

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE

ANDAR OU CORRER NA CHUVA?
ESTUDO DE COLISÕES DE GOTAS DE ÁGUA COM SUPERFÍCIES
ABSORVENTES

HENRIQUE PATRIOTA ALVES

ORIENTADOR:
PROF. DR. PAULO HENRIQUE RIBEIRO PEIXOTO

CO-ORIENTADOR:
PROF. DR. CHARLIE SALVADOR GONÇALVES

CARUARU - PERNAMBUCO - BRASIL
AGOSTO - 2014

Henrique Patriota Alves

Andar ou Correr na Chuva?
Estudo de Colisões de Gotas de Água com Superfícies Absorventes

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Física - Licenciatura. Núcleo de Formação Docente, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: Prof. Paulo Henrique Ribeiro Peixoto.

Co-orientador: Prof. Charlie Salvador Gonçalves.

Caruaru
2014

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva CRB/4-1223

- A474a Alves, Henrique Patriota.
Andar ou correr na chuva?: estudo de colisões de gotas de água com superfícies absorventes. / Henrique Patriota Alves. – Caruaru, 2014.
75 f., il.; 30 cm.
- Orientador: Paulo Henrique Ribeiro Peixoto.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Física - Licenciatura, 2014.
Inclui referências.
1. Chuva. 2. Superfície (Física). 3. Investigação. 4. Experiências - Física. I. Peixoto, Paulo Henrique Ribeiro (Orientador). II. Título.
- 371.12 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2014-129)



Campus
AGRESTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
GRADUAÇÃO EM FÍSICA – LICENCIATURA

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA NA
DISCIPLINA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

HENRIQUE PATRIOTA ALVES

Título

**“ANDAR OU CORRER NA CHUVA? ESTUDO DE COLISÕES DE
GOTAS DE ÁGUA COM SUPERFÍCIES ABSORVENTES”**

A comissão examinadora composta pelos professores: PAULO HENRIQUE RIBEIRO PEIXOTO, NFD/UFPE; SÉRGIO DE LEMOS CAMPELLO, NFD/UFPE e JOÃO FRANCISCO LIBERATO DE FREITAS, NFD/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o graduando **HENRIQUE PATRIOTA ALVES APROVADO.**

Caruaru, 01 de agosto de 2014.

~~JOÃO F. L. DE FREITAS~~
Coordenador do curso de Física –
Licenciatura

~~PAULO H. R. PEIXOTO~~
Orientador e 1º Examinador

~~SÉRGIO L. CAMPELLO~~
2º Examinador

~~JOÃO F. L. DE FREITAS~~
3º Examinador

O poder da vontade...

*À minha amada avó, Dulcineia (Mãe Dulci).
Tudo que consegui até hoje foi porquê você acreditou
em mim.
O homem que sou hoje foi devido à sua criação.
Essa conquista é nossa!*

*À minha amada, Paula Juliane.
Poder dividir essa alegria com você é algo maravilhoso.
Você chegou, trazendo consigo o amor que eu tanto
precisava.*

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 10 |
| 2 | Modelos Teóricos | 12 |
| 2.1 | Modelo de Partida | 13 |
| 2.2 | Modelo Refinado | 18 |
| 3 | Investigação Experimental | 26 |
| 3.1 | O Aparato Experimental | 26 |
| 3.1.1 | Sistema de Gotejamento | 28 |
| 3.1.2 | Procedimento para medição do diâmetro das gotas de água | 33 |
| 3.1.3 | Plataforma | 34 |
| 3.1.4 | Superfícies Absorventes | 35 |
| 3.1.5 | Circuito para Interface | 36 |
| 3.1.6 | Programando a Porta Paralela | 39 |
| 3.1.7 | Programa para Controle do Pistão Pneumático | 41 |
| 3.1.8 | Medição da Massa de Água Absorvida | 41 |
| 3.2 | Resultados | 43 |
| 4 | Conclusões e Perspectivas | 56 |
| 4.1 | Conclusões | 56 |
| 4.2 | Perspectivas | 57 |
| | Referências Bibliográficas | 59 |
| | Apêndice | 61 |
| A | Comparações com Modelos Anteriores | 61 |
| B | Lista de Publicações | 70 |
| C | Circuito para interface com computador | 71 |
| D | Fotografias do Aparato Experimental | 73 |
| E | Programa de controle da porta paralela | 75 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Características do modelo de partida em relação ao referencial S (solo). A densidade volumétrica média de água é denotada por ρ | 13 |
| 2.2 | Características do modelo de partida em relação ao referencial S' (referencial do paralelepípedo). | 14 |
| 2.3 | Massa de água que atinge o paralelepípedo (em unidades do valor limite M_F) em função de sua velocidade (em unidades da velocidade de queda da chuva v_q). | 18 |
| 2.4 | Massa de água que é absorvida pelo paralelepípedo (em unidades do valor limite $M_F = \rho bcL$) em função de sua velocidade (em unidades da velocidade de queda da chuva v_q). | 23 |
| 3.1 | Esquema de funcionamento da montagem experimental para o estudo de colisões de gotas de água com superfícies absorventes. | 27 |
| 3.2 | Confecção do reservatório de água. | 28 |
| 3.3 | Perspectiva explodida do gotejador. | 29 |
| 3.4 | Montagem experimental para medição do diâmetro das gotas de água. | 30 |
| 3.5 | Versão final da cabeça do gotejador capaz de gerar gotas com 6 mm de diâmetro. | 30 |
| 3.6 | Versão final da cabeça do gotejador capaz de gerar gotas com 2,5 mm de diâmetro. | 32 |
| 3.7 | Versão final da cabeça do gotejador capaz de gerar gotas com 4 mm de diâmetro. | 33 |
| 3.8 | Sistema de gotejamento. Foto capturada em nosso laboratório, onde esse aparato encontra-se montado. | 33 |
| 3.9 | Montagem experimental para medição do diâmetros das gotas de água. | 34 |
| 3.10 | Itens da plataforma de colisões. Foto capturada em nosso laboratório. | 35 |
| 3.11 | Sequência de confecção das superfícies absorventes. | 36 |
| 3.12 | Placas revestidas com tecido. | 36 |
| 3.13 | Funcionamento do CI 4N25. Datasheet retirado da internet [9]. | 37 |
| 3.14 | Diagrama do circuito. | 37 |
| 3.15 | Modo de alimentação do circuito através da LPT. Imagem extraída parcialmente da internet [10]. | 38 |
| 3.16 | Interface para porta paralela. | 39 |
| 3.17 | Endereços da porta LPT. | 40 |
| 3.18 | Registradores da porta LPT. | 40 |
| 3.19 | Medida da massa final m_f , após a colisão com dez gotas de água. | 43 |
| 3.20 | Pontos experimentais da massa de água absorvida em função da pressão (gotas de 6 mm de diâmetro). | 51 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.21 | Pontos experimentais da fração absorvida em função da pressão (gotas de 4 mm de diâmetro). | 52 |
| 3.22 | Pontos experimentais da fração absorvida em função da pressão (gotas de 2,5 mm de diâmetro). | 53 |
| 3.23 | Pontos experimentais da fração absorvida em função da pressão (gotas de 6 mm de diâmetro). | 54 |
| 3.24 | Gráfico de γ_F versus v , com $v_q = 9m/s$ | 54 |
| A.1 | Representação geométrica do indivíduo, extraída do artigo de Stern [2]. | 61 |
| A.2 | Representação geométrica do indivíduo - extraída do artigo de De Angelis [1]. | 63 |
| A.3 | Representação geométrica de um indivíduo que desloca-se na direção do eixo x sob chuva (figura extraída do artigo de Bailey [3]). | 64 |
| A.4 | Representação geométrica do indivíduo, extraída do artigo de Kroatz [4]. | 66 |
| A.5 | Representação do indivíduo retirada do artigo de Ehrmann e Blachowicz [5]. | 68 |
| C.1 | Circuito no formato para impressão na PCI | 71 |
| C.2 | Ilustração dos componentes na PCI | 71 |
| D.1 | Versão final do sistema de colisões de gotas de água com superfícies absorventes. | 73 |
| D.2 | Vista superior da plataforma. | 74 |
| D.3 | Placa revestida com tecido presa aos trilhos. | 74 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Resultado da primeira série de colisões (flanela). | 44 |
| 3.2 | Resultado da segunda série de colisões (flanela) | 45 |
| 3.3 | Resultado da terceira série de colisões (flanela) | 45 |
| 3.4 | Valores médios da massa absorvida para a superfície revestida com flanela de acordo com a pressão do pistão. | 46 |
| 3.5 | Resultado da primeira série de colisões (jeans) | 46 |
| 3.6 | Resultado da segunda série de colisões (jeans) | 47 |
| 3.7 | Resultado da terceira série de colisões (jeans) | 48 |
| 3.8 | Valores médios da massa absorvida para a superfície revestida com jeans de acordo com a pressão do pistão. | 48 |
| 3.9 | Resultado da primeira série de colisões (poliéster) | 49 |
| 3.10 | Resultado da segunda série de colisões (poliéster) | 49 |
| 3.11 | Resultado da terceira série de colisões (poliéster) | 50 |
| 3.12 | Valores médios da massa absorvida para a superfície revestida com poliéster de acordo com a pressão do pistão. | 50 |
| 3.13 | Comparação da massa de água absorvida para os três tipos de tecido (usando gotas com 6 mm de diâmetro). | 51 |
| 3.14 | Comparação da massa de água absorvida para os três tipos de tecido (usando gotas de 4 mm de diâmetro). | 52 |
| 3.15 | Comparação da massa de água absorvida para os três tipos de tecido (usando gotas de 2,5 mm de diâmetro). | 53 |

Agradecimentos

Durante minha graduação Deus enviou pessoas para contribuírem em minha formação. Pessoas essas que sempre estiveram perto de mim e pessoas novas, nas quais construímos grande amizade. Os conselhos, as experiências compartilhadas, o apoio nas horas difíceis, entre tantas outras coisas... Em especial,

- Agradeço a Deus, por conceder mais uma vitória em minha vida;
- Agradeço a minha Mãe, Aldira e Meu irmão, Ellyakim, pelo apoio familiar;
- Agradeço ao meu orientador, prof. Paulo Peixoto, por todo esse tempo em que trabalhamos juntos, pelos seus ensinamentos, pela confiança que depositou em mim e pela amizade que construímos;
- Agradeço ao meu co-orientador, prof. Charlie Salvador, pela sua grande contribuição na parte experimental deste trabalho. Sem sua experiência, acredito que este trabalho teria tomado rumos diferentes;
- Agradeço aos professores João Francisco e Jehan Fonseca, por me ajudarem na minha busca pela pós-graduação;
- Agradeço a professora Giovana Siracusa, por sempre acreditar em meu potencial e por me ajudar a construir uma base matemática tão sólida;
- Agradeço aos meus grandes amigos, Valdemir Manoel e Maylson Marckesan, nos quais começamos juntos este curso e estamos concluindo juntos. Acredito que a amizade firmada em uma graduação como a nossa é para a vida inteira. Desejo muito sucesso aos dois;
- Agradeço ao meu grande amigo, Aristóteles Rodrigues, pela amizade construída, pelos seus conselhos valiosos, por sempre ter mostrado que aprender física conhecendo a história é muito mais empolgante. Que você sempre possa discutir sobre ciência de forma tão elegante. Desejo muito sucesso em sua vida;
- Ao meu amigo Hebio Junior, pela amizade firmada. Desejo muito sucesso em sua jornada;
- Aos meus amigos de sempre, Lêdson Inácio, André Rocha, Daniel Antônio, Dimicartty Batista, Dayllon Sales, Luan Quintino e Florisval Protásio, pelo apoio e momentos descontraídos.

ANDAR OU CORRER NA CHUVA? ESTUDO DE COLISÕES DE GOTAS DE ÁGUA COM SUPERFÍCIES ABSORVENTES

Autor: Henrique Patriota Alves

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Peixoto

Co-orientador: Prof. Dr. Charlie Salvador Gonçalves

Resumo

Na chuva, uma pessoa se molha menos andando ou correndo? Ao longo de três décadas esse problema vem gerando publicações em importantes revistas de ensino de física, mas todas sugerem - através apenas de elaborações de modelos teóricos, sem nenhuma investigação experimental - que correndo molha-se menos. Desenvolvemos um modelo teórico e elaboramos uma investigação experimental que indicou que o problema é mais complexo que vislumbrado pelos autores dos trabalhos publicados, porque o fenômeno da absorção de uma gota de água deve ser cuidadosamente investigado. Nosso modelo teórico fundamenta-se na ideia, não considerada nos trabalhos anteriores, de que não necessariamente todo o volume de uma gota de chuva que atinge o indivíduo é absorvido pelo mesmo. Ou seja, atingir é diferente de molhar. Nossa hipótese adicional é que a fração absorvida depende do ângulo de incidência e, conseqüentemente, da velocidade do indivíduo. E foi isso que investigamos experimentalmente: como a fração absorvida varia com a velocidade de percurso. Os resultados obtidos mostram, como havia sido imaginado, um aumento na fração absorvida da massa de cada gota de água à medida que a velocidade das superfícies absorventes aumenta, podendo abrir caminho para uma série de interessantes investigações.

Palavras-chave: chuva, fração absorvida, modelagem, investigação experimental.

Capítulo 1

Introdução

Na chuva, uma pessoa se molha menos andando ou correndo? A priori, a resposta óbvia seria que correndo molha-se menos, pois o tempo de exposição na chuva seria menor. Porém uns pensam de maneira oposta, levantando o fato menos óbvio de que, andando, o fluxo de água sobre o indivíduo (ou seja, o volume total de água que atinge a superfície desse indivíduo por unidade de tempo) diminui, devido à diminuição do ângulo de inclinação da chuva em relação à direção vertical, no referencial do mesmo. De modo que o confronto das duas respostas dá-se da seguinte maneira: se a pessoa está andando, menos água a atinge a cada segundo; em contrapartida, ela conclui seu percurso em mais tempo. Se ela está correndo, mais água a atinge a cada segundo, mas em compensação o percurso é concluído em menos tempo. Então, qual desses fatores (tempo de percurso e fluxo de água sobre o sujeito) tem maior peso, se o indivíduo pretende concluir seu trajeto menos molhado? É melhor andar ou correr?

Numa tentativa de responder esse problema, alguns modelos teóricos foram propostos em um período de quase 30 anos [1-5]. Mas todos preveem que, representando-se o indivíduo por um sólido geométrico que translada uma distância fixa sob uma chuva vertical constante sem girar ou se deformar, esse se molha menos quanto maior for sua velocidade. Ou seja, no caso de uma chuva vertical constante é melhor correr, mas, segundo De Angelis [1], *“By running faster you get less wet, but the benefit that you get beyond the speed of brisk walk does not justify the supplementary effort”*, que numa tradução livre significa que o benefício resultante de se mover mais rapidamente que em uma caminhada vigorosa pode não compensar o esforço adicional.

Com a equivalência entre os cinco modelos apresentados, o problema de andar ou correr na chuva parecia estar definitivamente resolvido (ao menos para o caso de uma chuva vertical constante). É preciso entender, porém, que na física um modelo é uma representação (geralmente em linguagem matemática) de um fenômeno, não o fenômeno em si. O detalhe é que em nenhum dos cinco trabalhos publicados foi considerada explicitamente a questão da *absorção* de água pelo indivíduo, ficando

implícita a suposição de que cada gota de chuva que o atinge é completamente absorvida pelo mesmo. Acreditamos que tal hipótese não corresponde à realidade, ou seja, nem sempre cada gota de chuva que atinge o sujeito é *totalmente absorvida*. De modo que neste trabalho apresentamos a elaboração de um modelo refinado para o problema. Sabemos que o sucesso das teorias físicas acontece após a validação experimental, sendo que isso não quer dizer que a teoria é a própria realidade, mas que a descreve bem. Por isso, para testarmos se o modelo por nós proposto é válido, elaboramos uma investigação experimental sobre o problema da colisão de uma gota de água com uma superfície absorvente. Uma vez que nosso modelo refinado possui um *ansatz*¹ para a fração absorvida de uma gota de água, ele deve ser verificado experimentalmente.

Nosso trabalho é de natureza teórico-experimental, logo, nossos objetivos são a elaboração de um modelo refinado que aproxime-se mais da realidade e a verificação experimental do mesmo. E, com isso, temos um exemplo claro de como os físicos trabalham, tanto os teóricos quanto os experimentais. Uma vez que os problemas enfrentados pelos cientistas são muito diferentes dos que os estudantes de física encontram nos livros-texto, que sempre tem a resposta no final do livro, eles buscam modelar a natureza usando a linguagem matemática (os modelos teóricos) e planejam e executam experimentos para teste de suas hipóteses.

Este trabalho encontra-se dividido em quatro capítulos, no qual o primeiro é esta introdução e os outros estão formulados da seguinte maneira:

- Capítulo 2 - Modelos Teóricos: neste capítulo formulamos um modelo inicial, denominado de modelo de partida. Em seguida verificamos que tal modelo de partida é equivalente aos modelos encontrados na literatura num período de quase 30 anos. E por fim, apresentamos o nosso modelo refinado, como um pequeno avanço na discussão do problema de andar ou correr na chuva.

- Capítulo 3 - Investigação Experimental: aqui é detalhado todo o planejamento, montagem e execução do experimento para investigação da fração absorvida de uma gota de água numa colisão com uma superfície absorvente. Em sua última seção apresentamos nossos resultados experimentais.

- Capítulo 4 - Conclusões e Perspectivas: neste último capítulo apresentamos algumas reflexões sobre as contribuições concebidas com este trabalho e discutimos um pouco sobre as possibilidades que o mesmo pode abrir.

¹Palavra alemã usada pela comunidade científica, que representa uma solução estimada de uma equação ou problema em questão.

Capítulo 2

Modelos Teóricos

A modelagem em física consiste em representações de fenômenos da natureza usando a linguagem matemática. Os modelos são elaborados mantendo-se a essência do que está sendo estudado e adicionando-se, aos poucos, elementos do fenômeno para que o modelo possa aproximar-se cada vez mais da realidade. Neste texto, nos referimos à palavra “essência” como o mínimo de características do fenômeno que devem ser mantidas para que um modelo teórico possa ser desenvolvido. Por exemplo, em nosso trabalho, como estamos modelando um indivíduo deslocando-se sob chuva, temos que ter em nosso modelo a representação de uma chuva e algo para representar o indivíduo. No que se diz respeito a aproximar-se da realidade, queremos destacar que isso está relacionado com o refinamento do modelo, ou seja, não significa que estamos descrevendo a própria realidade, pois acreditamos que estamos longe disso, mas significa que estamos adicionando elementos observados em nossas experiências diárias. A inserção de elementos ou, como preferimos, o refinamento de um modelo, às vezes pode custar um preço muito alto, pois o refinamento está atrelado ao número de variáveis que você adiciona no seu problema e à sofisticação matemática que elas exigem. Não queremos dizer que representar a natureza exija modelos extremamente complicados. Um exemplo está no modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, no qual, exceto pela hipótese de quantização do momento angular, as equações desenvolvidas exigiram apenas conhecimentos básicos de física. E a “simplicidade” não tira os créditos do modelo; pelo contrário, o torna elegante. Neste capítulo, mostraremos um exemplo de como é a elaboração de um modelo teórico, as considerações e limitações e como aperfeiçoá-lo, adicionando hipóteses não consideradas anteriormente. Iniciamos com um modelo de partida para o problema de andar ou correr na chuva, no qual é equivalente aos modelos encontrados na literatura, e adicionamos a nossa hipótese fundamental para o refinamento: apenas uma fração da massa de água incidente no indivíduo é completamente absorvida.

2.1 Modelo de Partida

Nosso modelo de partida é, essencialmente, o que foi apresentado por De Angelis [1]. Nele, o problema da absorção de água não é considerado. Ou seja, não consideramos nenhuma distinção entre atingir e molhar. Idealizamos um indivíduo representando sua forma real por um paralelepípedo de dimensões a , b e c se deslocando com uma velocidade horizontal constante \vec{v} , com respeito a um sistema de referência S fixo em relação ao solo, conforme mostrado na Fig. 2.1. A velocidade vertical de queda da chuva, \vec{v}_q , foi considerada constante - ou seja, estamos assumindo que todas as gotas de chuva têm a mesma velocidade terminal \vec{v}_q e que atingem essa velocidade antes de chegarem ao paralelepípedo, o que não necessariamente ocorre no caso de uma chuva simulada em laboratório, vale salientar. Uma distância fixa L é percorrida pelo paralelepípedo, enfrentando uma densidade volumétrica média de água

$$\rho = \lambda \rho_{\text{água}}, \quad (2.1)$$

em que λ é a fração de volume ocupado pelas gotas de chuva em um volume macroscópico da ordem de 1 m^3 , e $\rho_{\text{água}} (\approx 1 \text{ g/cm}^3)$ é a densidade da água. Veja, na Fig. 2.1, a nossa representação geométrica para o problema!

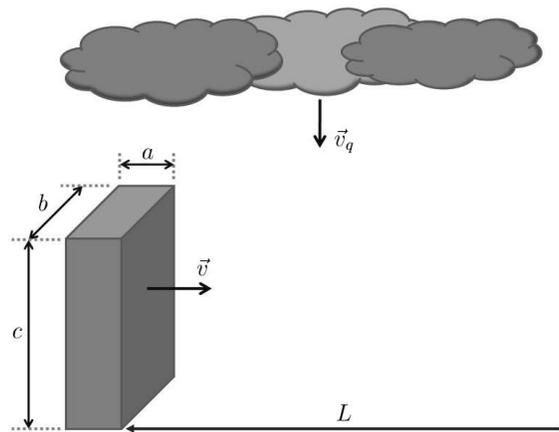


Figura 2.1: Características do modelo de partida em relação ao referencial S (solo). A densidade volumétrica média de água é denotada por ρ .

Entenda que ao trabalharmos com ρ , em vez de $\rho_{\text{água}}$, estamos modelando a chuva como um *continuum* de densidade ρ . Embora isto não altere os valores calculados para a massa de água que atinge o paralelepípedo no percurso de comprimento L , o mesmo não pode ser dito em relação ao volume de água que atinge o paralelepípedo

em tal percurso. Por isso, usaremos M e V para denotar, respectivamente, a massa e o volume reais de água que atingem o paralelepípedo, e V_{cont} para denotar o volume de água que atinge o indivíduo modelando-se a chuva como um *continuum*.

Analisemos a incidência de água sobre o paralelepípedo do ponto de vista do mesmo, ou seja, em um novo sistema de referência S' que se move com velocidade \vec{v} em relação ao referencial S :

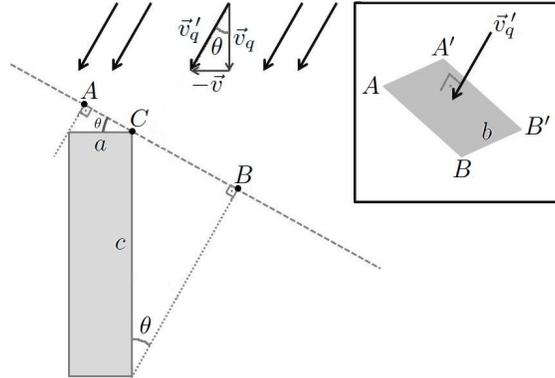


Figura 2.2: Características do modelo de partida em relação ao referencial S' (referencial do paralelepípedo).

De acordo com a Fig. 2.2, a distância entre os pontos A e B é dada por

$$\overline{AB} = a \cos \theta + c \sin \theta, \quad (2.2)$$

em que θ é o ângulo que a velocidade \vec{v}'_q de uma gota de chuva no referencial S' faz com a vertical.

Observe que

$$\cos \theta = \frac{v_q}{v'_q} \quad e \quad \sin \theta = \frac{v}{v'_q}, \quad (2.3)$$

com

$$v'_q = \sqrt{v_q^2 + v^2}. \quad (2.4)$$

Substituindo a Eq. (2.3) na Eq. (2.2), obtemos

$$\overline{AB} = \frac{av_q + cv}{v'_q}. \quad (2.5)$$

O volume V de água que atinge o paralelepípedo é aquele que atravessa a região retangular $AA'BB'$ (veja a janela no canto superior direito da Fig. 2.2) no tempo de percurso $\Delta t = L/v$, e a massa de água correspondente é, portanto,

$$M = \rho_{\text{água}} V = \rho V_{\text{cont}} = \rho \Delta t \frac{V_{\text{cont}}}{\Delta t} = \frac{\rho L}{v} \frac{V_{\text{cont}}}{\Delta t}. \quad (2.6)$$

Substituindo na Eq. (2.6) o valor do fluxo (calculado no referencial S') $\Phi \equiv V_{\text{cont}}/\Delta t = \overline{AB}bv'_q$, aquela igualdade é modificada para

$$M = \frac{\rho L}{v} \overline{AB}bv'_q. \quad (2.7)$$

Considerando a igualdade (2.5), a igualdade (2.7) é modificada para

$$\boxed{M(v) = \rho bcL + \frac{\rho abLv_q}{v}}. \quad (2.8)$$

Esta é a massa de água que atinge o paralelepípedo de dimensões a , b e c quando este percorre horizontalmente uma distância L com velocidade v sob uma chuva vertical, com densidade volumétrica média de água ρ , que cai com velocidade v_q (veja Fig 2.1). Ou seja, esta é a principal equação desta seção. Está claro que M cai com o aumento de v .

Revedo o desenvolvimento que culminou na igualdade (2.8), você irá concordar que podemos reescrever (basta observar que, na Fig. 2.2, $\overline{AB} = \overline{AC} + \overline{CB}$):

$$M = \frac{\rho L}{v} (\overline{AC} + \overline{CB})bv'_q = \frac{\rho L}{v} \overline{AC}bv'_q + \frac{\rho L}{v} \overline{CB}bv'_q = \frac{\rho L}{v} a \cos \theta bv'_q + \frac{\rho L}{v} c \sin \theta bv'_q = \rho bcL + \frac{\rho abLv_q}{v} \Rightarrow$$

$$M = M_F + M_S, \quad (2.9)$$

em que

$$M_F = \rho bcL \quad (2.10)$$

e

$$M_S = \frac{\rho abLv_q}{v} \quad (2.11)$$

são, respectivamente, a massa de água que atinge a região frontal do paralelepípedo e a massa de água que atinge a região superior do mesmo, no percurso de comprimento L .

Observe que o termo $M_F = \rho bcL$ é a massa de água à frente do paralelepípedo da Fig. 2.1, ou seja, em um paralelepípedo imaginário de dimensões b , c e L . Essa é a massa de água “varrida” pela região frontal do paralelepípedo que representa o indivíduo quando o percurso de comprimento L é cumprido e, assim, seu valor independe da velocidade de queda da chuva e da velocidade de percurso (desde que esta não seja nula - já que estamos supondo que a distância L é percorrida). O termo $M_S = \rho abLv_q/v$ pode ser melhor analisado reescrevendo-se $M_S = \rho\Phi\Delta t$, em que $\Phi = abv_q$ é o fluxo de água, modelada como um continuum de densidade ρ , sobre a região superior do paralelepípedo, e $\Delta t = L/v$ é o tempo de percurso.

Agora vamos fazer alguns testes do nosso modelo de partida. O que ocorre quando o indivíduo leva um tempo muito grande (tendendo ao infinito) para cumprir seu trajeto? Significa que o sujeito vai passar um tempo infinito sob a chuva, de modo que uma massa de água infinita irá incidir em sua região superior, que somada como a massa de água a sua frente irá resultar numa massa total M infinita. De fato, na expressão (2.8), tomando o limite quando $v \rightarrow 0$ (equivalente ao limite em que $\Delta t \rightarrow \infty$), temos

$$\lim_{v \rightarrow 0} \left(\rho bcL + \frac{\rho abLv_q}{v} \right) = \infty.$$

Em outras palavras, temos que $M_S \rightarrow \infty$ e com isso a soma $M = M_F + M_S$ também vai para infinito. Agora vamos para a situação contrária, ou seja, suponha que o indivíduo irá percorrer a distância L com uma velocidade altíssima. O que ocorre com a massa M ? À medida que a velocidade do paralelepípedo aumenta ($v \rightarrow \infty$), a direção da velocidade de queda da chuva vai se horizontalizando cada vez mais, no referencial S' , e o retângulo $AA'BB'$ na Fig. 2.2 vai tendendo à região frontal do paralelepípedo. Na expressão (2.8), tomando o limite quando $v \rightarrow \infty$, temos

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \left(\rho bcL + \frac{\rho abLv_q}{v} \right) = \rho bcL + 0 = M_F$$

Ou seja, não haverá incidência de água na superfície superior, de modo que o indivíduo irá receber água apenas na sua face frontal ($M = M_F$). Resumindo nossas observações, temos que

$$\lim_{v \rightarrow 0} M = \infty \quad \text{e} \quad \lim_{v \rightarrow \infty} M = M_F.$$

A igualdade (2.8) pode ser reescrita de uma forma mais adequada a uma tentativa de verificação experimental, observando-se que o produto ρv_q é a massa \tilde{M} de água que atinge o solo por unidade de tempo por unidade de área. Resultado:

$$M = \tilde{M}bL \left(\frac{c}{v_q} + \frac{a}{v} \right). \quad (2.12)$$

Também mais adequada que a igualdade (2.8) a uma tentativa de verificação experimental é a igualdade

$$V = \tilde{V}bL \left(\frac{c}{v_q} + \frac{a}{v} \right), \quad (2.13)$$

em que V é o volume de água que atinge o paralelepípedo no percurso de comprimento L e \tilde{V} é o volume de água que atinge o solo por unidade de tempo por unidade de área. Obviamente, V é proporcional a M e \tilde{V} é proporcional a \tilde{M} ($V = M/\rho_{\text{água}}$ e $\tilde{V} = \tilde{M}/\rho_{\text{água}}$). Vale observar que \tilde{V} é a chamada *taxa de precipitação de chuva*, que pode ser expressa em mm/h. O que significa, por exemplo, uma taxa de precipitação de 4 mm/h (que corresponde a uma chuva moderada, segundo Caracciolo e colaboradores [6])? Significa que, mantida essa taxa de precipitação, a cada hora 4 mm³ de água atingem uma região do solo com 1 mm² de área, resultando em uma elevação de 4 mm no nível de água.

A Fig. 2.3 apresenta o gráfico de M/M_F versus v/v_q , com $c/a = 15$ (o valor usando por De Angelis [1], que é bastante razoável para um indivíduo de estatura mediana, nos padrões brasileiros [7]). Fazendo as contas obtemos

$$\frac{M}{M_F} = 1 + \frac{1}{15v/v_q}. \quad (2.14)$$

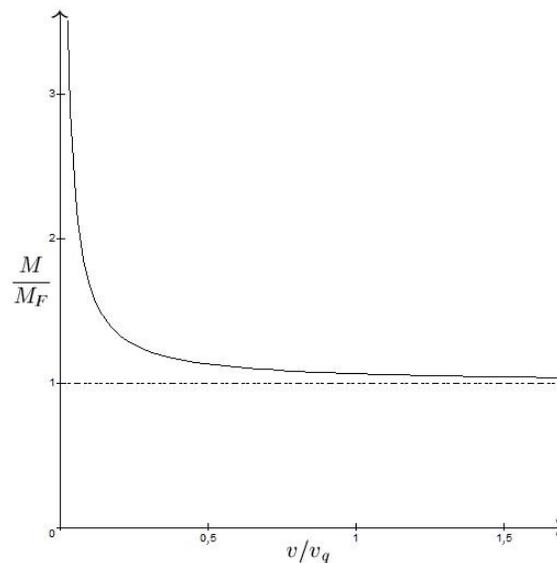


Figura 2.3: Massa de água que atinge o paralelepípedo (em unidades do valor limite M_F) em função de sua velocidade (em unidades da velocidade de queda da chuva v_q).

A partir desta igualdade, você poderá verificar que, com $v_q = 9$ m/s, um indivíduo (modelado por um paralelepípedo com $c/a = 15$) movendo-se a 3 m/s é atingido por apenas aproximadamente 13% mais água que outro movendo-se a 10,44 m/s (100 m / 9,58 s - velocidade média para o atual recorde mundial nos 100 metros). Ou seja, concordaríamos incondicionalmente com a seguinte afirmativa: “correndo mais rápido você pode ficar menos molhado, mas o benefício de se ir além de uma caminhada rápida não justifica o esforço adicional” de De Angelis [1], não fosse o fato de que nem sempre cada gota que atinge o indivíduo é completamente absorvida por ele. Mas como o modelo de partida considera este fato, uma melhor reflexão sobre o efeito do aumento de velocidade será encontrada na seção seguinte, na qual apresentamos nosso modelo refinado.

2.2 Modelo Refinado

Nosso refinamento do modelo de partida apresentado na seção 2.1 fundamenta-se na ideia de que não necessariamente todo o volume de uma gota de chuva que atinge o paralelepípedo que representa o indivíduo é absorvido pelo mesmo. Ou seja, ATINGIR≠MOLHAR! Tentar prever, a partir de leis básicas da física, que fração da gota é absorvida em cada situação é tarefa extremamente complexa, de modo que apresentaremos aqui apenas uma conjectura simples (uma espécie de tentativa inicial) para essa fração, baseada em algumas experiências de pensamento descritas a seguir.

Todos sabemos que uma bola de tênis, ao ser fortemente golpeada por uma raquete, sofre uma grande deformação durante um intervalo de tempo muito pequeno. Quanto maior a componente da velocidade da bola perpendicular ao plano do encordoamento da raquete, no referencial desta, maior a deformação, e também maior é a velocidade adquirida pela bola quando a energia potencial associada à deformação é convertida em energia cinética. Agora vamos substituir, em nossa experiência de pensamento, a bola de tênis por uma bola de gelatina, de igual tamanho. Adicionalmente, tenhamos como cenário um ambiente com “gravidade zero”, como o interior de uma estação espacial em órbita. Então a bola de gelatina flutua imóvel, esperando ser golpeada por nossa raquete. De início imaginemos um golpe muito fraco. O que você visualiza? Nós visualizamos algo semelhante ao que ocorre com a bola de tênis ao ser fortemente golpeada: quanto maior a componente da velocidade da bola (agora de gelatina) perpendicular ao plano do encordoamento da raquete, no referencial desta, maior a deformação da bola, e também maior a velocidade adquirida pela bola quando a energia potencial associada à deformação é convertida em energia cinética. É claro que estaremos restritos a um intervalo de velocidades que corresponde a um golpe muito fraco.

Retomando nossa experiência de pensamento com a bola de gelatina em um ambiente com gravidade zero, imaginemos agora um golpe muito forte, como desferido por um tenista sobre uma bola de tênis. O que você visualiza? Nós visualizamos a bola de gelatina sendo espatifada pela raquete. O mais importante, contudo, é tentarmos imaginar “em camera lenta” o que ocorre com a bola. Visualizamos que se o plano do encordoamento se aproxima da bola de gelatina imóvel perpendicularmente ao seu vetor velocidade, um golpe forte faz com que o encordoamento “atravesse” a bola - espatifando-a, é claro, mas deixando a maior parte dela para trás. Perceba claramente o contraste entre o que ocorre com a bola de gelatina se ela é golpeada fraca ou fortemente pela raquete de tênis. Tal contraste não se observa com a bola de tênis.

Passemos a mais uma experiência de pensamento. Ainda no interior da estação espacial em órbita, vamos substituir a bola de gelatina por uma gota d’água, com diâmetro da ordem de 5 mm, e a raquete de tênis por uma raquete de tênis de mesa. Esta última substituição é necessária porque a gota d’água é pequena demais para ser golpeada pelo encordoamento da raquete de tênis. Como no caso da bola de gelatina, iniciemos com um golpe muito fraco. O que você visualiza? Nós visualizamos que ocorre com a gota d’água algo semelhante ao que ocorre com a bola de gelatina ao ser fracamente golpeada pela raquete de tênis: a gota molha um pouco a raquete, mas sofre uma deformação e é impulsionada pela mesma. Se o golpe é forte, assim como a bola de gelatina se espatifa e sua maior parte é atravessada pela raquete de tênis, a maior parte da gota se espalha pela raquete de tênis de mesa. Se a raquete

está revestida com um tecido (como algodão, poliéster etc.), a água que se espalha é absorvida.

Se você concordou com nossas experiências de pensamento, acreditamos que irá concordar com a seguinte conclusão: *quando uma gota colide em alta velocidade (típica de uma gota de chuva em queda) com uma superfície plana absorvente, quanto maior a componente da velocidade da gota perpendicular a essa superfície, no referencial da mesma, maior a fração absorvida da gota.* Nossa conjectura para essa fração, que denotamos por γ , não pretende ser fiel à realidade (seria muita sorte nossa se isso ocorresse, pois, quando se trata de fluidos, as coisas usualmente são muito mais complicadas do que essas experiências de pensamento sugerem). Buscamos apenas algo simples e que atendesse à conclusão apresentada no parágrafo anterior, para em seguida examinarmos de que forma é modificado o modelo de partida, na esperança de avançarmos um pouco na análise do problema de andar ou correr na chuva.

Para a face frontal do paralelepípedo da Fig. 2.1, nossa conjectura é

$$\gamma_F(\theta) = \gamma_F(\pi/2)\text{sen}\theta, \quad (2.15)$$

em que θ é o ângulo apresentado na Fig. 2.2. $\gamma_F(\pi/2)$ é uma constante, assim denotada porque, para $\theta = \pi/2$, $\gamma_F(\theta)$ é igual à mesma. Como $\text{sen}\theta = v/v'_q$ (veja Eq. (2.3) e Fig. 2.2), com o aumento de v , $\gamma_F(\theta)$ aumenta, como imaginado.

Adicionalmente, vamos conjecturar que $\gamma_F(\pi/2) = 1$, porque imaginamos que, para grandes valores de v , da violência da colisão da gota contra a face frontal do paralelepípedo resulta uma absoção praticamente completa da mesma. Logo, nossa conjectura final para $\gamma_F(\theta)$ é

$$\gamma_F(\theta) = \text{sen}\theta. \quad (2.16)$$

A física da interação de uma gota de chuva com a face superior do paralelepípedo não deve ser muito diferente da física da interação de uma gota com a face frontal, porque no curto intervalo de tempo em que uma gota interage com o paralelepípedo (na face superior ou na face frontal) a interação eletromagnética predomina, ou seja, durante a interação, o efeito direto da gravidade é desprezível. Por isso, para a face superior do paralelepípedo, nossa conjectura inicial equivalente àquela para a face frontal

$$\gamma_S(\phi) = \text{sen}\phi, \quad (2.17)$$

em que $\phi = \pi/2 - \theta$. Assim como θ é o ângulo entre o vetor \vec{v}_q e a face frontal (veja Fig. 2.2), ϕ é o ângulo entre \vec{v}_q e a face superior. Podemos reescrever

$$\gamma_S(\theta) = \text{sen}(\pi/2 - \theta) = \text{cos}\theta. \quad (2.18)$$

Com velocidades diretamente alcançáveis por um ser humano (v , em nosso modelo), não há incidência quase-tangencial (nem próximo disso) de uma gota de chuva na face superior do paralelepípedo, no referencial do mesmo. Por exemplo, com $v_q = 9\text{m/s}$ (valor obtido do artigo de De Angelis [1]) e $v = 10,44\text{m/s}$ (recorde mundial nos 100 metros) - e ninguém irá correr sob chuva com essa velocidade - temos $\phi = \arcsen\left(v_q / \sqrt{v_q^2 + v^2}\right) = 40,8^\circ$ e $\gamma_S(\phi) = \text{sen}\phi = 0,653$. Com $v = 5\text{m/s}$ - possivelmente o maior valor alcançado na prática por um ser humano comum sob chuva - temos $\gamma_S(\phi) = 0,874$. Daí, em casos realistas temos $\gamma_S(\phi) \geq 0,87$. Como esse limite inferior é muito próximo de 1, vamos simplificar ainda mais e concluir que nossa conjectura para γ_S como

$$\gamma_S = 1. \quad (2.19)$$

Em relação à conjectura apresentada na Eq. (2.16), ela poderia ser substituída por outras também simples. Por exemplo, poderíamos elevar $\text{sen}\theta$ a um expoente positivo menor que 1, que teria a vantagem, sobre a conjectura da Eq. (2.16), de modelar uma maior absorção para pequenos valores de θ . Como você pode perceber, mesmo dentro de um modelo simples como o que estamos apresentando aqui há muito o que ser explorado. Imagine então nas complexas atividades de pesquisa em andamento no Brasil e no mundo! A visão romântica de um cientista excepcional obtendo resultados incríveis como que num passe de mágica, que a mídia às vezes nos mostra em obras de ficção, realmente não corresponde à realidade. Mesmo Einstein precisou trabalhar duro para avançar em suas pesquisas. E sempre dependemos do trabalho de outros.

Com as igualdades (2.16) e (2.19) é possível modificar o modelo de partida da seguinte forma: denotando por \mathcal{M}_F , \mathcal{M}_S e \mathcal{M} respectivamente as massas *absorvidas* pela face frontal, pela face superior, e total, temos (veja Eqs. (2.9) a (2.11))

$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_F + \mathcal{M}_S = \gamma_F \mathcal{M}_F + \gamma_S \mathcal{M}_S = \text{sen}\theta \rho b c L + \frac{\rho a b L v_q}{v} \quad (2.20)$$

Como $\text{sen}\theta = v / \sqrt{v^2 + v_q^2} = 1 / \sqrt{1 + v_q^2/v^2}$, segue que

$$\mathcal{M}(v) = \frac{\rho bcL}{\sqrt{1 + v_q^2/v^2}} + \frac{\rho abLv_q}{v}. \quad (2.21)$$

Vimos, na Eq. (2.8), que a massa M que incide sobre o paralelepípedo da Fig. 2.1 cai com o aumento de v . Já a massa \mathcal{M} que é absorvida pelo paralelepípedo depende de v de forma mais complexa, pois enquanto $M_S(v)$ diminui, $M_F(v)$ cresce com o aumento de v . De modo que o confronto entre M_S e M_F pode fornecer algum resultado interessante (e de fato fornece! Veremos em breve). Observe na expressão (2.21) que no limite em que v tende a infinito, M_F tende a $\rho bcL = M_F$. Ou seja, a massa de água absorvida é igual a massa de água que incide na face frontal. Esse é um fato necessário, pois consideramos que da violência da colisão em alta velocidade da superfície frontal com a gota de água deve resultar sua massa completamente absorvida por esta face (hipótese implicitamente encontrada nos modelos encontrados na literatura tanto para a face frontal como para a superior).

Lembrando que $M_F = \rho bcL$, podemos reescrever a igualdade (2.21) como

$$\frac{\mathcal{M}}{M_F} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1/(v/v_q)^2}} + \frac{a/c}{v/v_q}. \quad (2.22)$$

Na Fig. 2.4 é apresentado o gráfico de \mathcal{M}/M_F vs. v/v_q , com $c/a = 15$ (mesma razão usada na Fig. 2.3). A forma desse gráfico revela a existência de uma velocidade ótima $v^* \approx 0,27v_q$, com a qual o indivíduo se molha o mínimo possível! Trata-se de uma previsão que nenhum dos modelos anteriormente publicados realizou para o caso de uma chuva vertical constante, por não terem considerado o fato de que nem sempre cada gota de chuva que atinge o indivíduo é completamente absorvida por ele. É curioso observar que com $c/a = 15$ e $v_q = 9m/s$, o valor de v^* ($\approx 2,4m/s$) correspondente a algo intermediário entre andar e correr: talvez uma caminhada vigorosa, ou uma corrida lenta. Mas, sem dúvida, não é so isso que nos deixa sem resposta para a pergunta “é melhor andar ou correr sob uma chuva vertical constante?”, mas a própria complexidade do problema. Estamos apresentando aqui apenas um modelo muito simples (e possivelmente ingênuo), que serve mais para mostrar para o estudante iniciante um pouco de como os físicos trabalham que para tentar responder definitivamente essa pergunta. Compreendemos, com a realização deste trabalho, que seria necessário um conjunto muito grandes de *experimentos*, com várias combinações de valores para os parâmetros relevantes, para se tentar chegar a uma resposta mais clara para aquela pergunta. E talvez a realização desses experimentos revelasse que em algumas situações é melhor andar, em outras é

melhor correr, e ainda, que em outras não faz diferença. Por exemplo, se o percurso sob chuva for muito grande, não importa se você vai andar ou correr, de qualquer maneira você irá concluir seu trajeto totalmente ensopado de água. Como dito, mesmo o nosso modelo teórico simples indica que a questão de andar ou correr na chuva é não-trivial.

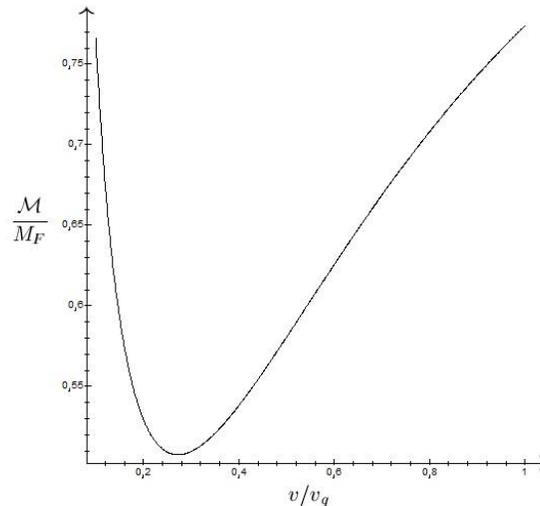


Figura 2.4: Massa de água que é absorvida pelo paralelepípedo (em unidades do valor limite $M_F = \rho b c L$) em função de sua velocidade (em unidades da velocidade de queda da chuva v_q).

Para a construção de gráficos de M vs. v (ao invés do gráfico acima), precisamos determinar mais que a razão c/a ; necessitamos determinar os valores de a , b , c , L , v_q e ρ . Como sugestão, consideramos valores interessantes $a=0,11$ m, $b=0,4$ m, $c=1,7$ m (estatura razoável para os padrões brasileiros, considerando-se uma média entre homens e mulheres [6]), $L=100$ m e $v_q=9$ m/s. O valor de ρ pode ser determinado a partir da igualdade $\rho = \rho_{\text{água}} \tilde{V}/v_q$ (pois $\tilde{V} = \tilde{M}/\rho_{\text{água}}$ e $\tilde{M} = \rho v_q$, você pode verificar no final do Apêndice A). Com $\tilde{V} = 4$ mm/h temos uma chuva moderada, e com $\tilde{V} = 16$ mm/h uma chuva forte (mas não há um consenso na literatura quanto à classificação da intensidade da chuva).

É importante atentar para o fato de que todo tecido tem uma capacidade de absorção de água limitada. Definindo σ_{max} como a massa máxima absorvida por unidade de área, temos, segundo medições que realizamos, $\sigma_{max} \approx 0,5$ kg/m² para tecidos de algodão tipicamente usados para camisas esportivas, $\sigma_{max} \approx 0,2$ kg/m² para morim e $\sigma_{max} \approx 1$ kg/m² para uma toalha de algodão com boa capacidade de absorção. Assim, o valor de σ_{max} para uma ampla variedade de tecidos, mais absorventes que o morim e menos que uma toalha, encontra-se no intervalo 0,2 + 1 (em kg/m²).

É claro que a função $\mathcal{M}(v) = \mathcal{M}_F(v) + \mathcal{M}_S(v)$ expressa na Eq. (2.21) não se aplica se $\mathcal{M}_S > \sigma_{max}ba$ ou $\mathcal{M}_F(v) > \sigma_{max}bc$. Vejamos,

$$\mathcal{M}_S > \sigma_{max}ab \Rightarrow \frac{\rho abLv_q}{v} > \sigma_{max}ab \Rightarrow v < \frac{\rho Lv_q}{\sigma_{max}} \quad (2.23)$$

Com as sugestões apresentadas para os parâmetros a , b , c , L e v_q , e com $\sigma_{max} = 0,5kg/m^2$ e $\rho = 4,9 \times 10^{-4}kg/m^3$ (obtido com $\tilde{V} = 16mm/h$ e $v_q = 9m/s$), temos (substituindo tais valores em (2.23)) que $v < 0,9m/s$. Ou seja, movendo-se abaixo dessa velocidade, temos que $\mathcal{M}_S(v) > \sigma_{max}ab$, de modo que a face superior fica completamente encharcada antes que o indivíduo (paralelepípedo) conclua seu percurso. Nesse caso, a massa absorvida total ao final do percurso é, segundo o modelo,

$$\mathcal{M} = \frac{\rho bcL}{\sqrt{1 + v_q^2/v^2}} + \sigma_{max}ab. \quad (2.24)$$

O modelo teórico aqui proposto apresentou, mesmo com sua simplicidade, bastante consistência com a proposta deste trabalho, pois o nosso refinamento levou a um resultado diferente do fornecido pelos modelos propostos na literatura [1-5] - a previsão de uma velocidade ótima, na qual se molha o mínimo possível. Como você mesmo pode inferir, esse resultado não põe um fim no problema de andar ou correr na chuva, apenas mostra como o refinamento de um modelo teórico resulta em novas conclusões. Acreditamos que esse problema está longe de ser solucionado, pois como foi observado, a simples inserção de um elemento (fração absorvida das gotas de chuva) já traz uma nova cara para o problema, com equações mais sofisticadas. Para se ter uma ideia do que estamos falando, vale atentar para as seguintes questões quando se for elaborar um modelo mais aperfeiçoado:

- A chuva é vertical, ou há vento?
- A chuva é homogênea?
- Trata-se de uma garoa, de um temporal ou de algo intermediário?
- Quais são as características físicas do indivíduo?
- Ele está vestido com algum tipo de tecido?
- A roupa é justa ou folgada? Há dobras?
- Como ele se move? (Há várias formas de andar ou correr, não é? E há diferentes velocidades para “andar” e para “correr”.)

- A distância a ser percorrida é curta, média ou longa? E o que significa ser “curta”, “média” ou “longa”?
- O percurso é feito em linha reta? Horizontalmente?
- Será que para um tecido levemente umidecido a fração absorvida deve mudar? De que forma?

O que você acha disso? Modelar a natureza não é nada simples, não é verdade? Por isso acreditamos fortemente que elaborar um modelo que satisfaça todas essas condições é tarefa extremamente complicada. E sobretudo, mesmo que consigamos este feito, pode ser que o modelo simplesmente não concorde com os resultados experimentais. Pois como sabemos, em física, um modelo só é validado quando sujeito às devidas investigações experimentais. Uma vez que esse modelo satisfaça/explique dados experimentais, ele descreve bem o fenômeno. Por isso, no próximo capítulo trazemos uma investigação experimental do *ansatz* usado em nosso modelo refinado: $\gamma_F(\theta) = \text{sen}\theta$ Eq. (2.16). De modo que daqui pra frente estaremos interessados no estudo de colisões de gotas de água com superfícies absorventes.

Capítulo 3

Investigação Experimental

Como vimos no capítulo anterior, nosso modelo refinado está baseado na ideia de que apenas uma fração da gota de água incidente é absorvida numa colisão com uma superfície absorvente. Tal fração, segundo o *ansatz* da seção 2.2, cresce com o $\sin\theta$ e, conseqüentemente, com v , estando θ no intervalo $[0, \pi]$ (correspondente a v no intervalo $[0, \infty]$). O fato de termos usado um *ansatz* nos leva à necessidade de uma investigação experimental acerca do mesmo, de modo que neste capítulo apresentamos todo o desenvolvimento do aparato experimental, elaborado para efetuar as colisões de gotas de água com diferentes tipos de superfícies absorventes. Acreditamos que após a leitura deste capítulo o leitor irá perceber o grau de dificuldade que está atrelado ao desenvolvimento de experimentos, fazendo com que muitas vezes o pesquisador tenha que procurar alternativas para a montagem ou mudar o enfoque da pesquisa. Em cada seção deste capítulo foi descrita ao máximo a elaboração de cada componente do experimento, para que o mesmo possa ser reproduzido por outras pessoas interessadas no tema.

3.1 O Aparato Experimental

A investigação experimental proposta neste trabalho exige o desenvolvimento de um aparato experimental para atender aos nossos objetivos, os quais consistem na construção de um gotejador que seja capaz de gerar gotas com três tamanhos distintos e bem definidos (2,5 mm, 4 mm e 6 mm) e na construção de um sistema mecânico para movimentar uma placa revestida com tecido para colidir com as gotas de água. Esse sistema deve ser capaz de reproduzir três velocidades distintas, para que possamos investigar o aumento da fração absorvida de acordo com a velocidade da colisão (lembrando que essa é a questão que move nosso trabalho experimental).

A construção do nosso aparato foi dividida em etapas: de início, elaboramos uma plataforma de metal para deslocamento das superfícies absorventes; em se-

guida, um sistema de gotejamento; a construção das superfícies absorventes; um circuito eletrônico para interface com computador. Devemos destacar que tal interface oferece suporte para possíveis aperfeiçoamentos do experimento. Por fim, desenvolvemos um programa em C/C++ para controle do sistema mecânico.

A ideia inicial era que o aparato experimental funcionasse na seguinte ordem:

1. De início a gota de água é gerada a um altura de 2 m da placa revestida de tecido (superfície absorvente) e é detectada por um sensor infravermelho que está sendo monitorado pelo computador;
2. A partir do momento em que a gota de água é detectada pelo computador, é acionado o pistão pneumático que está ligado ao braço motor, o qual irá mover uma placa revestida por tecido;
3. Ao aproximar-se do solo, tal gota de água será atingida por esta placa revestida de tecido que se desloca com velocidade v pré-definida;

A Fig. 3.1 traz uma ilustração prévia do funcionamento do experimento:

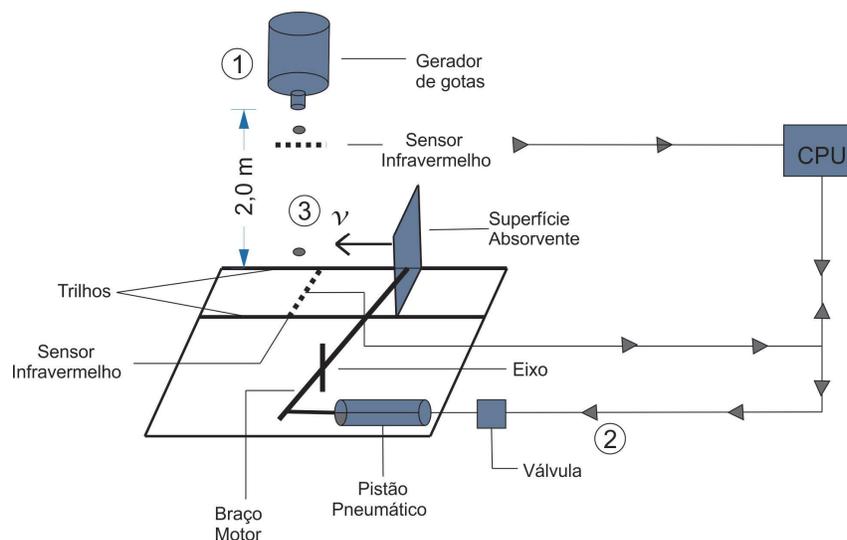


Figura 3.1: Esquema de funcionamento da montagem experimental para o estudo de colisões de gotas de água com superfícies absorventes.

Devemos atentar, mais uma vez, para o fato de que cada item desta montagem deve cumprir as seguintes exigências:

- O gotejador deve gerar gotas com diferentes diâmetros pré-definidos de 2,5 mm, 4 mm e 6 mm (tarefa extremamente complicada), manter uniforme sua taxa de gotejamento e manter fixa a massa de cada gota;

- A plataforma deve garantir que as superfícies absorventes se desloquem com a mesma velocidade, para que seja garantida a reprodutibilidade dos resultados experimentais;
- O circuito eletrônico deve ser voltado para uma interface simples, porta LPT;
- O programa em C/C++ deve ser capaz de medir com boa precisão a velocidade do carro (nome dado ao objeto que se desloca revestido de tecido - superfície absorvente);
- A massa de água absorvida deve ser medida com a maior precisão possível, usando grama com quatro casas decimais.

Acompanhe nas seções seguintes a construção de cada item do aparato.

3.1.1 Sistema de Gotejamento

O sistema de gotejamento é uma das peças fundamentais do nosso experimento e foi uma das mais complicadas de ser elaborada. Ele consiste em um reservatório de água e um gotejador, que foi construído com o uso de conexões de PVC disponíveis no mercado local. O reservatório é um garrafão de água de 19,5L com um corte horizontal na região próxima à saída de água. Usamos um volume grande para o reservatório, comparado com o volume de uma gota de água, para garantir que as mesmas condições experimentais fossem mantidas para cada medida.

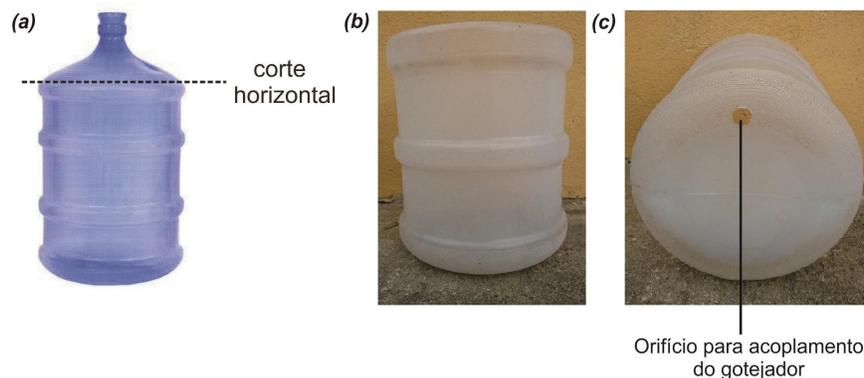


Figura 3.2: Confeção do reservatório de água.

Após obtermos o reservatório como ilustrado na Fig. 3.2b, fizemos um orifício na região inferior para introdução do gotejador Fig. 3.2c. Devemos destacar que o uso de borrachas de vedação é extremamente importante, pois algum vazamento pode acarretar o comprometimento da medição. Como dito anteriormente, o gotejador foi construído usando tubos e conexões de PVC e seus bicos de gotejamento foram elaborados separadamente por processos distintos de tentativa e erro.



Figura 3.3: Perspectiva explodida do gotejador.

Destacamos que um registro de pressão hidráulica foi usado pelo fato de possuir um ajuste sensível à saída de água, ou seja, é possível ajustar minimamente a quantidade de água que sai do reservatório a fim de obter um controle eficiente da taxa de gotejamento, ao contrário de outros registros que testamos, nos quais os caracterizamos como “registros binários” (0 ou 1, ou seja, ou abre totalmente ou fecha totalmente). A conexão responsável pelo gotejamento é o *cap PVC roscável JR 1/2”* a qual iremos denominar a partir de agora de cabeça do gotejador. Foi a partir dela que os bicos de gotejamento foram implementados, para que fossem geradas gotas com diâmetros de 2,5 mm, 4 mm e 6 mm. Iremos apresentar a seguir os materiais e métodos para elaboração desses bicos, lembrando, mais um vez, que não procuramos em textos científicos alguma forma de obter gotas com os diâmetros especificados; seguimos o nosso próprio método artesanal. Para todos os bicos foi necessário o uso de massa EPOXI¹ de fácil obtenção no mercado.

- **Bico de 6mm**

Fizemos um furo no centro da cabeça do gotejador usando uma furadeira com uma broca para metais de 8 mm; em seguida preparamos a massa EPOXI e fechamos completamente tal furo; Aqui o leitor pode nos questionar o porquê fazer um furo e em seguida tapá-lo, mas já adiantamos a resposta: estamos utilizando um processo de tentativa e erro para obtenção dos diâmetros, de modo que o material da cabeça é bastante rígido para ser desgastado com uma lima delgada de ferro, ao contrário da massa EPOXI, que mesmo depois de seca apresentou bastante facilidade de ser desgastada. Após a massa secar, fizemos um pequeno furo central com um broca de 1 mm; acoplamos ele no corpo do gotejador e medimos o diâmetros das gotas

¹Massa adesiva resistente a água com alto poder de adesão, podendo vedar, soldar e reparar superfícies lisas ou rugosas de materiais como ferro, madeira, polímeros (plásticos) rígidos e vidro [8].

que saíram por ele; a medida foi efetuada com um paquímetro e o procedimento de tal medição encontra-se na seção 3.1.2; abaixo temos apenas uma ilustração da montagem usada.



Figura 3.4: Montagem experimental para medição do diâmetro das gotas de água.

Como prevíamos, dificilmente iria ser formada uma gota de 6 mm por um orifício de apenas 1 mm. Continuamos o procedimento da seguinte maneira: após efetuar a medição, que de início resultava em um valor menor que o diâmetro desejado, retirávamos o bico e com a lima aumentávamos um pouco o diâmetro do furo, e repetíamos a medição. Destacamos esta parte como a mais delicada do nosso trabalho e uma das que demandou boa parte do nosso tempo, pois a variação no tamanho das gotas se mostrou sensível às variações do diâmetro do furo, ou seja, muitas vezes um desgaste um pouco maior na espessura do furo fazia com que a gota tivesse seu tamanho consideravelmente aumentado. Algumas vezes perdemos nosso bico pelo fato dele gerar gotas com um tamanho maior que o desejado. E o que fazíamos quando isso ocorria? Fachavamos o furo com massa EPOXI e retomávamos o processo a partir do início. Após muito trabalho conseguimos desenvolver nosso bico capaz de gerar gotas com 6 mm de diâmetro.

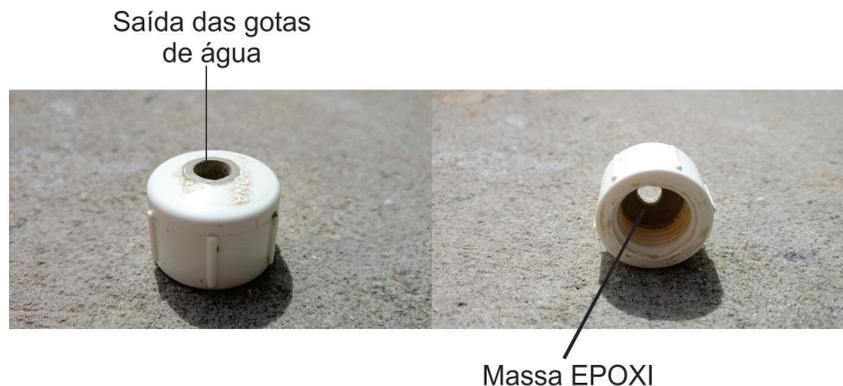


Figura 3.5: Versão final da cabeça do gotejador capaz de gerar gotas com 6 mm de diâmetro.

Gostaríamos de ter usado o mesmo método para construir os outros bicos, de 4 mm e 2,5 mm, mas todas as nossas tentativas foram sem sucesso. O que foi observado é que o método descrito anteriormente funciona apenas para formação de gotas de água relativamente grandes, a partir de 5 mm. Acreditamos que um dos motivos está no formato geométrico do bico do gotejador, pois como é possível observar ele tem uma superfície quase plana, de modo que a área de contato entre a gota de água e a superfície é relativamente grande, fazendo com que a força eletromagnética predomine por um tempo suficiente para a gota de água ganhar massa na saída do gotejador. Quando ela atinge certo tamanho, a força peso supera a força de atração e a gota é liberada pelo bico do gotejador, sendo que ela já está com um diâmetro maior que 4 mm (ocorrido em todas as nossas tentativas). De modo que seguimos à procura de alguma maneira de obter outros bicos, e encontramos! Veja a seguir.

- **Bico de 2,5mm**

Na procura por uma solução alternativa, o bico de 2,5 mm foi o primeiro a ser obtido. Utilizamos uma agulha usada na aplicação de insulina, a qual possui um diâmetro interno de 0,3 mm (foi a agulha com menor diâmetro que encontramos). Para acoplar a agulha no gotejador foi necessário um bico do método anterior e um pouco de massa EPOXI. Fizemos um furo com o mesmo diâmetro da base da agulha (base essa denominada de canhão - ver Fig. 3.6) e a encaixamos; para evitar vazamentos, passamos massa EPOXI pela região interna da peça. A ideia de usar algum tipo de agulha surgiu como resposta para o problema enfrentado no método anterior, pois ao contrário do que tínhamos, o contato da gota de água com a superfície à sua volta é muito menor na agulha. O fato de termos que trabalhar com gotas de 2,5 mm de diâmetro foi por não termos conseguido gerar gotas com 2 mm (pois nossa ideia inicial era que o aumento do diâmetro de cada gota fosse de 2 mm). Vale destacar que não partimos diretamente para uma agulha de insulina; de início usamos uma agulha comum com diâmetro interno de 0,8 mm, mas obtivemos gotas com diâmetro da ordem de 3 mm. Contudo, esse método também só foi eficaz para obter mais um dos diâmetros, ou seja, não conseguimos obter gotas com 4 mm usando as agulhas que tínhamos disponíveis, com isso, mais uma vez partimos na busca por outra forma de gerar gotas com este tamanho.

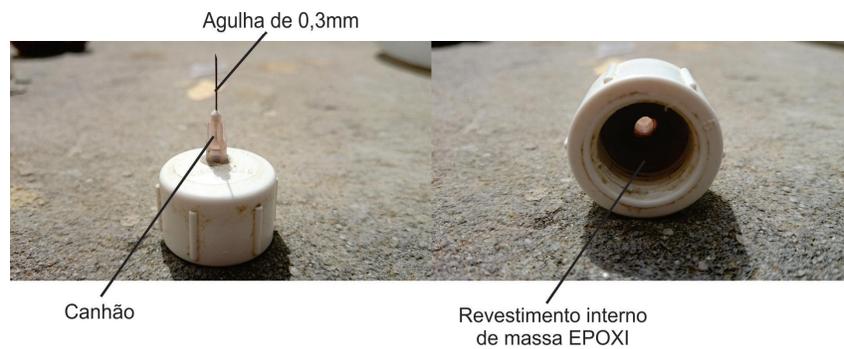


Figura 3.6: Versão final da cabeça do gotejador capaz de gerar gotas com 2,5 mm de diâmetro.

- **Bico de 4 mm**

O processo pelo qual obtivemos as gotas com 4 mm de diâmetro foi o mais complicado, pois precisávamos de algo com um diâmetro um pouco maior que o de uma agulha convencional. Foi aí que decidimos montar algo semelhante a uma agulha. Usando como base um bico do mesmo tipo daquele do primeiro método, fizemos um furo central e inserimos a ponta de um gotejador comercial (usado em estufas), passamos um pouco de massa EPOXI na parte interna para evitar vazamentos e efetuamos a primeira medida. Porém não tivemos sucesso; o diâmetro obtido foi algo em torno de 5 mm, mas acreditamos que isso ocorreu pelo fato da ponta apresentar uma área de contato maior que a de uma agulha. Para contornar essa situação e reduzir o diâmetro de saída, fizemos o seguinte: pegamos um canudo comum e cortamos um pequeno pedaço, em seguida abrimos esse pedaço para planificá-lo (da mesma forma que planificamos uma casca cilíndrica), enrolamos ele e encaixamos na saída da ponta gotejador. Como ele estava enrolado, o enrolamento interno dava conta de diminuir o diâmetro de saída, de modo que a redução ou aumento desse enrolamento interno proporciona o controle do diâmetro interno (imagine como se tivéssemos uma agulha na qual temos controle sobre seu diâmetro). Com isso, ajustando aos poucos tal sistema, conseguimos gerar gotas com 4 mm de diâmetro. Acreditamos que a Fig. 3.7 irá facilitar sua compreensão quanto ao processo usado neste item.



Figura 3.7: Versão final da cabeça do gotejador capaz de gerar gotas com 4 mm de diâmetro.

O resultado final do nosso sistema de gotejamento está ilustrado na Fig. 3.8.

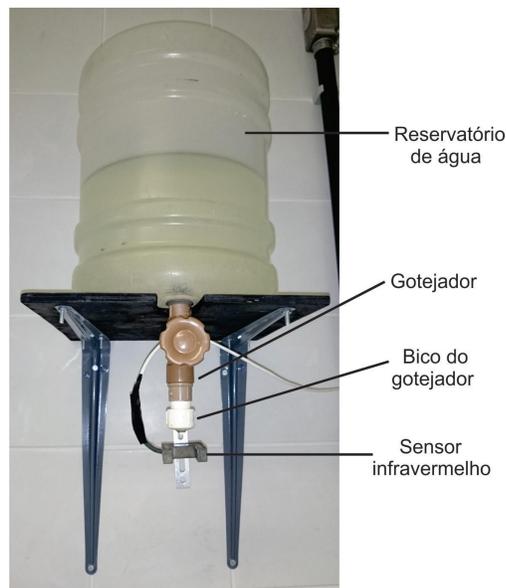


Figura 3.8: Sistema de gotejamento. Foto capturada em nosso laboratório, onde esse aparato encontra-se montado.

3.1.2 Procedimento para medição do diâmetro das gotas de água

Para efetuar a medição do diâmetro das gotas de água geradas pelo gotejador durante o processo de confecção de seus bicos, adotamos os seguintes passos:

1. De início, fixar a taxa de gotejamento em $(5s)^{-1}$ [ou 12 gotas/min];
2. Ajustar a ponta fixa para medição de exteriores do paquímetro de modo que ela seja minimamente molhada pela gota. Fixar então esta ponta na base onde repousa o paquímetro;

3. Ajustar a ponta móvel para medição de exteriores de modo que ela seja minimamente molhada pela gota, travando o paquímetro em seguida. Verificar se a ponta fixa continua sendo minimamente molhada;
4. Registrar o valor medido com o paquímetro;
5. Aumentar a distância entre as pontas em 0,1 mm e verificar se elas ainda estão sendo molhadas. Em caso afirmativo, continuar aumentando a distância em 0,1 mm de cada vez, até que nenhum molhamento seja observado. Registrar então o valor medido como o diâmetro da gota. (Obs.: Se, com o aumento de 0,1 mm na distância entre as pontas, apenas uma delas estiver sendo molhada, ajustar a posição do paquímetro TRAVADO e verificar se não há molhamento em nenhuma das pontas. Caso isso ocorra, defina o valor medido como sendo o diâmetro da gota.)

A Fig. 3.9 apresenta a montagem usada no procedimento acima:



Figura 3.9: Montagem experimental para medição do diâmetros das gotas de água.

3.1.3 Plataforma

Nossa plataforma é a base do sistema mecânico na qual são efetuadas as colisões das gotas de água com as superfícies absorventes. Seu corpo possui dimensões de 74cmx63cm e é constituído por canos retangulares de metal. O movimento das placas revestidas com tecido é dado por um mecanismo composto por um braço motor, um pistão pneumático e dois trilhos. O carro (placa de madeira em que são fixadas as superfícies revestidas com tecido) está acoplado a uma das extremidades do braço motor e o pistão na outra. Ao longo do seu comprimento médio foi colocado um

eixo de rotação, para que o movimento do carro seja dado a partir do movimento do pistão, ou seja, devido a articulação entre pistão e carro, quando o pistão vai para frente o carro vai para trás e vice-versa. Para manter a uniformidade do movimento das placas, condicionamos o carro a se mover sobre trilhos.

A Fig. 3.10 mostra nossa plataforma em sua versão final², onde todos os componentes que se fizeram necessárias no decorrer de sua confecção foram inseridos, como por exemplo, caixas de madeira usadas como medidas de segurança. Destacamos aqui o grau de dificuldade enfrentado ao se desenvolver um aparato experimental, pois no momento em que idealizamos o experimento não conseguimos visualizar os problemas que podem surgir na montagem de cada equipamento e também, após o equipamento montado e funcionando, como por exemplo, a folga de um parafuso, a falta de equilíbrio do eixo de rotação (motivo pelo qual inserimos na plataforma o suporte para o eixo de rotação), ou seja, foi necessário bastante tempo e trabalho para chegarmos a esta versão final.

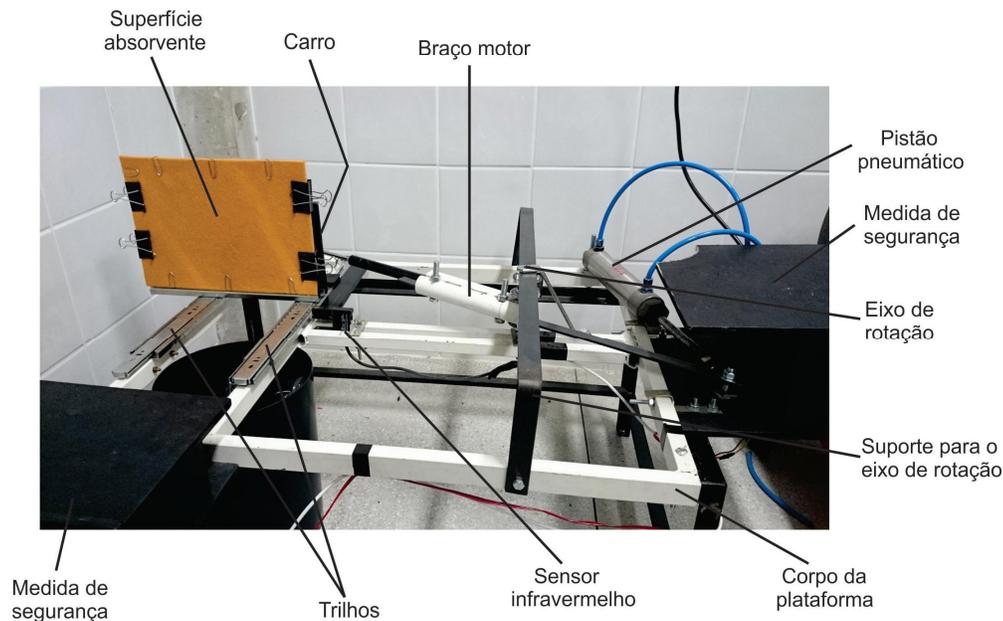


Figura 3.10: Itens da plataforma de colisões. Foto capturada em nosso laboratório.

3.1.4 Superfícies Absorventes

As superfícies absorventes por nós elaboradas consistem em placas de DURA-TEX³ cobertas com tecidos de diferentes capacidades de absorção. Confeccionamos um total de trinta placas, sendo dez placas para cada tipo de tecido. Elas possuem as

²No Apêndice D disponibilizamos mais fotografias do nosso experimento.

³Tipo de folha de madeira bastante leve, usada para confeccionar por exemplo, as pranchetas encontradas facilmente nas papelarias.

dimensões de uma folha A4, ou seja, 210 mmx297 mm. Usamos três tipos de tecidos: flanela, jeans e poliéster. Para evitar que alguma massa de água seja absorvida pela placa, colocamos um revestimento de plástico entre o tecido e a placa. O método de confecção é muito simples, basta observar a sequência de imagens na Fig. 3.11.

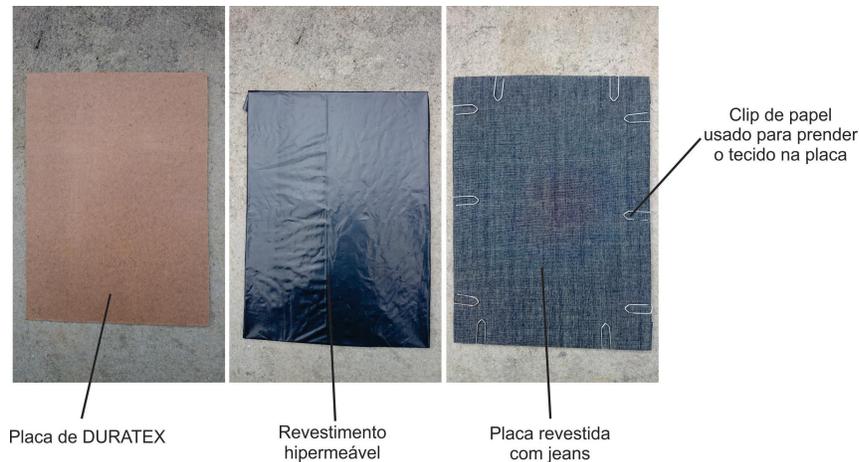


Figura 3.11: Sequência de confecção das superfícies absorventes.

É claro que está implícito o fato de que foi necessário cortar a folha de DURATEX (com dimensões 3 mx1 m) nessas pequenas placas. As demais placas, revestidas com flanela e poliéster, são mostradas a seguir na Fig. 3.12.

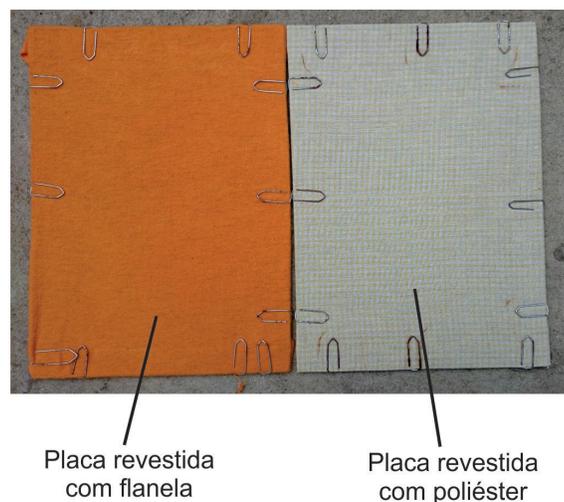


Figura 3.12: Placas revestidas com tecido.

3.1.5 Circuito para Interface

Nesta seção iremos apresentar o desenvolvimento do circuito eletrônico usado para fazer a interface entre o computador e o nosso aparato mecânico. Como foi dito

no início deste capítulo, a interface foi feita pela porta paralela (LPT) do computador, de modo que exigiu um circuito relativamente simples. Um ponto importante que serviu de guia de elaboração do circuito foi o fato de que a integridade física da LPT deve ser garantida, ou seja, devemos deixá-la livre do risco de sobrecarga. Portanto nosso circuito foi baseado no uso de um circuito integrado CI 4N25, o qual funciona basicamente como um acoplador óptico, ou seja, ele é capaz de unir duas extremidades de circuitos, que trabalham com DDPs (Diferenças De Potenciais) diferentes, apenas com luz. O fato de termos usado DDPs diferentes é devido ao computador trabalhar internamente com 5 V e os elementos do nosso circuito serem alimentados por 12 V. Como você pode observar na imagem abaixo, esse circuito integrado, como o nome já diz, integra em seu interior um circuito emissor de luz com um circuito de um fototransistor.

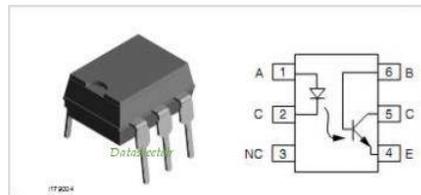


Figura 3.13: Funcionamento do CI 4N25. Datasheet retirado da internet [9].

Com o uso do software Circuit Wizard versão estudante, montamos o desenho técnico do nosso circuito e em seguida geramos a página de impressão para PCI (Placa de Circuito Impresso). A impressão usada na PCI está disponível no Apêndice C; na Fig. 3.14 apresentamos apenas o diagrama do circuito.

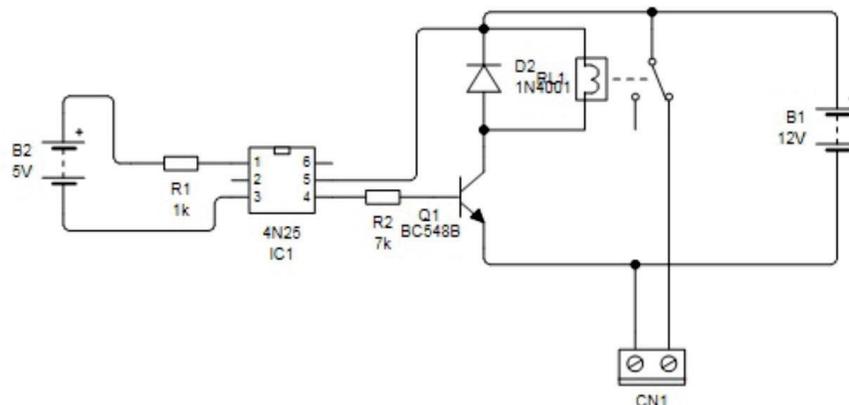


Figura 3.14: Diagrama do circuito.

No diagrama da Fig. 3.14, a fonte de alimentação de 5 V está representando a tensão da porta paralela. A referência de alguns elementos encontra-se nesta imagem, contudo você encontrará todas as referências dos componentes usados neste circuito no Apêndice C. Nosso circuito funciona da seguinte forma: de início, o computador envia 5 V para a porta LPT, fazendo com que o LED (Diodo Emissor de Luz) do CI (Circuito Integrado) seja acionado e com isso a outra parte do circuito seja liberada; com isso uma corrente é estabelecida no circuito e então é levada pelo transistor para alimentar a bobina do relé; com isso o eletroíma é acionado e faz com que os 12 V da alimentação do circuito sejam enviados para o terminal CN1, em que ele representa os terminais da válvula do pistão pneumático apresentado na seção 3.1.3. Ou seja, quando 5 V são enviados do computador temos o acionamento do pistão e com isso o movimento das superfícies absorventes, de modo que ganhamos o controle da nossa plataforma.

Como você verá na próxima seção, a porta LPT possui uma entrada com 25 pinos (conector DB25), sendo que apenas 8 são responsáveis pelo envio de informações (que equivale ao envio de 5 V para cara um dos pinos), ou seja, interprete cada pino como um bit, de modo que as informações estão contidas em um byte. Os pinos responsáveis por essa função são denotados por D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6 e D7 (Dados), que são equivalentes aos pinos 2 a 9. Portanto, para alimentar o CI com os 5 V de um desses pinos, basta conectar nosso circuito em um deles, no nosso caso escolhemos o D2. Veja na imagem a seguir que basta conectar um fio no D2 (polo positivo) e outro no GND 25 (polo negativo) e estaremos com nossa DDP estabelecida.

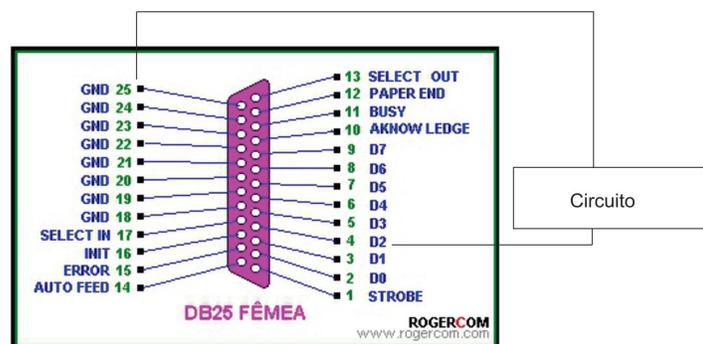


Figura 3.15: Modo de alimentação do circuito através da LPT. Imagem extraída parcialmente da internet [10].

A foto abaixo foi retirada do nosso circuito, que foi conectado à porta paralela através do cabo paralelo DB25/Centrônicos 36. Poderíamos ter conectado os fios do circuito diretamente no cabo, mas preferimos usar um conector fêmea Centrônicos 36.

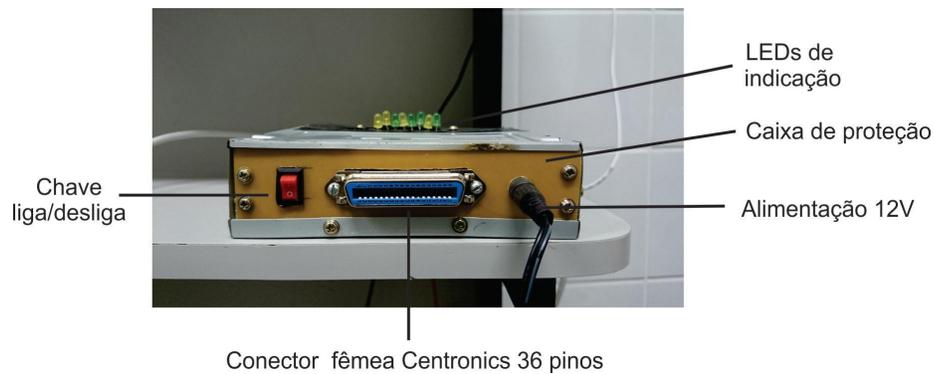


Figura 3.16: Interface para porta paralela.

Os LEDs de indicação têm a função de informar qual dos pinos, do D0 ao D7, está sendo utilizado. O circuito usado está indicado no Apêndice C. A chave liga/desliga é uma garantia de que o circuito ficará protegido, quando desligado, de alguma alteração no valor da tensão de alimentação de 12 V, já que ela está ligada nos 220 V da rede doméstica. O uso de uma caixa de proteção é muito importante, principalmente quando se planeja um circuito para ser usado inúmeras vezes, como é o caso do nosso.

Devemos destacar que nosso circuito não está limitado apenas ao envio de dados do computador, ele também tem suporte para o recebimento de informações de algum dispositivo externo, como por exemplo, o estado de um sensor. Para nosso experimento o envio de dados (5 V) já nos basta, mas temos como perspectiva o aperfeiçoamento do experimento - obtendo controle de novas variáveis, como por exemplo medir a velocidade do carro ou ainda tornar totalmente automatizado o aparato experimental.

3.1.6 Programando a Porta Paralela

Desde o início dos anos 80, a porta paralela vem sendo um dos meios usados para interface entre o computador e algum dispositivo periférico externo, como por exemplo uma impressora. Esse mecanismo funciona de forma simples e é capaz de transmitir dados apenas numa direção (ou seja, é unidirecional) com taxas de 100 kB/s a 200 kB/s. Na década de 90, grandes empresas fabricantes de *softwares*, como por exemplo a *Microsoft*, a *Intel* e a *Compaq*, reuniram-se para o desenvolvimento de uma nova tecnologia capaz de suportar altas taxas de transmissão de dados, ou seja, surgia a porta USB (Universal Serial Bus). Em janeiro de 1996 foi lançada a USB 1.1, capaz de transmitir e receber (bidirecional) dados a taxas de 1,5 MB/s a 12 MB/s - um grande avanço comparado com a porta paralela. Atualmente nossos computadores são munidos de portas USB 2.0, as quais enviam e recebem dados a taxas que podem ir até 480 MB/s. Contudo, mesmo com os avanços nas tecnologias de transmissão

de dados, a porta paralela não foi totalmente desprezada, pois ela oferece bastante simplicidade de manipulação por parte do programador - e foi isso o que nos levou à escolha desta interface - uma vez que nosso trabalho presa pelo uso de recursos relativamente simples, pelo fato de ser direcionado a estudantes de graduação.

Atualmente a porta paralela é encontrada apenas em computadores antigos e que funcionem com sistema operacional *Windows XP* ou seus antecessores (versões recentes do *Windows* apresentam bastante dificuldade de manipulação desta porta, deixando-a disponível apenas para conexão com algum periférico), ou com o *LINUX*. O computador que usamos possui o *Windows XP* instalado. Tal sistema operacional mantém a porta LPT bloqueada para comunicação com periféricos desconhecidos, como é o caso do nosso circuito. Esse problema pode ser facilmente contornado com o uso da BIOS, pois basta acessá-la e liberar a porta. Contudo usamos um método diferente, o qual consiste no uso do *Userport*, que é um software livre que tem a função de liberar a porta. Geralmente esse programa já vem com um tutorial de uso.

É comum encontrar computadores com duas portas paralelas, LPT1 e LPT2. Para acessá-las a partir de um programa é necessário conhecer seus endereços. A Fig. 3.17 foi extraída de uma página da web que consideramos ter o maior conteúdo sobre porta paralela, desde seu funcionamento ao seu uso na comunicação com circuitos eletrônicos [10].

| Nome da Porta | Endereço de memória | Endereço da Porta | | Descrição |
|---------------|---------------------|-------------------|-------------|---------------|
| LPT1 | 0000:0408 | 378 hexadecimal | 888 decimal | Endereço base |
| LPT2 | 0000:040A | 278 hexadecimal | 632 decimal | Endereço base |

Figura 3.17: Endereços da porta LPT.

Como complemento do endereço da porta LPT, é necessário informar o registrador, ou seja, um tipo de endereço no qual o computador interpreta qual é a operação a ser exercida. Por exemplo, no caso em que uma impressora está conectada a essa porta, o registrador pode enviar um byte para ela ou ler seu *status*, registrador de dados e registrador de status, respectivamente (veja Fig. 3.18).

| Nome | Endereços LPT1 | Endereços LPT2 | Descrição |
|----------------------|----------------|----------------|---|
| Registro de Dados | 378h | 278h | Envia um byte para a impressora |
| Registro de Status | 379h | 279h | Ler o Status da impressora |
| Registro de Controle | 37Ah | 27Ah | Envia dados de controle para a impressora |

Figura 3.18: Registradores da porta LPT.

A linguagem de programação utilizada em nosso experimento foi o C/C++ e o compilador foi o DevC++. Um detalhe importante é que, dependendo do compilador, o uso de algumas funções de controle da porta paralela também devem ser

liberadas, ou seja, o compilador não tem acesso direto ao hardware; é necessário algum tipo de *driver* que “converse” com o *kernel* do sistema para que as portas físicas LPT sejam acessadas [11]. Compiladores como o Turbo C++ da Borland não exigem a inserção destes *drivers*, pois já vêm com ele em sua interface, porém não possuem algumas bibliotecas, como por exemplo a *windows.h*, de modo que preferimos usar o DevC++, mesmo tendo que inserir a leitura do *driver* em nosso programa. As linhas de comando responsáveis por essa leitura foram retiradas de uma página confiável da web [11] e estão disponíveis no Apêndice E. O envio de bytes à porta paralela foi feito através da rotina *outportb*, encontrada na biblioteca *dos.h*, a qual funciona da seguinte maneira: declaramos como variável o registrador *378h*, relacionado à porta física LPT1; em seguida atribuímos algum valor numérico a ela; tal valor é transformado em binário e é enviado à porta paralela na forma de um byte; o bit 0 corresponde a 0 V e o bit 1 equivale a 5 V, de modo que tal byte alimenta em 0 V ou 5 V cada um dos pinos do D0 ao D7. A biblioteca *dos.h* também possui a rotina *inportb*, a qual tem a função de ler o estado da porta usando o registrador *379h*. Acreditamos que essa rotina, numa perspectiva futura, pode auxiliar na medida da velocidade do carro, pois como ela tem a função de monitorar o estado da porta paralela, basta ligar a ela algum tipo de sensor óptico.

3.1.7 Programa para Controle do Pistão Pneumático

Como já foi dito nas seções anteriores, o controle do pistão pneumático de nosso aparato é dado pelo acionamento de sua válvula. Uma maneira prática que desenvolvemos para ativar e desativar a válvula foi através da interface sugerida na seção 3.1.5, pois basta manter um dos pinos de dados (D0 ao D7) alimentados com tensão de 0 ou 5 volts. Para controle de tais pinos desenvolvemos um programa de envio de bytes, o qual está disponível no Apêndice E. Na prática, o programa tem a seguinte função: quando a tecla numérica relacionada ao pino onde está ligado o circuito for acionada (no nosso caso foi a tecla 2) ela libera o pistão, fazendo com que o carro entre em movimento para frente. Para o carro voltar para sua posição inicial basta teclar 0, ou alguma outra tecla numérica diferente de 2.

3.1.8 Medição da Massa de Água Absorvida

No capítulo 2 propusemos que a massa de água absorvida aumenta com a velocidade de colisão segundo a fração $\gamma_F(v) = 1/\sqrt{1 + v_q^2/v^2}$. Nosso objetivo inicial seria estudar o aumento da fração de água absorvida em função da velocidade de colisão da placa revestida com tecido, de modo que isso nos levou a traçar o aparato experimental da seção 3.1. Porém, a montagem experimental que desenvolvemos, e que

você acompanhou no decorrer deste capítulo 3, não foi capaz de satisfazer todas as nossas exigências, ou seja, fizemos várias tentativas de medir a velocidade do carro usando o sensor infravermelho inserido na plataforma e implementando devidamente rotinas para medição do tempo das bibliotecas `time.h` e `windows.h`, mas não obtivemos êxito. O tempo dedicado a esta etapa do trabalho foi significativo e sem sucesso, pois até conseguimos desenvolver um dispositivo que media velocidade, porém ele estava limitado a valores muito pequenos, nos quais não tínhamos interesse de investigar. Como solução alternativa elaboramos nossa investigação acerca da absorção baseando-nos na pressão colocada no pistão pneumático, ou seja, em unidades de *PSI* - unidade de pressão utilizada no sistema americano de medidas, definida como libra por polegada quadrada (lb/f^2). Como o deslocamento do carro é devido ao deslocamento do pistão, de alguma maneira a velocidade do carro deve estar associada à pressão colocada no pistão.

A medida da massa de água absorvida foi uma tarefa realizada com bastante cuidado. De início, calibramos o gotejador para uma taxa de gotejamento de 12 gotas/min e fizemos a cada minuto uma medição da massa de dez gotas que ele gerava, pois nossa preocupação foi para que ele mantivesse constante a massa das gotas geradas. Também estávamos preocupados em fazer com que a taxa de gotejamento fosse mantida constante pelo intervalo de tempo necessário para efetuarmos, ao menos, uma série de dez colisões. O resultado foi satisfatório, pois garantimos a massa fixa de cada gota por todo o intervalo de tempo do experimento e a taxa de gotejamento permaneceu fixa por $8min$, tempo mais que suficiente para efetuar dez colisões. Para efetuar as colisões das superfícies absorvente com as gotas de água em queda foi necessário certo treinamento, pois como o sistema mecânico é ativado manualmente, precisamos manter um sincronismo entre a queda da gota e a liberação do carro, para que a colisão ocorra. De início tivemos bastante trabalho, pois na maioria das vezes a gota atingia o solo sem ser atingida pela superfície absorvente, mas depois conseguimos um bom sincronismo (não deixamos passar nada!).

Para obter a massa absorvida, primeiramente medimos a massa inicial m_i de todas as trinta placas revestidas por tecido (é importante atentar que tal medição deve ser executada minutos antes do experimento, pois acreditamos que mudanças na umidade no ar podem alterar levemente os valores medidos). Em seguida efetuamos a colisão de dez gotas em regiões diferentes de cada placa e medimos a massa final m_f (é claro que você deve entender que esse processo foi feito para cada placa na sequência: massa inicial, colisão, massa final). Portanto, a massa absorvida foi dada por $m_{absorvida} = m_f - m_i$. Usamos três valores distintos de pressão para cada sessão do experimento: 30 PSI, 50 PSI e 70 PSI. Como tínhamos a disponibilidade de trinta placas, sendo dez de cada tipo de tecido, o experimento como um todo foi realizado em três dias: em cada dia efetuamos colisões com a mesma pressão no pistão para

cada tipo de tecido.



Figura 3.19: Medida da massa final m_f , após a colisão com dez gotas de água.

Como você pode observar na Fig. 3.19, ficamos limitados a medir a massa em gramas com precisão de apenas duas casas decimais (balança semi-analítica), ao contrário do que desejávamos na proposta inicial - medir com precisão de quatro casas decimais. Contudo você verá na próxima seção que conseguimos obter resultados interessantes. Uma dica que deixamos para quem pretende reproduzir nosso experimento é que tenha cuidado ao remover a placa revestida com tecido do carro da plataforma, pois lembre-se que o gotejador continua liberando gotas, de modo que pode ocorrer que alguma gota em queda atinga alguma região do tecido e comprometa totalmente sua medida, pois isso ocorreu algumas vezes durante nosso experimento (é preciso estar atento). Outro fato está relacionado com a segurança do indivíduo: sempre que for remover a placa, deixe o carro na posição em que ele conclui o movimento (para frente), pois caso ocorra algum desligamento no circuito, o carro apenas irá voltar para sua posição inicial, ou seja, não irá colidir com suas mãos - ao contrário do que pode ocorrer se ele estiver na sua posição inicial.

3.2 Resultados

Todo nosso trabalho até aqui, neste capítulo, foi voltado para esta seção. Aqui iremos apresentar todos os nossos resultados experimentais e suas interpretações. Destacamos que nossas análises foram voltadas para o modelo que desenvolvemos e apresentamos na seção 2.2 desta monografia, pois o objetivo de todo este trabalho experimental foi investigar se nossas hipóteses se sustentam.

Iniciamos com as gotas de 6 mm de diâmetro com uma massa $M = (0,16 \pm 0,01)g$. A partir dos dados da Tabela 3.1 podemos calcular a massa média absorvida para colisões a 30 PSI de pressão com superfícies revestidas por flanela.

$$\langle m_{f,30} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 0,458g \quad (3.1)$$

Adicionando-se o desvio padrão médio, temos que a massa de água absorvida para esta situação foi:

$$m_{30} = (0,46 \pm 0,07)g \quad (3.2)$$

Tabela 3.1: Resultado da primeira série de colisões (flanela).

| Tipo de tecido: Flanela - Pressão no pistão: 30 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{f,30}$ (g) |
| P1 | 207,70 | 208,12 | 0,42 |
| P2 | 199,54 | 200,07 | 0,53 |
| P3 | 203,61 | 204,12 | 0,51 |
| P4 | 197,76 | 198,21 | 0,45 |
| P5 | 197,44 | 198,02 | 0,58 |
| P6 | 192,11 | 192,51 | 0,40 |
| P7 | 192,04 | 192,49 | 0,45 |
| P8 | 199,09 | 199,48 | 0,39 |
| P9 | 199,13 | 199,51 | 0,38 |
| P10 | 199,50 | 199,97 | 0,47 |

Temos, a partir dos valores na Tabela 3.2, que a massa média absorvida para as superfícies revestidas com flanela é

$$\langle m_{f,50} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 0,813g \quad (3.3)$$

Novamente, adicionando-se o desvio padrão médio, temos:

$$m_{f,50} = (0,81 \pm 0,09)g \quad (3.4)$$

Tabela 3.2: Resultado da segunda série de colisões (flanela)

| Tipo de tecido: Flanela - Pressão no pistão: 50 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{f,50}$ (g) |
| P01 | 207,70 | 208,33 | 0,63 |
| P02 | 199,54 | 200,28 | 0,74 |
| P03 | 203,61 | 204,45 | 0,84 |
| P04 | 197,76 | 198,65 | 0,89 |
| P05 | 197,44 | 198,24 | 0,80 |
| P06 | 192,11 | 193,04 | 0,93 |
| P07 | 192,04 | 192,84 | 0,80 |
| P08 | 199,09 | 199,84 | 0,75 |
| P09 | 199,13 | 199,98 | 0,85 |
| P10 | 199,50 | 200,40 | 0,90 |

A partir dos valores da Tabela 3.3, para uma pressão de 70 PSI, temos uma massa média absorvida para a flanela de:

$$\langle m_{f,70} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 1,03g \quad (3.5)$$

Considerando o desvio padrão médio, temos:

$$m_{f,70} = (1,03 \pm 0,07)g \quad (3.6)$$

Tabela 3.3: Resultado da terceira série de colisões (flanela)

| Tipo de tecido: Flanela - Pressão no pistão: 70 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{f,70}$ (g) |
| P01 | 207,70 | 208,85 | 1,15 |
| P02 | 199,54 | 200,61 | 1,07 |
| P03 | 203,64 | 204,58 | 0,94 |
| P04 | 197,78 | 198,77 | 0,99 |
| P05 | 197,42 | 198,51 | 1,09 |
| P06 | 192,09 | 193,12 | 1,03 |
| P07 | 192,06 | 193,04 | 0,98 |
| P08 | 199,08 | 200,03 | 0,95 |
| P09 | 199,12 | 200,14 | 1,02 |
| P10 | 199,52 | 200,62 | 1,10 |

A Tabela 3.4 resume os resultados obtidos até aqui:

Tabela 3.4: Valores médios da massa absorvida para a superfície revestida com flanela de acordo com a pressão do pistão.

| Pressão em PSI | $\langle m \rangle$ em g |
|----------------|--------------------------|
| 30 | 0,46 |
| 50 | 0,81 |
| 70 | 1,03 |

A partir dos dados da Tabela 3.5 podemos calcular a massa média absorvida para colisões a 30 PSI de pressão com superfícies revestidas com jeans.

$$\langle m_{j,30} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 0,403g \quad (3.7)$$

Adicionando-se o desvio padrão médio, temos que a massa de água absorvida para esta situação foi:

$$m_{j,30} = (0,40 \pm 0,04)g \quad (3.8)$$

Tabela 3.5: Resultado da primeira série de colisões (jeans)

| Tipo de tecido: Jeans - Pressão no pistão: 30 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{j,30}$ (g) |
| P11 | 206,40 | 206,72 | 0,32 |
| P12 | 207,37 | 207,76 | 0,39 |
| P13 | 212,65 | 213,07 | 0,42 |
| P14 | 205,70 | 206,08 | 0,38 |
| P15 | 200,99 | 201,39 | 0,40 |
| P16 | 205,26 | 205,74 | 0,48 |
| P17 | 209,78 | 210,17 | 0,39 |
| P18 | 208,04 | 208,45 | 0,41 |
| P19 | 208,65 | 209,10 | 0,45 |
| P20 | 208,60 | 208,99 | 0,39 |

Temos, a partir dos valores na Tabela 3.6, que a massa média absorvida é

$$\langle m_{j,50} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 0,741g \quad (3.9)$$

Novamente, adicionando-se o desvio padrão médio, temos:

$$m_{j,50} = (0,74 \pm 0,06)g \quad (3.10)$$

Tabela 3.6: Resultado da segunda série de colisões (jeans)

| Tipo de tecido: Jeans - Pressão no pistão: 50 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{j,50}$ (g) |
| P11 | 206,40 | 207,09 | 0,69 |
| P12 | 207,37 | 208,21 | 0,84 |
| P13 | 212,65 | 213,45 | 0,80 |
| P14 | 205,70 | 206,43 | 0,73 |
| P15 | 200,99 | 201,80 | 0,81 |
| P16 | 205,26 | 205,76 | 0,70 |
| P17 | 209,78 | 210,46 | 0,68 |
| P18 | 208,04 | 208,76 | 0,72 |
| P19 | 208,65 | 209,34 | 0,69 |
| P20 | 208,60 | 209,35 | 0,75 |

A partir dos valores da Tabela 3.7, para uma pressão de 70 PSI, temos uma massa média absorvida de:

$$\langle m_{j,70} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 0,878g \quad (3.11)$$

Considerando o desvio padrão médio, temos:

$$m_{j,70} = (0,88 \pm 0,06)g \quad (3.12)$$

Tabela 3.7: Resultado da terceira série de colisões (jeans)

| Tipo de tecido: Jeans - Pressão no pistão: 70 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{j,70}$ (g) |
| P11 | 206,43 | 207,22 | 0,79 |
| P12 | 207,36 | 208,21 | 0,85 |
| P13 | 212,66 | 213,55 | 0,89 |
| P14 | 205,71 | 206,65 | 0,94 |
| P15 | 200,99 | 201,77 | 0,78 |
| P16 | 205,27 | 206,14 | 0,87 |
| P17 | 209,78 | 210,69 | 0,91 |
| P18 | 208,04 | 209,00 | 0,96 |
| P19 | 208,66 | 209,56 | 0,90 |
| P20 | 208,61 | 209,50 | 0,89 |

A Tabela 3.8 resume os resultados obtidos até aqui:

Tabela 3.8: Valores médios da massa absorvida para a superfície revestida com jeans de acordo com a pressão do pistão.

| Pressão em <i>PSI</i> | $\langle m \rangle$ em <i>g</i> |
|-----------------------|---------------------------------|
| 30 | 0,40 |
| 50 | 0,74 |
| 70 | 0,88 |

A partir dos dados da Tabela 3.9 podemos calcular a massa média absorvida para colisões a 30 PSI de pressão para superfícies revestidas com poliéster.

$$\langle m_{p,30} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 0,704g \quad (3.13)$$

Adicionando-se o desvio padrão médio, temos que a massa de água absorvida para esta situação foi:

$$m_{p,30} = (0,70 \pm 0,05)g \quad (3.14)$$

Tabela 3.9: Resultado da primeira série de colisões (poliéster)

| Tipo de tecido: Poliéster - Pressão no pistão: 30 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{p,30}$ (g) |
| P21 | 186,53 | 187,22 | 0,69 |
| P22 | 191,24 | 191,98 | 0,74 |
| P23 | 193,62 | 194,32 | 0,70 |
| P24 | 192,14 | 192,79 | 0,65 |
| P25 | 192,20 | 192,92 | 0,72 |
| P26 | 193,18 | 193,79 | 0,61 |
| P27 | 199,81 | 200,57 | 0,76 |
| P28 | 193,52 | 194,22 | 0,70 |
| P29 | 192,25 | 192,93 | 0,68 |
| P30 | 193,63 | 194,42 | 0,79 |

Temos, a partir dos valores na Tabela 3.10, que a massa média absorvida é

$$\langle m_{p,50} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 0,885g \quad (3.15)$$

Novamente, adicionando-se o desvio padrão médio, temos:

$$m_{p,50} = (0,88 \pm 0,06)g \quad (3.16)$$

Tabela 3.10: Resultado da segunda série de colisões (poliéster)

| Tipo de tecido: Poliéster - Pressão no pistão: 50 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{p,50}$ (g) |
| P21 | 186,53 | 187,38 | 0,85 |
| P22 | 191,22 | 192,16 | 0,94 |
| P23 | 193,62 | 194,42 | 0,80 |
| P24 | 192,14 | 192,93 | 0,79 |
| P25 | 192,19 | 193,17 | 0,98 |
| P26 | 193,17 | 194,01 | 0,84 |
| P27 | 199,83 | 200,71 | 0,88 |
| P28 | 193,50 | 194,42 | 0,92 |
| P29 | 192,25 | 193,20 | 0,95 |
| P30 | 193,63 | 194,53 | 0,90 |

A partir dos valores da Tabela 3.11, para uma pressão de 70 PSI, temos uma massa

média absorvida de:

$$\langle m_{p,70} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} m_k = 0,984g \quad (3.17)$$

Considerando o desvio padrão médio, temos:

$$m_{p,70} = (0,98 \pm 0,04)g \quad (3.18)$$

Tabela 3.11: Resultado da terceira série de colisões (poliéster)

| Tipo de tecido: Poliéster - Pressão no pistão: 70 PSI | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Placa | Massa inicial m_i (g) | Massa final m_f (g) | Massa absorvida $m_{p,70}$ (g) |
| P21 | 186,52 | 187,53 | 1,01 |
| P22 | 191,20 | 192,19 | 0,99 |
| P23 | 193,60 | 194,55 | 0,95 |
| P24 | 192,15 | 193,15 | 1,00 |
| P25 | 192,20 | 193,18 | 0,98 |
| P26 | 193,19 | 194,23 | 1,04 |
| P27 | 199,82 | 200,75 | 0,93 |
| P28 | 193,51 | 194,45 | 0,94 |
| P29 | 192,24 | 193,22 | 0,98 |
| P30 | 193,64 | 194,66 | 1,02 |

A Tabela 3.12 resume os resultados obtidos até aqui:

Tabela 3.12: Valores médios da massa absorvida para a superfície revestida com poliéster de acordo com a pressão do pistão.

| Pressão em PSI | $\langle m \rangle$ em g |
|----------------|--------------------------|
| 30 | 0,70 |
| 50 | 0,88 |
| 70 | 0,98 |

A Tabela 3.13 fornece uma melhor visão do aumento da massa de água absorvida das gotas de 6 mm de diâmetro de acordo com a pressão do pistão e com a variação do tipo de tecido:

Tabela 3.13: Comparação da massa de água absorvida para os três tipos de tecido (usando gotas com 6 mm de diâmetro).

| Pressão em PSI | $\langle m \rangle$ em g | $\langle m \rangle$ em g | $\langle m \rangle$ em g |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Flanela | Jeans | Poliéster |
| 30 | 0,46 | 0,40 | 0,70 |
| 50 | 0,81 | 0,74 | 0,88 |
| 70 | 1,03 | 0,88 | 0,98 |

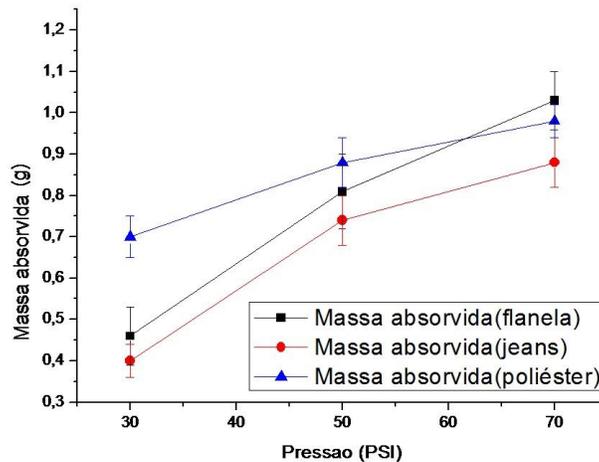


Figura 3.20: Pontos experimentais da massa de água absorvida em função da pressão (gotas de 6 mm de diâmetro).

O gráfico na Fig. 3.20 foi plotado usando-se os dados da tabela 3.13. Um fato interessante a ser observado é o seguinte: observe que quando saímos de 30 PSI para 50 PSI a variação da massa absorvida é maior do que quando saímos de 50 PSI para 70 PSI. Destacamos que esse resultado está de acordo com nosso modelo refinado para a massa absorvida em função da velocidade.

A seguir, iremos exibir os dados obtidos para as colisões com gotas de água com 4 mm de diâmetro e com massa média $M = (0,35 \pm 0,01)g$ (massa de dez gotas de água). Da mesma forma que para as gotas de 6 mm de diâmetro, colidimos dez gotas por placa. Destacamos que vamos exibir apenas os valores médios de cada série de colisões, ou seja, não iremos exibir tabelas como, por exemplo, a Tabela 3.10. Uma vez que o método usado foi o mesmo das gotas de 6 mm, seremos mais objetivos no decorrer desta seção.

Para as gotas de 4 mm de diâmetro, a tabela a seguir exibe os valores médios da massa de água absorvida para colisões a 30 PSI, 50 PSI e 70 PSI:

Tabela 3.14: Comparação da massa de água absorvida para os três tipos de tecido (usando gotas de 4 mm de diâmetro).

| Pressão em <i>PSI</i> | < <i>m</i> > em <i>g</i> | < <i>m</i> > em <i>g</i> | < <i>m</i> > em <i>g</i> |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Flanela | Jeans | Poliéster |
| 30 | 0,11 | 0,08 | 0,15 |
| 50 | 0,21 | 0,18 | 0,21 |
| 70 | 0,30 | 0,22 | 0,25 |

A Fig. 3.21 mostra os pontos experimentais da fração absorvida das gotas de 4 mm de diâmetro a partir dos dados da Tabela 3.14⁴.

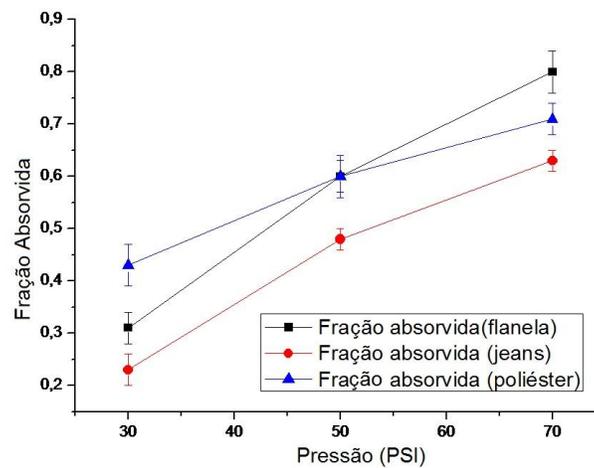


Figura 3.21: Pontos experimentais da fração absorvida em função da pressão (gotas de 4 mm de diâmetro).

Para as gotas de 2,5 mm de diâmetro tivemos dificuldade para medir a massa de água de uma única gota, umas vez que estávamos trabalhando com uma balança semi-analítica (com precisão de apenas duas casas decimais). Com isso, foi necessário efetuar a colisão de vinte gotas de água por placa, uma vez que tais gotas possuem uma massa média muito pequena de aproximadamente 6,5 mg, enquanto que a massa média de vinte gotas é $M = (0,13 \pm 0,01)g$.

⁴Com os dados da Tabela 3.14 basta calcular a razão entre tais valores e a massa média de dez gotas de água de 4 mm de diâmetro $M = (0,35 \pm 0,01)g$.

Tabela 3.15: Comparação da massa de água absorvida para os três tipos de tecido (usando gotas de 2,5 mm de diâmetro).

| Pressão em PSI | $\langle m \rangle$ em g | $\langle m \rangle$ em g | $\langle m \rangle$ em g |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Flanela | Jeans | Poliéster |
| 30 | 0,08 | 0,08 | 0,09 |
| 50 | 0,13 | 0,12 | 0,12 |
| 70 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |

O gráfico da figura a seguir exibe os pontos experimentais, obtidos a partir da tabela acima⁵, da fração absorvida das gotas de água de 2,5 mm de diâmetro:

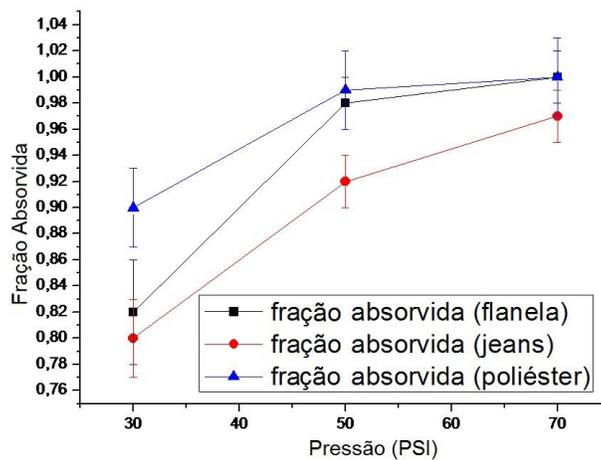


Figura 3.22: Pontos experimentais da fração absorvida em função da pressão (gotas de 2,5 mm de diâmetro).

Na Fig. 3.22 devemos observar que, diferentemente do que ocorreu com as gotas de 6 mm e 4 mm, para uma pressão de 70 PSI tivemos uma fração absorvida de 100%. Ou seja, toda a massa de água incidente foi completamente absorvida. Devemos notar também que mesmo a gota de água de 2,5 mm de diâmetro sendo muito pequena, para colisões a 30PSI e a 50 PSI ainda tivemos o respingo.

Na Fig. 3.23 temos o gráfico da fração absorvida da massa de uma gota de água de 6 mm de diâmetro numa colisão com uma superfície absorvente (lembrando que foi a sua busca que nos levou ao desenvolvimento de toda nossa investigação experimental). Tal fração absorvida foi obtida calculando-se a razão m/M , onde m

⁵Com os dados da Tabela 3.15 basta calcular a razão entre tais valores e a massa média de vinte gotas de água de 2,5 mm de diâmetro $M = (0,13 \pm 0,01)g$.

representa a massa absorvida e M representa a massa de uma gota de água (massa incidente).

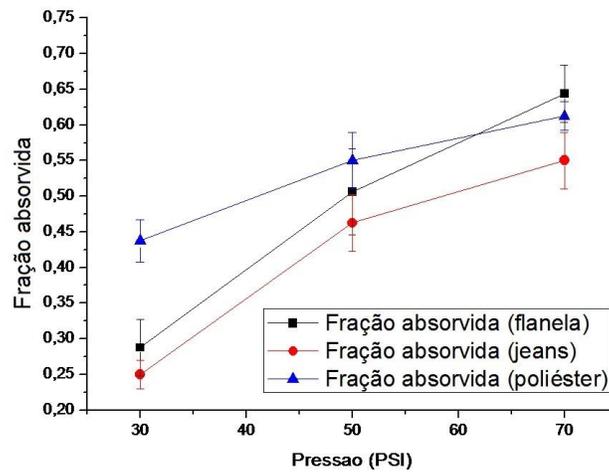


Figura 3.23: Pontos experimentais da fração absorvida em função da pressão (gotas de 6 mm de diâmetro).

Para reforçar nossa discussão, atente para expressão da fração absorvida obtida na seção 2.2, mas agora em termos da velocidade:

$$\gamma_F(v) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v_q^2}{v^2}}} \quad (3.19)$$

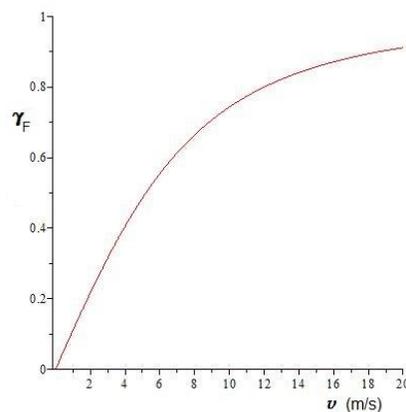


Figura 3.24: Gráfico de γ_F versus v , com $v_q = 9\text{ m/s}$.

Como podemos observar na Fig 3.24, à medida que v aumenta, o gráfico vai ganhando uma forma assintótica. Isso significa que a fração absorvida está tendendo

ao seu limite máximo $\gamma_F = 1$. Observe também, no gráfico da Fig. 3.24, que uma variação Δv para algum valor inicial de v gera um aumento maior da fração absorvida do que no caso de uma mesma variação Δv para um valor inicial de v mais alto. Por exemplo, observe que sair de 4 m/s para 8 m/s gera um aumento significativo em γ quando comparado a sair de 10 m/s para 14 m/s. Note que esse efeito é semelhante ao que observamos no gráfico da Fig. 3.23, ou na Fig. 3.22, ou na Fig. 3.21, exceto pelo fato de o aumento ser dado em termos da variação de pressão do pistão pneumático, ao invés da velocidade. Passemos à seguinte reflexão: sabemos que o movimento do carro no qual transporta as superfícies absorventes é dado através do acionamento do pistão pneumático de modo que: quanto maior sua pressão maior será sua velocidade. Não conhecemos nenhum tipo de relação matemática entre a pressão calocada no pistão e a velocidade que o carro adquire, mas sabemos que quanto maior a pressão, maior a velocidade. Acreditamos que nosso êxito está em obter pontos experimentais, mesmo de uma forma indireta (em termos da pressão no pistão), que apresentam um comportamento semelhante ao da curva teórica (estando essa em função da velocidade). No futuro, quando o experimento for refinado, abrindo a possibilidade de medir velocidades - como foi planejado no início deste capítulo - teremos com certeza a possibilidade de confrontar a curva teórica com a curva experimental, e, se possível, ajustar, caso necessite, nosso modelo teórico.

Capítulo 4

Conclusões e Perspectivas

Neste capítulo temos nossas considerações finais sobre o trabalho, destacando as contribuições deixadas e as perspectivas para a continuação do mesmo.

4.1 Conclusões

Vamos iniciar com a parte teórica deste trabalho. O modelo refinado apresentado na seção 2.2 acreditamos ser um ponto de partida para novas discussões acerca do problema de andar ou correr na chuva, pois a ideia que se tinha anteriormente, apenas analisando os modelos encontrados num período de quase 30 anos, é que tal problema já estava devidamente solucionado, uma vez que todas as abordagens levavam à mesma resposta - é melhor correr! Com o nosso modelo, mostramos que na verdade estamos longe de resolver tal problema, pois, se sairmos acrescentando todas as variáveis envolvidas, iremos torná-lo insolúvel. O fato de nosso modelo refinado apresentar uma velocidade ótima, com a qual se molha o mínimo possível, é uma demonstração de como a inserção de novos elementos podem proporcionar novas respostas. Contudo, devemos ressaltar que um modelo teórico é uma idealização, descrita pela matemática, que fazemos de determinado fenômeno, ou seja, não é o fenômeno em si.

Geralmente, a ideia que se tem de um cientista é a de que ele é uma pessoa que elabora grandes teorias, que planeja experimentos que funcionam perfeitamente - uma pessoa que não enfrenta problemas tanto em questões matemáticas, como uma integral que não tem solução, quanto do ponto de vista experimental, como um circuito que apresenta problemas, mas que ele não consegue identificar - porém não é assim. A cada modelo ou experimento proposto, as dificuldades estarão sempre presentes. Às vezes os próprios estudantes de graduação em física ou em áreas afins têm essa visão, pois sua rotina acadêmica está em resolver problemas dos livros-texto, em que para saber se suas respostas estão certas ou não, basta olhar no final

do livro. Não queremos dizer que isso está errado. Pelo contrário, faz parte da formação, mas acreditamos que o amadurecimento do estudante de ciências exatas ocorre quando ele se depara com problemas nos quais ele não conhece a solução.

Em relação ao nosso trabalho experimental, nosso aprendizado foi bastante significativo. Vimos como é complicado planejar com todos os detalhes o funcionamento de um experimento e conseguir por tudo em prática. Um exemplo claro está em nosso aparato, que de início foi planejado para conseguir medir a velocidade com que as superfícies absorventes colidiam com as gotas de água, para que pudéssemos investigar se a fração absorvida de cada gota de água segue a função proposta em nosso modelo. De fato, os dispositivos necessários para efetuar tal medição foram implantados na plataforma e no caminho percorrido pelas gotas de água (sensores de infravermelho encontrados nas imagens e esquemas do aparato), porém não obtivemos êxito ao elaborar um programa capaz de medir com boa precisão a velocidade do carro. De modo que isso nos levou a realizar nossa investigação experimental em função da pressão colocada no pistão pneumático, uma vez que de alguma forma a velocidade do carro depende dessa pressão. Como pode ser observado no capítulo 3, construímos cada item do aparato experimental, mas o conhecimento que adquirimos ao montar cada item de nosso aparato foi recompensador.

No que se diz respeito aos resultados experimentais que obtivemos, só o fato dos pontos experimentais apresentarem um comportamento semelhante ao do gráfico da fração absorvida em termos da velocidade (lembrando que os pontos experimentais foram obtidos em termos da pressão) nos foi o bastante para finalizar esta monografia. Tais resultados mostram o indício de que a fração absorvida aumenta de acordo com a velocidade de colisão, uma vez que quanto maior a pressão colocada no pistão, maior a velocidade que o carro adquire. Podemos (ou não) ter errado em nosso modelo teórico sobre a forma como tal fração aumenta, mas só o fato dela aumentar já é de grande importância para nós. Quanto à questão de andar ou correr na chuva, infelizmente a única recomendação que temos no momento é: tenha à mão um guarda-chuva.

4.2 Perspectivas

Como foi dito no capítulo 3, os itens do nosso aparato experimental foram desenvolvidos com suporte para novas adaptações e melhorias, uma vez que as limitações nas quais nosso experimento foi realizado devem ser superadas para que possamos obter os dados necessários para um confronto formal entre teoria e experimento. De modo que destacamos a seguir os pontos nos quais devem ser trabalhados:

- Automatizar todo o aparato experimental: deixar que a gota seja detectado

pelo sensor infravermelho e com isso o carro entre em movimento para efetuar a colisão da superfície revestida com tecido e a gota de água;

- Aperfeiçoar a interface para aquisição de dados, para que ela seja capaz de medir velocidades;
- Efetuar com maior precisão a medida da massa de água absorvida e da fração absorvida. De preferência usar uma balança analítica (com quatro casas decimais);
- Repetir, após o aparato totalmente aperfeiçoado, o maior número de vezes o experimento para que se possa obter confiança nos dados obtidos;
- Comparar a curva teórica com os resultados experimentais e, dependendo, efetuar correções no modelo teórico.

Referências Bibliográficas

- [1] DE ANGELIS, A. **Is it really worth running in the rain?**, European Journal of Physics, **8**,201,1987.
- [2] STERN, S. A. **An optimal speed for traversing a constant rain**, American Journal of Physics, **51**, 815, 1983.
- [3] BAYLEI, H. **On running in the rain**, The College Mathematics Journal, **33**, 88, 2002.
- [4] KROETZ, T. **The “running in the rain” problem revisited: an analytical and numerical approach**, Revista Brasileira de Ensino de Física, **31**, 4304, 2009.
- [5] EHRMANN, A., BLACHOWICZ, T. **Walking or running in the rain - a simple derivation of a general solution**, European Journal of Physics, **32**, 355, 2011.
- [6] CARACCILOLO, C., PORCÙ, F., PRODI, F. **Precipitation classification at mid-latitudes in terms of drops size distribution parameters**, Advances in Geosciences, **16**, 11, 2008.
- [7] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Antropometria e estado nutricional de crianças, adolescentes e adultos no Brasil. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pof/2008/default-tabpdf.shtm>. Acesso em: 10 de abril de 2014.
- [8] HENKEL. Adesivos, selantes e revestimentos. Disponível em: <http://www.henkel.com.br>. Acesso em: 07 de julho de 2014.
- [9] DATASHEET DIRECTORY. Optoelectronics: optocouplers. Disponível em: <http://www.datasheetdir.com/4N25+Optocouplers>. Acesso em: 07 de julho de 2014.
- [10] ROGERCOM. Introdução à Porta Paralela. Disponível em: <http://www.rogercom.com/pparalela/introducao.htm>. Acesso em: 07 de julho de 2014.

- [11] ROGERCOM. Porta Paralela: acessando a porta paralela nas versões do windows NT/2000 e XP. Disponível em: <http://www.rogercom.com/pparalela/ExemploImpOut32.htm>. Acesso em: 07 de julho de 2014.

Apêndice A

Comparações com Modelos Anteriores

Nosso objetivo neste apêndice é mostrar a equivalência entre os resultados obtidos na seção 2.1 (representado pela igualdade (2.8) ou, alternativamente, pela igualdade (2.12) ou pela igualdade (2.13)) e os resultados publicados em nosso referencial teórico de [1-5], no caso particular de uma chuva vertical constante.

Modelo de Stern, 1983

No trabalho de Stern [2], o “indivíduo” é representado por um plano inclinado que se desloca com velocidade v_H , como mostrado na figura a seguir

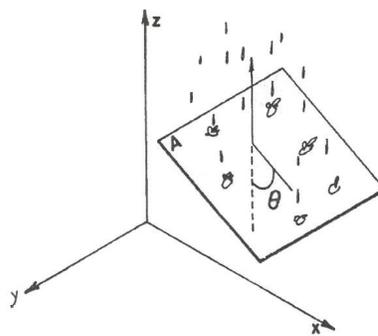


Figura A.1: Representação geométrica do indivíduo, extraída do artigo de Stern [2].

Em seu trabalho, encontramos a igualdade

$$S = N \left(\frac{A_H}{v_H} + \frac{A_z}{v_z} \right) D_H, \quad (\text{A.1})$$

em que:

- S é o número total de gotas que atingem um certo elemento de superfície, que corresponde ao paralelepípedo na Fig. 2.1;

- N é o número total de gotas que atingem o solo por unidade de tempo por unidade de área;
- A_H é a área da seção de choque horizontal, que corresponde à face superior do paralelepípedo na Fig. 2.1;
- A_z é a área de seção de choque vertical, que corresponde a face superior do paralelepípedo na Fig. 2.1;
- v_H é a velocidade de percurso;
- v_z é a velocidade terminal das gotas de chuva;
- D_H é a distância percorrida.

Multiplicando S e N pela massa de uma gota de chuva obtemos, respectivamente, a massa M de água que atinge o indivíduo e a massa \tilde{M} de água que atinge o solo por unidade de tempo por unidade de área. Resultado:

$$M = \tilde{M} \left(\frac{A_H}{v_H} + \frac{A_z}{v_z} \right) D_H \quad (\text{A.2})$$

A equivalência entre a igualdade (A.2) e a igualdade (2.12) fica clara observando-se as seguintes correspondências:

- A_H corresponde, em nosso modelo, à área ab ;
- A_z corresponde à área bc ;
- v_H corresponde à velocidade v ;
- v_z corresponde à velocidade v_q ;
- D_H corresponde à distância L .

Modelo de De Angelis, 1987

No trabalho de De Angelis [1], o indivíduo é representado por um paralelepípedo (da mesma forma que o representamos na seção 2.1), como mostra a Fig. A.2.

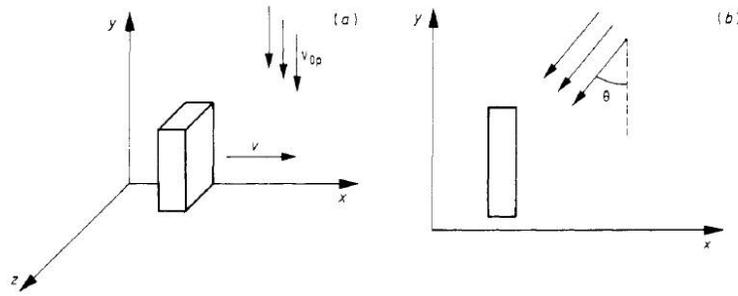


Figura A.2: Representação geométrica do indivíduo - extraída do artigo de De Angelis [1].

A igualdade a seguir representa o número total de gotas de chuva que atinge o indivíduo durante seu percurso

$$N = \mu D_z \left(\frac{D_x}{v} + \frac{D_y}{v_{0p}} \right), \quad (\text{A.3})$$

com

$$\mu \equiv \frac{s v_{0p}}{d_{0x} d_{0y} d_{0z}}. \quad (\text{A.4})$$

Na igualdade (A.3),

- N é o número total de gotas que atingem um paralelepípedo equivalente ao apresentado na Fig. 2.1;
- D_x , D_y e D_z são as dimensões do paralelepípedo;
- v é a velocidade de percurso;
- v_{0p} é a velocidade de queda da chuva.

Na igualdade (A.4), que define a constante μ ,

- s é a distância percorrida;
- d_{0x} , d_{0y} e d_{0z} são as distâncias médias entre as gotas de chuva ao longo dos eixos coordenados x , y e z , respectivamente.

Observe que N , na igualdade (A.1), tem significado distinto de N na igualdade (A.3). Multiplicando N (da igualdade (A.3)) pela massa m de uma gota de chuva obtemos

a massa M de água que atinge o indivíduo. Multiplicando também por m o segundo membro da igualdade (A.3) e usando a igualdade (A.4), obtemos

$$M = \frac{m}{d_{0x}d_{0y}d_{0z}}sD_yD_z + \frac{m}{d_{0x}d_{0y}d_{0z}}\frac{sD_xD_zv_{0p}}{v}. \quad (\text{A.5})$$

A equivalência entre a igualdade (A.5) e a igualdade (2.8) fica clara observando-se que

- A razão $m/(d_{0x}d_{0y}d_{0z})$ é a densidade média ρ de água da chuva;
- D_x , D_y e D_z correspondem, em nosso modelo, respectivamente a a , b e c ;
- s corresponde a L ;
- v tem o mesmo significado nas Eqs. (A.5) e (2.8);
- v_{0p} corresponde à velocidade v_q .

Modelo de Bailey, 2002

No trabalho de Bailey [3], o indivíduo é representado praticamente da mesma maneira que no artigo de De Angelis. Ou seja, também é usado um tipo de paralelepípedo, como mostra a Fig.A.3.

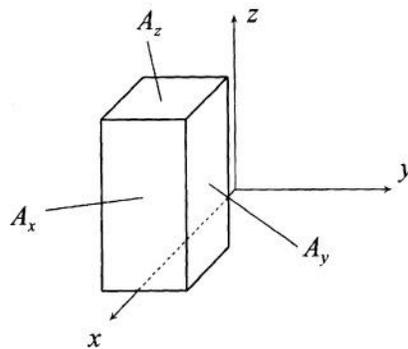


Figura A.3: Representação geométrica de um indivíduo que desloca-se na direção do eixo x sob chuva (figura extraída do artigo de Bailey [3]).

Em seu artigo, Bailey considera que o paralelepípedo é atingido pelas gotas de chuva nas faces superior, frontal e lateral. Ou seja, ele não considera uma chuva puramente vertical, de modo que a velocidade das gotas possui componentes v_x , v_y e v_z . Com isso é encontrada a seguinte igualdade,

$$R(v_s) = \begin{cases} R_1(v_s) = \frac{D\rho}{v_s} [(v_x - v_s)A_x + |v_y|A_y + |v_z|A_z], & v_s \leq v_x \\ R_2(v_s) = \frac{D\rho}{v_s} [(v_s - v_x)A_x + |v_y|A_y + |v_z|A_z], & v_s > v_x \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

Para o caso em que $v_s > v_x$ (em que v_s representa a velocidade do indivíduo), temos

$$R(v_s) = \frac{D\rho}{v_s} [(v_s - v_x)A_x + |v_y|A_y + |v_z|A_z] \quad (\text{A.7})$$

em que

- R é o volume total de chuva que atinge um paralelepípedo equivalente ao apresentado na Fig.2.1;
- v_s é a velocidade de percurso;
- D é a distância percorrida;
- ρ é o volume de chuva por unidade de volume de ar;
- v_x , v_y e v_z são as componentes cartesianas da velocidade da chuva;
- A_x , A_y e A_z são, respectivamente, as áreas das faces frontal, lateral e superior do paralelepípedo.

Observe que ρ , na igualdade (A.6), não corresponde ao ρ da igualdade (2.8), mas ao λ da igualdade (2.1). Assim, trocando ρ por λ na Eq. (A.6) obtemos, para o caso de uma chuva vertical (onde $v_x = v_y = 0$),

$$R(v_s) = \frac{D\lambda}{v_s} (v_s A_x + |v_z|A_z). \quad (\text{A.8})$$

Multiplicando R por $\rho_{\text{água}}$ obtemos a massa M de água que atinge o indivíduo. Multiplicando também por $\rho_{\text{água}}$ o segundo membro da igualdade (A.7) e usando a igualdade (2.1), obtemos

$$M = \frac{D\rho}{v_s} (v_s A_x + |v_z|A_z). \quad (\text{A.9})$$

A equivalência entre a igualdade (A.9) e a igualdade (2.8) fica clara observando-se que

- M e ρ têm o mesmo significado nas Eqs. (A.9) e (2.8);
- D corresponde, em nosso modelo, à distância L ;
- $|v_z|$ corresponde a v_q ;
- A_x corresponde ao produto bc ;
- A_z corresponde ao produto ab .

Modelo de Kroetz, 2009

No trabalho de Kroetz [4], assim como no de Bailey, o autor considera a incidência de chuva nas faces laterais. O interessante de sua modelagem é que ele considera a organização das gotas de chuva na forma de uma rede tridimensional, na qual ele denomina de “estrutura tridimensional com célula unitária tetragonal”, observe tal representação na Fig. A.4.

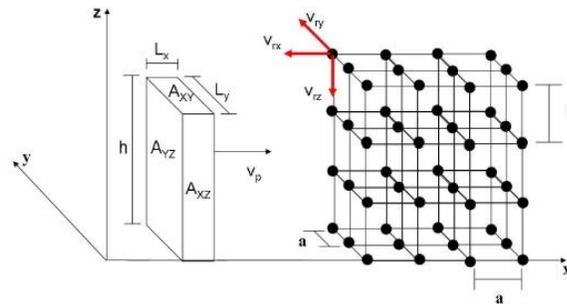


Figura A.4: Representação geométrica do indivíduo, extraída do artigo de Kroetz [4].

Em seu artigo, é fornecida um expressão para o volume total de água que atinge o indivíduo em seu percurso, veja a seguir:

$$V_{total} = PD \left[\frac{A_{xy}}{v_p} + \frac{\left| 1 - \frac{v_{rx}}{v_p} \right|}{|v_{rz}|} A_{yz} + \frac{|v_{ry}|}{|v_{rz}| v_p} A_{xz} \right]. \quad (A.10)$$

A igualdade acima, para o caso de uma chuva vertical constante (onde as componentes v_{rx} e v_{ry} da velocidade da chuva são nulas), fica da seguinte forma:

$$V_{total} = PD \left[\frac{A_{xy}}{v_p} + \frac{A_{yz}}{|v_{rz}|} \right]. \quad (A.11)$$

Nesta igualdade,

- V_{total} é o volume de água que atinge o paralelepípedo da Fig. A.4;
- P é a taxa de precipitação de chuva;
- D é a distância percorrida;
- A_{xy} é a área da face superior do paralelepípedo;
- A_{yz} é a área da face frontal do paralelepípedo;
- v_p é a velocidade de percurso;
- $|v_{rz}|$ é o módulo da componente vertical da chuva - obviamente, a única componente no caso de uma chuva vertical.

A equivalência entre as igualdades (A.9) e (2.13) fica clara observando-se as seguintes correspondências:

- V_{total} corresponde, em nosso modelo, ao volume V ;
- P corresponde a \tilde{V} ;
- D corresponde a L ;
- A_{xy} corresponde ao produto ab ;
- A_{yz} corresponde ao produto bc ;
- v_p corresponde a v ;
- $|v_{rz}|$ corresponde a v_q .

Modelo de Ehrmann e Blachowicz, 2011

No trabalho de Ehrmann e Blachowicz [5] encontramos duas particularidades. Primeiro, eles representam o indivíduo por um cilindro (veja Fig. A.5). Segundo, que eles não apresentam sua resposta na forma de uma igualdade (como obtido nos outros modelos), mas é fornecida uma relação de proporcionalidade. Veja:

$$w \propto \pi r^2 s \frac{v_{Ry}}{v_x} + 2hrs \frac{|v_H - v_x|}{v_x} \quad (\text{A.12})$$

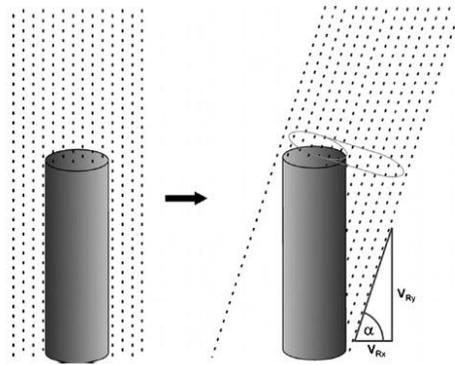


Figura A.5: Representação do indivíduo retirada do artigo de Ehrmann e Blachowicz [5].

A relação de proporcionalidade (A.12) fica, para o caso de uma chuva vertical (onde a componente horizontal v_H da velocidade da chuva é nula),

$$w \propto \pi r^2 s \frac{v_{Ry}}{v_x} + 2hrs. \quad (\text{A.13})$$

Nesta relação,

- w é uma grandeza (denominada de “wetting” pelos autores) que quantifica o quão molhado o indivíduo conclui o seu percurso (sua dimensão não é importante, porque temos na Eq. (A.10) uma relação de proporcionalidade, não uma igualdade);
- r é o raio e h a altura do cilindro que modela o indivíduo;
- s é a distância percorrida;
- v_x é a velocidade de percurso;
- v_{Ry} é a componente vertical da chuva.

Para encontrarmos a equivalência entre a relação de proporcionalidade (A.13) e a igualdade (2.8), devemos inicialmente observar que qualquer gota de chuva que atinge o cilindro de raio r e altura h interceptaria, se continuasse seu movimento retilíneo uniforme em um referencial fixo em relação ao cilindro, uma das seguintes regiões: o retângulo de base $2r$, altura h e direção perpendicular à direção de movimento, que divide o cilindro em duas partes iguais; o semicírculo superior de raio r à esquerda deste retângulo; o semicírculo inferior de raio r à direita do retângulo. Em termos de seções de choque, esses dois semicírculos, juntos, correspondem à região superior do cilindro que modela o indivíduo no trabalho de Ehrmann e Blachowicz

e, portanto, à face superior do paralelepípedo nas Figs. 2.1 e 2.2. O que sobra (o retângulo de base $2r$ e altura h) corresponde à região lateral do cilindro e à face frontal do paralelepípedo nas Figs. 2.1 e 2.2. Assim, a equivalência entre a relação de proporcionalidade (A.13) e a igualdade (2.8) fica clara observando-se as seguintes correspondências:

- a área πr^2 corresponde, em nosso modelo, à área ab ;
- a área $2rh$ corresponde à área bc ;
- s corresponde à distância L ;
- v_x corresponde a v ;
- v_{Ry} corresponde a v_q .

Note que, com essas correspondências, a expressão na Eq. (A.13) só difere do membro direito na Eq. (2.8) pelo fator ρ , que pode ser visto como um fator de proporcionalidade.

Após esta análise dos modelos publicados num período de quase 30 anos, e pela equivalência entre eles, ou seja, pelo fato deles fornecerem a mesma resposta quando submetidos às mesmas condições - cumprir um percurso fixo numa chuva vertical constante - poderíamos concluir que o problema de andar ou correr na chuva estaria solucionado.

Apêndice B

Lista de Publicações

O trabalho relativo à parte teórica desta monografia (Capítulo 2) foi publicado em 2013 na Revista Brasileira de Ensino de Física.

- ▷ PATRIOTA, H., BERTUOLA, A. C., PEIXOTO, P. Andar ou correr na chuva: um problema não-trivial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, 2013.
(<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/353316.pdf>)

O desenvolvimento do aparato experimental, juntamente com nossos resultados teóricos, foram apresentados no Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada e no Encontro de Físicos do Norte e Nordeste, com seus respectivos resumos publicados nos Anais de cada evento.

- ▷ PATRIOTA, H., SALVADOR, C., PEIXOTO, P. Investigação experimental da fração de água absorvida numa colisão com uma superfície absorvente. **XXXVI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**, 2013.
(<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/enfmc/xxxvi/sys/resumos/R0194-1.pdf>)
- ▷ PATRIOTA, H., PEIXOTO, P. Andar ou correr na chuva? Estudo de colisões de gotas de água com superfícies absorvente. **XXX Encontro de Físicos do Norte e Nordeste**, 2012.
(<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/efnne/xxx/sys/resumos/R0135-1.pdf>)

Apêndice C

Circuito para interface com computador

A Fig. C.1 consiste no diagrama do circuito usado em nosso experimento no formato para placa de circuito impresso.

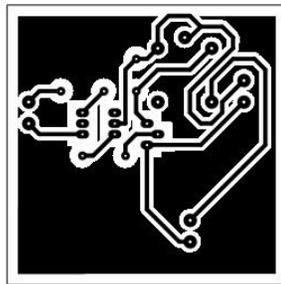


Figura C.1: Circuito no formato para impressão na PCI

A Fig. C.2 serve como guia de montagem dos componentes eletrônicos na PCI.

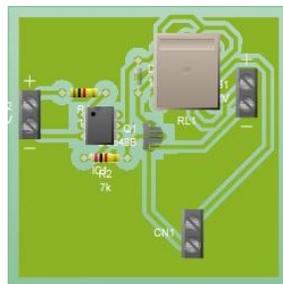


Figura C.2: Ilustração dos componentes na PCI

As referências dos componentes eletrônicos usados em nosso circuito da Fig. 3.14 estão destacadas a seguir:

1. Transistor BC 548 NPN;
2. Relé 12V;
3. Terminal de dois pinos;
4. Diodo 1N4001;
5. Resistor $1k\Omega$ potência de $(1/8)W$;
6. Resistor $7k\Omega$ potência de $(1/8)W$.

Apêndice D

Fotografias do Aparato Experimental

Nosso objetivo com este apêndice é exibir mais detalhes de nosso aparato experimental, para que interessados no tema possam reproduzir nossa montagem.

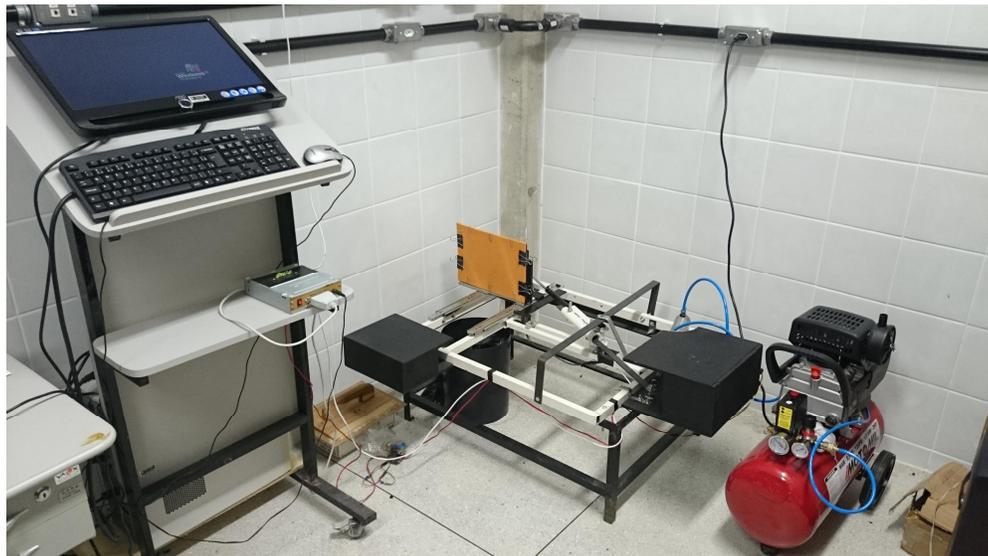


Figura D.1: Versão final do sistema de colisões de gotas de água com superfícies absorventes.



Figura D.2: Vista superior da plataforma.



Figura D.3: Placa revestida com tecido presa aos trilhos.

Apêndice E

Programa de controle da porta paralela

A seguir, temos o programa completo usado em nosso experimento para controle do pistão pneumático.

```
1  #include <stdio.h> // Biblioteca Standard Input/Output
2  #include <conio.h> // Biblioteca necessaria para o uso da
   funcao getch();
3  #include <windows.h> // Biblioteca necessaria para o carregamento
   da inpout32.dll
4
5  ////Liberando a porta paralela para envio de dados para
   dispositivos perifericos desconhecidos
6  typedef short _stdcall (*PtrInp)(short EndPorta);
7  typedef void _stdcall (*PtrOut)(short EndPorta, short datum);
8  HINSTANCE hLib; //Instancia para a DLL inpout32.dll.
9  PtrInp inpoutb; //Instancia para a funcao Imp32().
10 PtrOut outportB; //Instancia para a funcao Out32().
11
12 int main()
13 {
14     //Carrega a DLL na memoria.
15     hLib = LoadLibrary("inpout32.dll");
16     if(hLib == NULL)
17     {
18         printf("\n\taErro. O arquivo inpout32.DLL nao foi encontrado
19             .\n0 programa vai terminar apos digitar qualquer tecla."
20             );
21         getch();
22     }
23     else { //Todo o programa so sera executado apenas se a dll for
24         carregada.
```

```
22 //Obtem o endereco da funcao Inp32 contida na DLL.
23 inportb = (PtrInp) GetProcAddress(hLib, "Inp32");
24 if(inportB == NULL)
25 {
26     printf("\n\aErro. Erro ao enderecar a funcao Inp32.");
27 }
28 //Obtem o endereco da funcao Out32 contida na DLL.
29 outportb = (PtrOut) GetProcAddress(hLib, "Out32");
30 if(outportb == NULL)
31 {
32     printf("\n\aErro. Erro ao enderecar a funcao Out32.");
33
34 }
35 ///Fim da liberacao da porta paralela
36
37 ///Inicio do programa para envio de bytes a porta paralela
38
39 char teclado=' ';
40 puts("Vamos ao controle do nosso aparato experimental.");
41 puts(" Para acionar o pistao tecle 2; para desaciona-lo tecle 0;
42     quando quiser parar o processo, tecle p; para acender algum dos
43     outros LEDs de indicacao use as teclas relacionada a eles: 1, 3,
44     4, 5, 6, 7 ");
45 teclado=getch();
46 while(teclado!='p')
47 {
48     switch(teclado)
49     {
50         case '0':
51             outportb(0x378,1); // A funcao que manda um byte para a
52                 porta paralela no caso o numero 1 ou 0000 0001 em
53                 binario
54             break;
55         case '1':
56             outportb(0x378,2);
57             break;
58         case '2':
59             outportb(0x378,4);
60             break;
61         case '3':
62             outportb(0x378,8);
```

```
58         break;
59     case '4':
60         outportb(0x378,16);
61         break;
62     case '5':
63         outportb(0x378,32);
64         break;
65     case '6':
66         outportb(0x378,64);
67         break;
68     case '7':
69         outportb(0x378,128);
70         break;
71     }
72     teclado=getch();
73 }
74
75 outportb(0x378,0);
76 }//fim do else pertencente ao if que testa se carregou a dll
77
78 }//fim da funcao main e do programa
```