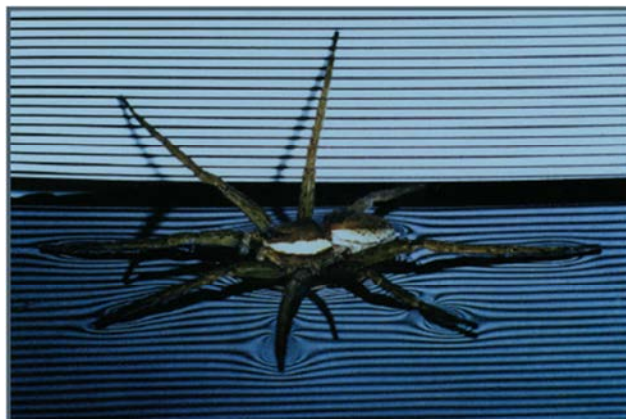


Figura 3.13 – Nesta imagem, uma fêmea da espécie *Dolomedes triton* caminha sobre a água e cria ondulações sobre a superfície. Fonte: Suter et al. (1997, p.2524).

Robert Suter (1997) e seu grupo fizeram um estudo sobre esse tipo de locomoção utilizando aranhas fêmeas da espécie *Dolomedes triton* que possui uma massa corporal de aproximadamente 1,2 g e um comprimento de perna de 5,0 cm.

De acordo com esses pesquisadores, quando a aranha se move com velocidade constante sobre a superfície da água, ela gera um tipo de onda que oferece resistência ao seu movimento. Essa resistência sobre a perna pode resultar da formação de uma onda chamada de onda de proa, onde a superfície da água tende a achatar devido a gravidade e a capilaridade (Figura 3.14a). As fontes hipotéticas dessa resistência às patas são mostradas na Figura 3.14 como: ondas de proa, arrasto e tensão superficial. O arrasto contra essas ondas proporciona o rendimento necessário para que o animal caminhe através delas. A eficácia deste método depende da habilidade do animal em mover suas patas e gerar ondas, e esta estabilidade depende da velocidade das patas.

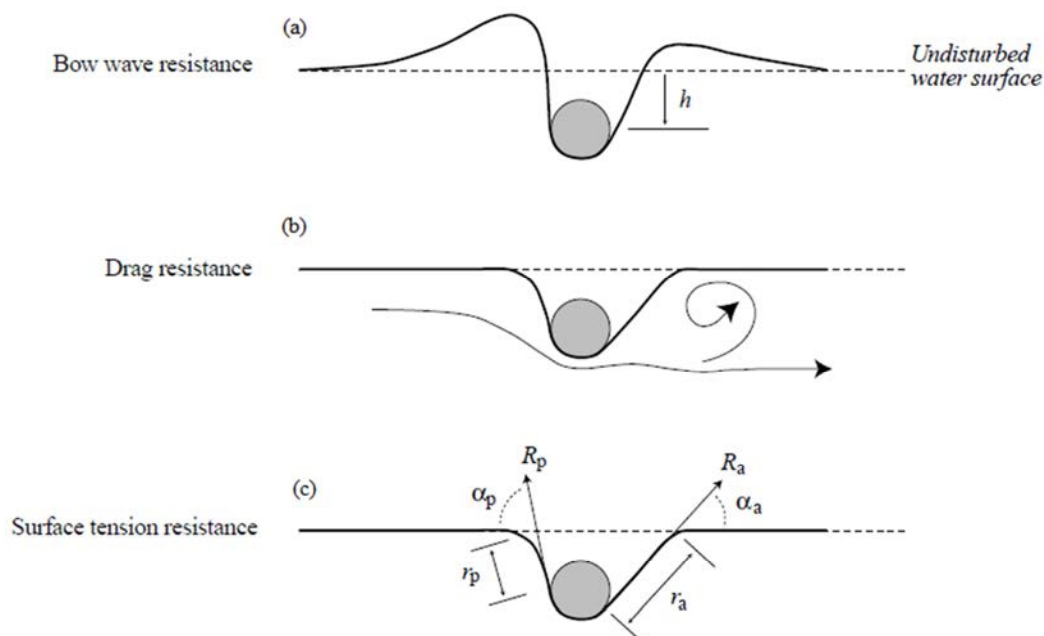


Figura 3.14 – O círculo representa a extremidade da perna da aranha (a) Formação da onda de proa devido o contato da perna com a superfície. (b) Força de resistência, ou força de arraste, causada pela diferença de pressão e pela viscosidade. (c) Mostra a resistência da tensão superficial. Fonte: Suter et al. (1997, p.2525).

Há uma velocidade mínima ($U_{\min}$) de locomoção para que haja produção de ondas. Ela depende da tensão superficial (γ), da aceleração gravitacional (g) e da densidade do líquido (ρ), tendo sido discutido por Denny (1993), como:

$$U_{\min} = \sqrt{2\sqrt{\frac{g\gamma}{\rho}}} \quad (3.20)$$

Se γ for $0,0728 \text{ J/m}^2$, que é o valor da tensão superficial da água pura a 20°C , e sendo a densidade da água a 20°C for 998 kg/m^3 , então o valor de $U_{\min}$ é $0,23 \text{ m/s}$. Para velocidades acima de $0,23 \text{ m/s}$, as ondas teoricamente devem aparecer e as ondas de proa devem equilibrar a pressão horizontal entre a perna e a superfície.

A partir da equação de Bernoulli, Denny estima que a força horizontal de resistência (F_w) causada pela onda de proa pode ser expressa pela razão entre a pressão total do fluido sobre a perna da aranha e a área da superfície frontal (S_f), superfície essa onde a força propulsora é aplicada, portanto:

$$F_w = \frac{1}{S_f} \left(\frac{\rho U^2}{2} + \frac{2\pi^2 h \gamma}{\lambda^2} \right) \quad (3.21)$$

Onde h é a altura da onda (Figura 3.14a), U é a velocidade do fluido e λ é o comprimento de onda, que é o dobro do comprimento da ondulação, assumindo que a onda é uma onda senoidal. Esta equação mostra que a força de resistência à propulsão aumenta quando aumenta a velocidade com que o inseto se move e com o aumento da tensão superficial.

Independente da existência de ondas de proa, a perna do inseto experimenta uma força resistiva F_d devido à diferença de pressão no fluido e pela viscosidade. Ela é proporcional à U^2 , S_f e a um coeficiente de arrasto C_{df} , que é um fator adimensional e varia de acordo com o número de Reynolds (R_e).

$$F_d = 0,5\rho.S_f.C_{df}.U^2 \quad (3.22)$$

Note que F_w e F_d são diretamente proporcionais à velocidade U^2 , mas F_w é inversamente e F_d diretamente proporcional à S_f . Com relação ao número de Reynolds, as pernas das aranhas operam em uma faixa de 10 a 10.000, na qual o C_{df} varia de acordo com esse número.

A tensão superficial fornece grande parte da resistência vertical para segurar a aranha parada sobre a água, mas também pode fornecer resistência horizontal para propulsão. Quando a perna da aranha está em repouso sobre a superfície, as componentes horizontal $F_{s,a}$ e $F_{s,p}$ das forças resultantes R_a e R_p (Figura 3.14c), devido à tensão superficial anterior e posterior à perna, estão em equilíbrio pois a ondulação é simétrica. A força resultante horizontal devido à tensão superficial (F_s) é, portanto, a soma das componentes $F_{s,a}$ e $F_{s,p}$. A magnitude dessa força depende da orientação de R_a e R_p em relação à superfície da água intacta, medido pelos ângulos de inclinação α_a e α_p , respectivamente, que nos fornecem as seguintes relações:

$$F_{s,a} = l\gamma\cos\alpha_a \quad (3.23)$$

$$F_{s,p} = l\gamma\cos\alpha_p \quad (3.24)$$

Onde l é o comprimento da perna que está interagindo com a superfície. Sabendo que h é a profundidade em relação à superfície, r_a e r_p as distâncias entre a extremidade da perna até o ponto de contato com a superfície nas direções anterior e posterior, então temos:

$$\alpha_a = \sin^{-1} \frac{h}{r_a} \quad (3.25)$$

$$\alpha_p = \sin^{-1} \frac{h}{r_p} \quad (3.26)$$

Combinado a equação (3.23) com (3.25) e a equação (3.24) com (3.26), percebemos que a força resultante horizontal devido à tensão superficial (F_s) depende da forma da ondulação, descrita pela razão de h com r_a e r_p . Assim, para que a tensão superficial gere uma força de resistência para a perna em movimento, devemos ter a condição:

$$\frac{h}{r_a} < \frac{h}{r_p} \quad (3.27)$$

Essa condição resulta em $\alpha_a < \alpha_p$, consequentemente $F_{s,a} < F_{s,p}$ e , portanto, F_s positivo.

Assim, para uma única perna sobre a superfície, a força de empuxo (F_e) é a soma das três forças de resistência:

$$F_e = F_w + F_d + F_s \quad (3.28)$$

Nos experimentos realizados por Suter (1997), buscou-se determinar F_e e qual das forças de resistência é a mais importante para a locomoção aquática da aranha, neste caso, *Dolomedes triton*. Para isso, foram manipuladas três variáveis independentes: a velocidade U , a profundidade h e a tensão superficial γ . Esses experimentos mostraram que o a força de resistência dominante é a causada por arrasto (F_d), e não a tensão superficial (F_s) como indicado em várias linhas de evidência. A modelagem feita pelos pesquisadores mostrou que a força F_d corresponde em torno de 75% a 98% da força de empuxo total (F_e). Como podemos observar na Figura 3.15, a força de empuxo máxima medida foi de aproximadamente 0,6 mN.

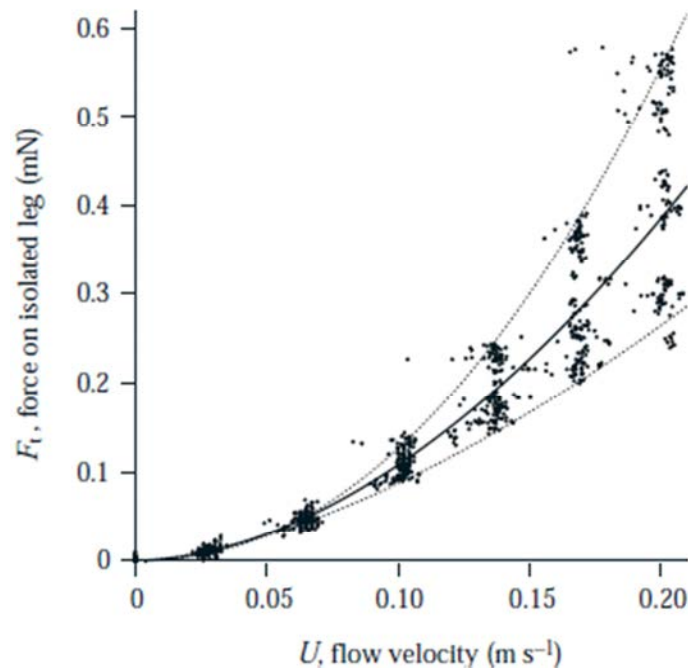


Figura 3.15 – Gráfico de força (F_l) em função da velocidade (U). Fonte: Suter et al. (1997, p.2534).

Nos experimentos de Suter (1997), então, foram medidas as forças que atuam em um segmento de perna de uma aranha. Em velocidades abaixo de 0,23 m/s, não havia ondas de proa e, portanto, não há produção de empuxo a baixas velocidades.

Em outro momento, variaram o valor da tensão superficial, alterando a concentração de etanol de 0% para 9% no tanque de água onde estavam sendo realizados os experimentos. As ondulações sofreram pouca ou nenhuma variação com a mudança da tensão superficial. No entanto, quando a tensão superficial diminuiu de 0,072 N/m para 0,064 N/m observou-se que o expoente que relaciona força e velocidade aumentou, e quando a tensão diminuiu para 0,054 N/m esse expoente diminuiu. Estes resultados sugerem que há uma influência da tensão superficial, mesmo que secundária, na geração das forças horizontais.

Finalmente, os pesquisadores chegaram a algumas conclusões. Por exemplo, quando as pernas das aranhas formam ondulações na superfície da água, então elas estão se movendo a uma velocidade superior a 0,23 m/s. Podemos também prever a relativa importância dos três tipos de forças de resistência sob certas condições, por exemplo, quando a velocidade for maior que 0,23 m/s e a profundidade h for muito grande, perto da distorção, então neste caso a força de arraste F_d deve ser minimizada e a contribuição relativa da resistência da onda de proa deve ser máxima. Em profundidades entre 1,0 e 3,5 mm o arraste deve predominar.

Os dados apresentados neste estudo possibilitam não só uma avaliação destas previsões, mas também que um processo físico simples, o arraste, dentre muitos outros fatores, é um dos fatores principais da locomoção sobre a superfície líquida. Uma curiosidade interessante é que as aranhas podem se locomover de dois modos, um modo chamado remo e outro conhecido como galope. Na Figura 3.16 podemos observar os dois tipos de caminhar e as ondulações por ela provocadas.

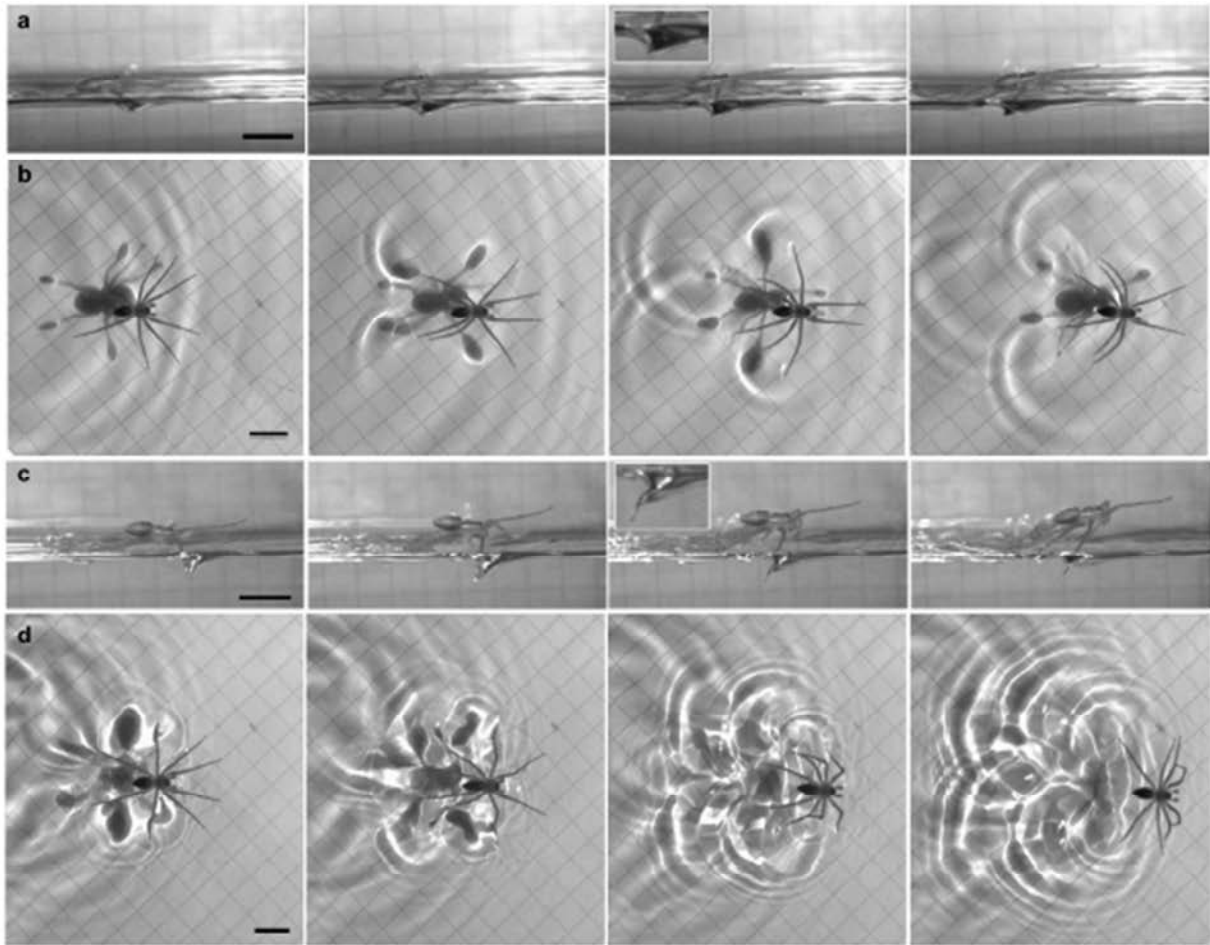


Figura 3.16 – (a) Modo de caminhar tipo remo visto lateralmente. (b) Modo de caminhar tipo remo visto de cima. (c) Modo de caminhar tipo galope visto lateralmente. (d) Modo de caminhar tipo galope visto de cima. Fonte: Hu (2006, p.76).

Na Figura 3.16, em (a) e (b) a aranha impulsiona-se a remo com velocidade abaixo de $0,20 \text{ m/s}$. Note que neste caso as pernas estão esticadas e na horizontal ao longo da superfície da água, percebe-se também que esse tipo de caminhar gera poucas ondulações. Todavia, em (c) e (d) a aranha utiliza o galope para se locomover, com velocidades maiores que $0,30 \text{ m/s}$. No galope, as pernas ficam dobradas na articulação e elas impulsionam-se para cima, gerando uma maior quantidade de ondulações. Observe em (c) que no galope parte da extremidade da perna da aranha penetra na superfície da água.

Não são somente as aranhas que conseguem caminhar sobre a água, outros tipos de animais, como insetos, também possuem essa capacidade. Observe alguns deles na Figura 3.17.

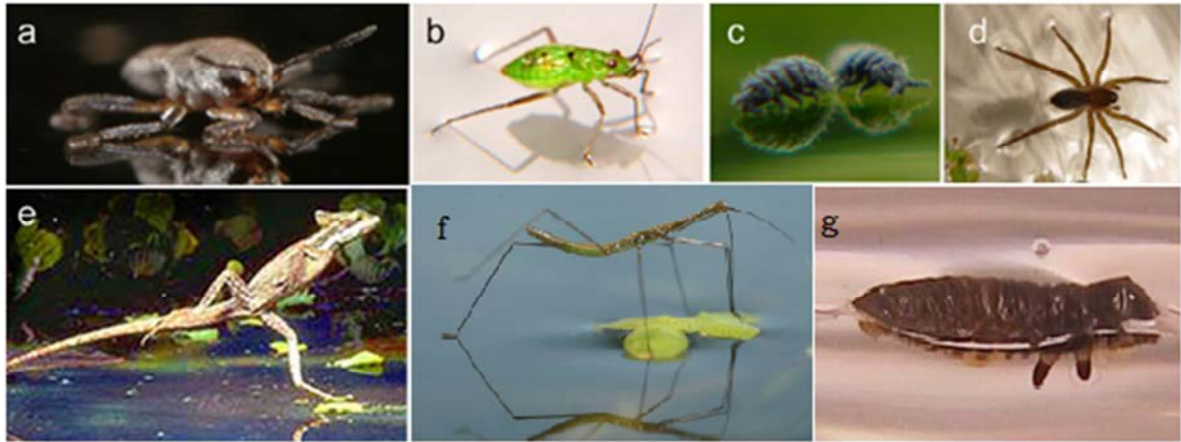


Figura 3.17 – (a) *Microvelia*. (b) *Masovelina*. (c) *Anurida*. (d) Aranha *Dolomedes*. (e) Lagarto basilisco. (f) *Hydrometra*. (g) *Pyrrhalta*. Fonte: Hu (2006, p.24).

3.4.1. Condição para que a aranha não afunde

Vamos fazer uma análise física da condição para que a aranha, sobre a superfície da água, não afunde.

A Figura 3.18 mostra a perna de uma aranha parado sobre um líquido de tensão superficial γ . A força devido à tensão superficial age, em cada ponto do líquido, tangencialmente à superfície, e perpendicularmente à curva de nível que passa por aquele ponto. Então, em todos os pequenos comprimentos Δl da curva atua a força F_γ . Essa força pode ser expressa pela relação:

$$F_\gamma = \gamma \cdot \Delta l \quad (3.29)$$

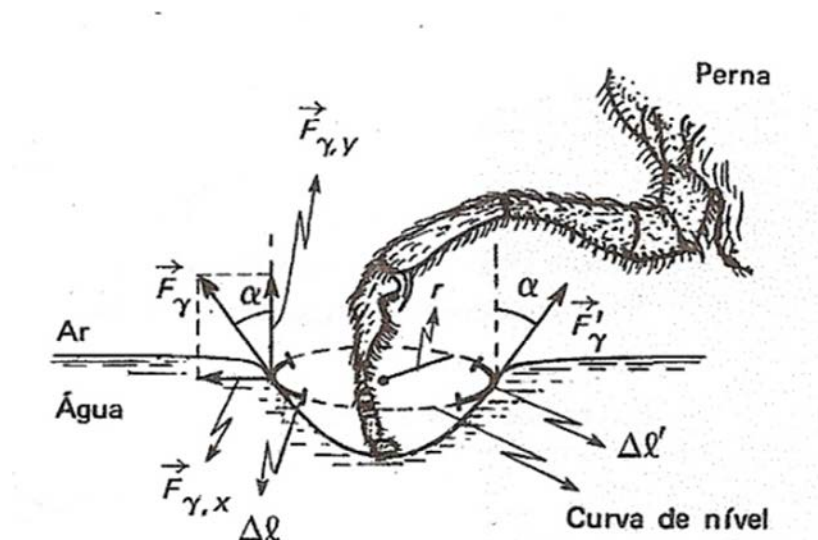


Figura 3.18 – A perna de uma aranha sustentada pela tensão superficial de um líquido. Fonte: Okuno, Caldas e Chow (1982, p.329).

A força F_γ pode ser decomposta em duas componentes, a $F_{\gamma x}$ e $F_{\gamma y}$. As componentes horizontais $F_{\gamma x}$ aplicadas em segmentos diametralmente opostos se anulam. A componente vertical $F_{\gamma y}$ é dada por:

$$\begin{aligned} F_{\gamma y} &= F_\gamma \cdot \cos \alpha \\ F_{\gamma y} &= \gamma \Delta l \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.30)$$

A soma de todas as forças que atuam sobre cada trecho Δl é a resultante $R_{\gamma y}$. Substituindo Δl pelo comprimento total $2\pi r$, temos:

$$R_{\gamma y} = 2\pi r \gamma \cdot \cos \alpha \quad (3.31)$$

Onde r é o raio da curva de nível considerada (Figura 3.18). Portanto, a força total que sustenta cada perna da aranha é a resultante perpendicular à superfície de contato entre a perna e a água.

Se a aranha estiver parada, a resultante $R_{\gamma y}$ será igual ao peso P da aranha dividido pela quantidade de pernas (n) que ela possui.

$$\begin{aligned} \frac{P}{n} &= 2\pi r \gamma \cdot \cos \alpha \\ P &= 2\pi r n \gamma \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.32)$$

3.4.2. Massa máxima do animal que pode ser suportada pela tensão superficial

Existe um diâmetro máximo r_m para a pata de um animal com comprimento L , raio r e densidade ρ que pode ser suportado pela tensão superficial. Assumimos que a perna está quase totalmente submersa. Então o peso P é suportado pela tensão superficial F_T e pela flutuabilidade F_F . Na condição de equilíbrio temos:

$$P = F_T + F_F \quad (3.33)$$

Substituindo cada termo temos:

$$\pi \rho r^2 L g \leq 2L \gamma + \pi \rho_w r^2 L g \quad (3.34)$$

Isolando o raio r , a relação acima pode ser expressa:

$$r \leq \sqrt{\frac{2\gamma}{\pi g (\rho - \rho_w)}} \quad (3.35)$$

Para um objeto orgânico com densidade $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$, o raio máximo é de 2,9 mm. Se uma aranha que caminha sobre a água se apoia em pelo menos 4 pernas de comprimento L e raio muito menor que 1 a tensão superficial torna-se:

$$S = 8L\gamma \quad (3.36)$$

E a força de flutuabilidade sobre pelo menos 4 pernas que estão próximas de serem imersas pode ser expressa por:

$$B = 4\rho g\pi r^2 \quad (3.37)$$

Então, neste caso, a relação da condição de equilíbrio é:

$$Mg \leq 4\rho g\pi r^2 + 8L\gamma \quad (3.38)$$

Porém, algumas aproximações podem ser feitas e a força de flutuabilidade sobre as 4 pernas não tem efeito significativo, portanto o peso do corpo dado como:

$$M_{\max}g \approx 8L\gamma \quad (3.39)$$

Se o comprimento da perna do animal for de aproximadamente $L = 0,05$ m e a tensão superficial for $\gamma = 0,072$ N/m, a massa máxima do corpo suportada pela tensão superficial, neste caso, é:

$$M_{\max} = 0,0028 \text{ kg}$$

3.4.3. Cálculo do ângulo de contato pata/menisco para que o animal seja suportado pela tensão superficial

Na Figura 3.19, temos um diagrama de forças para uma única perna sobre a superfície da água. F_G é a força gravitacional e F_T é a força da tensão superficial que age em torno da superfície da perna. O ângulo θ é o ângulo de contato entre a pata e o menisco da água. Há um valor máximo de θ para que a tensão superficial não se rompa.

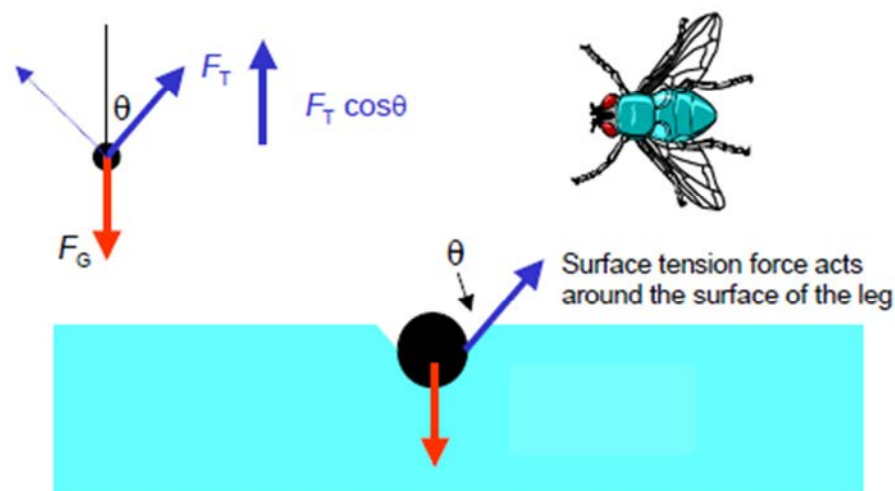


Figura 3.19 – Diagrama de forças para uma perna em contato com a superfície da água. Disponível em: <<http://www.physics.usyd.edu.au>>. Acesso em: 29 ago.2011.

Para facilitar nosso estudo, vamos aproximar a base da perna de um inseto a um formato esférico com um raio de cerca de $2,0 \cdot 10^{-5}$ m. A massa do inseto é de $3,0 \cdot 10^{-6}$ kg e é suportado igualmente por seis pernas. O coeficiente de tensão superficial (γ) é $0,072 \text{ Nm}^{-1}$.

A tensão superficial pode ser expressa pela relação:

$$F_T = \gamma L$$

$$F_T = \gamma 2\pi R \quad (3.40)$$

E a força gravitacional que atua em cada uma das seis pernas é dada por:

$$F_G = \frac{mg}{6} \quad (3.41)$$

Observando na Figura 3.19, vemos que há duas forças no eixo vertical do diagrama de forças: a força gravitacional e a componente da tensão superficial. No equilíbrio temos:

$$F_T \cos \theta = F_G \quad (3.42)$$

Substituindo (3.40) e (3.41) na equação (3.42), temos:

$$\gamma 2\pi R \cos \theta = \frac{mg}{6}$$

$$\cos \theta = \frac{mg}{12\gamma\pi R} \quad (3.43)$$

$$\cos \theta = 0,54157$$

$$\theta = 57^\circ$$

Determinamos, portanto, que o ângulo de contato entre a perna do inseto e a superfície do líquido é de 57° .

Se o ângulo θ for maior que 90° a tensão superficial não suporta o peso do inseto.

3.5. Robôs que caminham sobre a água

Sabemos que a Biomimética é uma parte da ciência que vem sendo explorada intensamente em diversas áreas. Cientistas vêm estudando o comportamento dos insetos que conseguem caminhar sobre a superfície da água para tentar aplicar à robótica.

Um grupo de pesquisadores liderado pelo professor Metin Sitti, da Universidade de Carnegie Mellon, nos Estados Unidos, desenvolveu um robô que imita a capacidade que alguns insetos possuem de caminhar sobre a água, técnica que é conhecida como “waterstriders”. O robô foi chamado de STRIDE (Surface Tension based Robotic Insect Dynamic Explorer), possui uma massa de aproximadamente 1,0 grama, suas patas têm espessura de algumas centenas de microns e 5 a 10 centímetros de comprimento.

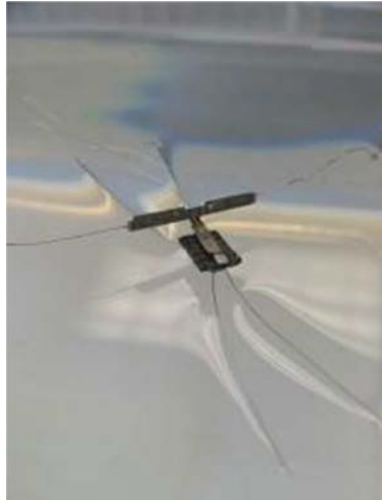


Figura 3.20 – O robô STRIDE imita a técnica dos insetos que caminham sobre a superfície da água. Disponível em: <<http://lqes.iqm.unicamp.br>>. Acesso em: 19 jul. 2011.

Assim como esses insetos, o robô divide o peso de seu corpo sobre suas seis patas, o que lhe permite utilizar a tensão superficial da água para se locomover sem romper a superfície. Além disso, elas são revestidas com teflon, que serve para torná-las hidrofóbicas. Três células piezoelétricas movimentam o robô, possibilitando movimentos retilíneos e movimentos de rotação.

A diferença entre o robô STRIDE e os insetos está na velocidade que atingem. O robô consegue caminhar em linha reta a uma velocidade de 3 cm/s com 40 batimentos de pata por segundo. Já os insetos atingem uma velocidade de 1,5 m/s com apenas 10 batimentos de pata por segundo.

Outro ponto interessante é que enquanto estes insetos e aranhas conseguem manter sobre a superfície da água 15 vezes o peso de seu corpo, os robôs conseguem sustentar somente a metade do peso do conjunto mecânico, o que explica o baixo desempenho do STRIDE.

Pesquisadores do Carnegie Mellon estão tentando melhorar certos aspectos do robô, como a hidrofobia das patas, colocando pelos sintéticos semelhantes aos encontrados nas patas das lagartixas geckos, vistos no capítulo anterior.

Há pesquisa semelhante no Massachusetts Institute of Technology (MIT). Os pesquisadores David L. Hu e Brian Chan mostraram que a habilidade desses insetos envolve principalmente cálculos de dinâmica de fluidos e mecânica. Criaram então o Robostrider, que parte da ideia que as pequenas ondas de qualquer superfície líquida podem ser usadas como trampolins, permitindo que se permaneça sobre a superfície do líquido.



Figura 3.21 – Robostrider, um robô criado por um grupo de pesquisadores do MIT, robô este que imita a capacidade que alguns insetos possuem de caminhar sobre a água. Disponível em: <<http://news.bbc.co.uk>>. Acesso em: 24 set. 2011.

Diferentemente do robô STRIDE criado na Universidade de Carnegie Mellon, o Robostrider atinge uma velocidade de 150 cm/s, que se explica por suas pernas bem longas e flexíveis feitas de aço e uma série de elásticos minúsculos que interligam os membros inferiores.

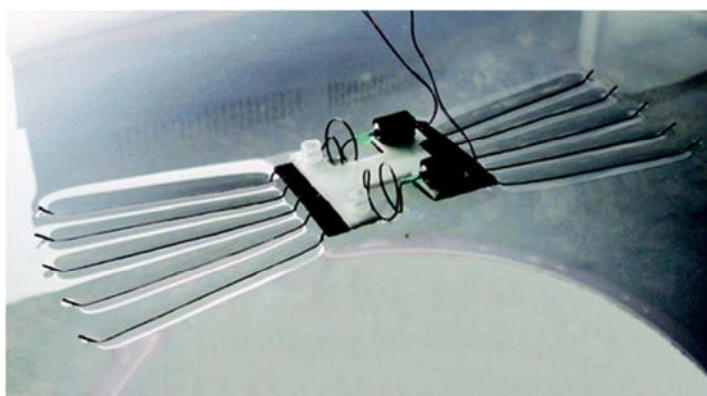


Figura 3.22 - Micro-robô criado pelos chineses com dez pernas hidrofóbicas, sendo duas delas utilizadas para dar impulso. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/am200382g>>. Acesso em: 03 out. 2011.

Na China, Xinbin Zhang e seu grupo de pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Harbin, além de utilizarem tecnologicamente o conceito, adotaram algumas soluções ligeiramente diferentes. Eles criaram um novo micro-robô flutuante (Figura 3.22) que possui dez pernas super-hidrofóbicas para sua sustentação, duas delas para impulso, acionadas por dois micromotores de corrente contínua. Além da alta velocidade, a variação no funcionamento de um dos motores dá ao robô uma grande capacidade de movimento, com curvas bastante suaves. A Figura 3.23 mostra um desenho esquemático da estrutura do robô.

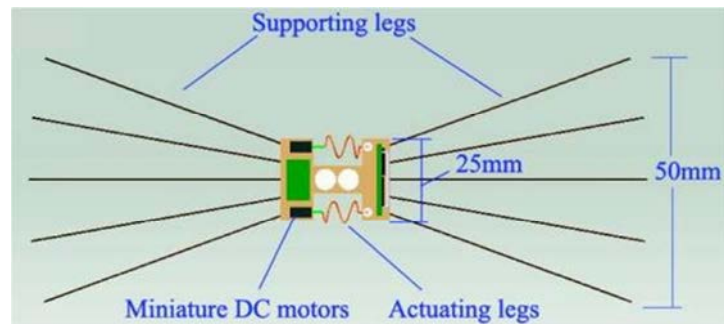


Figura 3.23 – Esquema do micro-robô criado pelos chineses. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/am200382g>>. Acesso em: 03 out. 2011.

Dentre outros objetivos, espera-se usar os micro-robôs para monitoramento de grandes reservatórios de água, eles poderão coletar dados de áreas maiores, além de dados adicionais sobre ventos e correntes. Logo será possível incorporar microcâmeras e esses robôs, que usarão o mesmo sistema de comunicação e transmissão de dados que as redes de sensores remotos.

3.6. A natureza das aranhas

As aranhas pertencem ao filo *Artropoda*. São da ordem *Araneae* da classe dos aracnídeos. O nome desta classe tem origem na figura da mitologia grega *Arachne*, por que as aranhas foram os primeiros membros à pertencer a esta classe. Essa ordem pode ser dividida em três subordens: a *Mygalomorphae*, a *Araneomorphae* e a *Mesothelae*. Existem no mundo aproximadamente 40.000 espécies de aranhas.

Os aracnídeos possuem quatro pares de patas no cefalotórax, que é coberto por uma carcaça quitinosa. Não possuem antenas e o seu abdome não tem divisão definida. As aranhas possuem fiandeiras que são utilizadas para a produção de seda.

Não possuem mandíbulas, apresentam quelíceras ao redor da boca, que são estruturas utilizadas na manipulação do alimento. Possuem também em torno da boca um par de pedipalpos que são estruturas articuladas e servem, na maior parte das espécies, para ajudar as quelíceras na alimentação. Em várias espécies de aranhas, os pedipalpos encontram-se modificados como órgãos copuladores.

As aranhas e os escorpiões são basicamente carnívoros. Muitos desses predadores possuem glândulas de veneno onde usam para paralisar sua presa.

Os aracnídeos respiram por filotraquéias, também denominadas pulmões foliáceos, as quais possuem lamelas que aumentam a superfície de troca gasosa no indivíduo. Nas aranhas, além das filotraquéias existem as traquéias, embora em algumas espécies menores a respiração seja cutânea. No sistema traqueal, uma abertura chamada espiráculo leva o oxigênio direto aos tecidos.

Uma das características mais fascinantes das aranhas, sem dúvida, é a capacidade de tecer teias, que podem ser até 5 vezes mais resistentes do que o aço no mesmo diâmetro. As teias também possuem grande elasticidade, elas podem esticar até 4 vezes o seu comprimento inicial. São resistentes à água e suportam temperaturas de até -45°C.

A maior aranha do mundo é a *Theraphosa blondi* que chega a medir até 20 centímetros de uma pata a outra, já a menor aranha já encontrada é a *Patu digua* que tem aproximadamente 0,37 milímetros de comprimento.



Figura 3.24 - *Theraphosablondi*, a maior aranha do mundo, podendo chegar até 20 centímetros de comprimento. Disponível em: <<http://www.tarantulas.ru>>. Acesso em: 24 set. 2011.

Algumas dessas aranhas possuem a capacidade de caminhar sobre a água. Uma dessas espécies é a *Dolomedes triton*.

O gênero *Dolomedes* pertence à família *Pisauridae*, da qual a maioria das espécies são semiaquáticas. Há mais de uma centena de espécies *Dolomedes* no mundo, como por exemplo, a *Dolomedes aquaticus*, uma espécie florestal da Nova Zelândia, a *Dolomedes fimbriatus*, também conhecida como aranha jangada, que vive em pântanos na Europa, e a *Dolomedes triton* que habitam os pântanos e as beiras de lagoas e córregos em grande parte da América do Norte. Muitas espécies são grandes, algumas fêmeas chegam até 26 mm de comprimento com uma extensão de perna de 80 mm.



Figura 3.25 – Aranha *Dolomedes triton*, encontrada na América do Norte. Disponível em: <<http://bugguide.net>>. Acesso em: 16 set. 2011.

As aranhas *Dolomedes* são cobertas de pelos curtos e aveludados, o que lhes dá a característica hidrofóbica. Essa característica permite que utilizem a tensão superficial da água para caminharem sobre ela.

Aranhas desta espécie não são caçadoras terrestres, elas caçam na superfície da água, predando alguns insetos aquáticos e até mesmo pequenos peixes. As *Dolomedes* tem a incrível

capacidade de sentir vibrações emitidas por sua presa estendendo suas pernas sobre a superfície da água. Eles são capazes de identificar o que está causando as vibrações na água, por exemplo, vibrações de um inseto lutando contra um predador, folhas caindo, o ruído do vento ou o fluxo de a água ao redor rochas e outros obstáculos. Também são capazes de avaliar a distância e a direção da fonte.

As aranhas fêmeas são maiores que os machos. Após o acasalamento, a fêmea pode optar por se alimentar do seu macho. Esse comportamento pode ajudar a fêmea, fornecendo a nutrição que ela precisa para produzir filhotes saudáveis.

Além das aranhas, alguns insetos como o *Gerris remigis* da ordem *Hemiptera* também caminham sobre a água (Figura 3.26). Eles possuem o corpo dividido em três partes: cabeça, tórax e abdômen. Têm seis pernas, duas antenas e seu corpo tem comprimento de aproximadamente 1,0 centímetro.



Figura 3.26 – Inseto *Gerrisremigis* da ordem *Hemiptera*. Disponível em: <<http://www.me.gatech.edu>>. Acesso em: 03 out. 2011.

As pernas traseiras são usadas para orientar e atuar como freios. As pernas dianteiras são usadas para capturar suas presas. Alimentam-se de pequenos insetos que caem na superfície da água e são presas fáceis para rãs, peixes e pássaros.

4. A DINÂMICA DOS FLUIDOS E OS CÃES DA PRADARIA

4.1. Fluidos em movimento

Fluidos podem escoar de diversas maneiras. A fluidez da água em um córrego, a brisa suave do ar ou mesmo um tornado violento. Devido essa diversidade de movimentos, o escoamento de fluidos pode ser classificado de várias formas.

O escoamento de um fluido pode ser permanente ou não-permanente. No escoamento permanente, a velocidade das partículas do fluido em qualquer ponto é sempre constante. Observe o Figura 4.1, nela vemos que no ponto 1 a velocidade das partículas é de $+2 \text{ m/s}$, com o passar do tempo essa velocidade permanece constante. A velocidade pode ser diferente se analisarmos outro ponto do fluido, como o ponto 2 da mesma figura. Neste ponto a velocidade do fluido é de $+0,5 \text{ m/s}$, e ela também permanece constante com o passar do tempo.

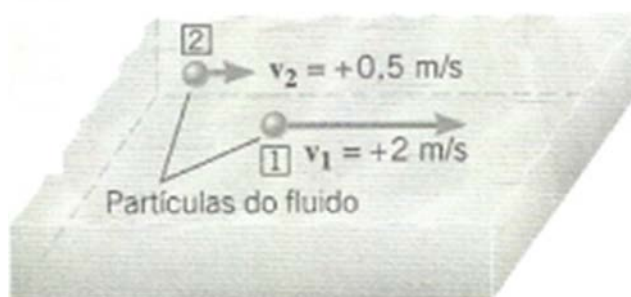


Figura 4.1 – Duas partículas de fluido em diferentes pontos de uma corrente. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.341).

No escoamento não-permanente a velocidade em um ponto varia com o tempo. Um exemplo desse tipo de escoamento é o chamado escoamento turbulento. Ela ocorre quando o fluido se move rapidamente, como em corredeiras, e há diversos obstáculos pontudos ou uma trajetória com muitas curvas. O vetor velocidade varia de forma imprevisível a cada instante, tanto em módulo quanto em direção.

O escoamento de um fluido também pode ser classificado como compressível ou incompressível. No geral, os líquidos são incompressíveis, pois a massa específica desses líquidos permanece quase constante com a variação de pressão. Dizemos então que os líquidos escoam de maneira incompressível. Já os gases são altamente compressíveis, ou seja, sua massa específica varia de acordo com a pressão aplicada, conseqüentemente o escoamento de gases é do tipo compressível. Porém há casos onde alguns gases se comportam de maneira incompressível.

O escoamento pode ser também viscoso ou não-viscoso. No escoamento viscoso, ocorre um processo dissipativo de energia, pois a viscosidade impede que as camadas do fluido deslizem livremente uma sobre as outras. Já no escoamento não-viscoso, o fluido tem baixa ou nenhuma viscosidade escoando de forma desimpedida sem a dissipação de energia.

Embora nenhum fluido real tenha viscosidade nula a temperatura ambiente, alguns fluidos possuem uma viscosidade tão pequena que pode considerada desprezível. Quando em fluido for não-viscoso e incompressível, este pode ser chamado de fluido ideal.

No escoamento permanente, é frequente o uso de linhas de corrente para representar a trajetória das partículas de um fluido em movimento. Uma linha de corrente é desenhada de maneira que qualquer tangente à linha de corrente seja paralela ao vetor velocidade nesse ponto. Na Figura 4.2 podemos observar três vetores velocidade ao longo de uma linha de corrente.

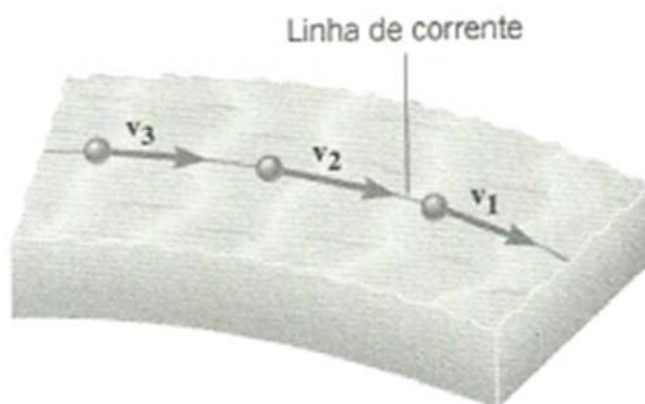


Figura 4.2 – Vetores velocidade ao longo de uma linha de corrente são tangentes a essas linhas. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.342).

No escoamento permanente, o padrão das linhas de corrente não se altera e elas não se cruzam (Figura 4.3). Se as linhas de corrente se cruzassem, as partículas que estivessem chegando ao ponto de cruzamento poderiam seguir dois caminhos distintos, isso quer dizer que a velocidade no ponto de cruzamento variaria a cada instante, fazendo com que o escoamento deixe de ser permanente.

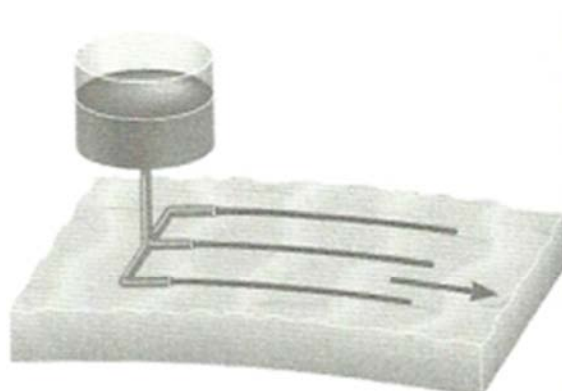


Figura 4.3 – As linhas de corrente no escoamento permanente não se cruzam. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.342).

4.2. Equação da Continuidade

Na Figura 4.4a temos um fluxo de água saindo pela extremidade da mangueira. Se controlarmos manualmente o fluxo de água (Figura 4.4b), diminuindo a seção transversal da abertura da mangueira, a velocidade de saída da água aumenta. Esse tipo de comportamento do fluido pode ser descrito pela equação da continuidade.

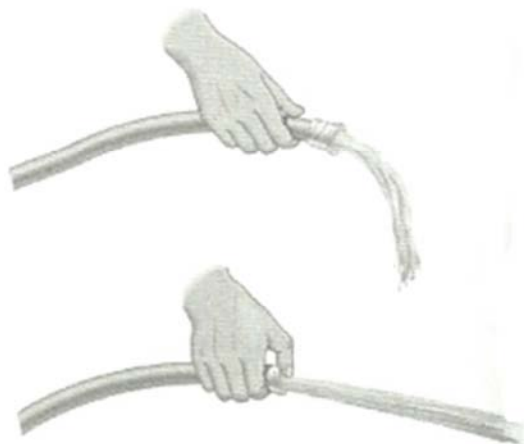


Figura 4.4 – Quando diminuimos a área da seção transversal da mangueira, a velocidade do fluxo de água aumenta. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.342).

Para explicarmos esse comportamento, vamos considerar um tubo de escoamento delimitado por duas seções retas de áreas A_1 e A_2 (Figura 4.5) onde escoa um fluido com velocidades v_1 e v_2 , respectivamente. Em um determinado tempo dt o fluido que estava em A_1 se desloca a uma distância $v_1 dt$ de modo que um volume $dV_1 = A_1 v_1 dt$ escoa pelo tubo através de A_1 . Durante esse mesmo intervalo de tempo dt , um volume $dV_2 = A_2 v_2 dt$ escoa para fora do tubo através de A_2 .

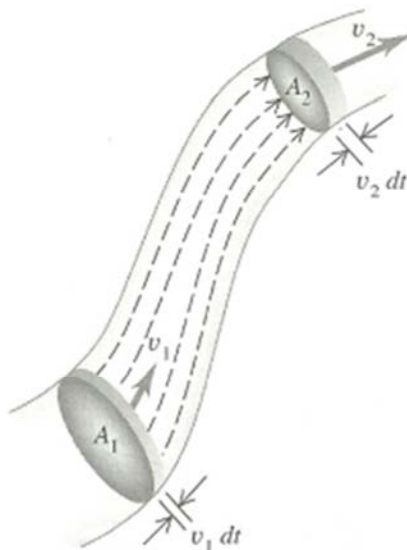


Figura 4.5 – Um tubo de escoamento com seções retas variáveis. Fonte: Young e Freedman (2003, p.82).

No caso de um fluido incompressível, a densidade ρ é constante em todos os pontos do fluido. A massa dm_1 que escoa no tubo através de A_1 no intervalo de tempo dt é dada por:

$$dm_1 = \rho A_1 v_1 dt \quad (4.1)$$

Temos uma relação semelhante para uma massa dm_2 que flui através de A_2 no mesmo tempo dt .

$$dm_2 = \rho A_2 v_2 dt \quad (4.2)$$

No escoamento estacionário, a massa do fluido permanece constante durante todo o trajeto, então $dm_1 = dm_2$. Portanto podemos igualar as equações (4.1) e (4.2):

$$\rho A_1 v_1 dt = \rho A_2 v_2 dt \quad (4.3)$$

A partir da equação (4.3), chegamos à equação da continuidade para um fluido incompressível:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (4.4)$$

A grandeza Av representa o volume dV do fluido por unidade de tempo dt que passa pelo tubo, sendo conhecida como vazão volumétrica.

$$Av = \frac{dV}{dt} \quad (4.5)$$

Para o caso de um fluido compressível, a relação é análoga à equação (4.3). Sendo ρ_1 e ρ_2 as densidades do fluido nas seções A_1 e A_2 , respectivamente, temos a equação da continuidade para um fluido compressível:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (4.6)$$

Onde ρ é a densidade do fluido, A é a área da seção transversal do tubo e v é a velocidade escalar do fluido.

4.3. Equação de Bernoulli

Para um escoamento permanente, a velocidade escalar, a pressão e a elevação de um fluido incompressível e não-viscoso estão relacionados em uma equação descoberta por Daniel Bernoulli (1700-1782). Esta equação é uma importante ferramenta em diversas aplicações como escoamentos em encanamentos, em usinas hidrelétricas, em voo de aeronaves, entre outros.

Para deduzirmos esta equação, aplicaremos o teorema do trabalho-energia ao fluido em uma seção em um tubo de escoamento. Observando a Figura 4.6, consideraremos que o fluido está, inicialmente, entre as seções a e c com velocidades v_1 e v_2 , respectivamente. Em um pequeno intervalo de tempo dt o fluido que estava em a se desloca para b e, portanto, o que estava em c se desloca para d , percorrendo as respectivas distâncias $ds_1 = v_1 dt$ e $ds_2 = v_2 dt$. A área das seções nas duas extremidades são A_1 e A_2 . Sendo o fluido incompressível, então o volume dV ao longo da trajetória do fluido é constante, então $dV = A_1 ds_1 = A_2 ds_2$.

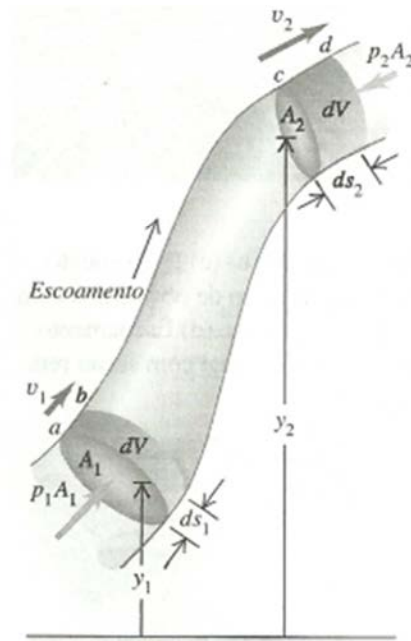


Figura 4.6 – Um tubo de escoamento com seções retas com diferentes áreas. O trabalho total realizado sobre o elemento de fluido é a soma das energias cinética e potencial. Fonte: Young e Freedman (2003, p.82).

As pressões nas duas extremidades são p_1 e p_2 . A força sobre a seção reta é dada por:

$$F = p.A \quad (4.7)$$

O trabalho total dW realizado pelo fluido das vizinhanças sobre o elemento de fluido durante o escoamento é:

$$dW = F_1 ds_1 - F_2 ds_2$$

$$dW = p_1 A_1 ds_1 - p_2 A_2 ds_2$$

$$dW = (p_1 - p_2) dV \quad (4.8)$$

O trabalho dW é realizado por outras forças de modo que ele é igual à variação da energia mecânica do sistema, composta de energia cinética e energia potencial.

A variação da energia cinética K durante um intervalo dt é dada por:

$$dK = \frac{1}{2} \rho dV (v_2^2 - v_1^2) \quad (4.9)$$

Com relação à energia potencial, no início de dt a energia da massa entre a e b está relacionada com a altura y_1 , e no final de dt a energia da massa entre c e d está relacionada com y_2 . A variação total da energia potencial U durante esse intervalo de tempo é:

$$dU = \rho dV g (y_2 - y_1) \quad (4.10)$$

Substituindo as equações (4.8), (4.9) e (4.10) na equação da energia $dW = dK + dU$, temos:

$$\begin{aligned}(p_1 - p_2)dV &= \frac{1}{2}\rho dV(v_2^2 - v_1^2) + \rho dVg(y_2 - y_1) \\ p_1 - p_2 &= \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(y_2 - y_1) \\ p_1 + \rho gy_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 &= p_2 + \rho gy_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2\end{aligned}\quad (4.11)$$

A equação (4.11) é a equação de Bernoulli. Ela mostra que o trabalho realizado pelo fluido das vizinhanças sobre um volume de fluido é equivalente à soma das energias cinética e potencial ocorridas durante o escoamento.

Vamos analisar uma situação do dia-a-dia. Um encerado é uma peça feita de lona que serve para cobrir cargas de caminhões (Figura 4.7). Observamos que quando o caminhão está parado, o encerado permanece plano. Quando o caminhão está em movimento, vemos que o encerado estufa para fora.



Figura 4.7 – O encerado permanece plano quando o caminhão está parado e quando está em movimento o encerado estufa. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.347).

Isso pode ser explicado através da equação de Bernoulli, ou seja, esse comportamento do encerado é consequência da variação de pressão do fluido em movimento, que no caso seria o ar. Quando o caminhão está parado, o ar que está dentro e fora do encerado está em repouso, portanto a pressão é igual em ambos os locais. Esta pressão aplica a mesma força na parte interna e na externa da lona, fazendo com que ela fique plana. Isso não acontece quando o caminhão está em movimento. O ar que está fora da lona se desloca rapidamente sobre a superfície e, de acordo com a equação de Bernoulli, a pressão neste local é menor do que na parte interna da lona onde o ar está em repouso. Neste último caso a pressão exercida é maior. A pressão maior no interior gera uma força na superfície interna que é maior que a força na superfície externa da lona e por isso o encerado estufa.

4.3.1. Efeito Venturi

Um fluido escoa em um tubo horizontal que possui um estrangulamento (Figura 4.8). Como as duas seções estão na mesma altura, então $y_1 = y_2$. A equação de Bernoulli se torna:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante}$$

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (4.12)$$

Quando o fluido entra no estrangulamento, a área se torna menor e, portanto, a velocidade v deve aumentar, pois o produto Av permanece constante. Como $p + \frac{1}{2}\rho v^2$ é constante, quando a velocidade aumenta e pressão tem que diminuir. Portanto a pressão P_2 no estrangulamento é menor.

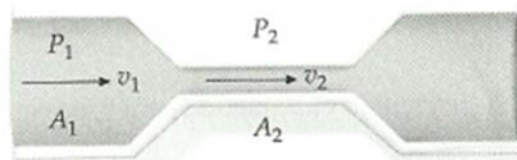


Figura 4.8 – Um tubo de escoamento com um estrangulamento. A pressão é menos na parte mais estreita. Fonte: Tipler e Mosca (2009, p.449).

Dizemos então que quando um fluido passa por um estrangulamento, sua velocidade aumenta e sua pressão diminui. A este fenômeno damos o nome de efeito Venturi e o estrangulamento é conhecido como tubo Venturi.

Na Figura 4.9 temos um medidor Venturi, que serve para medir a vazão de um fluido incompressível não-viscoso. Um fluido de massa específica ρ_F passa por um tubo de seção de área A_1 que possui um estrangulamento de área A_2 . Ambas as partes do tubo estão conectadas a um manômetro de tubo em forma de U parcialmente preenchido com um fluido de massa específica ρ_L . A diferença de altura dos níveis do fluido no tubo em U mostra a diferença de pressão existente.

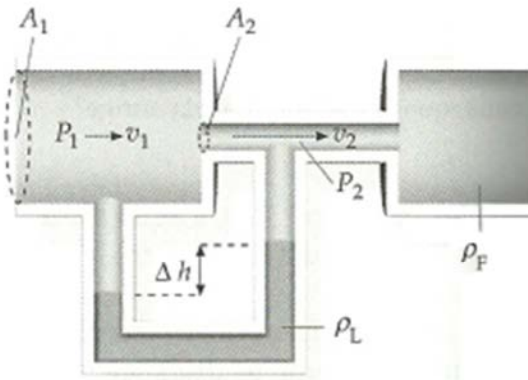


Figura 4.9 – Um Medidor Venturi tem a função de medir a vazão de um fluido incompressível e não-viscoso. Fonte: Tipler e Mosca (2009, p.450).

Como as duas regiões estão na mesma altura, podemos expressar a equação da Bernoulli da seguinte forma:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_F v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_F v_2^2 \quad (4.13)$$

Com a equação da continuidade podemos expressar a relação entre as velocidades:

$$\begin{aligned} v_1 A_1 &= v_2 A_2 \\ v_2 &= \frac{A_1}{A_2} v_1 \\ v_2 &= \alpha v_1 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Substituímos a equação (4.14) em (4.13):

$$\begin{aligned} P_1 + \frac{1}{2} \rho_F v_1^2 &= P_2 + \frac{1}{2} \rho_F (\alpha v_1)^2 \\ P_1 - P_2 &= \frac{1}{2} \rho_F [\alpha^2 - 1] v_1^2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Agora vamos escrever a diferença de pressão $P_1 - P_2$ em termos da diferença Δh do fluido dentro do tubo em U.

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= \rho_L g \Delta h - \rho_F g \Delta h \\ P_1 - P_2 &= (\rho_L - \rho_F) g \Delta h \end{aligned} \quad (4.16)$$

Igualamos as equações (4.15) e (4.16) e encontramos v_1 em termos da diferença de altura Δh :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho_F [\alpha^2 - 1] v_1^2 &= (\rho_L - \rho_F) g \Delta h \\ v_1 &= \sqrt{\frac{2(\rho_L - \rho_F) g \Delta h}{\rho_F [\alpha^2 - 1]}} \end{aligned} \quad (4.17)$$

4.3.2. Escoamento viscoso

Quando um fluido possui baixa ou nenhuma viscosidade, as camadas desse fluido deslizam uma sobre as outras, e todas elas com a mesma velocidade (Figura 4.10a). Mas quando o fluido possui viscosidade, as camadas do fluido escoam com velocidades diferentes, conforme observamos na Figura 4.10b.

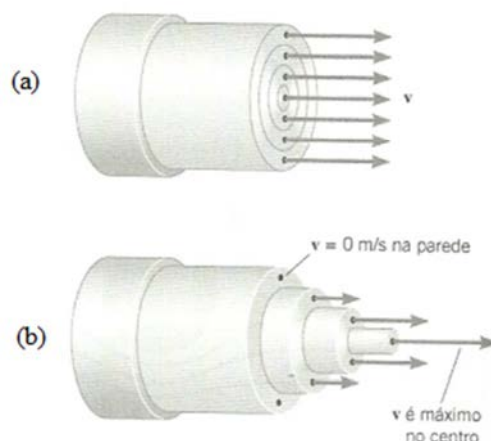


Figura 4.10 – (a) Em um fluido sem viscosidade a velocidade é a mesma em todos os pontos. (b) Em um fluido viscoso a velocidade varia, sendo ela maior no centro e menos nas extremidades próximas à parede do tubo. Fonte: Cutnell e Johnson (2006, p.350).

O fluido que está no centro do tubo possui velocidade máxima. Já o fluido que está próximo à superfície da parede permanece quase imóvel, isso ocorre devido às forças intermoleculares que atuam entre a parede do tubo e o fluido.

Essas forças muitas das vezes são tão intensas que se a superfície sólida se mover a camada de fluido próxima a ela se move junto.

Para definir a viscosidade de um fluido vamos considerar a situação da Figura 4.11. Um fluido está confinado entre duas placas, de área A cada uma, paralelas entre si e separadas por uma distância z . Aplicamos uma força $\vec{F}$ sobre a placa superior e ela inicia um movimento com velocidade v constante, e a placa inferior permanece em repouso.

O fluido escoa em camadas, ou lâminas, e por isso o movimento é chamado escoamento laminar.

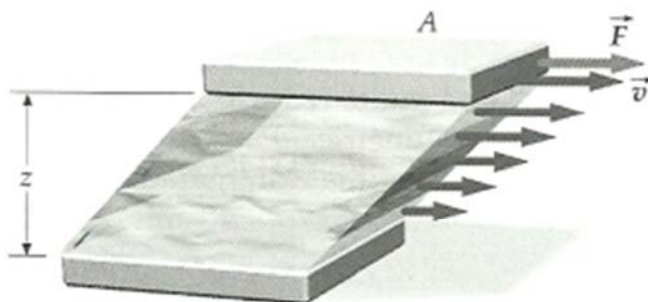


Figura 4.11 – Um fluido é contido por duas placas paralelas. Devido à força aplicada na placa superior, a camada de fluido adjacente a placa se move junto. Fonte: Tipler e Mosca (2009, p.453).

A força aplicada sobre a placa superior é diretamente proporcional à velocidade v e a área A , e inversamente proporcional à distância z entre as placas. A constante de proporcionalidade dessa relação de grandezas é denominada constante de viscosidade η .

$$F = \eta \frac{vA}{z} \quad (4.18)$$

A unidade de viscosidade, no Sistema Internacional, é o $(\text{N.s/m}^2) = (\text{Pa.s})$. Há uma unidade antiga mas ainda utilizada que é o poise, em homenagem ao físico francês Jean Poiseuille.

$$1 \text{ Pa.s} = 10 \text{ poise}$$

A tabela 4.1 abaixo mostra alguns valores de viscosidade de alguns fluidos em várias temperaturas, pois quando a temperatura diminui a viscosidade de um fluido tende a aumentar.

Tabela 4.1 – Coeficiente de viscosidade de alguns fluidos

Fluido	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{mPa} \cdot \text{s}$
Água	0	1,8
	20	1,00
	60	0,65
Sangue (integral)	37	4,0
Óleo de motor (SAE 10W)	30	200
Glicerina	0	10.000
	20	1.410
	60	81
Ar	20	0,018

Fonte: Tipler e Mosca (2009, p.453).

Podemos relacionar a vazão volumétrica de um fluido dentro de um tubo em um escoamento laminar através da Lei de Poiseuille, que considera o coeficiente de viscosidade η ao longo de um tubo de raio r .

Para deduzirmos a Lei de Poiseuille, vamos calcular a vazão volumétrica dV dentro de um tubo de raio R e comprimento L (Figura 4.12).

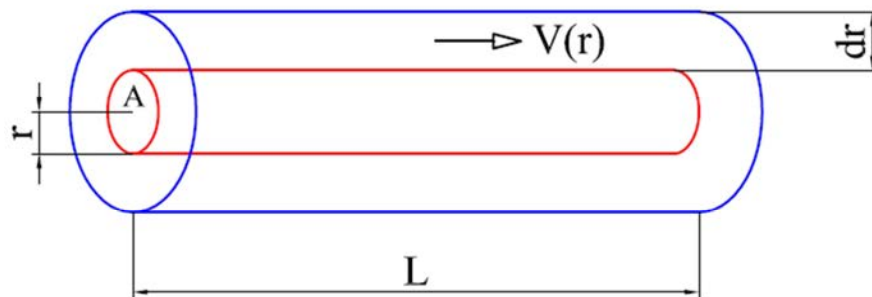


Figura 4.12 – Tubo de raio R onde escoa laminarmente um fluido de viscosidade η .

A vazão volumétrica dV é uma relação entre a velocidade do fluido v contido no tubo e a área dA da seção ao longo deste tubo. A velocidade do fluido pode ser expressa por:

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta L} (R^2 - r^2) \quad (4.19)$$

Onde ΔP é a variação de pressão no interior do tubo, η é o coeficiente de viscosidade do fluido, L é o comprimento do tubo, R é o raio maior do tubo e r o raio menor.

Sabendo que a área é $dA = 2\pi r dr$, a vazão volumétrica pode ser dada por:

$$dV = v.dA \quad (4.20)$$

Substituindo a equação (4.19) e a expressão da área em (4.20), temos:

$$\begin{aligned} dV &= \frac{\Delta P}{4\eta L} (R^2 - r^2) \cdot 2\pi r dr \\ dV &= \frac{\Delta P \pi}{2\eta L} (R^2 r - r^3) dr \end{aligned} \quad (4.21)$$

Integrando a equação (4.21) entre $r = 0$ e $r = R$, encontraremos a vazão volumétrica total.

$$\begin{aligned} V &= \frac{\Delta P \pi}{2\eta L} \int_0^R (R^2 r - r^3) dr \\ V &= \frac{\Delta P \pi}{2\eta L} \left(\frac{R^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right)_0^R \\ V &= \frac{\Delta P \pi}{2\eta L} \left(\frac{R^4}{2} - \frac{R^4}{4} \right) \\ V &= \frac{\Delta P \pi}{8\eta L} R^4 \end{aligned} \quad (4.22)$$

A partir da equação (4.22) podemos obter uma relação que fornece a variação de pressão ao longo de um comprimento L de um tubo de seção circular de raio R , e que chamamos de Lei de Poiseuille.

$$\Delta P = \frac{8\eta L}{\pi R^4} V \quad (4.23)$$

A Lei de Poiseuille é válida para um escoamento laminar. Quando a velocidade de escoamento de um fluido se torna muito rápida, o movimento deixa de ser laminar e passa a ser turbulento. A turbulência depende da massa específica, da viscosidade do fluido e do raio do tubo. A Figura 4.13a mostra um escoamento laminar, a Figura 4.13b indica que a velocidade do fluido aumentou de modo que o movimento passou a ser turbulento.

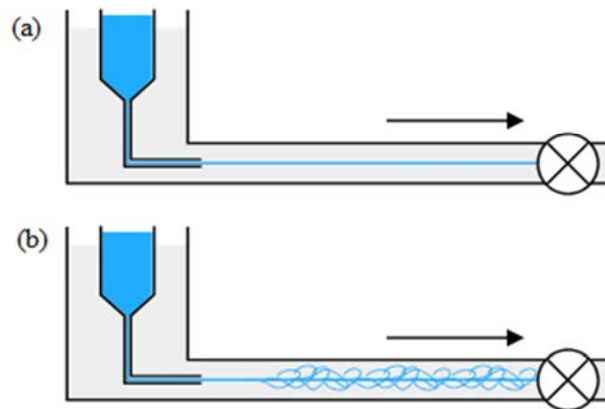


Figura 4.13 – (a) Escoamento laminar. (b) Escoamento turbulento. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br>>. Acesso em: 14 set. 2011.

O escoamento de um fluido pode ser caracterizado por um número adimensional conhecido como número de Reynolds (N_R), que é dada pela relação:

$$N_R = \frac{2r\rho v}{\eta} \quad (4.24)$$

Onde v é a velocidade média do fluido. A partir do número de Reynolds podemos saber o tipo de escoamento do fluido, se:

$N_R < 2000$, o escoamento é laminar

$N_R > 3000$, o escoamento é turbulento

$2000 < N_R < 3000$, o escoamento é instável

4.4. Movimento de fluidos em tocas de animais

Os cães da pradaria são encontrados na América do Norte. Eles vivem em colônias subterrâneas, constituídas de um emaranhado de túneis que ligam várias salas onde se abrigam e guardam seus alimentos. Os túneis têm diversas saídas para a superfície, que possuem diversas finalidades. Uma delas é regular a temperatura dos túneis, pois o ar percorre de uma ponta a outra levando oxigênio aos animais e mantendo uma temperatura agradável para a sobrevivência destes.

A Figura 4.14 é um esquema de uma toca de um cão da pradaria. A principal saída é indicada por A, e está localizado em um monte, enquanto a outra abertura está localizada no nível do solo. Vogel e Bretz (1972), pesquisadores da Universidade de Duke, Durham, na Carolina do

Norte, EUA, sugeriram que esse tipo de estrutura pode desempenhar um papel importante na ventilação e, assim, na adequação do habitat.

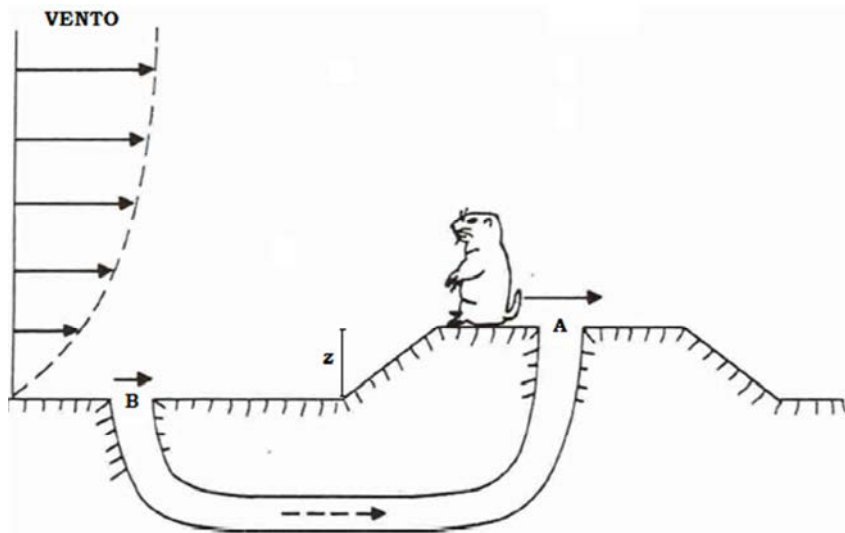


Figura 4.14 – Esquema de uma toca de um cão da pradaria, com o perfil do vento e da ventilação da toca. Fonte: Okubo, Ackerman e Swaney (2002, p.93).

A atividade de escavação desses túneis pode trazer efeitos ambientais significativos, tais como mudança na flora local e na alteração da estabilidade do solo.

Pelo menos dois mecanismos físicos podem ser levados em consideração para explicarmos o fluxo unidirecional de ar que percorre os túneis. O primeiro é devido à diferença de pressão gerada por variações na velocidade ao longo da altitude, como podemos observar na Figura 4.14. O segundo, conhecido como escoamento viscoso, depende da viscosidade do fluido.

Para qualquer um desses mecanismos que induzem o fluxo de ar nas tocas, é necessário que as saídas dos túneis sejam diferentes. As diferenças podem ser na altura em relação ao solo, na localização em terrenos desnivelados ou apenas variações na forma. A Figura 4.15 mostra uma das saídas da toca de um cão da pradaria, percebe-se que há uma pequena elevação em relação ao nível do solo.



Figura 4.15 – Uma das saídas da toca de um cão da pradaria. Disponível em: <<http://www.meridian.k12.il.us>>. Acesso em: 28 set. 2011.

Vamos analisar a situação do ponto de vista quantitativo. Aplicaremos a equação de Bernoulli para estudar o fluxo de ar dentro do túnel (Figura 4.14), observando as contribuições da pressão em duas posições distintas A e B:

$$\left(\frac{1}{2u^2} + \frac{p}{\rho} + gz \right)_A = \left(\frac{1}{2u^2} + \frac{p}{\rho} + gz \right)_B \quad (4.25)$$

Onde u é a velocidade do vento, p é a pressão total, ρ é a densidade do ar, g é a aceleração da gravidade e z é a altura do ponto considerado acima de um plano horizontal fixo. No caso da Figura 4.14, assume-se uma situação onde há um fluxo constante de um fluido ideal, ou seja, incompressível, estacionário, não viscoso e com densidade uniforme.

A pressão total é a soma da pressão estática (p_0) e a pressão dinâmica (p_1). Uma vez que a pressão estática equilibra a força gravitacional, temos:

$$\left(\frac{p_0}{\rho} + gz \right)_A = \left(\frac{p_0}{\rho} + gz \right)_B \quad (4.26)$$

Subtraindo (4.26) de (4.25), obtemos:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2u^2} + \frac{p_1}{\rho} + gz \right)_A &= \left(\frac{1}{2u^2} + \frac{p_1}{\rho} + gz \right)_B \\ \left(\frac{p_1}{\rho} \right)_B - \left(\frac{p_1}{\rho} \right)_A &= \frac{1}{2(u_A^2 - u_B^2)} \end{aligned} \quad (4.27)$$

O perfil do vento na Figura 4.14, mostra que a velocidade do vento em A é maior que em B. Assim, o lado direito da equação (4.27) torna-se positivo, então a pressão dinâmica em B é maior que em A. a diferença de pressão define o movimento do ar na toca, na direção da linha tracejada, como vemos na figura.

Em outras palavras, o princípio é o mesmo que o do tubo Venturi, a pressão dinâmica em um ponto onde o fluido se move rapidamente é menor que a pressão dinâmica em um ponto onde o fluido se desloca mais lentamente, e os túneis do cão da pradaria corresponde ao tubo em U ligado ao medidor Venturi.

Vamos analisar alguns cálculos aproximados do fluxo no interior da toca. Consideremos a toca como um tubo cilíndrico de raio r e que o fluxo de ar no seu interior é laminar. O gradiente de pressão entre A e B é $(P_B - P_A)/L$, onde L é a distância entre os pontos A e B ao longo da toca.

Aplicando a lei de Poiseuille, o fluxo de fluido (Q) dentro da toca devido ao gradiente de pressão é:

$$Q = \frac{\pi r^4 (P_B - P_A)}{8\eta L} \quad (4.28)$$

Utilizando a equação (4.27) em (4.28), temos:

$$Q = \frac{\pi r^4 (u_A^2 - u_B^2)}{16\nu L} \quad (4.29)$$

Onde ν é a viscosidade do ar. Se V for a velocidade média de ventilação dentro da toca e sabendo que $Q = \pi r^2 V$, encontra-se uma expressão que nos fornece a velocidade V :

$$\begin{aligned} \pi r^2 V &= \frac{\pi r^4 (u_A^2 - u_B^2)}{16\nu L} \\ V &= \frac{r^2 (u_A^2 - u_B^2)}{16\nu L} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Além disso, utilizando a equação (4.30) e sabendo que a velocidade média é dada pela razão entre a variação de espaço pela variação de tempo, pode-se encontrar o tempo (T) necessário para que o fluido percorra todo o interior da toca, de B até A:

$$\begin{aligned} \frac{L}{T} &= \frac{r^2 (u_A^2 - u_B^2)}{16\nu L} \\ T &= \frac{16\nu L^2}{r^2 (u_A^2 - u_B^2)} \end{aligned} \quad (4.31)$$

Para estimar os valores de velocidade e o tempo, toma-se alguns valores como exemplo. O comprimento da toca $L = 20$ m, o raio da toca $r = 6$ cm, as velocidades do vento nos pontos A e B são, respectivamente, $u_A = 20$ cm/s e $u_B = 10$ cm/s, e a viscosidade do ar $\nu = 0,15$ cm²/s. Assim, utilizando a equação (4.30), o valor da velocidade média do fluxo de ar no interior da toca, neste caso, é:

$$V = 2,25 \text{ cm / s}$$

E usando a equação (4.31), o tempo gasto pelo fluxo de ar para percorrer toda a extensão da toca:

$$T = 14,8 \text{ min}$$

A eficácia dessa ventilação é notável. Todavia, muitas vezes as tocas não preenchem todas as condições que exige o princípio de Bernoulli.

O número de Reynolds para este fluxo pode ser determinado a partir da relação:

$$R_e = \frac{2rV}{\nu} \quad (4.32)$$

E neste caso encontrou-se $Re = 180$, o que confirma a hipótese de fluxo laminar. A turbulência só ocorre com um valor de Re acima de 2000.

No segundo mecanismo, em geral, tem-se o mesmo fluxo direcional como no caso anterior. Mas quando levamos em consideração o escoamento viscoso alguns pontos devem ser levantados. Por exemplo, um grande buraco proporciona uma melhor saída de fluido que um pequeno buraco, assim, o fluido entrará pela pequena abertura e sairá pela abertura maior, mesmo não havendo diferença na velocidade externa entre as extremidades da toca.

Devido à complexidade considerável do escoamento viscoso, Vogel, da Universidade de Duke, tentou desenvolver uma abordagem empírica para prever a velocidade interna. A força motriz (F) para o fluxo induzido pode ser representado por:

$$F = 0,15\rho Au^2 \quad (4.33)$$

Onde A é a área transversal das aberturas, u é a velocidade de fluxo e o coeficiente numérico 0,15 foi determinado utilizando modelos experimentais em tocas.

Combinando a equação (4.33) com a lei de Poiseuille, obtém:

$$V = \frac{6 \cdot 10^{-3} Au^2}{\nu L} \quad (4.34)$$

Esta equação afirma que para um determinado fluido e uma geometria da abertura, a velocidade do fluxo interno é proporcional ao quadrado da velocidade do fluxo externo.

Tocas de animais são geralmente curvas, em vez de retilíneas, o que pode contribuir para o fluxo de ar em seu interior. Talvez mais importante, as tocas são muito ramificadas e, portanto, diferem muito de um simples tubo reto.

4.5. A natureza dos cães da pradaria

O cão da pradaria é um roedor da família *Sciuridae*, classificado no gênero *Cynomys*. Pertence à ordem *Rodentia* da classe *Mammalia*. O grupo possui cinco espécies, todas elas nativas da América do Norte, ocupando uma área geográfica que vai do Alasca até ao norte do México.



Figura 4.16 – O cão da pradaria é um mamífero roedor, nativo da América do Norte. Disponível em: <<http://animals.nationalgeographic.com>>. Acesso em: 26 set. 2011.

Os cães da pradaria chegam a medir de 30 a 40 cm de altura e têm hábitos gregários, ou seja, vivem em bandos. As colônias de cães da pradaria são um sistema complexo de que podem chegar até 10 metros de profundidade. Os túneis têm diversas saídas para a superfície e englobam inúmeras cavidades com funções específicas como: lugar para comer, dormir, cuidar dos filhotes, entre outros.

São vários os motivos para os túneis possuírem várias saídas, uma delas é a regulação da temperatura em seu interior, pois havendo várias aberturas o ar pode percorrer livremente. Outro motivo tem a ver com a necessidade de fuga perante o predador.

Na Natureza, esta espécie mantém um vigilante atento a tudo, enquanto os restantes se abastecem de comida ou descansam. Se algum predador se aproximar, esse elemento avisa todo o grupo, que em poucos segundos se esconde.

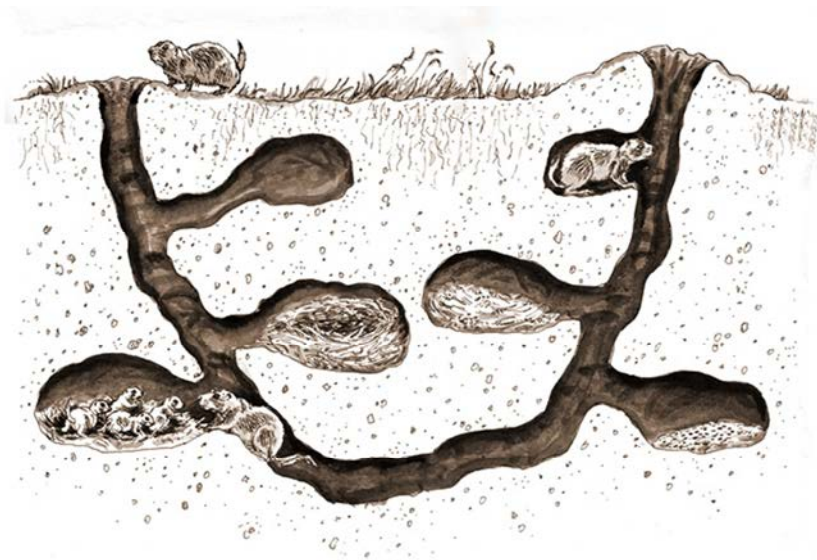


Figura 4.17 – Perfil de uma toca de um cão da pradaria, composta de tuneis com várias ramificações. E sempre com uma das extremidades mais elevada que a outra. Disponível em: < <http://wildlife.state.co.us> >. Acesso em: 28 set.2011.

Os cães-da-pradaria têm uma alimentação, sobretudo, herbívora e complementam a dieta com pequenos insetos. Apesar da sua importância ecológica, esses animais foram caçados em grande quantidade, principalmente no século XIX, por serem considerados como ameaça às colheitas. Como consequência, as populações de cães da pradaria diminuíram muito.

Ultimamente, tem-se visto muito o cão da pradaria como um animal de estimação, já que é considerado um animal meigo e brincalhão. Sua expectativa de vida é em torno de 8 anos.

5. CONCLUSÃO

É amplamente divulgado e conhecido, o sentimento dos alunos com relação à escola como instituição de ensino e o consequente conhecimento por ela transmitido. Na área das ciências exatas e em particular na Física, este sentimento se manifesta em frases como: *“não vejo como isto se aplica no meu dia a dia”*, *“não sei para que isto serve”*, *“isto é coisa para gênios”* e outras expressões do gênero. Não raramente, tais sentimentos se transformam em repulsa pela disciplina Física e seus conteúdos específicos.

Contrapondo-se a estes sentimentos e numa clara demonstração de desconhecimento da importância das ciências por si mesmas e também nas aplicações tecnológicas, estes mesmos alunos se deliciam com objetos eletrônicos de última geração, numa espantosa intimidade e facilidade de uso. Não se limitando a proporcionar lazer ou servir de meio de comunicação, a tecnologia também compete com os modelos escolares tradicionais e o ensino formal.

Nesta nova realidade, educar tornou-se um trabalho muito mais complexo e não apenas restrito aos limites da escola, pois a informação está acessível em toda parte. O conhecimento e a sua transmissão precisam ser reconceitualizados, a começar pela formação do licenciando, futuro professor. Deste modo, acentua-se o papel dos cursos de licenciatura como estimulador e consolidador de mudanças na visão e na prática do educador quanto à importância da escola para a sociedade e a conscientização disto pelos alunos.

Levando em conta estas verdades e constatações, um dos objetivos deste trabalho é aproximar a Física da realidade vivida pelos alunos. Muitas pessoas têm contato com animais e gostam deles, outras no mínimo são espectadoras/observadoras do comportamento deles. Deste modo, fizemos uma conexão entre a Física e animais, nos temas e aspectos em que isso é possível, valorizando a intersecção entre duas áreas do conhecimento, a Física e a Biologia, e elementos do cotidiano das pessoas. Neste trabalho não se busca desenvolver uma nova metodologia de ensino de Física, mas motivar aluno e professor a partir de temas alternativos como estes que abordam aspectos físicos e biológicos de diversos animais.

Ao longo da elaboração deste TCC foi possível perceber e compreender um pouco das dificuldades que podem ser encontradas por professores que buscam algum tipo de inovação em suas aulas para conseguirem a motivação de seus alunos. O acesso a revistas e periódicos especializados neste tema foi uma das dificuldades percebidas, pois muitas vezes eles encontram-se dispersos em periódicos estrangeiros assinados apenas por instituições de ensino superior. Pode haver também dificuldade com o idioma no qual estes textos são publicados, geralmente o inglês. É preciso disponibilidade de tempo para procurar, ler e encontrar uma forma de aplicá-los em suas aulas. Acrescenta-se a todos estes fatores, a complexidade dos sistemas biológicos reais e que do ponto de vista da Física e seu tratamento precisam ser analisados e modelados, para serem descritos o mais corretamente e próximo da realidade. Não se espera do professor a atitude de pesquisador científico nestes temas, mas que encontre neles um modo de provocar interesse pela Física e que busque em livros e textos ainda que introdutórios o material suficiente para um primeiro contato com o assunto.

REFERÊNCIAS

ALLANSON, B. R.; SKINNER, D.; IMBERGER, J. Flow in Prawn Burrows. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. Grahamstown, v.35, n.3, p.253-266, set. 1992.

AQUATIC OLYMPICS OF WATER SPIDERS. Disponível em:
<<http://www.youtube.com/watch?v=3a6DZ9YjoPA>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

AUTUMN, K.; PEATTIE, A. M. Mechanisms of Adhesion in Geckos. **Integrative and Comparative Biology**. Oxford, v.42, n.6, p.1081-1090, dez. 2002.

AUTUMN, K. et al. Dynamics of Geckos Running Vertically. **The Journal of Experimental Biology**. Cambridge, vol.209, p.260-272, jan. 2006.

BBCNEWS. Robot insect walks on water. Disponível em:
<<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/3126299.stm>>. Acesso em: 24 set. 2011.

BICHARADA.NET. **Cão da Pradaria**. Disponível em:
<<http://bicharada.net/animais/animais.php?aid=86>>. Acesso em: 25 set. 2011.

BIOTABRASIL. *Hemidactylus mabouia*. Disponível em:
<<http://www.biotabrasil.com.br/?p=634>>. Acesso em: 03 out. 2011.

BRADY, J.E; RUSSEL, J.W; HOLUM, J.R. **Química: A matéria e suas transformações**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. vol.1.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio; bases legais**. Brasília : MEC/SEMTEC, 2000.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. **Orientações Curriculares para o Ensino Médio: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias**. Brasília: MEC/Seb, 2006. v2.

BROWN, T. L. et al. **Química: a Ciência Central**. 9.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BUG GUIDE. *Dolomedes triton*. Disponível em: <<http://bugguide.net/node/view/194463>>. Acesso em: 16 set. 2011.

CARVALHO, M. A. DE.; ARRUDA, S. DE M. Dilemas e dificuldades apontadas pelos estagiários da licenciatura em física da UEL sobre a prática de ensino. **Anais EDUCERE & CIAVE**. Curitiba: PUCPR, 2008.

CASSEL, M. C. P.; FERREIRA, A. Por que as pererecas e as lagartixas não caem das paredes? **Bioikos**. Campinas, v.23, p.51-56, jan./jun. 2009.

CÃO DA PRADARIA. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A3o-da-pradaria>>. Acesso em: 25 set. 2011.

CLIMBING LEOPARD GECKO. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=DOaoxzacLdE&feature=related>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

CNN. **Stanford Stickybot Robot Gecko**. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=k2kZk6riGWU&feature=related>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

COLORADO - DIVISION OF WILDLIFE. Disponível em: <<http://wildlife.state.co.us/Education/TeacherResources/ColoradoWildlifeCompany/Pages/LittleTownCWCSpr2008.aspx>>. Acesso em: 28 set. 2011.

CUTNELL, J. D; JOHNSON, K. W. **Física**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v.1.

DRAGON FLY TV. **Gecko Feet**. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=AtSMRxyvW3M&feature=related>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

GASPAR, A. **Física**. 1 ed. São Paulo: Ática, 2004. Série Brasil.

GASPAR, A. **Física**: mecânica. São Paulo: Ática, 2000. v. 1.

GASPAR, A. **Física**: ondas, óptica e termodinâmica. São Paulo: Ática, 2000. v. 2.

GASPAR, A. **Física**: eletromagnetismo e física moderna. São Paulo: Ática, 2000. v. 3.

GECKOMOVESFOOT81230. Disponível em:
<<http://www.youtube.com/watch?v=iCSiipjptfA&feature=related>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

GECKO ROBOT. Disponível em:
<<http://www.youtube.com/watch?v=ECpY2N5rgcM&feature=related>>. Acesso em 29 jun. 2011.

HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de física**: mecânica. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v.1.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de física**: gravitação, ondas e termodinâmica. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v 2.

HANSEN, W. R.; AUTUMN, K. Evidence for Self-cleaning in Gecko Setae. **PNAS**, Washington, v.102, n.02, p.385-389, jan. 2005.

HU, D. L. **The Hydrodynamics of Water-walking Insects and Spiders**. 2006. 152 f. Dissertação (Doutorado em Filosofia) – Departamento de Matemática, Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Cambridge, 2006.

JUSUFI, A. et al. Active Tails Enhance Arboreal Acrobatics in Geckos. **PNAS**, Washington, v.105, n.11, p.4215-4219, mar. 2008.

KOTZ, J.C; TREICHEL, P.M; WEAVER, G.C. **Química Geral e Reações Químicas**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. vol.1.

KQED QUEST. **Bio-Inspiration: Nature as Muse**. Disponível em:
<<http://www.youtube.com/watch?v=JnBkbaFsZOY&feature=related>>. Acesso em 29 jun. 2011.

LITTLE SPARKS. Decaimento Atômico. Disponível em:
<<http://pamgodoy.blogspot.com/2009/12/decaimento-atomico.html>>. Acesso em: 14 mai. 2011.

LQES. **Laboratório de Química do Estado Sólido**. Disponível em:
<http://lqes.iqm.unicamp.br/canal_cientifico/lqes_news/lqes_news_cit/lqes_news_2007/lqes_news_novidades_1020.html>. Acesso em: 19 jul. 2011.

LUZ, A. M. R. DA; ÁLVARES, B. A. **Física**: ensino médio. 1.ed.São Paulo: Scipione, 2005. v.1.

LUZ, A. M. R. DA; ÁLVARES, B. A. **Curso de Física**. 6. ed. São Paulo: Scipione, 2005. v. 1.

MSPC. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/fldetc/fluid_0520.shtml>. Acesso em: 14 set. 2011.

MUNDO GUMP. **Lagartixas, animais incríveis**. Disponível em: <<http://www.mundogump.com.br/lagartixas-animais-incriveis/>>. Acesso em 11 mai. 2011.

NASCIMENTO, T. G.; ALVETTI, M. A. S. Temas científicos contemporâneos no ensino de biologia e física. **Ciência e Ensino**, v. 1, n. 1, 2006.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Prairie Dog**. Disponível em: <<http://animals.nationalgeographic.com/animals/mammals/prairie-dog/>>. Acesso em: 26 set. 2011.

NATIVE HAWAIIAN SILVER WATER SPIDER. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=CFb54UbEH3s&NR=1>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

NEW SCIENTIST. **Acrobatic geckos steer with their tails**. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=n83uUoTWx5E&feature=related>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

NEW SCIENTIST. **Robots inspired by animals**. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=Tq8Yw19bn7Q&NR=1&feature=fvwp>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

OKUBO, A.; ACKERMAN, J. D.; SWANEY, D. P. Passive Diffusion in Ecosystems. In: OKUBO, A.; LEVIN, S. A. **Diffusion and Ecological Problems**: Modern Perspectives. 2ed. Princeton: Springer, 2002. cap.3, p.92-96.

OKUNO, E; CALDAS, I.L; CHOW, C. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**. São Paulo: Harper e Row do Brasil, 1982.

PLATAFORMA DE FORÇA TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISES BIOMECÂNICAS E CINESIOLÓGICAS. Disponível em:

<<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/3899/2903>>. Acesso em: 04 out. 2011.

PEREIRA, D. R. DE O.; AGUIAR, O. Ensino de física no nível médio: tópicos de física moderna e experimentação. **Revista Ponto de Vista**, Viçosa, v.3, 2006. Disponível em:

<<http://www.coluni.ufv.br/revista/docs/volume03/ensinoFisica.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2011.

PERUZZO, F. M; CANTO, E. L. **Química**: na abordagem do cotidiano. 3 ed. São Paulo: Moderna, 2007.

PETERMAN, T. **Geckos Climbs a Wall Using Van der Waals Force**. Liubliana: Faculdade de Matemática e Física, Universidade de Liubliana, 2006.

PRADO, T. Biomimética: a indústria sustentável imita a natureza. Disponível em:

<http://super.abril.com.br/blogs/planeta/biomimetica-a-industria-sustentavel-imita-a-natureza/>. Acesso em: 27 de abr. 2011.

PRAIRIE DOG. Disponível em:

<http://www.meridian.k12.il.us/middle%20school/student_work/bmmm_mammal_project/prairie_dog.html>. Acesso em: 28 set. 2011.

PRAIRIE DOG COALITION. **Prairie Dog - A Brief Intro to the World of P-Dogs**. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=s-mJxt6-Riw>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

PRAIRIE DOGS: AMERICA'S MEERKATS - SOCIAL LIFE. Disponível em:

<<http://www.youtube.com/watch?v=PysWPMSjukk>>. Acesso em: 06 out. 2011.

QUIMICA.UFSC.BR. **Forças Intermoleculares**. Disponível em:

<http://www.qmc.ufsc.br/quimica/pages/especiais/revista_especiais_forcas_intermoleculares.html>. Acesso em 27 abr. 2011.

RODRIGUES, D. M. **As interações fundamentais da natureza**. 2010. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Física Ambiental) – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, 2010.

ROSA, C. W. DA; ROSA, Á. B. DA. Ensino de Física: objetivos e imposições no ensino médio. **Revista electrónica de enseñanza de las ciencias**, v.4, n.1, 2005.

RUSSEL, J. B. **Química Geral**. 2. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1994. v.1.

SCIENCENTRAL. **Gecko Stitches**. Disponível em:
<<http://www.youtube.com/watch?v=3uts4DGqf8U&feature=related>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

SCIENCE DAILY. **Mimicking Gecko Feet: Dry Adhesive Based On Carbon Nanotubes Gets Stronger**. Disponível em: <<http://www.sciencedaily.com/releases/2008/10/081009143704.htm>>. Acesso em: 01 out. 2011.

STEVEN, V. Organisms That Capture Currents. **Scientific American**, New York, v. 239, n.2, p.108-117, ago. 1978.

SUTER, R. B. et al. Locomotion on the Water Surface: Propulsive Mechanisms of the Fisher Spider *Dolomedes triton*. **The Journal of Experimental Biology**. Cambridge, vol.200, p.2523-2538, jul. 1997.

THE MALAYSIAN LIFE. Tokay Geckos For Sale. Disponível em:
<<http://themalaysianlife.blogspot.com/2010/09/tokay-geckos-for-sale.html>>. Acesso em: 05 jul. 2011.

THERAPHOSA BLONDI. Disponível em:
<http://www.tarantulas.ru/photo/Theraphosa_blondi_3_foto.htm>. Acesso em: 24 set. 2011.

TIPLER, P. A; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.1.

TIPLER, P. A; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**: Física Moderna: mecânica quântica, relatividade e estrutura da matéria. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.3.

TOTALLY WILD. **Water Spider - Jesus Spider**. Disponível em:
<<http://www.youtube.com/watch?v=IHjc4gxob3s&feature=related>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

VISUAL PHYSICS. **Surface Tension**. Disponível em:
<http://www.physics.usyd.edu.au/teach_res/jp/fluids/surface.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2011.

VOGEL, S.; BRETZ, W. L. Interfacial Organisms: Passive Ventilation in the Velocity Gradients Near Surfaces. **Science**. New York, v.175, p.210-211, jan. 1972.

ZHANG, X. et al. Bioinspired Aquatic Microrobot Capable of Walking on Water Surface Like a Water Strider. **ACS Applied Material and Interfaces**. Washington, v.3, n.7, p.2630-2636, jun. 2011.

WALKING ON WATER. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=FBVjhuowEOI>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

WANDERLEY, C. **Biologia em foco**. São Paulo: FTD, 2002.

WATER SPIDER. Disponível em:
<<http://www.youtube.com/watch?v=d7Alu015y8c&feature=related>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

WATER WALKING. Disponível em:
<<http://www.me.gatech.edu/hu/Striderweb/striderweb.html>>. Acesso em: 03 out. 2011.

WIKIPÉDIA. **Viscosidade**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Viscosidade>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

YOUNG, H. D; FREEDMAN, R. A. **Física I: mecânica**. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.

YOUNG, H. D; FREEDMAN, R. A. **Física II: termodinâmica e ondas**. 10. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2003.