

1 2



9 0

UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

João Francisco de Sousa Jordão  
Carvalho

Instalação experimental  
para estudo do impacto de  
múltiplas gotas em  
superfícies secas

Dissertação no âmbito do Mestrado em  
Engenharia Mecânica na Especialidade de  
Produção e Projeto orientado por Professor  
Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão e apresentada  
ao departamento de Engenharia Mecânica

Setembro de 2022





FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# Instalação experimental para estudo do impacto de múltiplas gotas em superfícies secas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

**João Francisco de Sousa Jordão Carvalheiro**

Orientador

**Miguel Rosa Oliveira Panão**

Júri

Presidente	Professor Doutor <b>Almerindo Domingues Ferreira</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor <b>Miguel Rosa Oliveira Panão</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor <b>André Silva</b> Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

Colaboração Institucional

---



Universidade  
de Coimbra



Associação  
para o Desenvolvimento da  
Aerodinâmica  
Industrial

Coimbra, Setembro, 2022



*[Imagination is more important than knowledge. Knowledge is limited. Imagination  
encircles the world.]*  
*[Albert Einstein]*

*Obrigado família.*



## Agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Miguel Panão por todo o apoio prestado, pelos conselhos e material disponibilizado e orientação que me deu durante este percurso. Agradeço ao meu colega de laboratório Miguel toda a ajuda que me deu no decorrer das experiências levadas a cabo, sem ele esta tarefa teria sido mais árdua. Agradeço aos meus amigos e colegas que me ajudaram a superar as dificuldades inerentes a estes últimos cinco anos. Um agradecimento especial à Inês por todo apoio, cumplicidade e sentimento de entreajuda para comigo nestes últimos anos. Uma palavra especial para a minha irmã Ana Luísa, que mesmo nos momentos de desânimo, soube sempre estar presente. Por último, quero agradecer à minha família, por terem acreditado em mim ao longo de todo este processo, mesmo quando tive que pôr o desporto em primeiro lugar e por em pausa os estudos. Foram todas estas pessoas que tornaram este caminho mais fácil ajudando-me a superar os desafios tanto a nível académico, como desportivo, nesta maratona que foi o curso de Engenharia Mecânica.



## Resumo

O impacto simultâneo de múltiplas gotas é um fenómeno físico presente em múltiplas aplicações de engenharia, nomeadamente, nos sistemas de injeção dos motores de combustão interna, sistemas de aplicação de produtos agrícolas como os adubos foliares, procedimentos de pintura, entre outros. Porém, por ser um fenómeno complexo e cujo mecanismos hidrodinâmicos gerados pela interação das gotas serem ainda pouco compreendidos justifica-se o seu estudo ao nível fundamental com instalações que reproduzem as estruturas morfológicas em condições fronteira e ambiente relativamente controladas. A caracterização das estruturas formadas por interação dos múltiplos impactos de gotas, em particular quando ocorrem em simultâneo, são úteis para a validação dos modelos numéricos que se baseiam ainda nos modelos associados ao impacto de gotas individuais. O principal objetivo desta dissertação consiste no projeto e construção de um protótipo capaz de produzir gotas de diferentes tamanhos para estudo de impactos simultâneos e das estruturas hidrodinâmicas emergentes. A validação da instalação experimental construída recorre à visualização com uma câmara de alta-velocidade das gotas produzidas por agulhas de diferentes diâmetros interiores, de modo a calibrar o tempo de formação da gota e respetivo tamanho. Esta informação é relevante para sincronizar a formação das gotas de modo a que os impactos das mesmas ocorram simultaneamente. Ainda, através de duas perspetivas (lateral e a partir de baixo) usando um prisma refletor, procurou-se validar a obtenção de simultaneidade mediante a calibração realizada e aferir eventuais limitações e cuidados a ter com o funcionamento da instalação. Com os ensaios preliminares realizados, confirmou-se que a visualização da morfologia dos múltiplos impactos de gotas permite avaliar os parâmetros que dominam a evolução das estruturas resultantes a fim de conseguir produzir informação relevante para a validação de modelos que pretendem simular a aleatoriedade inerente a um *spray*.

**Palavras Chave:** Impacto simultâneo de múltiplas gotas, Protótipo, Aleatoriedade, Sincronização de gotas



## Abstract

Simultaneous multiple drop impact is still a poorly understood phenomenon, be it by the lack of existing studies, or its high complexity. Nonetheless it still plays a major role in multiple engineering applications, namely in regard to internal combustion engines' injection systems, agricultural product application systems (as foliar fertilizers) and painting procedures. In terms of predicting structures formed after multiple drop impacts, specifically simultaneous ones, it is still a great challenge for numerical simulations seeing as current impact models are based in phenomena associated with singular impacts. This study aims to obtain a prototype capable of producing simultaneous impacts, in order to, at a later stage, make it possible to analyze them, so as to try and overcome the existing shortfall in current numerical models. The study will consist in a high speed viewing of these phenomena, which will allow for an evaluation of the structures resulting from multiple impacts. In order to simulate the randomness associated with a spray, regarding the size of the drops being projected, several needles with different internal diameters were used, so as to create different sized drops. A key factor in obtaining the desired results was being able to establish a method which would allow for synchronizing drops projected from different needles, seeing as their times would also differ.

**Keywords:** Simultaneous multiple drop impact, prototype, randomness, synchronizing drops



## Conteúdo

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Conteúdo	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Nomenclatura	xix
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Estado atual do conhecimento . . . . .	1
1.1.1 Análise da formação e queda de gotas . . . . .	2
1.1.2 Análise relativa ao impacto de gotas . . . . .	6
1.2 Objetivos . . . . .	16
1.3 Conteúdo da dissertação . . . . .	16
<b>2 Instalação Experimental</b>	<b>17</b>
2.1 Estrutura de Suporte . . . . .	19
2.1.1 Estrutura metálica . . . . .	19
2.1.2 Guias e Sistema de ajuste . . . . .	20
2.1.3 Componentes impressos na impressora 3D . . . . .	21
2.2 Sistema de produção de gotas . . . . .	24
2.2.1 Seringas e Bombas de Seringa . . . . .	24
2.2.2 Tubos de ligação . . . . .	25
2.2.3 Agulhas . . . . .	25
2.3 Componentes da superfície de impacto . . . . .	26
2.3.1 Prisma de vidro óptico . . . . .	26
2.3.2 Suporte para o prisma . . . . .	27
2.4 Sistema de iluminação . . . . .	27
2.4.1 Placa de luz, vidro opalino . . . . .	27
2.4.2 Suporte para aplicar a fita de LED's . . . . .	28
2.5 Sistema de captação de imagem . . . . .	28
<b>3 Técnicas de Diagnóstico e Metodologia Experimental</b>	<b>31</b>
3.1 Sistema de diagnóstico e Fluido utilizado . . . . .	31
3.2 Agulhas em análise . . . . .	32
3.3 Obtenção das dimensões de uma gota pendente . . . . .	32
3.4 Obtenção da velocidade de queda de uma gota pendente . . . . .	34
3.5 Obtenção do desfasamento temporal e espacial entre duas gotas ad- jacentes . . . . .	34
3.6 Tempo de formação de uma gota . . . . .	35

3.7	Sincronizar a queda das gotas . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Análise de Resultados e Discussão</b>	<b>39</b>
4.1	Calibração do tamanho das gotas incidentes. . . . .	39
4.2	Calibração do tempo de formação das gotas. . . . .	40
4.3	Experiências preliminares de impacto múltiplas gotas . . . . .	40
4.3.1	Impactos simultâneos . . . . .	42
4.3.2	Possíveis Explicações para a Atomização Secundária . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>47</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	48
	<b>Bibliografia</b>	<b>49</b>

## Lista de Figuras

1.1	(a) Formação de gotas em agulhas [2] (b) e impacto simultâneo de duas gotas em diferentes superfícies sólidas [3]. . . . .	1
1.2	Ilustração das forças de coesão entre as moléculas de um líquido e as moléculas de ar que originam o fenómeno chamado tensão superficial numa gota de água. . . . .	2
1.3	Ilustração de uma instalação dedicada ao estudo de gotas suspensas . .	3
1.4	Forças ao longo da linha de contacto. . . . .	3
1.5	Representação do diâmetro nominal de uma agulha . . . . .	5
1.6	Imagem esquemática da molhabilidade de uma superfície . . . . .	7
1.7	Imagem esquemática do comportamento de uma gota após o impacto com uma superfície seca. . . . .	8
1.8	Imagem esquemática da deposição de uma gota numa superfície seca. .	8
1.9	Imagem esquemática do fenómeno de atomização secundária de uma gota. .	9
1.10	Diferentes formações provenientes do impacto de uma gota numa superfície solida . . . . .	10
1.11	Representação esquemática do fenómeno da queda de duas . . . . .	12
1.12	Visualização do impacto simultâneo entre três gotas numa superfície aquecida . . . . .	13
1.13	Imagem esquemática do fenómeno do impacto simultâneo de duas gotas	14
1.14	Representação esquemática da coluna de ascensão de liquido proveniente da interação de duas gotas após o impacto. . . . .	15
2.1	Vista geral da elaboração do protótipo . . . . .	17
2.2	Numeração e devida identificação de cada componente que integram o prototipo . . . . .	18
2.3	Dimensões principais da estrutura . . . . .	18
2.4	Construção da estrutura de suporte . . . . .	19
2.5	Procedimento da montagem da estrutura finalizado . . . . .	19
2.6	Representação esquemática do sistema de ajuste . . . . .	20
2.7	Representação esquemática das guias de ajuste . . . . .	20
2.8	Representação esquemática da peça que permite o movimento na vertical	21
2.9	Representação esquemática das peças que permitem o movimento horizontal . . . . .	22
2.10	Representação esquemática das peças que permitem a fixação para os encaixes das agulhas . . . . .	22
2.11	Representação esquemática das peças que permitem a fixação das agulhas	23
2.12	Seringas . . . . .	24
2.13	Bomba de seringas e introdução de parâmetros. . . . .	24
2.14	Tubo usado na instalação . . . . .	25

2.15	Diferentes agulhas usadas durante a realização das experiências . . . . .	25
2.16	Prisma de vidro óptico usado na captação das imagens . . . . .	26
2.17	Representação esquemática do suporte para fixar o prisma . . . . .	27
2.18	Placa de iluminação com vidro opalino . . . . .	27
2.19	Representação esquemática do suporte para obter iluminação vertical .	28
2.20	Câmara de alta velocidade . . . . .	28
2.21	Sistema de iluminação . . . . .	29
3.1	Agulhas usadas na experiência . . . . .	32
3.2	Diâmetro de uma gota pendente . . . . .	33
3.3	Sequência de ações realizadas no Matlab para obter o valor do diâmetro da gota . . . . .	33
3.4	Distância entre centróides da mesma gota em frames consecutivos . . .	34
3.5	Distância entre centróides de duas gotas adjacentes na direção vertical e horizontal . . . . .	34
3.6	Formação e queda de uma gota na ponta de uma agulha . . . . .	35
3.7	Introdução dos dos respectivos valores para os caudais volúmicos nas bombas de seringas. . . . .	36
3.8	Imagem obtida durante o processo de sincronização das gotas . . . . .	37
3.9	Imagem que mostra a simultaneidade obtida durante o processo de sincronização das gotas . . . . .	38
4.1	Diâmetro da gota em milímetros . . . . .	39
4.2	Gráfico tempos de formação das gotas para várias agulhas . . . . .	40
4.3	Imagem representativa da deposição de uma gota numa superfície seca	41
4.4	Interação resultante do impacto não simultâneo, entre uma gota proveniente da Agulha 3 e outra da Agulha 4 . . . . .	42
4.5	Interação resultante do impacto entre uma gota proveniente da Agulha 4 e outra da Agulha 5 . . . . .	43
4.6	Interação resultante do impacto simultâneo entre uma gota proveniente da Agulha 1 e outra da Agulha 5 . . . . .	44
4.7	Interação resultante do impacto entre uma gota proveniente da Agulha 2 e outra da Agulha 5 . . . . .	44
4.8	Interação resultante do impacto entre uma gota proveniente da Agulha 2 e outra da Agulha 4 . . . . .	45
4.9	Interação resultante do impacto entre uma gota proveniente da Agulha 3 e outra da Agulha 5 . . . . .	45

## Lista de Tabelas

1.1	modo como os resultados finais de um impacto variam com a alteração de determinados parâmetros. . . . .	9
3.1	Diâmetro interno de cada agulha utilizada e sua correspondente numeração. . . . .	32
3.2	Diâmetro externo de cada agulha utilizada, e sua correspondente numeração. . . . .	32
3.3	Valores obtidos durante as medições do tempo de formação das gotas .	35
1	Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 1, para os diferentes caudais volúmicos estabelecidos. . . . .	51
2	Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 2, para os diferentes caudais volúmicos estabelecidos. . . . .	52
3	Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 3, para os diferentes caudais volúmicos estabelecidos. . . . .	52
4	Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 4, para os diferentes caudais volúmicos estabelecidos. . . . .	53
5	Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 5, para os diferentes caudais volúmicos estabelecidos. . . . .	53
6	Valores dos diferentes diâmetros, retirados do <i>software MATLAB</i> . . .	56
7	Valores calculados para obter as diferentes áreas projetadas para cada gota criadas pelas cinco agulhas escolhidas . . . . .	56



## Nomenclatura

$\phi$	Ângulo de desfasamento temporal entre duas gotas [°]
$\theta$	Ângulo interfacial entre o líquido e o gás junto ao Aocal da agulha [°]
$\theta_m$	ângulo de contacto (molhabilidade de uma superfície) [°]
$A_e$	Área da superfície em análise [m <sup>2</sup> ]
$B_o$	Número de Bond
$D_0$	Diâmetro inicial da gota [m]
$d_c$	Diâmetro da cintura do líquido à saída da agulha [m]
$d_g$	Diâmetro da gota [m]
$D_{ai}$	Diâmetro interno da agulha [m]
$d_{min}$	Diâmetro da cintura mínimo [m]
$D_n$	Diâmetro exterior da agulha [m]
$F_\sigma$	Força de tensão superficial na linha de contacto com a agulha
$FPS$	Frames por segundo
$g$	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$K_c$	Parâmetro de splash
$L_a$	Número de Laplace
$l_{spacing}$	afastamento entre gotas na direção horizontal [m]
$m_g$	Massa de líquido fora da agulha [kg]
$O_h$	Número de Ohnesorge
$P_g$	Peso da gota [Kg]
$R$	Rácio entre o raio interior e exterior da agulha [m]
$R_e$	Número de Reynolds
$R_0$	Raio interior da agulha [m]

## Nomenclatura

---

$R_n$	Raio exterior da agulha [m]
$t_q$	Instante de queda [s]
$U_0$	Velocidade inicial da gota [m/s]
$V_{max}$	Volume máximo admissível antes do gotejamento [m <sup>3</sup> ]
$W_e$	Número de Weber
$V$	Volume de líquido exterior [m <sup>3</sup> ]

### Constantes Físicas

$\mu$	Viscosidade dinâmica da água destilada	0.001 kg/(m/s)
$\rho$	Massa volúmica da água destilada	1000 kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Tensão superficial	72.55 N/m
$g$	Aceleração da gravidade	9.81 m/s <sup>2</sup>

## 1. Introdução

O impacto de múltiplas gotas em superfícies sólidas ocorre em diversas aplicações de engenharia. Nomeadamente, na injeção de combustível para o interior do cilindro de um motor de combustão interna, na regulação da temperatura em sistemas de gestão térmica de superfície, em cirurgias dermatológicas com laser, ou na aplicação de certos materiais como tintas, a correta dispersão das gotas pode ser determinante para a eficácia e eficiência na aplicação dos sprays. A otimização dos parâmetros que definem o tamanho e velocidade das gotas do spray, e posterior impacto, recorre a modelos físicos e numéricos. Porém, grande parte desses modelos foram desenvolvidos para o impacto de uma só gota sendo lícito questionar, como fizeram Moreira et al. [1], até que ponto são válidos para descrever o que acontece quando existem múltiplos impactos que interagem entre si. Este aspeto aponta para a necessidade da realização de estudos fundamentais que permitam desenvolver novos modelos tendo em conta a interação entre múltiplos impactos de gotas que se manifesta por novas estruturas morfológicas e, eventualmente, formação de novas gotas por mecanismos de atomização secundária.

A realização de estudos fundamentais requer instalações laboratoriais com condições ambiente e fronteira controladas para viabilizar variações paramétricas das características dos elementos envolvidos no fenómeno investigado. A conceção e construção dessa instalação constitui a motivação para o projeto de engenharia realizado no âmbito desta dissertação. A próxima secção dedica-se à revisão bibliográfica dos elementos essenciais à conceção da instalação. Nomeadamente, a formação de uma gota pingente (*pendant droplet*) e o que se sabe sobre a interação entre múltiplos impactos de gotas.

### 1.1. Estado atual do conhecimento

Existem dois fenómenos físicos essenciais na instalação laboratorial que se pretende construir e que estão representados na Fig. 1.1: a formação de uma gota a partir de uma agulha; e o impacto controlado de duas ou mais gotas sobre uma superfície sólida, plana e seca. Será sobre a revisão do estado atual do conhecimento destes dois fenómenos que incide esta secção.

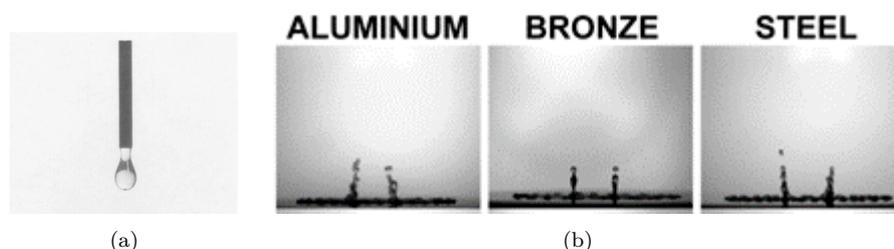


Figura 1.1: (a) Formação de gotas em agulhas [2] (b) e impacto simultâneo de duas gotas em diferentes superfícies sólidas [3].

Para sincronizar o impacto de duas ou mais gotas provenientes de agulhas com diâmetros diferentes, de modo que i) seja simultâneo, ou desfasado de um intervalo de tempo pré-definido, ii) e com uma distância pré-definida entre as gotas, é necessário conhecer o mecanismo de formação e queda da gota e qual a relação entre o caudal volumétrico e o intervalo de tempo desse evento.

Por outro lado, uma revisão bibliográfica do conhecimento desenvolvido sobre o resultado da interação entre múltiplos impactos de gotas é relevante para desenvolver o projeto da instalação de modo a viabilizar condições de funcionamento que permitam realizar experiências comparáveis aos trabalhos publicados na literatura sobre este tópico.

### 1.1.1. Análise da formação e queda de gotas

A formação e queda de uma gota a partir do líquido que sai de uma agulha depende de um balanço de forças. Ao nível microscópico, a tensão superficial é uma força que atua na interface entre duas fases químicas (líquido-gás no caso da gota), levando a que a camada superficial do líquido tenha um comportamento elástico, como representado na Fig. 1.2. Segundo Berry et al. [4], enquanto as moléculas situadas no interior do líquido são atraídas em todas as direções pelas moléculas vizinhas, as moléculas que se encontram na superfície do líquido sofrem apenas atrações laterais e internas. Assim o líquido adapta-se a esta situação e a tensão superficial define a remodelação da forma, de maneira a minimizar a área do líquido em contacto com a atmosfera envolvente, sendo que esta vem expressa nas unidades de fluxo energético  $J/m^2$  equivalente a  $N/m$  uma vez que a energia corresponde a trabalho exercido na interface.

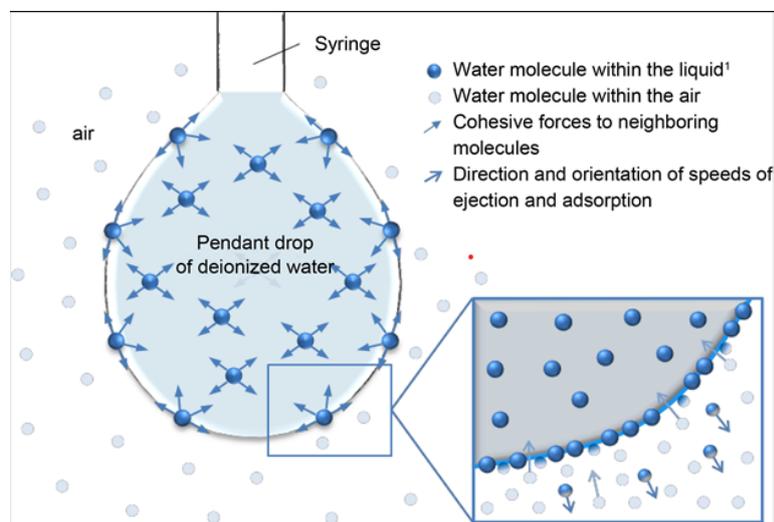


Figura 1.2: Ilustração das forças de coesão entre as moléculas de um líquido e as moléculas de ar que originam o fenômeno chamado tensão superficial numa gota de água, retirado de [5].

A fim de analisar a formação de uma gota e o momento exato em que esta se “descola” e inicia a sua queda, é necessário perceber qual a melhor maneira de realizar a experiência na prática. A nível experimental, o equipamento necessário para fazer a análise de uma gota suspensa, é muito pouco e simples. Tudo o que é necessário, é uma agulha, uma câmara e uma fonte de luz. Uma ilustração de uma configuração experimental deste tipo está representado na Fig. 1.3. Recorrendo ao artigo Berry et al. [4], pode comprovar-se que a melhor forma de produzir gotas individuais para

serem estudadas, faz-se, descarregando lentamente um líquido por uma torneira, uma agulha ou algo semelhante.

Com a finalidade de medir a tensão superficial de uma gota de água destilada produzida na extremidade de um tubo capilar, Adrian et al. [6] conclui ser importante assegurar que a extremidade da agulha não é pontiaguda, e deve-se encontrar numa posição absolutamente vertical, ou seja, paralela à força gravítica. Assim, garante-se a axi-simetria do volume crescente de líquido que formará a gota e obter medições precisas de tensão superficial.

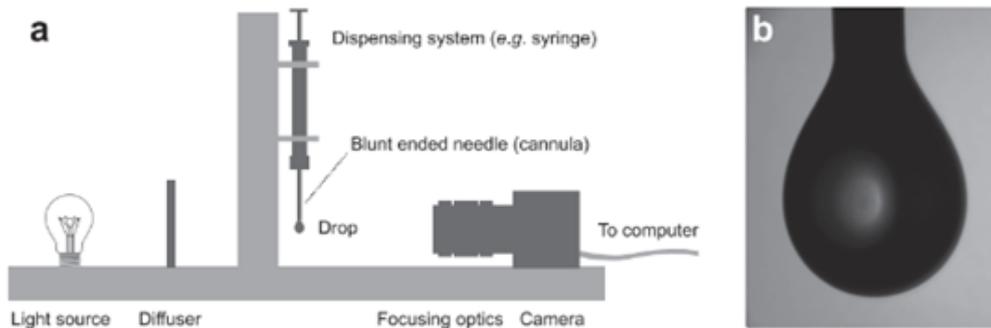


Figura 1.3: Ilustração de uma instalação dedicada ao estudo de gotas suspensas (a); imagem obtida no decorrer da experiência (b), Figura retirada de [4].

O gotejamento (*dripping*) a partir de uma agulha facejada (sem ponta) e um fornecimento de caudal volúmico constante encontra-se descrito em Middleman [2], sendo aqui sintetizado. Assumindo como nulo o ângulo interfacial entre o líquido e o gás junto ao bocal da agulha ( $\theta = 0^\circ$ ), e que  $D_{ai}$  corresponde ao diâmetro interior da agulha, a força de tensão superficial na linha de contacto com a agulha,  $F_\sigma = \pi D_{ai} \sigma$ , equilibra-se com o volume de líquido exterior ( $V$ ) como

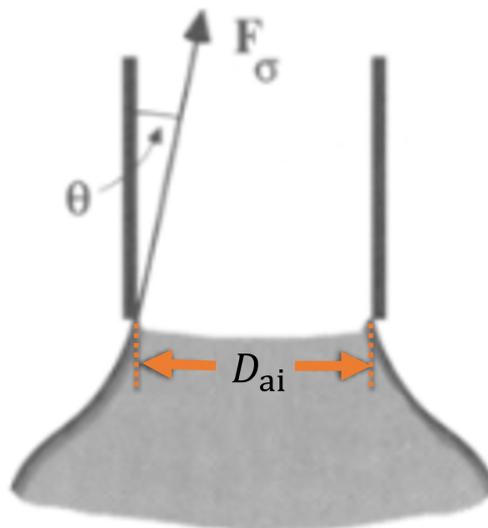


Figura 1.4: Imagem adaptada de [2], onde se pretende representar as forças existentes ao longo da linha de contacto.

$$\pi D_{ai} \sigma = \rho V g \quad (1.1)$$

Assim, resolvendo (1.1) em ordem ao volume máximo admissível antes do gotejamento, e assumindo que esse valor corresponde ao volume da gota produzida,  $V_{max} = \pi d_g^3/6$ , o tamanho previsto corresponde a

$$d_g = \left( \frac{6\sigma D_{ai}}{\rho g} \right)^{1/3} \quad (1.2)$$

pelo que se esse valor for normalizado pelo diâmetro interno da agulha, o resultado pode expressar-se em termos adimensionais como

$$\frac{d_g}{D_{ai}} = 1.82 \cdot Bo_{ai}^{-1/3} \quad (1.3)$$

em que  $Bo_{ai} = \rho D_{ai}^2 g / \sigma$  corresponde ao número de Bond que relaciona as forças gravíticas com as de tensão superficial. Considerando

$$N_d = (d_g/D_{ai}) Bo_{ai}^{1/3} \quad (1.4)$$

Assumindo que as forças de inércia associadas ao caudal que sai pela ponta da agulha são muito menores do que as forças gravíticas, esse balanço depende de um equilíbrio mecânico entre o peso da gota

$$P_g(t) = m_g(t)g \quad (1.5)$$

com  $m_g[kg]$  como a massa de líquido fora da agulha que aumenta com o tempo e  $g = 9.81 m/s^2$  a aceleração da gravidade, e as forças de tensão superficial relacionadas com o comprimento mínimo à saída,

$$F_\sigma(t) = \pi d_c(t)\sigma \quad (1.6)$$

com  $d_c(t)[m]$  como diâmetro da cintura do líquido à saída da agulha que varia com o tempo, e cujo valor inicial seria igual ao diâmetro de saída da agulha, e  $\sigma[N/m]$  corresponde à tensão superficial do líquido. A gota forma-se quando o diâmetro da cintura atingir um valor mínimo  $d_{min} = d_c(t_q)$  no instante de queda ( $t_q$ ), logo,

$$d_{min} = \frac{m_g(t_q)g}{\pi\sigma} \quad (1.7)$$

Sendo que  $d_{min}$  corresponde ao diâmetro da agulha em causa, é possível a partir da equação seguinte obter a relação para obter o diâmetro da gota:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6d_{min}\sigma}{\rho_{liq}g}} \quad (1.8)$$

Toda a análise feita por Middleman [2], a fim de obter as correlações apresentadas anteriormente, apenas teve em consideração o valor do diâmetro interno da agulha. Como se encontra explicado de uma maneira mais pormenorizada por Berry et al. [4], o tamanho da gota em análise necessita de ter um tamanho considerável, de maneira que o efeito da gravidade não seja desprezável. Esta primeira abordagem foi tida em

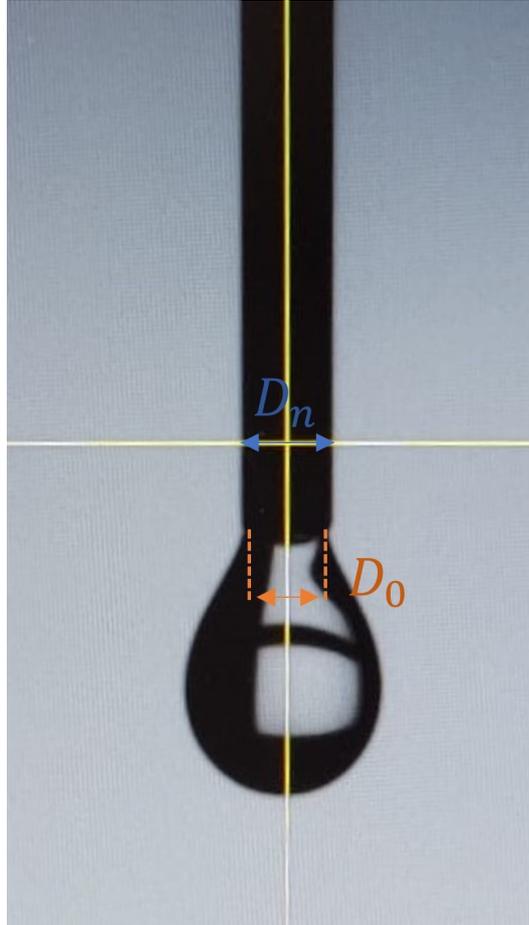


Figura 1.5: Imagem retirada durante o decorrer das experiências realizadas, estando nela esquematizado o diâmetro exterior e interior da agulha.

conta por MAGLI and BECKER [7], em um dos seus artigos. Esta relação entre as forças gravitacionais e as forças de coesão (tensão superficial) vem mais tarde a ser denominada de “Bond number” por Merrington and Richardson [8].

Por sua vez, Berry et al. [4], ao contrário da abordagem feita por Middleman [2], este refere a importância de considerar o diâmetro exterior da agulha para conseguir obter resultados mais fidedignos.

Como foi referido anteriormente, o objetivo é encontrar uma expressão para o volume máximo da gota antes de esta se destacar. Continuando a análise do estudo Berry et al. [4], obtemos a seguinte expressão:

$$V_{\max.} = \frac{\pi D_n \sigma}{\Delta \rho g} \quad (1.9)$$

Onde  $D_n$  é o diâmetro da agulha, que se encontra representado na Fig. 1.5 e  $\sigma$  apresenta um valor de  $72.55 \text{ g s}^{-2}$ , como se encontra mencionado anteriormente.

Relacionando agora a interação entre a força gravítica e a tensão superficial, como foi referido anteriormente, é possível obter o valor de Bond:

$$\text{Bo} \equiv \frac{\Delta \rho g R^2}{\sigma} \quad (1.10)$$

$R$  é igual ao rácio entre o raio interior e exterior do tubo (agulha),  $R_0/R_n$ . Este rácio pode ser verificado através da observação da Fig. 1.5.

O artigo de Zhang [9] permite retirar dados fundamentais, como os valores de algumas variáveis usadas nas equações anteriores, bem como equações de importância relevante, relacionadas com a formação de gotas. Todos os estudos teóricos e práticos que levaram a concluir estes valores encontram-se bem descritos tanto no estudo mencionado, como também se encontram justificados nas tabelas disponíveis em Vargaftik et al. [10].

### 1.1.2. Análise relativa ao impacto de gotas

Worthington [11] foi um dos primeiros a investigar o impacto de gotas em superfícies molhadas através de imagens fotográficas que conseguem captar a morfologia das estruturas hidrodinâmicas características do fenómeno. Tendo em conta os estudos anteriores (sintetizados em Yarin et al. [12]), sabe-se hoje existir uma vasta gama de cenários dependentes da topologia da superfície (lisa, rugosa, estruturada), condição do impacto (superfície seca, molhada com filme de líquido ou em piscina/*deep pool*), relação entre o espalhamento do líquido e a superfície (“molhabilidade”/*wetability*) e condição térmica (superfície fria ou quente). Depois, uma gota pode ser esférica ou elíptica (devido a oscilações) no momento do impacto. O impacto pode ser normal à superfície (perpendicular) ou oblíquo, e o fenómeno pode ocorrer a pressões ambiente atmosférica ou diferentes dessa.

Dada a diversidade de condições referida, a complexidade na descrição e explicação física da morfologia do impacto de uma gota é elevada, sendo necessária uma caracterização adequada do comportamento dinâmico das gotas e estabelecer relações entre os diferentes parâmetros característicos dessa dinâmica ( $D_0, U_0$ , diâmetro e velocidade iniciais da gota), propriedades do líquido ( $\rho$  [ $kg/m^3$ ] – massa volúmica;  $\mu$  [ $Pa \cdot s$ ] – viscosidade dinâmica;  $\sigma$  [ $N/m$ ] – tensão superficial), propriedade da superfície e condições-fronteira. Um modo adequado de sistematizar os vários parâmetros relevantes consiste no recurso a números adimensionais, nomeadamente:

- Weber, que relaciona as forças de inércia com a tensão superficial:

$$We = \frac{\rho \cdot D_o \cdot U_o^2}{\sigma} \quad (1.11)$$

- Reynolds, que é dado pela razão entre as forças de inércia e as forças viscosas que atuam na gota:

$$Re = \frac{\rho \cdot D_o \cdot U_o}{\mu} \quad (1.12)$$

- Ohnesorge, que relaciona as forças de inércia, viscosas e a tensão superficial:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_o \sigma}} \quad (1.13)$$

- Laplace, que é a relação entre a tensão superficial e o transporte da quantidade de movimento:

$$La = \frac{\rho \cdot \sigma \cdot D_o}{\mu^2} \quad (1.14)$$

Em que  $D_o$  e  $U_o$  correspondem ao diâmetro e velocidade das gotas antes do impacto, respetivamente.  $\rho$  corresponde à massa volúmica do fluido,  $\sigma$  à tensão superficial,  $\mu$  e  $\nu$  à viscosidade dinâmica e cinemática do fluido. De notar que segundo Yarin et al. [12], existem outros números adimensionais relacionados com o efeito da gravidade, como por exemplo o número de Bond ou o número de Froude, como se pode verificar no subcapítulo anterior. Contudo não serão considerados pelas razões apresentadas no artigo mencionado, onde a explicação se encontra descrita com maior clareza.

### Impacto de uma gota em superfícies secas

Como referido anteriormente, os mecanismos hidrodinâmicos associados ao impacto de gotas singulares em superfícies secas são ainda um campo ativo de investigação fundamental. Contudo, os conhecimentos desenvolvidos até ao momento permitem ter uma noção do comportamento das gotas e das estruturas hidrodinâmicas por estas formadas após o seu impacto mediante determinadas condições. Na sua síntese sobre estes mecanismos, Yarin et al. [12] pretende demonstrar que o resultado do impacto das gotas é, geralmente, influenciado pelas características dinâmicas das gotas e pelas propriedades da superfície, no que diz respeito a impactos em superfícies secas, sendo que as mais relevantes são a rugosidade e a molhabilidade da mesma. A molhabilidade define-se como a capacidade que um líquido tem para se espalhar, enquanto mantém o contacto com a superfície. Dependendo das propriedades dessa, o grau de molhabilidade de uma superfície sólida pode ser definido através do ângulo de contacto, que na literatura é definido por  $\theta_m$ . Rioboo et al. [13] explicam este fenómeno, referindo que a molhabilidade da superfície de impacto é proporcional ao valor de  $\theta_m$ , como esta representado na Fig. 1.6.

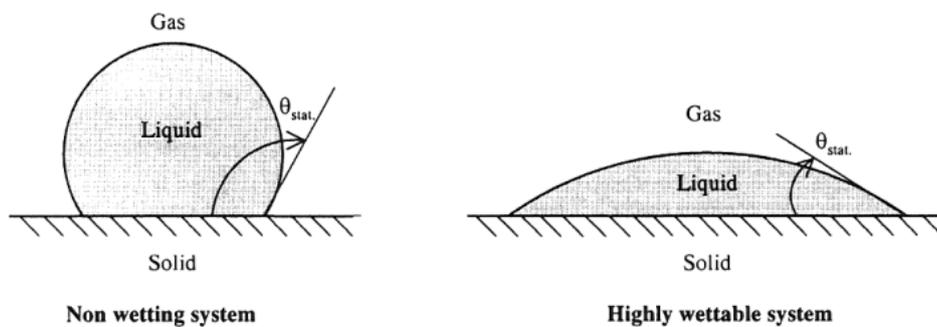


Figura 1.6: Imagem esquemática que demonstra a relação entre o valor do ângulo  $\theta_m$  com a molhabilidade de uma superfície.

Por sua vez, Roisman et al. [14] elaborou uma formulação física para a morfologia do espalhamento da gota após o impacto usando diversos parâmetros tais como, a velocidade de propagação da lamela e sua espessura.

A Fig.1.7 ilustra os diversos parâmetros envolvidos na descrição do comportamento de uma gota após o impacto com uma superfície seca (3). Sendo que, neste tipo de estrutura morfológica associada ao espalhamento, é possível identificar duas áreas distintas provenientes de uma onda de choque interna. A primeira zona, denominada de lamela (1), que se encontra delimitada pela segunda zona, um bordo (2). No final da sua propagação (radial em relação ao ponto de impacto) ocorre a deposição da gota na superfície.

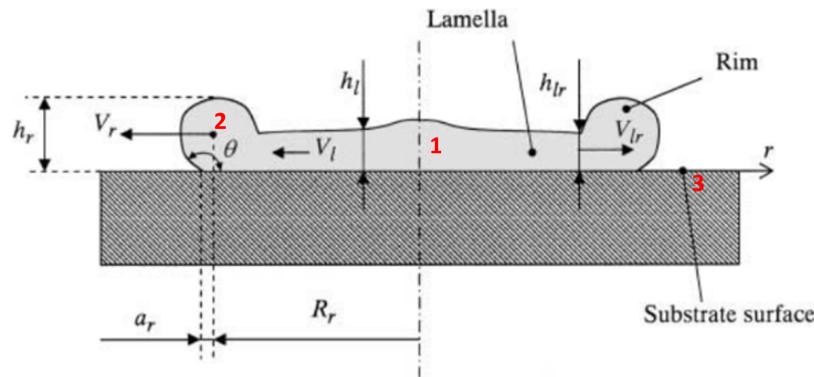


Figura 1.7: Imagem esquemática do comportamento de uma gota após o impacto com uma superfície seca, retirada de Roisman et al. [14].

Segundo a literatura, nomeadamente [14], considerando somente os impactos normais à superfície, é referido que as estruturas formadas durante este impacto dependem maioritariamente de dois parâmetros adimensionais: o número de Reynolds e o de Weber.

Segundo a análise de Mundo et al. [15], se os dois valores adimensionais mencionados anteriormente forem baixos, isto é, se as velocidades de impacto for baixa, a gota não terá energia suficiente para formar qualquer tipo de estrutura. Logo, todo o fluido espalhar-se-á sobre a superfície sólida, como se encontra representado esquematicamente na Fig. 1.8.

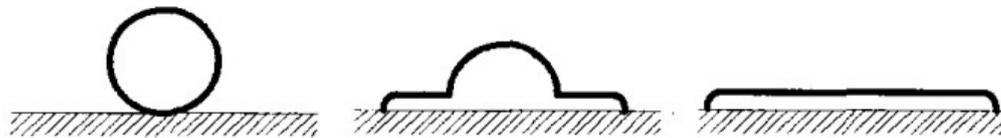


Figura 1.8: Imagem esquemática, retirada de [15], da deposição de uma gota após o impacto com uma superfície seca.

Por outro lado, quando os valores de Reynolds e Weber são suficientemente elevados, haverá uma descontinuidade da direção de propagação da lamela da superfície, formando uma estrutura conhecida por coroa. Analisando o estudo de Palacios et al. [16], é possível definir uma gama de valores em que é provável ocorrer este fenómeno. Esta formação após o impacto da gota descreve-se como uma ascensão vertical de filme de líquido, enquanto houver fluido da gota suficiente para a alimentar. A ascensão vertical do filme de líquido da coroa terminará por dois motivos: 1) quando já não existir mais fluido para o alimentar; 2) ou quando já não existir energia disponível para elevar a coroa. Nesse momento esta atinge a sua dimensão máxima.

A partir deste instante podem acontecer duas situações distintas. Na primeira situação, a coroa colapsa suavemente e o líquido pela qual é formada deposita-se na superfície. Na segunda situação, o bordo da coroa destabiliza-se e origina uma atomização secundária, com formação de gotas mais lentas e pequenas, mecanismo conhecido como *splash*, como se encontra ilustrado na Fig. 1.9. Esta situação ocorre para valores de Weber muito elevados.



Figura 1.9: Imagem esquemática do fenómeno de atomização secundária de uma gota, retirada de [15], após o impacto com uma superfície seca.

Como foi referido na secção 1.1.2, existem diversos fatores que podem influenciar o tipo de estrutura hidrodinâmica formada após o impacto da gota com a superfície. Assim as diferentes estruturas surgem associadas a diferentes condições do impacto. A variedade de formações estudadas encontra-se descrita em Rioboo et al. [13]. Por sua vez, em Yarin et al. [12] as estruturas formadas são analisadas com maior detalhe, chegando-se a uma catalogação pormenorizada das mesmas. Estes estudos referem haver um valor de Weber crítico ( $We_c$ ) a partir do qual se transita para um regime com atomização secundária. Analisando a Tabela 1.1, é possível perceber de forma resumida como, e quais os parâmetros que mais afetam os resultados obtidos após o impacto da gota.

Tabela 1.1: Tabela representativa do modo como os resultados finais de um impacto variam com a alteração de determinados parâmetros, retirada de [12].

Increase of	Deposition	Prompt splash	Corona splash	Receding breakup	Arcial rebound	Complete rebound
$V_0$	↓	↑	↑	↑	↑	
$D$	↓	↑				
$\sigma$		↓	↓	↑	↑	↑
$\mu$	↑	↓	↓	↓		
$R_a$	↓	↑	↓			
$R_w$		↓				
$\theta_{rec}$				↑	↑	↑

Nesta tabela, recorda-se que  $V_0$  corresponde à velocidade de impacto,  $D_0$  ao diâmetro da gota,  $\sigma$  ao valor da tensão superficial,  $\mu$  ao valor da viscosidade dinâmica,  $R_a$  e  $R_w$  correspondem ao valor da amplitude de rugosidade e comprimento de onda, respetivamente. Por fim,  $\theta_{rec}$  corresponde à molhabilidade definida pelo ângulo de contacto. Como evidencia Rioboo et al. [13], alguns destes parâmetros dependem de outros, como, por exemplo, a rugosidade e o ângulo de contacto, ou como a tensão superficial e a molhabilidade.

O fenómeno denominado de *Deposição*, encontra-se representado na Fig. 1.10a e ocorre quando as velocidades de impacto são reduzidas. Neste mecanismo, a gota possui uma deformação que depende da molhabilidade, espalha-se e permanece depositada na superfície.

Com o contínuo aumento da energia de impacto, o resultado seguinte designa-se por *Reflexão Parcial* (Fig. 1.10e) ou *Reflexão Total* (Fig. 1.10f). Estes resultados ocorrem quando a lamela recua, dependendo unicamente do diâmetro máximo da lamela e do ângulo de contacto, podendo ocorrer um de dois resultados: 1) para impactos com maior energia, o diâmetro atingido pela lamela pode ser de tal ordem que, durante a fase de recuo, pode haver ainda energia acumulada; 2) mas, se a energia for suficiente para

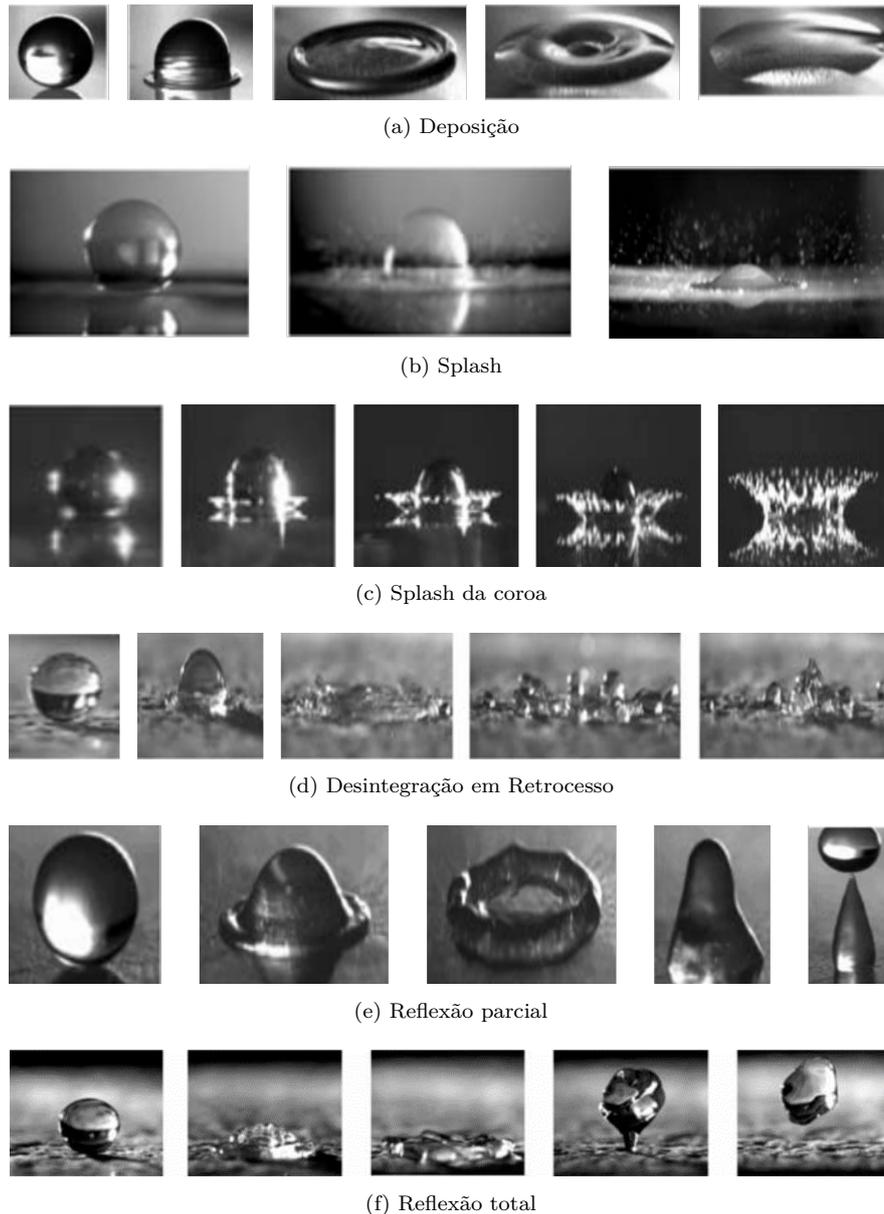


Figura 1.10: Diferentes resultados finais de um impacto que podem surgir, devido a pequenas alterações nos parâmetros mencionados na Tabela 1.1. Imagens retiradas de [12].

propagar uma onda de choque até ao ponto inicial do impacto, o líquido é projetado na vertical. As duas reflexões da gota após impacto são fenómenos semelhantes. A diferença entre eles consiste no ângulo de contacto durante o recuo. Desta forma, a reflexão total só irá ocorrer para ângulos de contacto mais elevados.

A Fig. 1.10b apresenta o fenómeno denominado por *Splash* ou *Splash Súbito*. A particularidade deste mecanismo consiste na desintegração da gota na zona de impacto. Como o nome indica, a morfologia de deformação da gota ocorre “subitamente” nos primeiros instantes do impacto. Isto deve-se à existência de elevadas forças de inércia e está relacionado com superfícies rugosas

No caso do *Splash com Coroa* apresentado na Fig. 1.10c, o mecanismo distingue-se pela formação de uma coroa ascendente, ocorrendo instabilidades no bordo desta, o que leva ao aparecimento de atomização secundária. Este resultado do impacto da gota

encontra-se normalmente associado a baixos valores na tensão superficial. Segundo Rioboo et al. [13], o splash com coroa ocorre com maior frequência quando se fala de impactos goticulares em filmes líquidos.

*Desintegração em retrocesso (recending breakup)* é o nome que se dá ao mecanismo em que a gota incidente desintegra-se durante a fase de recuo, havendo separação de algum líquido que acaba por formar gotas secundárias que, entretanto, depositam na superfície. Isto encontra-se diretamente relacionado com a molhabilidade e, à medida que o líquido da gota recua após o impacto, o ângulo  $\theta$  diminui até atingir valores quase nulos, criando esta separação do líquido em gotas secundárias que se irão depositar na superfície.

A transição com mais impacto no estudo de impacto de gotas acontece entre o seu espalhamento e o mecanismo de splash, pelo que vários autores utilizam um critério de transição entre regimes dado por:

$$K_c = Oh^a \cdot We^b \quad (1.15)$$

em que os coeficientes  $a$  e  $b$ , dependem apenas das condições experimentais, podendo estes valores serem consultados em trabalhos de revisão como, por exemplo, Moreira et al. [1] onde foram obtidos para diversas condições experimentais. Esta é a principal razão pela qual, não existe uma expressão geral para  $K_c$ . Outro inconveniente deste coeficiente é o facto de não ter em conta alguns parâmetros como, por exemplo, os da superfície de impacto. Estes fatores podem ser determinantes na formação, ou não, de gotas secundárias.

### Impacto de múltiplas gotas

No que diz respeito aos impactos de gotas singulares, os resultados que deste provem são bastante especáveis, ao nível dos mecanismos hidrodinâmicos associados às estruturas formadas após o impacto. No entanto, as aplicações práticas relacionadas com este fenómeno, aplicam-se na sua maioria a sprays, porém o estudo destes ainda não se encontra devidamente aprofundado, existindo assim uma lacuna de conhecimentos em relação aos mecanismos físicos que descrevem as interações que sucedem os impactos de múltiplas gotas. Esta falta de conhecimento adquirido até agora deve-se em grande parte ao comportamento aleatório que caracteriza um spray, tanto no que diz respeito à dispersão espacial e temporal de cada gota como à dimensão destas bem como às diferentes velocidades de cada uma, o que faz com que a localização de cada impacto e cada interação seja completamente diferente. Isto torna a análise destas situações muito mais complexa. A fim de tentar caracterizar a interação entre coroas, numa determinada área da superfície, em impactos múltiplos, no estudo de Tropea and Roisman [17], definiram um parâmetro adimensional, dado por:

$$\lambda = \frac{29 \cdot 75}{A_c \cdot T_e} \sum_{i=1}^n \frac{D_i^4 U_i^2 \rho^2 \nu}{\sigma^2} \quad (1.16)$$

Onde  $A_e$  representa a área da superfície em análise;  $T_e$  a duração do ensaio;  $D$  o diâmetro da gota em análise;  $U$  a velocidade da gota;  $\rho$  a massa volúmica;  $\sigma$  a tensão superficial e por fim  $\nu$  a viscosidade cinemática. De salientar que para aplicar este parâmetro, a área que esta a ser analisada,  $A_e$ , deverá ser suficientemente pequena, de forma a que se possa considerar que o spray é uniforme naquela zona, mas maior que a área ocupada por cada gota individual. Todas estas interações produzem resultados

dísparos dos resultados analisados anteriormente, quando se fala de gotas singulares. Como tal, os resultados obtidos anteriormente, provenientes dos impactos de gotas singulares, não poderão ser extrapolados a fim de caracterizar os resultados que provêm do impacto de múltiplas gotas.

De acordo com a literatura, a atomização secundária é um dos parâmetros que mais se verifica e se altera nos impactos múltiplos. Como já foi referido, em impactos singulares a atomização secundária acontece quando o valor limite de splash, definido na Equação 1.15 como  $K_c$ , atinge um determinado valor. Ao contrário do que acontece se houver interações, pois neste caso, mesmo que  $K_c$  seja inferior ao valor limite, pode mesmo assim formar-se gotas por atomização secundária.

Apesar de na literatura estarem descritos diversos tipos de interações entre gotas no momento em que impactam com uma superfície, é importante reforçar a ideia de que a maioria são realizadas em condições controladas, acabando por não simular realmente um spray, vindo reforçar a ideia da complexidade inerente ao estudo deste fenómeno. Analisando o estudo Cossali et al. [18], onde se encontra descrito que a velocidade de impacto da primeira gota tem uma grande influência na espessura do filme líquido e que quanto maior a velocidade associada ao impacto, menor irá ser a espessura do mesmo. Assim, aquilo que acontece para grandes velocidades de impacto é uma redução tanto do tamanho como da quantidade da atomização secundária que ocorre. Por outro lado, não afeta a morfologia das estruturas criadas pelas interações entre gotas.

Continuando a pesquisa sobre estes fenómenos, percebemos que na literatura estes estão divididos em múltiplos impactos e em múltiplos impactos simultâneos. Analisando o documento Moreira et al. [1], em particular a Fig. 1.11.

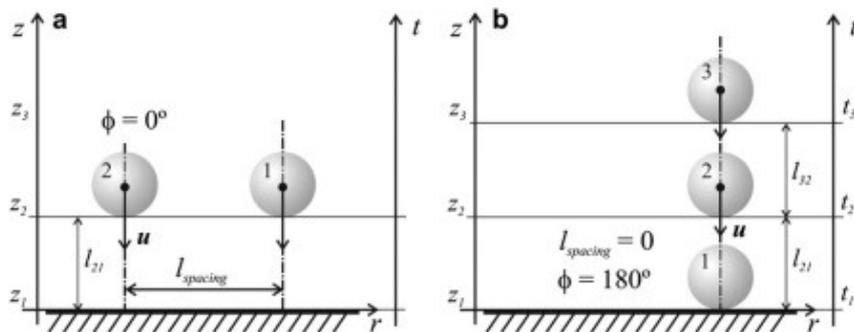


Figura 1.11: Representação esquemática do fenómeno resultante da queda de duas, (a) queda simultânea  $\phi = 0^\circ$  e em (b)  $\phi = 180^\circ$ . Imagem retirada de [1],

De acordo com o que se encontra representado na Fig. 1.11, é possível perceber que existem dois parâmetros principais e que com eles é possível "catalogar" estes fenómenos. Estes parâmetros caracterizam o afastamento temporal e espacial entre duas gotas, sendo que,  $l_{spacing}$  diz respeito ao afastamento entre gotas na direção horizontal representada na figura e  $\phi$  representa o desfasamento temporal entre as duas gotas durante a queda. Desfasamento esse que pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\phi = 2\pi \frac{t_{i+1} - t_i}{t_{i+2} - t_i} \quad (1.17)$$

Durante a aplicação de um spray existem impactos individuais, impactos adjacentes com um desfasamento temporal e impactos simultâneos em que, a interação entre gotas gera estruturas e formações diferentes.

### Impacto simultâneo de múltiplas gotas

Como referido anteriormente, não é possível prever os resultados do impacto de pulverização e sprays (ou seja, queda múltipla) numa superfície sólida, pois existe uma lacuna entre o conhecimento alcançado com o impacto de uma única gota quando comparado com o conhecimento dos fenómenos que caracterizam um impacto de pulverização. Segundo Cossali et al. [3], espera-se que os resultados provenientes do impacto de múltiplas gotas possam ser catalogados e previsíveis tal como os impactos singulares. Este estudo teve como objetivo otimizar o aparecimento de gotas mais pequenas (atomização secundária), sendo que estas se destacam da coluna de líquido que se forma na vertical na zona de interação.

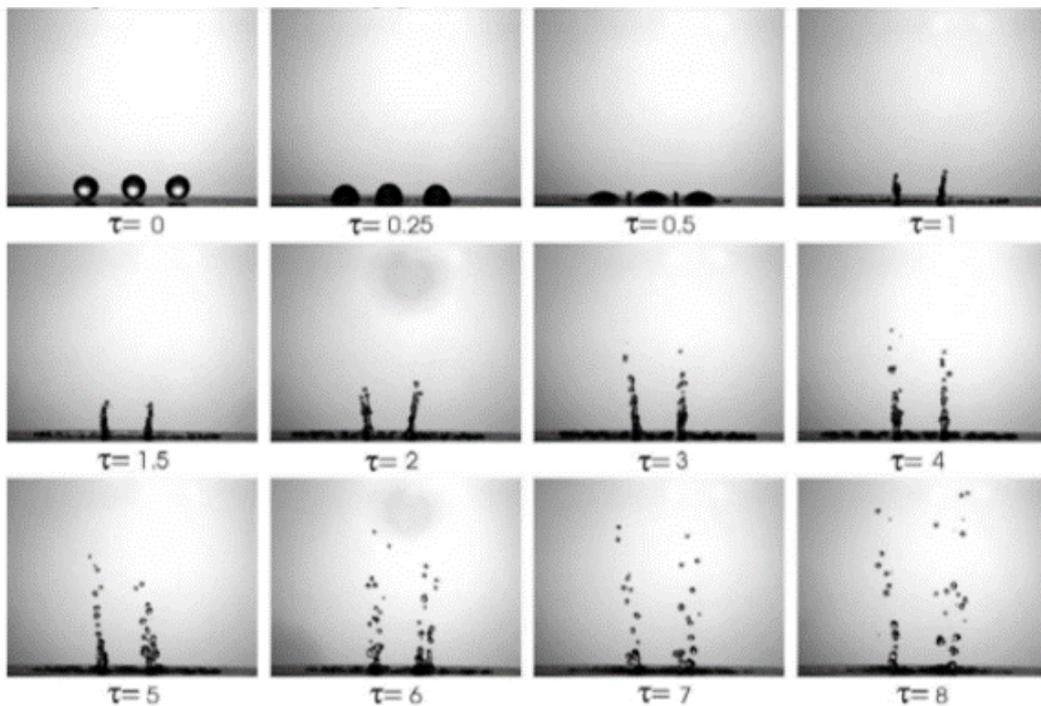


Figura 1.12: Visualização do impacto simultâneo entre três gotas numa superfície aquecida. Imagem retirada de [3].

Segundo este estudo, quando a energia cinética do impacto é suficientemente grande, bem como os efeitos térmicos, isto é, quando a temperatura da superfície é maior que a saturação do líquido temperatura, é provável conseguir provocar o aparecimento do fenómeno denominado de atomização secundária, como demonstrado na Fig. 1.12.

Outros estudos tentaram, de forma teórica e prática, conseguir calcular diversos parâmetros associados à coluna de líquido que se forma e tentaram perceber, quais os parâmetros que levam esta a formar gotas por atomização secundária ou não. O estudo Yarin et al. [12] considera duas gotas constituídas pelo mesmo líquido, com diâmetros iniciais  $D_1$  e  $D_2$ , que chocam numa superfície seca com velocidades de impacto  $V_1$  e  $V_2$ . Na Fig. 1.13 encontra se esquematizado o impacto simultâneo de duas gotas com diferentes diâmetros. Segundo o autor, é possível retirar os campos de velocidade  $V_{l1}$  e  $V_{l2}$  nas duas lamelas espalhadas e as suas espessuras,  $h_{l1}$  e  $h_{l2}$ . Estes valores podem ser obtidos recorrendo às expressões apresentadas no documento mencionado. De notar que apenas serão indicadas as fórmulas finais e não toda a parte de dedução que lhes deu origem, com a intenção de melhorar sua legibilidade.

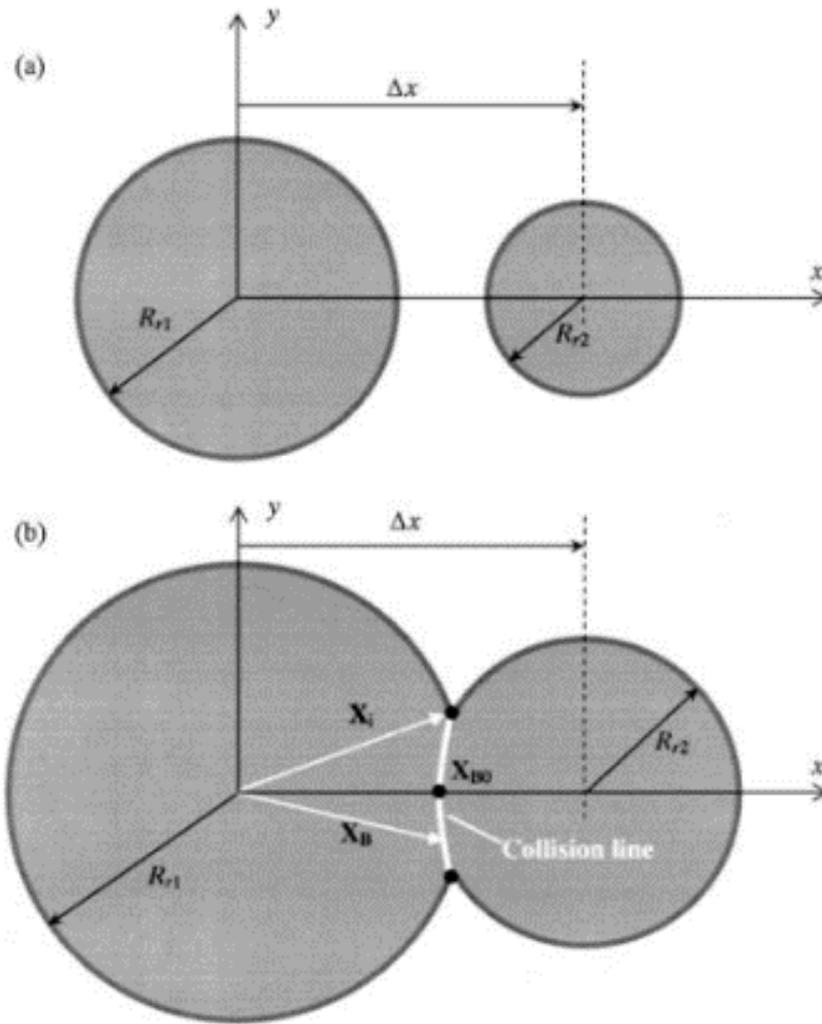


Figura 1.13: Imagem esquemática do fenômeno do impacto simultâneo de duas gotas de tamanhos diferentes. (a) antes do impacto e (b) depois do impacto, retirada de [12]

O artigo Yarin et al. [12], este baseia as suas deduções e o estudo teórico da análise da coluna de líquido formada na linha de colisão, no trabalho Roisman and Tropea [19]. A fundamentação neste estudo tem com objetivo descrever o fenômeno que aparece devido à interação de duas lamelas. Segundo a literatura disponível, o principal fator que influencia a velocidade da subida desta coluna de líquido, bem como a sua forma, é a inércia do fluido. Desta forma a viscosidade e a tensão superficial são duas grandezas que são desprezadas na presente solução, no que diz respeito ao cálculo da velocidade  $V_B$  da coluna que ascende, na linha de colisão. Analisando a Fig. 1.14a, também é possível verificar que a sua forma é definida como  $x = X_S$ . Considerando um sistema de coordenadas com os vetores  $\{\mathbf{e}'_n, \mathbf{e}'_\tau, \mathbf{e}'_z\}$  e com origem na linha de colisão  $X_B$ , que se move com uma velocidade:

$$\mathbf{V}_{cs} = \frac{\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2}{2} \quad (1.18)$$

onde  $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_{l1}(\mathbf{X}_B, t)$  e  $\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_{l2}(\mathbf{X}_B, t)$  são as velocidades do líquido das duas lamelas na zona da linha de colisão. Sendo que o vetor unitário  $\mathbf{e}'_\tau$  é tangente e  $\mathbf{e}'_n$  é normal à linha frontal de colisão e  $\mathbf{e}'_z$  é normal à superfície de impacto.

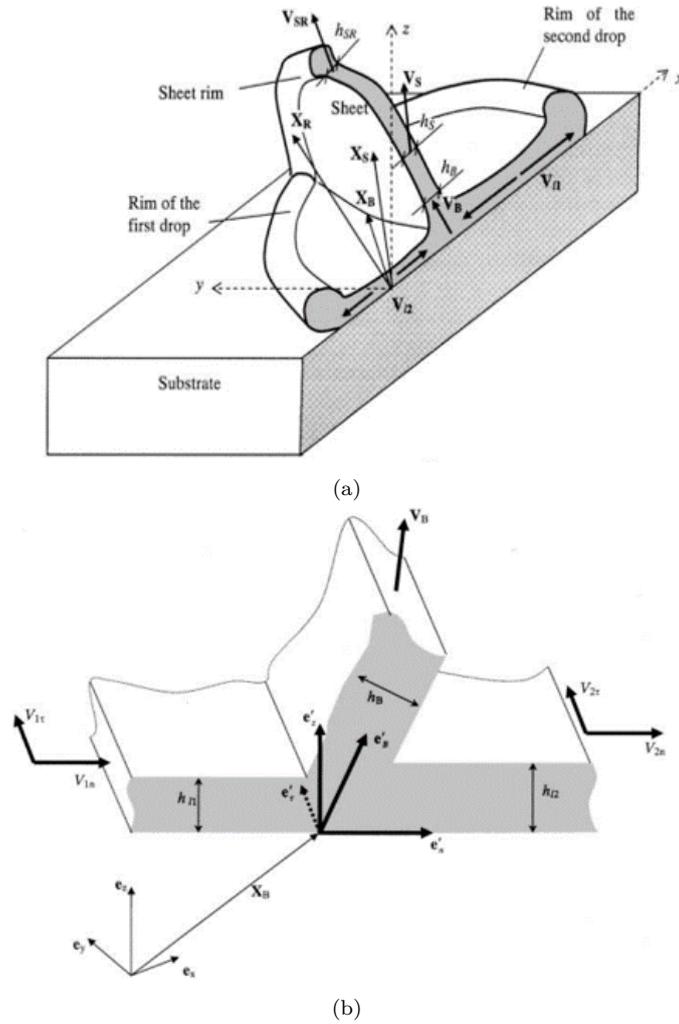


Figura 1.14: Representação esquemática da coluna de ascensão de líquido proveniente da interação de duas gotas após o impacto, (a) representa uma vista geral do fenómeno e (b) mostra de forma ampliada a zona da linha onde ocorre o impacto. Imagem retirada de [12]

Analisando o estudo, verificasse que o autor passou por toda uma dedução teórica, chegando por fim a duas equações que permitem calcular a velocidade da coluna vertical formada pelo líquido proveniente da interação das duas gotas (Equação 1.19), bem como a espessura da mesma (Equação 1.20).

$$\mathbf{V}_B = \frac{\mathbf{V}_1 h_{l1} + \mathbf{V}_2 h_{l2}}{h_{l1} + h_{l2}} + |\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2| \frac{\sqrt{h_{l1} h_{l2}}}{h_{l1} + h_{l2}} \mathbf{e}_z \quad (1.19)$$

$$h_B = \frac{(h_{l1} + h_{l2})^2 (V_{n1} - V_{n2})}{S}, \quad (1.20)$$

onde:

$$S = \sqrt{(h_{l1} + h_{l2})^2 (V_{n1} - V_{n2})^2 + 4h_{l1}h_{l2} (V_{\tau1} - V_{\tau2})^2} \quad (1.21)$$

A próxima secção sintetiza os objetivos geral e específicos desta dissertação.

### 1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal projetar e construir uma instalação experimental que permita a formação de duas ou mais gotas com tamanhos iguais ou diferentes, e garantir a simultaneidade do seu impacto numa superfície sólida, plana e seca. Assim, viabiliza-se o estudo morfológico das estruturas hidrodinâmicas resultantes desse impacto, e respetivos fenómenos provenientes da interação entre estas após o seu impacto na superfície. os objetivos específicos serão:

- conceber a estrutura da instalação tendo em conta que o movimento tri-dimensional cartesiano das agulhas que produzem as gotas, bem como do ângulo, de modo a permitir os ajustes necessários durante a realização dos ensaios experimentais e, assim, controlar as condições de impacto como distância e desfasamento entre gotas;
- produzir curvas de calibração dos tempos de formação das gotas e tamanho produzido por cada agulha;
- validar a instalação com ensaios preliminares que demonstrem a obtenção do impacto simultâneo entre duas gotas e permitam aferir as limitações da instalação de modo a propor futuros desenvolvimentos da mesma.

### 1.3. Conteúdo da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo que este primeiro capítulo contém os objetivos e contexto deste trabalho. Além disso, inclui ainda a motivação que levou à realização deste projeto e os requisitos críticos que o sistema deve contemplar para atingir o que se considera ser uma boa implementação. Ainda neste capítulo, encontra-se descrito os princípios do processo de formação de uma gota na ponta de uma agulha capilar, bem como contexto histórico e evolução da análise feita ao longo dos anos, com base nos estudos realizados sobre o impacto de gotas singulares e múltiplas, tanto em superfícies secas.

O segundo capítulo dedica-se a apresentar a descrição de como foi idealizada a conceção da estrutura criada, pretendendo descrever e explicar os componentes desta e a sua funcionalidade. Ainda neste capítulo encontrar-se descrito o sistema de produção de gotas, a forma de iluminação e o de captação de imagem.

O terceiro capítulo expõe as técnicas de diagnóstico e metodologia experimental envolvidas no processo experimental. Neste mesmo capítulo é feito um estudo sobre o tempo de queda de uma gota, a fim de ser possível obter a simultaneidade no impacto.

O quarto capítulo contém todas as aquisições feitas na etapa final deste estudo, respetivas aos impactos simultâneos conseguidos.

O quinto e último capítulo inclui a discussão e revisão crítica dos resultados obtidos e algumas indicações para trabalhos futuros.

## 2. Instalação Experimental

Pretende-se simular experimentalmente o impacto (controlado) de múltiplas gotas com uma superfície seca através de visualização do comportamento das interações entre as mesmas. Assim, o conhecimento desenvolvido com essas experiências procura fazer a transição do estudo do impacto de uma gota individual para um spray. De modo a obter diferentes comportamentos, pode variar-se a altura de queda bem como as dimensões das agulhas. De modo a realizar os estudos mencionados, a instalação experimental constitui-se, essencialmente, por quatro partes: a estrutura de suporte; o sistema de produção de gotas; a superfície de impacto e o sistema de iluminação. As figuras 2.1-2.3 mostram o conceito projectado e implementado recorrendo, em algumas das suas partes, ao fabrico aditivo com uma impressora 3D usando o PETG como material.

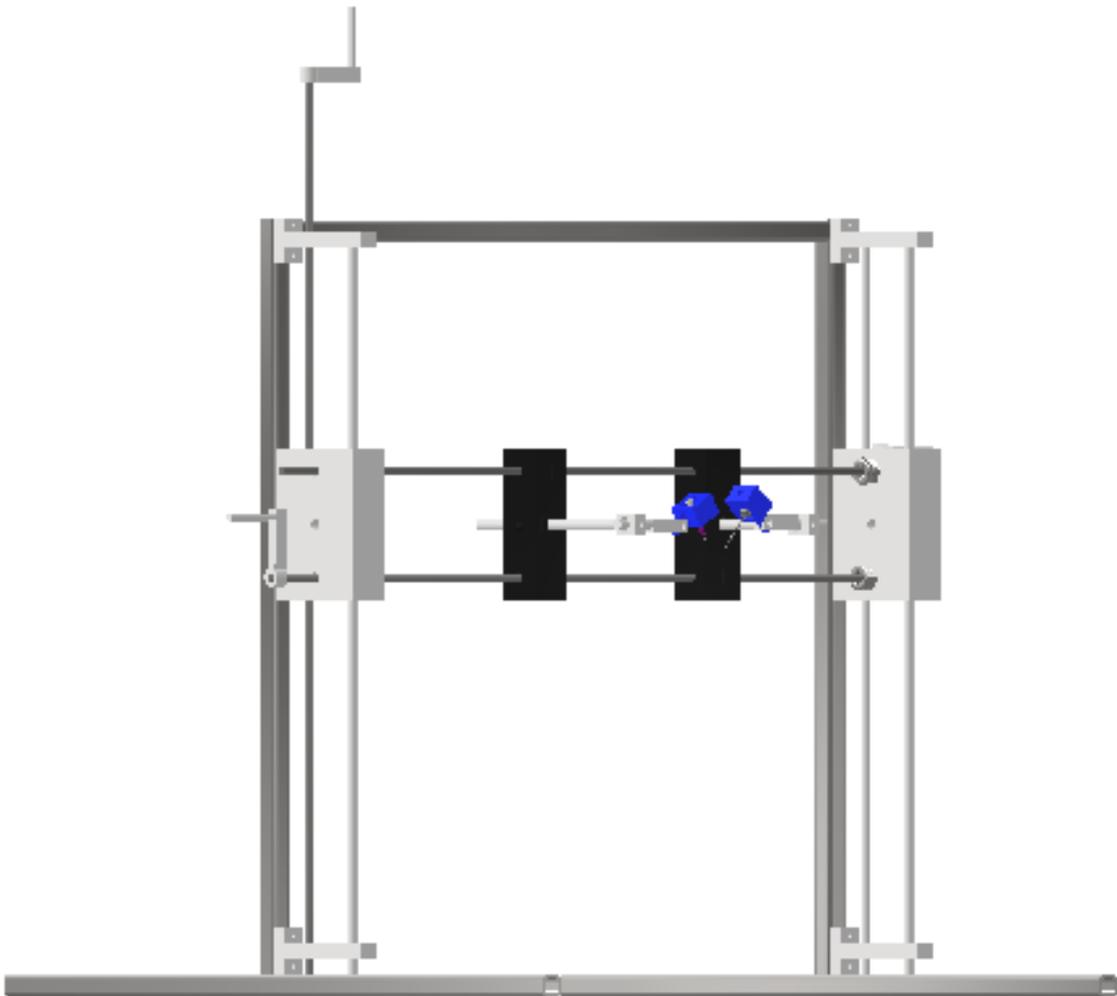


Figura 2.1: Vista geral da elaboração do protótipo.

## 2. Instalação Experimental

LISTA DE PEÇAS		
ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA
1	2500,000 mm	EN 10210-2 - 50 x 30 x 2,5 - 500
2	2	fixação
3	3	guia
4	3	varao_roscado
5	2	sobe_e_desce
6	8	ISO 8675 - M10 x 1,25
7	3	manivela
8	2	suporte_direito
9	2	fixação_cima
10	2	peça_ajuste_pequena
11	2	peça_ajuste_grande_articulacao
12	2	peça_ajuste_grande
13	1	encaixe_agulha_grande
14	1	encaixe_agulha_pequena
15	1	agulha_pequena
16	1	agulha_grande

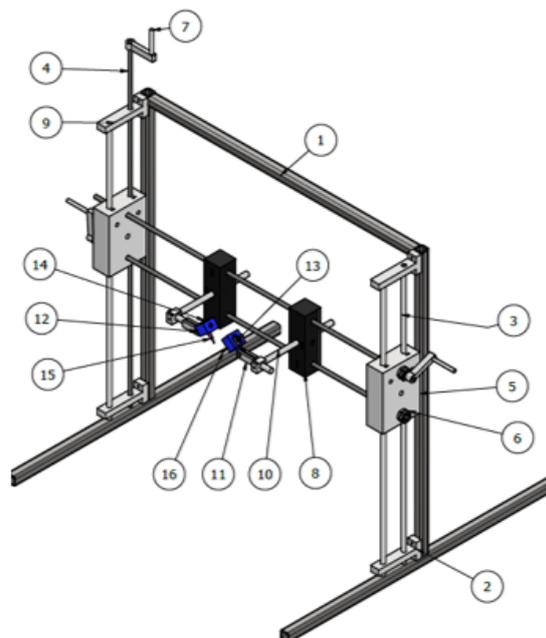


Figura 2.2: Desenho esquemático 2D da montagem final do protótipo, obtido através da utilização do *software AUTODESK INVENTOR* [20], onde se encontram numerados e devidamente identificados todos os componentes que integram a estrutura projetada.

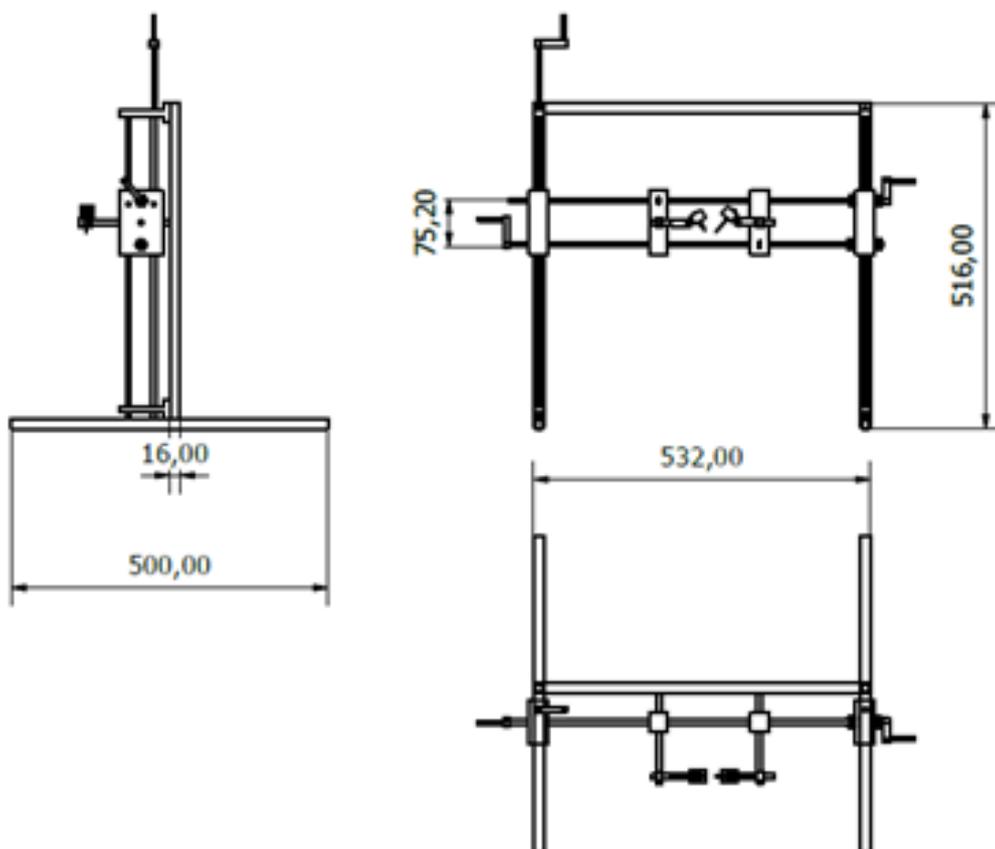


Figura 2.3: Desenho esquemático 2D da montagem final do protótipo (diferentes perspectivas do projeto), obtido através da utilização do *software AUTODESK INVENTOR* [20], onde se encontram indicadas as principais dimensões desta estrutura.

## 2.1. Estrutura de Suporte

As secções seguintes dedicam-se a dois elementos da estrutura de suporte: a estrutura metálica; e o conjunto de guias e sistema de ajuste da posição das agulhas.

### 2.1.1. Estrutura metálica

A estrutura de suporte metálica pretende acomodar os sistemas de ajustes das agulhas concebidos. Desta forma, pretende obter impactos com diferentes alturas de queda, bem como diferentes distâncias das gotas provenientes das agulhas.

A estrutura que suporta todos os outros componentes foi fabricada a partir de tubos metálicos de secção quadrada com 16 milímetros de largura. A Fig. 2.4a mostra as ferramentas usadas no corte dos tubos e resultado da soldadura. Recorrendo a um esquadro foi possível garantir as esquadrias de 90° entre os tubos metálicos que iriam dar forma à estrutura. A estrutura metálica final está na Fig. 2.4b. Essa servirá de suporte aos outros componentes integradores do protótipo que irão ser descritos mais à frente.



Figura 2.4: Material usado na construção [Ferros metálicos de 16 milímetros, rebarbadora Black & Decker, aparelho de soldar Vito, óculos de proteção e fita métrica ] (a) Corte dos ferros com as medidas projetadas e uso de um esquadro para garantir a esquadria de 90° da estrutura, durante o procedimento de soldagem.



Figura 2.5: Procedimento da montagem da estrutura finalizado

Depois de todos os tubos metálicos devidamente soldados e estando de acordo com o que foi projetado, seguiu-se a pintura com tinta preta em spray para obter um melhor acabamento e impedir que a estrutura se enferruje, visto que esta irá estar exposta a água durante o decorrer dos ensaios. Por outro lado, a cor preta mitiga as reflexões de luz na instalação.

### 2.1.2. Guias e Sistema de ajuste

A fim de ajustar a posição individual de cada agulha, foram utilizados um conjunto de varões roscados M6 (veio sem-fim), que ao passarem no interior de furos roscados, ou passantes, das peças projetadas, permite realizar pequenos ajustes e, assim, testar diferentes cenários de impacto de múltiplas gotas. O sistema de ajuste encontra-se representado na Fig. 2.6.

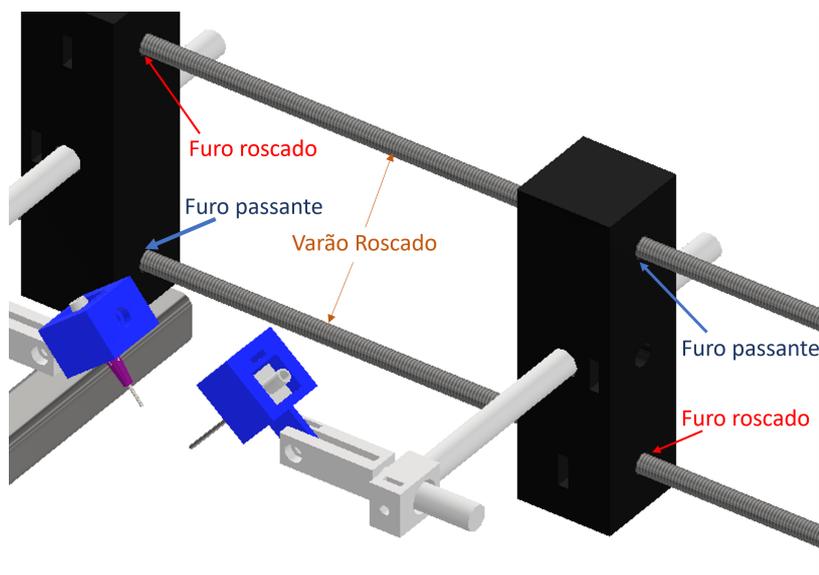


Figura 2.6: Representação esquemática do sistema de ajuste, formado por varões roscados

Por outro lado, como se pode ver na Fig. 2.7, também são usadas guias (ferros de secção circular) com um diâmetro de 5 mm que possibilitam o correto alinhamento das peças que servem para mover as agulhas na vertical, sem que ocorra torção.

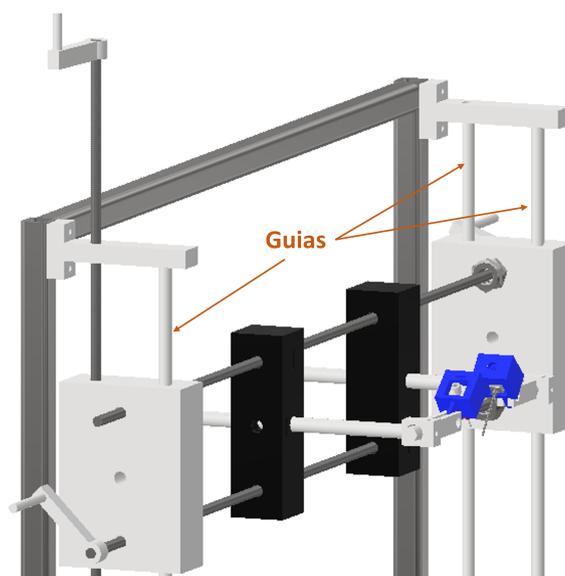


Figura 2.7: Representação esquemática das guias de ajuste, peças fundamentais para o correto alinhamento da estrutura, uma vez que permitem o movimento vertical sem que ocorra rotação.

### 2.1.3. Componentes impressos na impressora 3D

#### Movimento vertical

Projetou-se um componente com o objetivo de realizar um ajuste vertical das agulhas e posicioná-las à distancia pretendida da superfície de impacto. Esta peça encontra-se instalada em ambos os lados da estrutura. Tal como representado na Fig. 2.7, este componente tem dois furos que o atravessam de forma a possibilitar a instalação de uma guia, bem como a de um varão roscado. Este ao rodar no interior de uma porca embutida na peça mencionada, possibilita o deslocamento ao longo do eixo Z, conforme representado na Fig. 2.8.

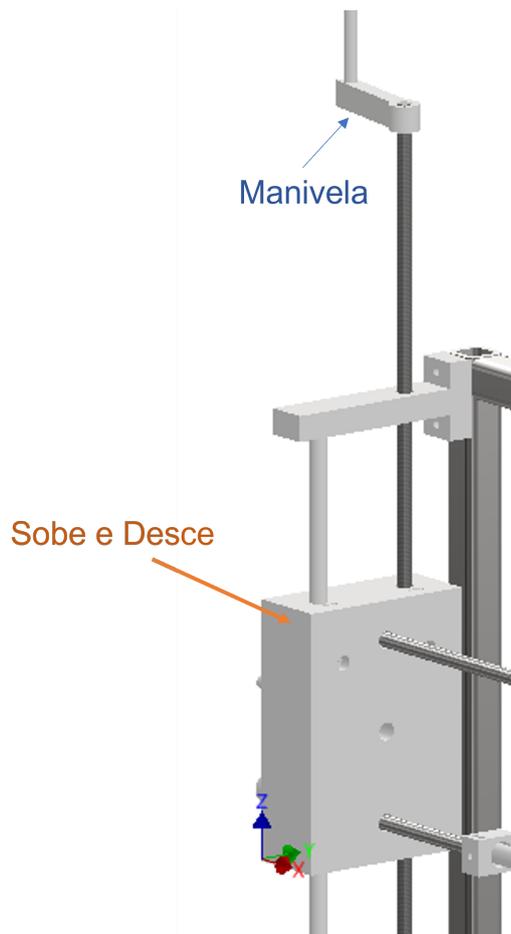


Figura 2.8: Representação esquemática da peça que permite o movimento na vertical, permitindo posicionar as agulhas a diferentes alturas

#### Peça de ajuste horizontal

O ajuste das agulhas na direção horizontal (eixo dos xx) é feito através da regulação de duas peças, que se encontram representadas a preto na Fig. 2.9. Para realizar qualquer ajuste no posicionamento das agulhas, cada uma destas peças tem um furo passante e um furo roscado. Ao alinhar um furo passante com um roscado, como se encontra explicado na Fig. 2.6, é possível mexer de forma independente cada um dos suportes representados a preto, conseguindo, assim, colocar as agulhas mais próximas e mais afastadas uma da outra. Esta condição é relevante, uma vez que o objetivo passa

## 2. Instalação Experimental

---

por conseguir controlar a distância de interação entre duas gotas após o seu impacto simultâneo numa superfície seca.

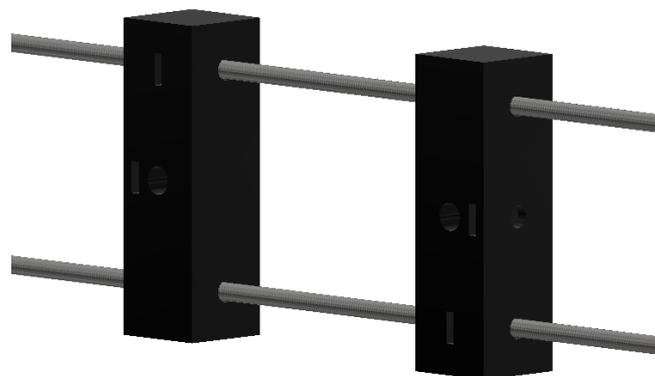


Figura 2.9: Representação esquemática das peças que permitem o movimento horizontal, possibilitando o posicionamento das agulhas a diferentes distâncias uma da outra lateralmente.

Peças projetadas para suportar e alinhar as agulhas.

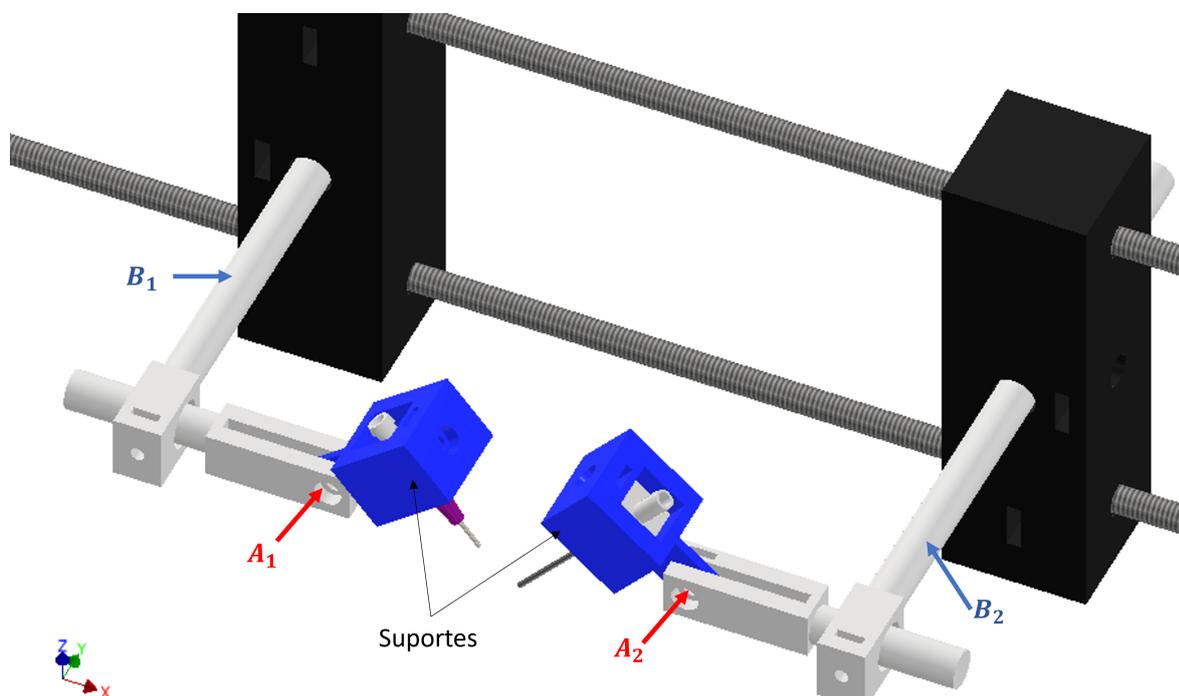


Figura 2.10: Representação esquemática das peças que permitem a fixação para os encaixes das agulhas.

Este conjunto de peças foi projetado para conseguir movimentar as agulhas na terceira direção, representada como direção dos  $yy$  na Fig. 2.10. Para isso, tem de se deslocar os braços denominados como  $B_1$  e  $B_2$ . Uma outra característica muito importante deste subconjunto de peças é a capacidade de tornar possível aproximar

a ponta das agulhas, desde uma distância considerável até estas se tocarem na sua extremidade.

Para proceder a este ajuste, tem de se regular o ângulo de inclinação das agulhas, sendo que este ajuste é possível de obter, devido à existência de articulações que funcionam por meio do aperto de um parafuso. Estas encontram-se representadas na Fig. 2.10 como  $A_1$  e  $A_2$ .

Representadas a azul, encontram-se os suportes para os encaixes das agulhas. Estas cabeças quadrangulares ocas, permitem por meio do aperto de um parafuso, fixar os encaixes desenhados para embutir as agulhas, como será mostrado em seguida.

### Encaixes para as agulhas

Foram desenhados dois encaixes diferentes para permitir o uso das várias agulhas disponibilizadas. O primeiro, representado na Fig. 2.11 a, para as agulhas de plástico e o segundo, representado na Fig. 2.11 b para que fosse possível acoplar as agulhas metálicas.

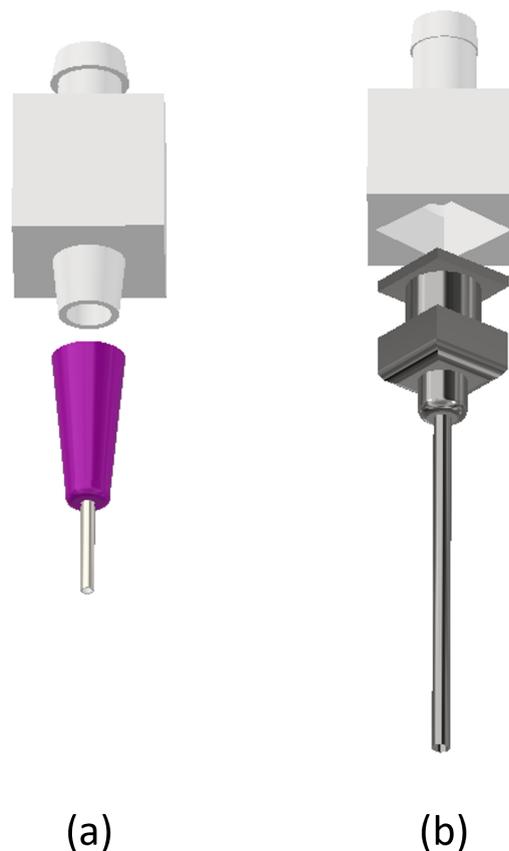


Figura 2.11: Representação esquemática das peças que permitem a fixação das agulhas: (a) fixação para as agulhas de plástico e (b) representa o encaixe para as agulhas de metal.

### 2.2. Sistema de produção de gotas

#### 2.2.1. Seringas e Bombas de Seringa

Para se conseguir introduzir o fluido (água destilada) no sistema, foram usadas duas seringas iguais às que se encontram representadas na Fig. 2.12. Estas seringas têm as seguintes características:

- Diâmetro da seringa,  $\phi = 28,5\text{mm}$ ;
- Volume da seringa,  $V = 50\text{mL}$ ;



Figura 2.12: Seringas usadas no decorrer da experiência.

Na Fig. 2.13a encontra-se a bomba de seringa utilizada, com o objetivo de bombear o fluido em estudo com um caudal pré-definido. Este componente funciona por meio de um veio-sem-fim que vai rodando com uma velocidade que dependendo dos valores de caudal introduzidos no equipamento. O primeiro passo para uma correta utilização da bomba de seringas foi introduzir o valor do diâmetro da seringa em milímetros, como se pode ver na Fig. 2.13b



(a)



(b)

Figura 2.13: (a) Bomba de seringas; (b) Introdução do Diâmetro da seringa em milímetros.

### 2.2.2. Tubos de ligação

Foi escolhido um tubo maleável e transparente de 4 milímetros de diâmetro para fazer a ligação entre as seringas e as agulhas, tal como encontra representado na Fig. 2.14. O facto de ser transparente é útil na medida em que possibilita verificar a existência de bolhas de ar. Tal como será mencionado futuramente, é muito importante garantir que não existe qualquer bolha de ar no interior do sistema.



Figura 2.14: Tudo usado na instalação para garantir a ligação entre as seringas e as agulhas.

### 2.2.3. Agulhas

Com o intuito de produzir e analisar a interação de gotas com diferentes tamanhos, foram utilizadas várias agulhas com diâmetros internos diferentes. As agulhas usadas podem ser identificadas na Fig. 2.15.

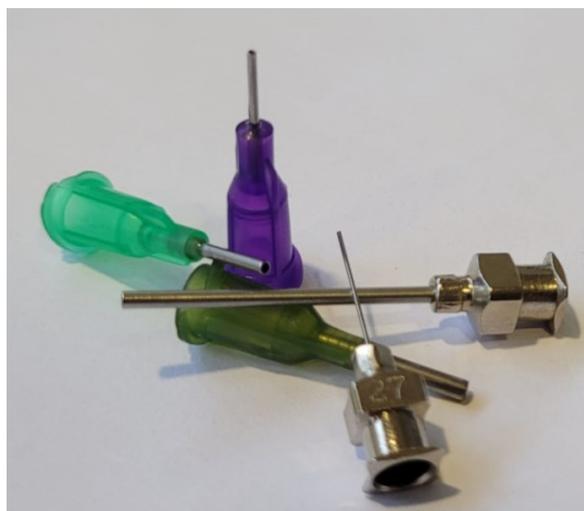
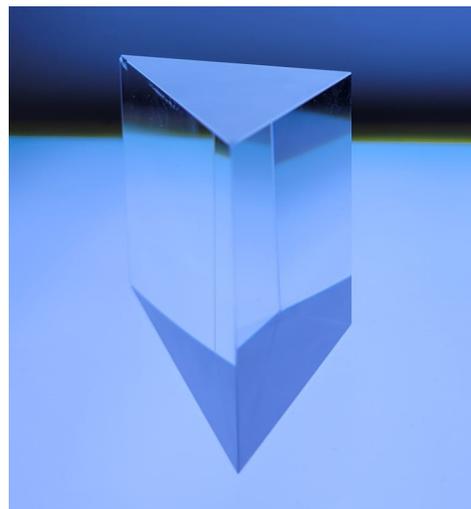


Figura 2.15: Diferentes agulhas usadas durante a realização das experiências.

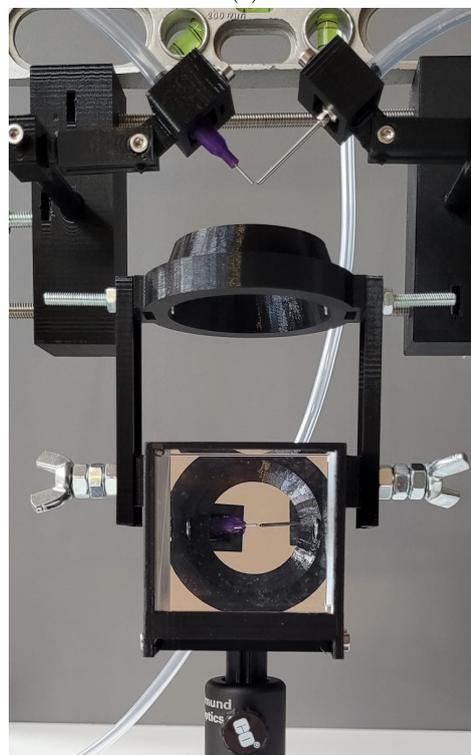
### 2.3. Componentes da superfície de impacto

#### 2.3.1. Prisma de vidro óptico

Um dos componentes mais importantes desta instalação é a superfície sólida onde as gotas irão incidir. A fim de visualizar o fenómeno de duas perspetivas diferentes, optou-se por usar um “prisma triangular *lsoescoles k9*”. Este prisma de ângulo reto possui 50 mm de largura e as superfícies retas são quadrangulares. A disposição deste prisma permite filmar numa posição frontal e obter uma imagem por baixo dos fenómenos ocorridos sobre a superfície, como se pode mostrar na Fig. 2.16b.



(a)



(b)

Figura 2.16: (a) Prisma de vidro óptico usado na captação das imagens; (b) Imagem obtida através do prisma.

### 2.3.2. Suporte para o prisma

O posicionamento correto do prisma necessita da construção de uma estrutura de suporte para este, como se encontra apresentada na Fig. 2.17. Este suporte serve também para fixar o apoio de uma fita de LED's, apresentada na Fig. 2.19, a fim de iluminar a parte superior do prisma e permitir a gravação dos vídeos.

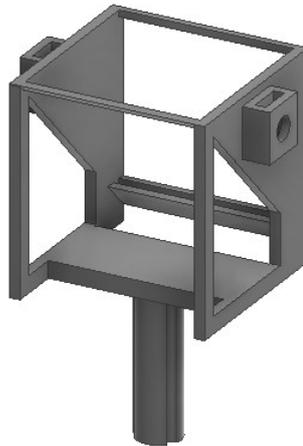


Figura 2.17: Representação esquemática do suporte, desenhado no *software Autodesk Inventor* [20], para fixar o prisma com a correta orientação.

## 2.4. Sistema de iluminação

### 2.4.1. Placa de luz, vidro opalino

Esta placa de luz colocada na parte traseira das agulhas e do prisma, colocada de frente para a câmara de filmar, permite criar o contraste perfeito e faz com que os contornos exteriores das gotas fiquem bastante visíveis e definidos. Para isso, esta fonte luminosa, está colocada por detrás de um vidro opalino. O uso deste vidro tem como objetivo criar uma luz homogénea, não concentrada, para impedir reflexos indesejados.

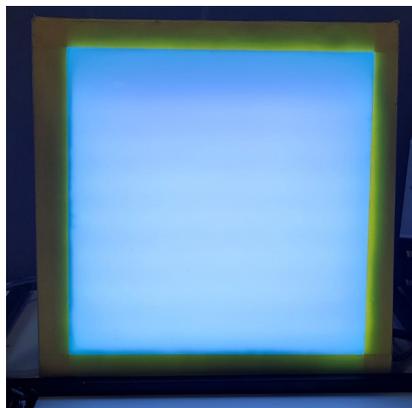


Figura 2.18: Placa de iluminação com vidro opalino, colocada atrás da instalação, para garantir que os contornos exteriores das gotas fiquem bastante visíveis e definidos.

### 2.4.2. Suporte para aplicar a fita de LED's

Durante os primeiros testes, verificou-se que seria necessário arranjar uma forma de colocar uma outra fonte de luz, que incidisse na parte superior do prisma, uma vez que as imagens captadas estavam bastante escuras e o fenómeno associado ao impacto das gotas não conseguia ser estudado na perfeição.

Assim desenhou-se o suporte representado na Fig. 2.19a, para no seu interior se conseguir embutir uma fita de LED's. Devido à inclinação cónica da peça em questão, a luz seria então direcionada para baixo e para o centro, conseguindo assim, melhorar bastante as imagens captadas.

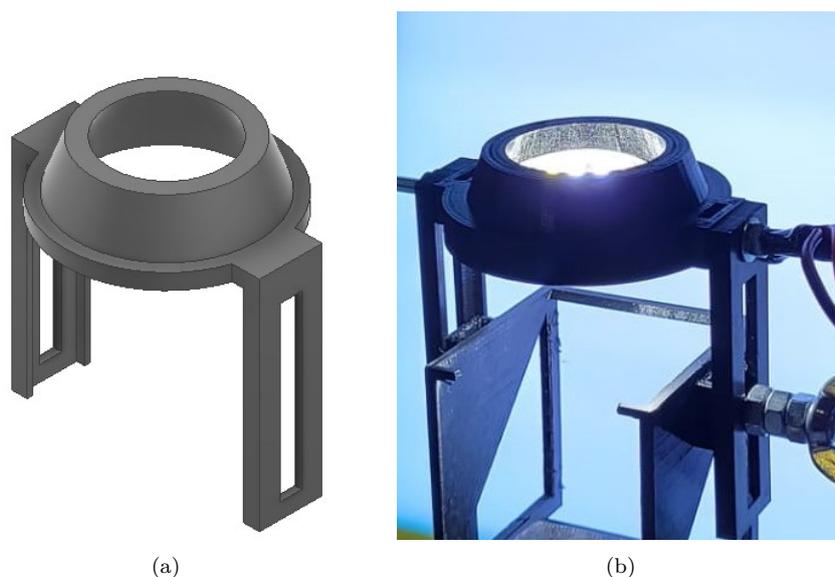


Figura 2.19: (a) Representação esquemática do suporte, desenhado no *software Autodesk Inventor* [20], para fixar uma fita de LED's, que irá permitir obter luz na face superior do prisma o prisma e (b) Aspeto final do componente.

## 2.5. Sistema de captação de imagem

A fim de visualizar o comportamento das gotas após o impacto e analisar a morfologias das estruturas hidrodinâmicas que se formam, foi necessário recorrer a uma câmara de alta velocidade *Phantom Miro M340* (Fig. 2.20). Este equipamento permite filmar com elevada resolução espacial e temporal e uma taxa de aquisição, FPS (*frames per second*), que depende da resolução espacial escolhida.



Figura 2.20: Câmara de alta velocidade, "Phantom Miro M340"

Existem duas considerações essenciais na obtenção das imagens com alta definição. A primeira passa pela estabilidade do tripé que suporta a câmera para impedir vibrações indesejadas. Este tem ainda de permitir um bom ajuste da posição da câmera, para que fique nivelada com a bancada onde assenta a instalação e à altura desejada. A segunda consideração consiste em garantir um bom contraste das imagens através da instalação de uma adequada fonte de luz. Como se pode observar na Fig. 2.21, nas posições  $L_1$  e  $L_2$  encontra-se a fita de LED's, e a placa de vidro opalino que difunde uniformemente a luz num plano, respetivamente. A fim de conseguir o nível de contraste pretendido, colocou-se a placa de iluminação atrás do prisma numa posição vertical. Sendo que a fita de LED's, foi colocada na parte superior do prisma, a fim de ser possível dar brilho às gotas de líquido incidentes em análise.

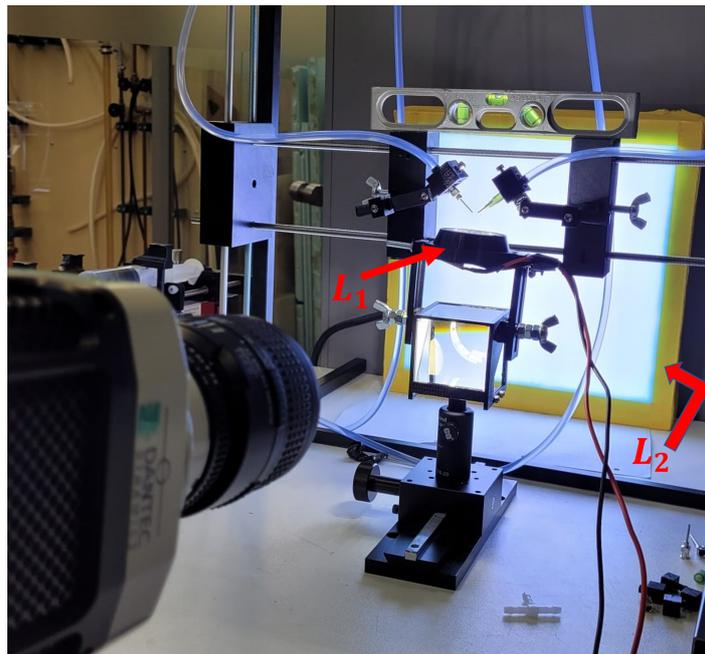


Figura 2.21: Sistema de iluminação, constituído pela fita de LED's ( $L_1$ ) e pela placa de vidro opalino ( $L_2$ ) e a sua colocação no espaço



### 3. Técnicas de Diagnóstico e Metodologia Experimental

Neste capítulo será descrita a forma como foi elaborada a preparação da instalação para realizar os testes preliminares e quantificar tamanhos e velocidades de gotas, ou distâncias e intervalos de tempo. O objetivo da instalação consiste no controlo de impactos para que ocorrem em simultâneo ou com um desfasamento controlado de duas ou mais gotas. A simultaneidade no impacto de duas gotas é caso muito particular, quando falamos de sprays, e também difícil de obter, mas relevante do ponto de vista da validação da modelação física do fenómeno.

#### 3.1. Sistema de diagnóstico e Fluido utilizado

A observação da morfologia envolvida nos múltiplos impactos de gotas recorre a uma câmara de alta-velocidade para visualizar, com suficiente resolução espacial e temporal, as condições dinâmicas das gotas antes do impacto, as estruturas hidrodinâmicas geradas pela interação entre gotas, e a possível emergência de gotas por atomização secundária (número, tamanho e velocidade).

As câmara de alta-velocidade possuem uma memória limitada que origina uma relação restrita entre a resolução escolhida e a taxa de aquisição de imagens máxima. Nos ensaios preliminares para validar o funcionamento da instalação foram usadas duas resoluções diferentes:

- i)  $1024 \times 768$ , com tempo de exposição de  $216\mu s$  e uma taxa de aquisição de imagem de  $1200 FPS$  (Frames-Per-Second/Imagens-Per-Segundo), sendo que o intervalo temporal entre duas imagens consecutivas é de  $0.83 ms$ ;
- ii)  $512 \times 512$ , com tempo de exposição de  $108.68\mu s$  e uma taxa de aquisição de imagens de  $9200 FPS$ , sendo que o intervalo temporal entre duas imagens consecutivas é de  $0.109 ms$ .

Foi considerado que os ensaios foram realizados à temperatura ambiente ( $20^{\circ}C$ ) utilizando água destilada, visto que é um fluido cujas propriedades se encontram bem definidas e de fácil aquisição. Assim, algumas das propriedades consideradas para este fluido são:

- Massa volúmica,  $(\rho) - 998.0 kg/m^3$ ;
- Viscosidade dinâmica,  $(\mu) - 1.002 \times 10^{-3} kg/(m.s)$ ;
- Tensão superficial  $(\sigma) - 72.6 \times 10^{-3} N/m$ ;

### 3.2. Agulhas em análise

A Fig. 3.1 mostra as agulhas usadas no decorrer da experiência para produzir as gotas com os tamanhos desejados.



Figura 3.1: Agulhas usadas na experiência.

Através da Tabela 3.1 é possível relacionar as agulhas em questão com os seus respectivos diâmetros internos.

Tabela 3.1: Diâmetro interno de cada agulha utilizada e sua correspondente numeração.

Agulha	1	2	3	4	5
Diâmetro Interno [mm]	0.20	0.51	0.84	1.04	1.50

Como já foi referido anteriormente, a aleatoriedade no que diz respeito ao tamanho das gotas, deve ser tido em conta quando se fala em análise de *sprays* e impacto de múltiplas gotas.

### 3.3. Obtenção das dimensões de uma gota pendente

Um dos aspetos fundamentais inerentes à realização deste estudo, passa por saber as dimensões das gotas em análise, representadas na Fig. 3.2. A determinação do diâmetro de cada uma das gotas, formadas pelas cinco agulhas em questão, foi aferido usando o *software MATLAB* [21].

Para ser possível determinar o diâmetro da gota, é necessário ter como referência na imagem em análise, algo que à partida já se conheça as suas dimensões. Como base de comparação foi usado o diâmetro externo de cada agulha, cujo os valores se encontram expressos na Tabela 3.2.

As respetivas medições dos diâmetros foram feitas para cinco valores de caudal volumico diferentes, com o objetivo de perceber se esta alteração também teria influência no diâmetro final da gota.

Tabela 3.2: Diâmetro externo de cada agulha utilizada, e sua correspondente numeração.

Agulha	1	2	3	4	5
Diâmetro Externo [mm]	0.27	0.59	0.93	1.14	1.60

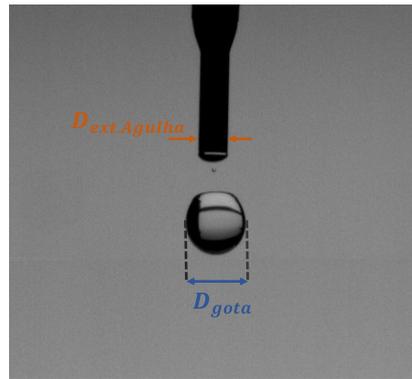


Figura 3.2: Ilustração esquemática do diâmetro de uma gota pendente associado ao diâmetro da agulha que lhe dá origem.

Como foi referido anteriormente, foi utilizado o *software MATLAB* para conseguir determinar o diâmetro das gotas em análise, sendo que o código criado para este efeito, encontra-se apresentado no Apêndice A 1.

Explicando, de uma forma geral o código, temos que proceder em primeiro lugar ao *upload* da imagem que se pretende analisar e transformar a imagem de RGB para preto e branco, Fig. 3.3a. De seguida, cria-se uma imagem a partir da imagem 2D anterior, convertendo todos os valores acima de determinado limite de cor com o valor 1 (branco) e todos os outros pixels com o valor 0 (preto), Fig. 3.3b. De realçar que a cor branca é considerada a mistura de todas as cores e o preto a ausência de cor.

O passo seguinte passa por eliminar todo o ruído da imagem e ao mesmo tempo pretende-se transformar os espaços brancos dentro da gota a preto. Para isso definiu-se que todos os conjuntos inferiores a 3000 píxeis adjacentes com o valor 1 (branco) se iriam converter em pixels com o valor 0 (preto), como se pode ver comparando a Fig. 3.3b com a Fig. 3.3c.

Por fim, o código gera o contorno das formas presentes na imagem. Na Fig. 3.3d, pode ver-se claramente delimitado, o contorno da agulha e da gota. Ainda neste passo é gerado o valor dos centróides das duas formas contornadas e através disso é determinado o número de pixels desde o centróide até ao contorno criado, tanto na direção vertical como na horizontal.

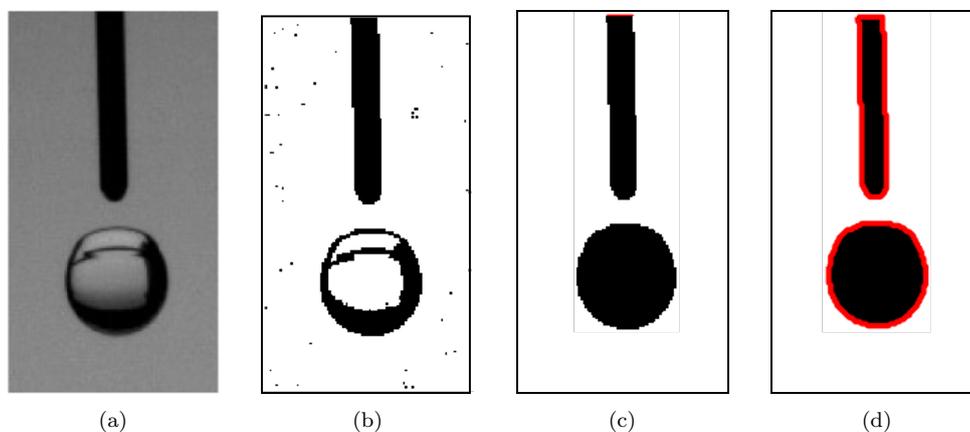


Figura 3.3: Sequência de ações realizadas no *Matlab* para obter o valor do diâmetro da gota. (a) Fazer upload da imagem e convertê-la a preto e branco; (b) Binarizar a imagem; (c) Eliminar o ruído e preencher as lacunas a preto; (d) Obter as fronteiras das formas existentes, agulha e gota.

Posto isto, foi possível criar uma função capaz de determinar o valor em milímetros do diâmetro da gota. Para isso basta identificar a imagem que se pretende analisar e introduzir o valor do diâmetro externo da agulha em causa.

#### 3.4. Obtenção da velocidade de queda de uma gota pendente

A fim de ser possível determinar a velocidade de queda de cada gota À semelhança do que foi feito anteriormente, foi dado como valor de referencia o diâmetro da gota em análise. Desta forma foi possível, através de uma função desenvolvida no *software MATLAB* retirar as coordenadas do centróide de uma gota em duas imagens consecutivas, como representado na Fig. 3.4 conseguindo assim uma distancia em milímetros, e consequentemente a velocidade de queda da gota.

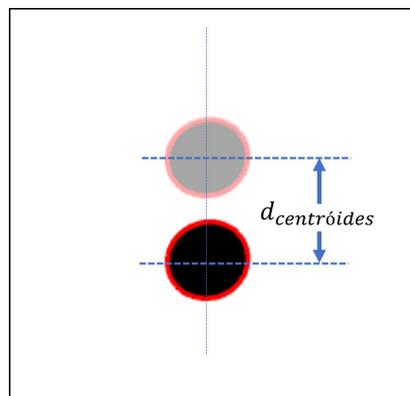


Figura 3.4: Valor, retirado através do *software MATLAB*, da distância entre centróides da mesma gota em frames consecutivos.

#### 3.5. Obtenção do desfaseamento temporal e espacial entre duas gotas adjacentes

Da mesma forma que foi possível retirar o valor da velocidade de queda de uma gota, analisando a Fig. 3.5, também se conseguiu determinar os valores do desfaseamento temporal e espacial entre duas gotas adjacentes.

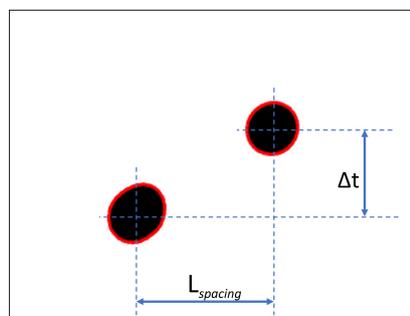


Figura 3.5: Valor, retirado através do *software MATLAB*, da distância entre centróides de duas gotas adjacentes na direção horizontal e do desfaseamento temporal entre elas.

### 3.6. Tempo de formação de uma gota

Como já foi referido anteriormente, o objetivo principal desta dissertação, passa por conseguir obter um protótipo capaz de criar impactos simultâneos de múltiplas gotas e posteriormente obter imagens deste fenómeno.

Também, como já foi mencionado, foram usadas agulhas com diâmetros diferentes, a fim de ser possível obter gotas de vários tamanhos. Este procedimento veio originar um problema, uma vez que agulhas de diâmetros diferentes não formam apenas gotas com tamanhos diferentes. Para o mesmo caudal volúmico introduzido na bomba de seringas, Fig. 2.13a, cada agulha irá formar uma gota que demora um certo tempo, desde que inicia a sua formação até que se liberta (este intervalo temporal foi denominado de "tempo de queda da gota"), estando ilustrado na Fig. 3.6. Através da Tabela 3.3 é possível consultar, os valores dos diferentes tempos de queda, retirados durante os ensaios. De notar que nesta tabela apenas se encontra expresso o valor da média de cada ensaio bem como a sua incerteza, sendo que a incerteza máxima obtida nos valores para os tempos de formação das gotas foi de 0.16% para um intervalo de confiança de 95%. Todas as medições efetuadas podem ser consultadas desde a Tabela 1 até à Tabela 5.

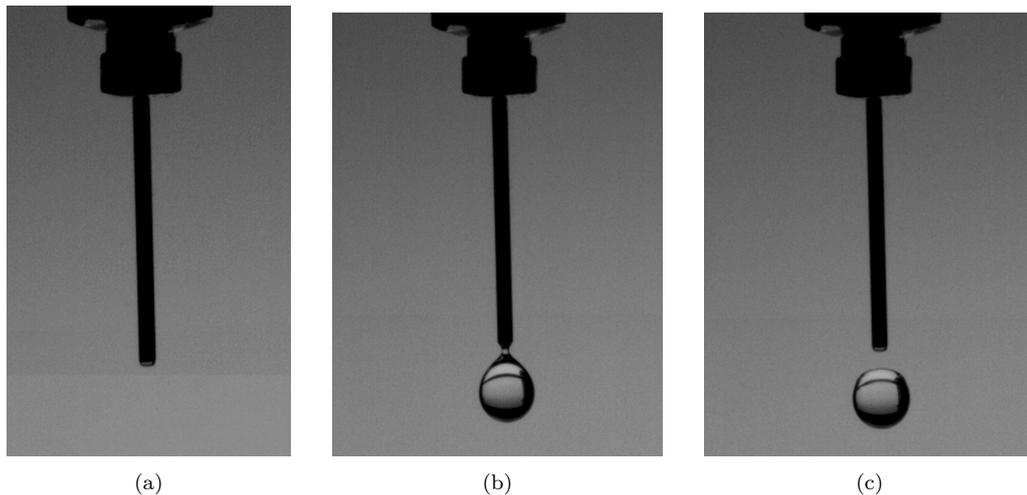


Figura 3.6: Imagem retirada no decorrer da experiência da formação e queda, de uma gota, na extremidade de uma agulha. (a) Representa o início da formação da gota, instante  $t = 0$  s. (b) Representa o momento exatamente antes, em que a gota se desprende da agulha. (c) Representa o instante em que se dá o descolamento da gota.

Tabela 3.3: Valores obtidos durante as medições do tempo de formação das gotas

Caudal Volúmico [mL/hr]	Tempo de Formação [s]				
	0.20 [mm]	0.51 [mm]	0.84 [mm]	1.04 [mm]	1.50 [mm]
5	$4,803 \pm 0,09$	$6,799 \pm 0,10$	$10,835 \pm 0,13$	$12,989 \pm 0,07$	$16,212 \pm 0,08$
10	$2,889 \pm 0,10$	$3,652 \pm 0,10$	$5,468 \pm 0,12$	$6,697 \pm 0,08$	$8,166 \pm 0,06$
15	$1,672 \pm 0,11$	$2,443 \pm 0,12$	$3,704 \pm 0,08$	$4,392 \pm 0,10$	$5,409 \pm 0,10$
20	$1,214 \pm 0,10$	$1,882 \pm 0,10$	$2,865 \pm 0,12$	$3,331 \pm 0,11$	$4,145 \pm 0,09$
25	$1,002 \pm 0,16$	$1,483 \pm 0,13$	$2,431 \pm 0,09$	$2,726 \pm 0,11$	$3,312 \pm 0,15$

### 3.7. Sincronizar a queda das gotas

Conhecendo o diâmetro interno das agulhas e tendo introduzido o valor do diâmetro da seringa utilizada na bomba de seringas, o passo seguinte resume-se, como já foi referido, a criar um estudo que possibilite a determinação do tempo de queda de uma gota, associada a uma agulha em particular.

Desta forma, foi feito, para cada uma das 5 agulhas referidas na Fig. 3.1, um conjunto de quinze ensaios para cada um dos cinco valores escolhidos para o caudal volúmico escolhido. Cada uma destas medições encontram-se exibidas nas tabelas apresentadas no Apêndice A, desde a Tabela 1 até à Tabela 5.

De seguida, depois de retirar experimentalmente todos os valores necessários, elaborou-se um gráfico que conseguisse relacionar, para cada uma das agulhas, o tempo de queda de uma gota para diferentes caudais volúnicos.

Desta forma pode-se teorizar que é possível sincronizar a queda de duas gotas provenientes de agulhas de tamanhos diferentes. Para isso, basta analisar o gráfico apresentado na Fig. 4.2, traçando uma reta com o correspondente valor do tempo de queda que queremos obter e através de uma interseção com a linha correspondente à agulha que estamos a usar, retirar os valores do caudal volúmico que serão posteriormente introduzidos na bomba de seringas.

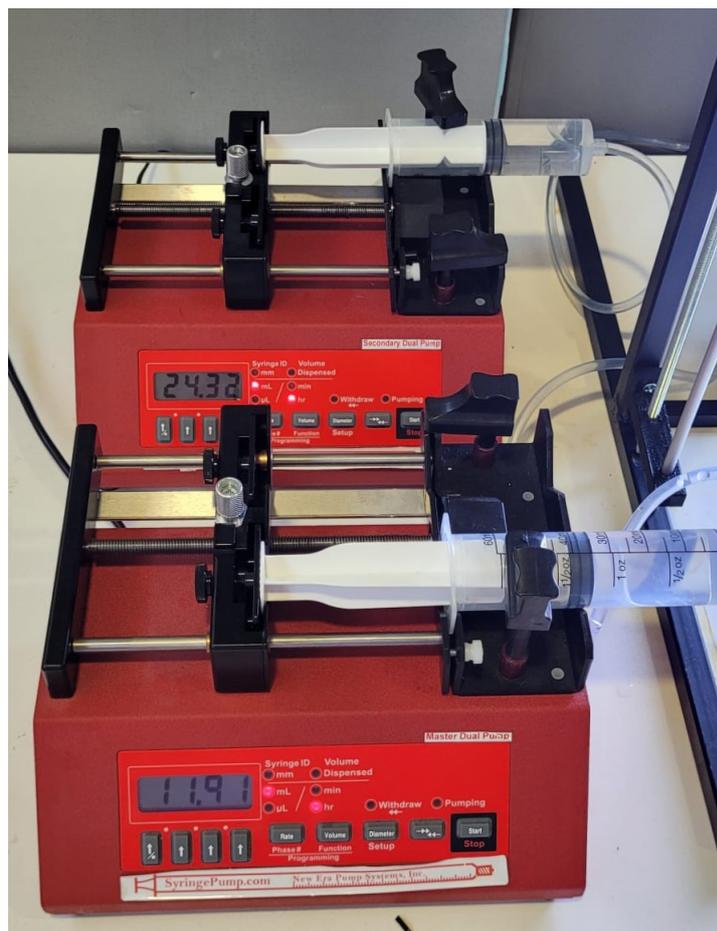


Figura 3.7: Imagem retirada durante o decorrer da experiência, onde mostra a introdução de diferentes valores para o caudal volúmico nas duas bombas de seringas, a fim de conseguir obter a sincronia perfeita, no momento do impacto das gotas.

Depois de obter o Gráfico 4.2, consegue-se calcular qual o valor do caudal volúmico a introduzir em cada uma das bombas de seringas, para assim conseguir obter a sincronia perfeita. Rapidamente se pôde comprovar que esta teoria não era verificada na realidade, uma vez que as gotas caíam com algum desfasamento. Apesar de o desfasamento temporal e espacial entre as duas gotas, representado na Fig. 3.8 ser bastante pequeno, porém ainda não se pode considerar que esta seja uma queda simultânea entre gotas.

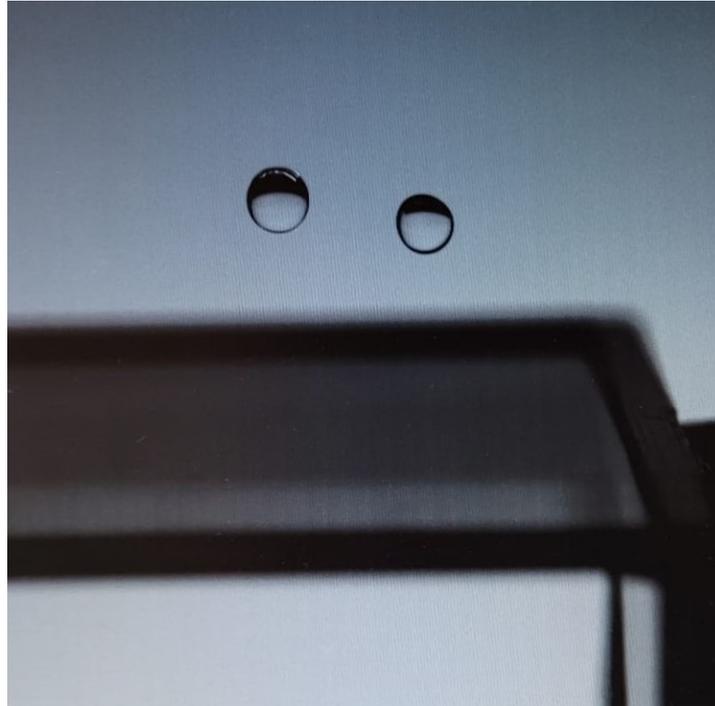


Figura 3.8: Imagem obtida durante o processo de sincronização das gotas, onde mostra um ligeiro desfasamento entre ambas, devido a alguns fatores externos.

Este desfasamento, quase mínimo encontra-se relacionado com uma série de pequenos erros que ocorrem durante a experiência.

Em primeiro lugar, temos os valores retirados do gráfico e que são posteriormente inseridos nas bombas de seringas. Uma vez que estes foram retirados experimentalmente e contêm um valor de incerteza associado, mesmo com uma amostra bastante abrangente de medições torna impossível dizer que são precisos o suficiente para conseguir a simultaneidade. Por outras palavras, o que se pretende dizer, é que mesmo calculando os valores através do gráfico, estes podem ou não criar simultaneidade entre as gotas. Assim sendo é necessário proceder a alguns ajustes nos valores introduzidos nas bombas de seringas. Foi necessário testar, com base no método de tentativa e erro, a coordenação da queda das duas gotas, ajustando os valores introduzidos nas bombas de seringas mais para cima ou mais para baixo, tendo em conta os valores calculados a partir do gráfico.

A existência de micro-bolhas de ar agarradas à superfície interior dos tubos usados, geram uma alteração no valor do caudal volúmico que corre dentro dos tubos até às agulhas. Desta forma o caudal volúmico definido na bomba de seringas, não é o exato e cria estes pequenos desfasamento que comprometem a experiência, daí a grande importância de usar tubos transparentes.

Outro problema que surgiu durante as experiências e que também causava alguns

desfasamentos na queda das gotas, foi o facto de muitas vezes não ser possível conseguir ligar as duas bombas de seringas exatamente ao mesmo tempo. Penso que este problema pode ser resolvido ligando as bombas ao computador permitindo assim coordenar as duas ao mesmo tempo.

A existência de vibrações indesejadas, também é um dos grandes problemas. Ao existirem vibrações, as gotas que se estão a formar na ponta das agulhas vão ter um comportamento imprevisível, o que faz com que estas não caiam coordenadas. Estas vibrações podem surgir devido a vários fatores: carregar nos botões das bombas de seringas para ligar e desligar, um toque na bancada de apoio ou mesmo a própria vibração induzida quando o mecanismo da bomba de seringas se encontra em funcionamento. Estas questões foram ultrapassadas arranjando uma outra bancada de apoio para todo o material que pudesse causar vibrações durante a formação das gotas.

Uma técnica que foi utilizada inicialmente foi limpar a ponta das agulhas com um cotonete, com o objetivo de retirar algum excesso de líquido que já se estaria a formar na extremidade destas. Desta maneira, no momento em que se ligavam as bombas de injeção, tentava-se impedir que uma das agulhas estivesse num estado mais avançado que a outra. Este método verificou-se vir a ser prejudicial, uma vez que a quantidade de água retirada da agulha não era igual em ambas as agulhas assim como também, nunca era igual em termos de quantidade, de experiência para experiência. A fim de resolver esta questão, bem como a questão da ligação das duas bombas em simultâneo, testou-se colocar um guardanapo em contacto com as duas agulhas em análise e pôr o sistema de bombagem em funcionamento. Assim, quando é retirado o guardanapo, as duas gotas começam a sua formação, daquilo que se pode considerar como ponto zero e caem ao mesmo tempo.

Tendo em conta todos estes pequenos ajuste, é possível com base no método da tentativa e erro, conseguir resultados bastante aceitáveis como se pode verificar na Fig. 3.9. As imagens obtidas dos impactos provenientes destes resultados serão apresentadas no próximo capítulo.

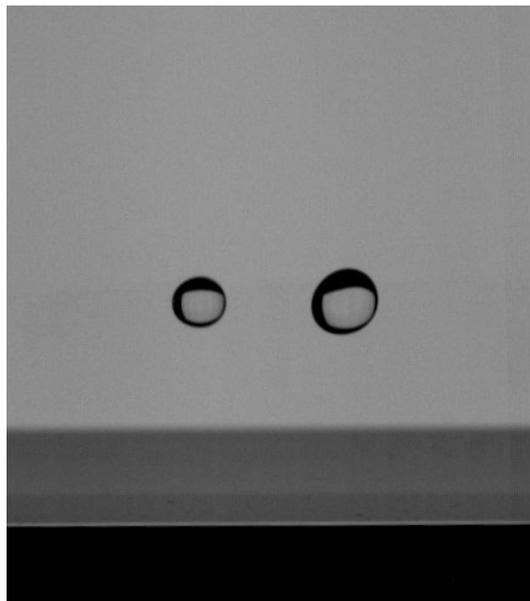


Figura 3.9: Imagem que mostra a simultaneidade obtida durante o processo de sincronização das gotas, depois de serem aplicadas todas as normas de bom funcionamento, referidas anteriormente.

## 4. Análise de Resultados e Discussão

Uma vez que o objetivo principal desta dissertação é a conceção e construção de uma instalação laboratorial para estudar a interação ocorrida no impacto de múltiplas gotas, existem três aspetos fundamentais: 1) o controlo do tamanho das gotas formadas; 2) o controlo do instante de impacto das múltiplas gotas; 3) e assegurar a capacidade de visualizar a morfologia das estruturas formadas por interação das múltiplas gotas.

### 4.1. Calibração do tamanho das gotas incidentes

Na secção 3.3 explicou-se o método de obtenção dos valores do diâmetro das diferentes gotas formadas pelas agulhas facetadas através de um algoritmo de análise de imagem desenvolvido em *software MATLAB*.

A medição dos tamanhos considerou diversos valores de caudal volúmico (5-25 ml/h), de modo a aferir se a variação do caudal induz algum efeito sobre o tamanho da gota incidente. Os valores estão detalhados no Apêndice A. Aqui, a Fig. 4.1 mostra os resultados obtidos para o diâmetro da gota ( $d_g$ ) em função do diâmetro interior da agulha ( $D_{ai}$ ). A figura inclui o diâmetro previsto de acordo com a Eq. (1.2). A incerteza máxima obtida nos valores para os tamanhos das gotas foi de 0.7% para um intervalo de confiança de 95%.

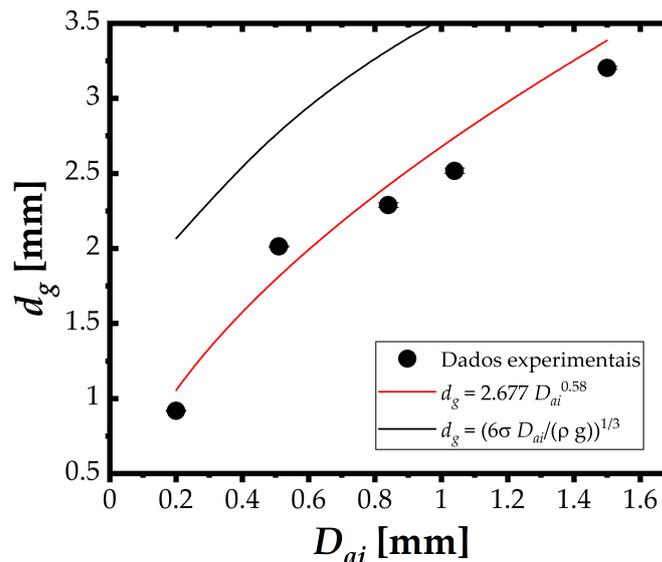


Figura 4.1: Diâmetro da gota em milímetros

Apesar da curva proveniente da calibração ter um comportamento semelhante ao previsto, as gotas formadas possuem, sistematicamente, um tamanho menor. Uma

razão possível estará numa pequena quantidade de líquido que fica sempre retida na ponta da agulha aquando do estrangulamento da linha de contacto até à formação da gota, ocorrido numa cota abaixo da saída da agulha.

## 4.2. Calibração do tempo de formação das gotas

A partir dos resultados apresentado na secção 3.6 elabora-se uma relação funcional entre o caudal volúmico ( $\dot{V}_f$  [ml/h]) e o tempo de formação das gotas ( $t_{fg}$  [s]) como

$$t_{fg} [s] = a \cdot (\dot{V}_f [ml/h])^b \quad (4.1)$$

que inclui uma tabela com o valor dos coeficientes de escala ( $a$ ) e forma ( $b$ ) de cada correlação. O desvio ( $bias$ ) entre os resultados experimentais e os obtidos pelo ajuste das relações funcionais é de  $5.17 \times 10^{-5}$  e um desvio padrão de  $3.25 \times 10^{-2}$ . Para sincronizar a formação das gotas em duas agulhas  $A_1$  e  $A_2$ , com diâmetros internos diferentes, de forma a obter uma libertação e um impacto simultâneo das mesmas, podemos saber o caudal usar na segunda agulha com base no caudal a usar na primeira fazendo

$$\dot{V}_{f,2} = \left( \frac{a_1 \dot{V}_{f,1}^{b_1}}{a_2} \right)^{1/b_2} \quad (4.2)$$

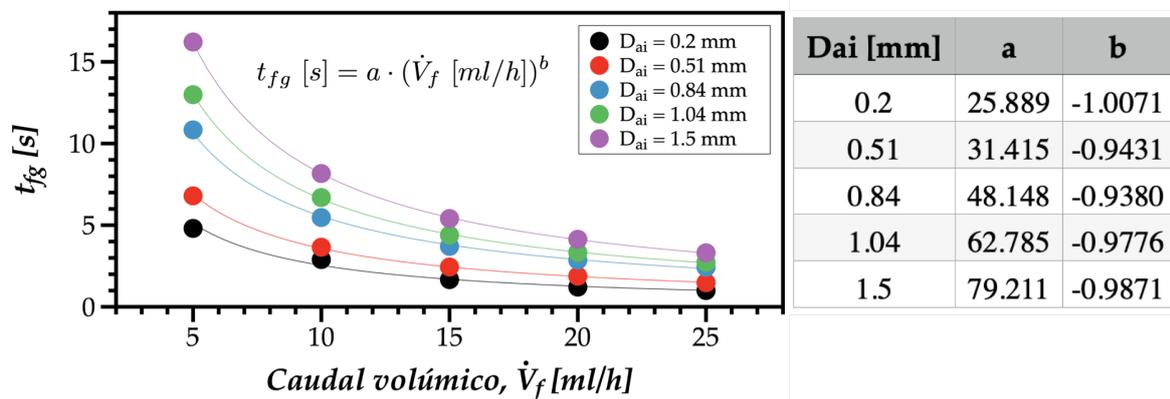


Figura 4.2: Calibração do tempo de formação das gotas para várias agulhas com diâmetros internos diferentes.

A próxima secção apresenta alguns resultados do funcionamento da instalação começando por considerar o impacto de um gota, impactos desfasados ou em simultâneo, onde o resultado pode, ou não, produzir uma atomização secundária a partir das estruturas hidrodinâmicas formadas por interação das gotas.

## 4.3. Experiências preliminares de impacto múltiplas gotas

Existe quatro resultados fundamentais aquando do impacto de um gota em superfícies secas – colamento (*stick*), reflexão (*rebound*), espalhamento (*spread*) e *splash*. A interação entre impactos de gotas ocorre quando se formam estruturas hidrodinâmicas diferentes das esperadas com o impacto de uma só gota. Nesse sentido, esta secção

analisa as diversas estruturas formadas pela interação ocorrido em múltiplos impactos de gotas. As imagens destes fenómenos foram obtidas através da visualização por câmara de alta velocidade como se encontra descrita nas secções 2.4 e 2.5. Porém, para compreender a física subjacente a essa interação, importa estabelecer a estrutura base que se forma com o impacto de uma só gota.

Como foi referido no capítulo introdutório, a atomização secundária pode ocorrer se o número de Weber ultrapassar um determinado critério de transição, originando um splash, ou através das interações entre múltiplas gotas. Ao observar a Fig. 4.3, esta apresenta o impacto de uma gota de água com  $d_g = 3.2 \text{ mm}$  e uma velocidade de  $u_g = 1.46 \text{ m/s}$ , resultando num valor para o número de Weber de  $We = 94.1$  que, de acordo com Bai et al. [22], se espera gerar um espalhamento da gota como observado. Analisando o estudo referido, verifica-se que foi definido um critério para ocorrência de atomização secundária em superfícies secas para determinar a transição entre os regimes de espalhamento e splash, dado por:

$$We_c = 2630La^{-0.183} \quad (4.3)$$

Onde  $La$  é o número de Laplace, sendo dado pela equação (1.14). Nestas condições o valor para o número de Weber crítico ( $We_c = 292.9$ ) é superior ao valor de Weber do caso em análise. Não sendo aspectável a ocorrência de atomização secundária, como foi verificado na Fig. 4.3. As imagens correspondem a instantes de tempo ( $t$ ) normalizados pela escala de tempo da gota ( $t_g = d_g/u_g$ ) -  $\tau = t/t_g$ .

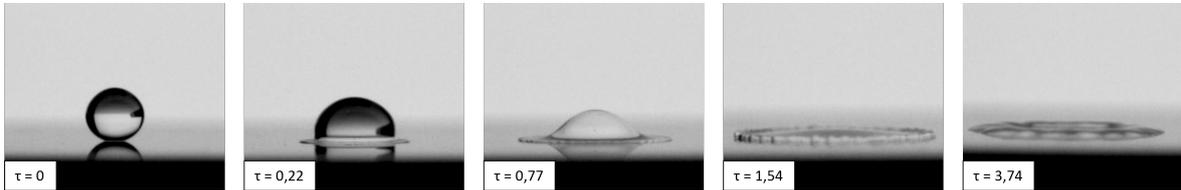


Figura 4.3: Exemplo do espalhamento de um gota incidente em superfície seca.

Se houver um segunda gota incidente, o mais comum seria estar desfasadas, como apresentado na Fig. 4.4 para duas gotas com tamanhos diferentes, embora próximos,  $d_{g,e} = 2.5 \text{ mm} \rightarrow La_e = 182274,62$  à esquerda e  $d_{g,d} = 2.3 \text{ mm} \rightarrow La_d = 166045$  à direita, com a mesma velocidade de impacto ( $u_g = 1.471 \text{ m/s}$ ) por terem sido lançadas da mesma altura, resultando em  $We_e = 74.9$  e  $We_d = 68.3$ , inferiores aos correspondentes valores de Weber críticos que indicam a transição para *splash* de acordo com Bai et al. [22], pelo que se prevê o seu espalhamento. As gotas estão distanciadas de  $l = 6.25 \text{ mm}$  e o intervalo de desfasamento é de  $\Delta t = 2.446 \text{ ms}$ .

O facto de ocorrer o espalhamento previsto por Bai et al. [22], das duas gotas em análise, deve-se ao facto de a interação na linha de contacto entre as coroas formadas, se verificar numa fase em que a gota da esquerda praticamente já encontra depositada, enquanto que a da direita ainda não impactou na superfície (devido ao desfasamento temporal entre gotas ser significativo [ $\Delta t = 2.446 \text{ ms}$ ]). Desta forma a primeira gota que entrou em contacto com a superfície não tendo energia suficiente acumulada, para que aquando o contacto com a segunda gota, se possa verificar a mudança de regime e o aparecimento de *splash*.

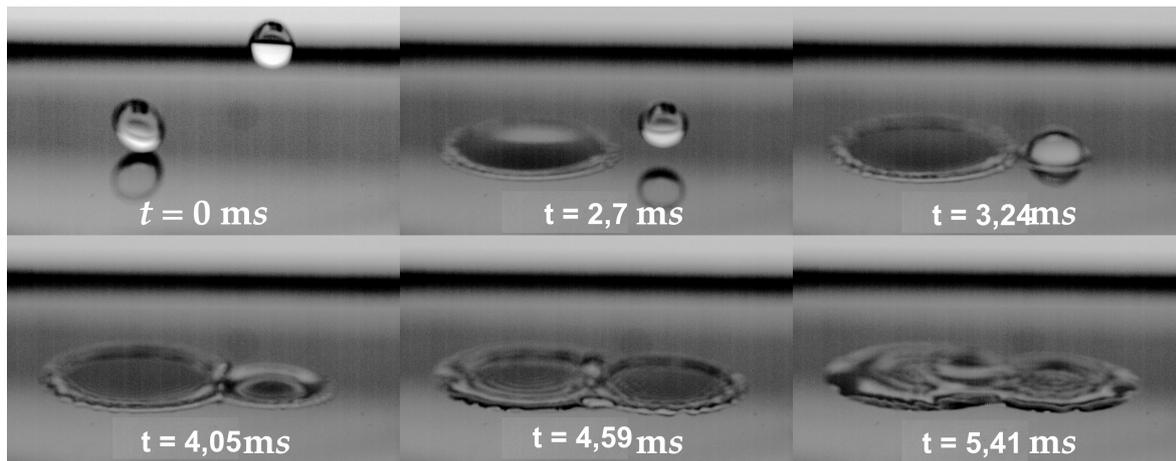


Figura 4.4: Interação resultante do impacto desfasado ( $l = 6.249 \text{ mm}$ ,  $\Delta t = 2.446 \text{ ms}$ ) de duas gotas com tamanhos diferentes (2.5 mm à esquerda e 2.3 mm à direita).

### 4.3.1. Impactos simultâneos

O impacto entre gotas incidentes considera-se simultâneo quando o desfasamento temporal for igual ou próximo de zero. Apesar de serem casos particulares, a sua fenomenologia é relevante para a validação dos modelos físicos que procuram simular o impacto de sprays. A exigência do ponto de vista de uma instalação é elevada para se conseguir uma queda sincronizada de duas ou mais gotas, suficientemente próximas entre si, de forma a que possa ocorrer interação. Dependendo da energia de impacto, as gotas podem espalhar-se ou formar coroas ascendentes que acabam por colidir. No caso de espalhamento de ambas as gotas, durante a colisão dos bordos, a quantidade de movimento altera a sua direção e sentido gerando uma lamela vertical ascendente. Este fenómeno é descrito na literatura, como possuindo maiores dimensões do que as coroas já formadas, de acordo com a análise feita na secção 1.1.2. Também na mesma secção descreve-se que a observação desta colisão através de uma vista inferior, permite visualizar que o formato da linha de contacto da interação depende da diferença entre a quantidade de movimento das gotas incidentes.

Em alguns casos, a lamela vertical pode inclinar na direção da gota incidente de menores dimensões devido ao maior trabalho exercido pela outra gota sobre a primeira. Esta disposição foi observada durante as experiências laboratoriais levadas a cabo no decorrer desta investigação, sendo que um exemplo deste fenómeno se encontra representado na Fig. 4.6. Durante o decorrer das filmagens verificou-se que a única discrepância (que ocorria neste tipo de formações) encontrada ao longo das experiências, foi a geração de uma atomização secundária, cuja intermitência na ocorrência indica a existência de um critério por definir. Contudo, na maioria dos ensaios realizados e analisados, 71% deste tipo de impactos apresentou atomização secundária.

### 4.3.2. Possíveis Explicações para a Atomização Secundária

A Fig. 4.5 ilustra um caso em que não houve atomização secundária a partir da lamela emergente da interação das duas gotas incidentes. A falta do aparecimento desta atomização secundária pode ser justificada por duas razões. A primeira poderia atribuir-se à distância entre as gotas envolvidas no impacto ser suficientemente grande,

diminuindo em valor suficiente a quantidade de movimento e mitigando a intensidade da interação entre as lamelas de espalhamento das duas gotas. Na Fig. 4.5 os centros das duas gotas incidem na superfície a uma distancia de ( $l = 7.239 \text{ mm}$ ), o que afeta, substancialmente, a formação de uma lamela de líquido ascendente, na linha de interação entre as duas gotas e com energia suficiente para gerar uma atomização secundária.

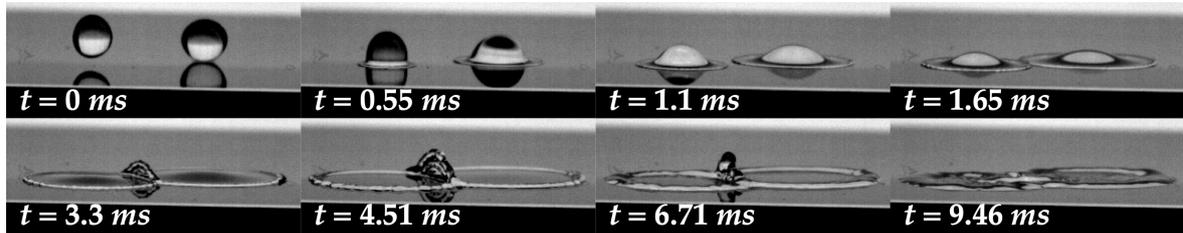


Figura 4.5: Interação resultante do impacto simultâneo, ( $l = 7.239 \text{ mm}$ ,  $\Delta t = 0.319 \text{ ms}$ ) de duas gotas com tamanhos diferentes (2.5 mm à esquerda e 3.2 mm à direita).

Uma segunda razão, observada na Fig. 4.6 onde também não se geram gotas secundárias, poderia ser a diferença de tamanhos das duas gotas em interação. Ou seja, haverá um critério  $c$  para a razão entre a energia de impacto das gotas,

$$\frac{E_{imp,menor}}{E_{imp,maior}} < c \quad (4.4)$$

de tal modo que a formação de uma lamela vertical não tem condições para gerar uma atomização secundária.

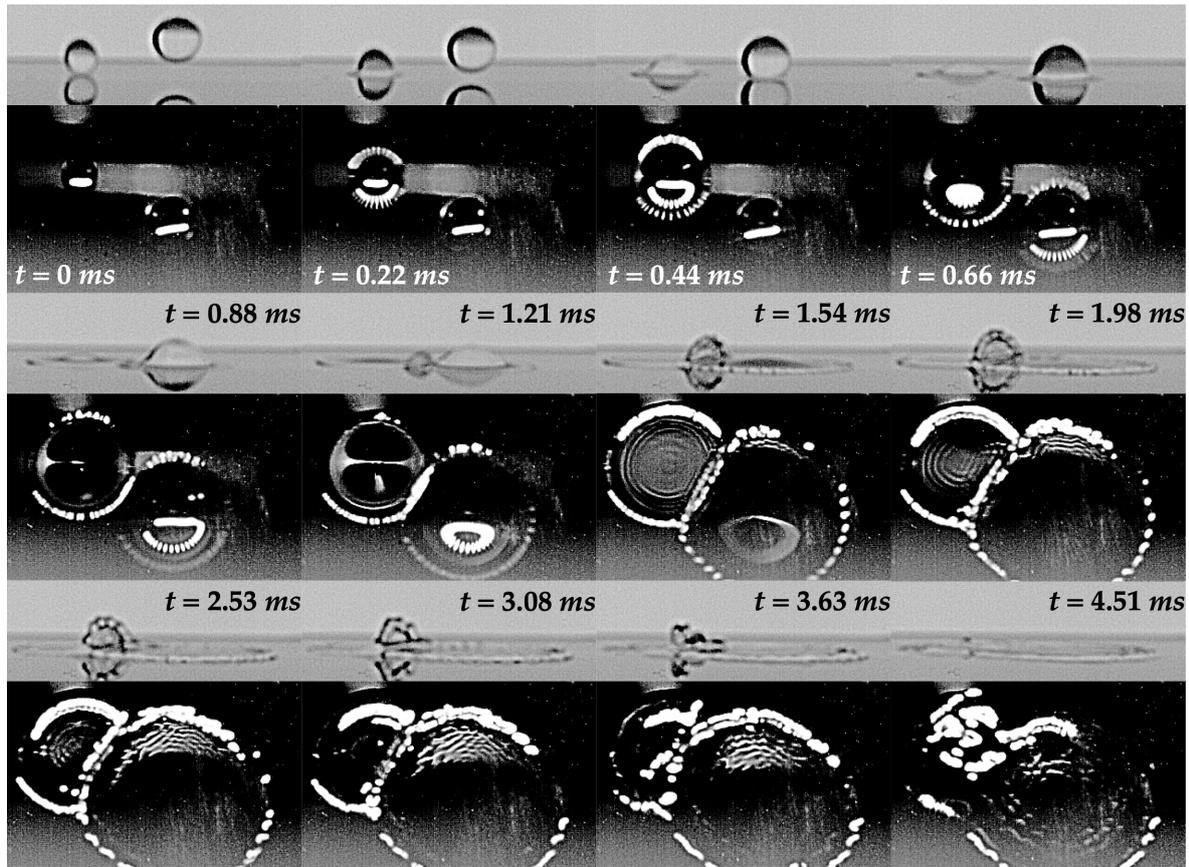


Figura 4.6: Interação resultante do impacto simultâneo, ( $l = 5.15 \text{ mm}$ ,  $\Delta t = 0.70105 \text{ ms}$ ) de duas gotas com tamanhos diferentes (0.92 mm à esquerda e 3.2 mm à direita).

A ocorrência desta atomização secundária evidenciou-se como sendo o resultado predominante da interação, como exemplificado nas Figs. 4.7 e 4.9. É de notar que apesar do regime de impacto ser o do espalhamento da gota, a interação ocorre com energia suficiente para superar as força de tensão superficial no bordo da lamela ascendente e gerar uma atomização secundária.

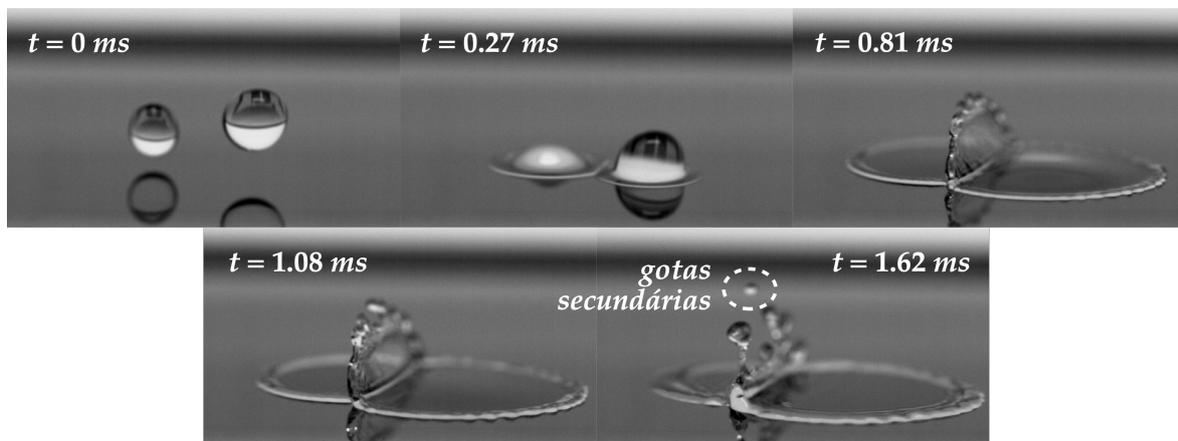


Figura 4.7: Interação resultante do impacto simultâneo, ( $l = 4.785 \text{ mm}$ ,  $\Delta t = 0.4092 \text{ ms}$ ) de duas gotas com tamanhos diferentes (2.01 mm à esquerda e 3.20 mm à direita).

Na Fig. 4.9, é possível verificar que quase não acontece atomização secundária, uma vez que as duas gotas impactam a superfície com uma distancia entre elas de  $l =$

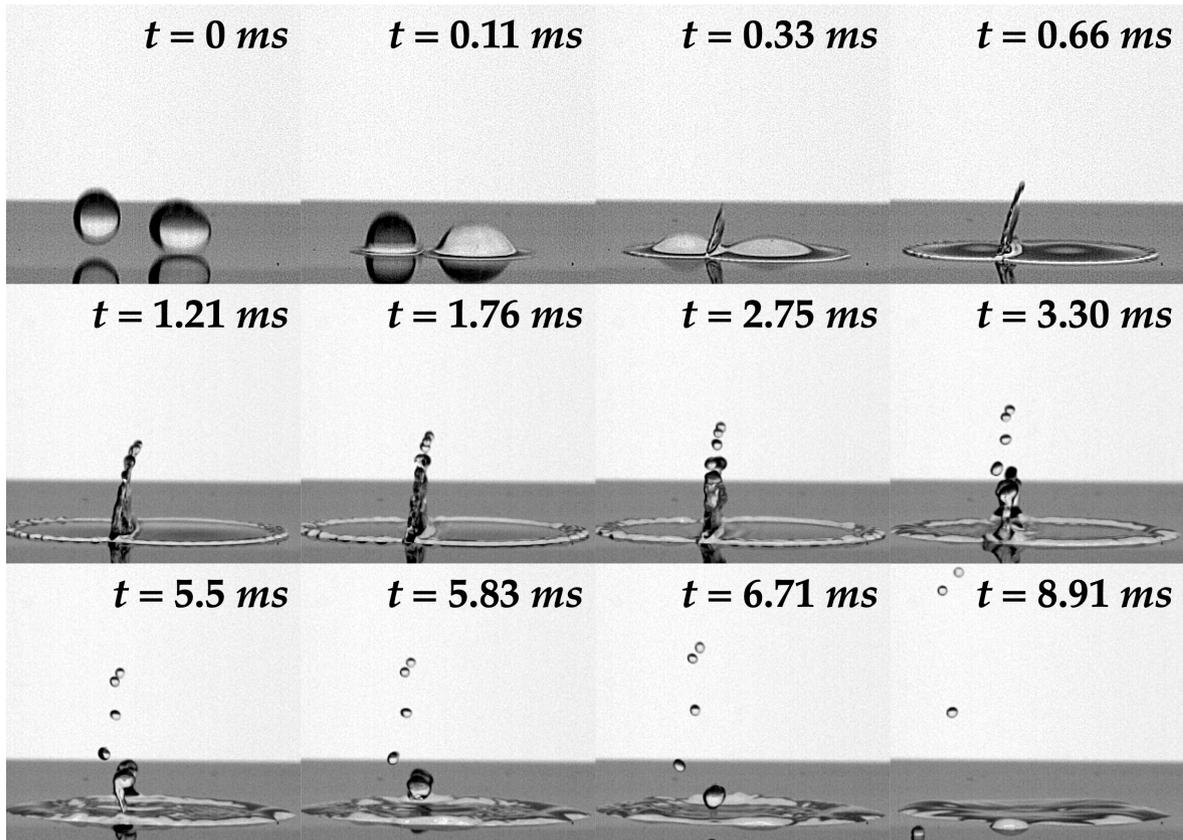


Figura 4.8: Interação resultante do impacto simultâneo, ( $l = 3.244 \text{ mm}$ ,  $\Delta t = 0.5114 \text{ ms}$ ) de duas gotas com tamanhos diferentes (2.01 mm à esquerda e 2.51 mm à direita).

7.117 mm. Por esta razão e como foi explicado anteriormente, este fator impossibilita a formação da lamela vertical e a posterior atomização da parte superior desta.

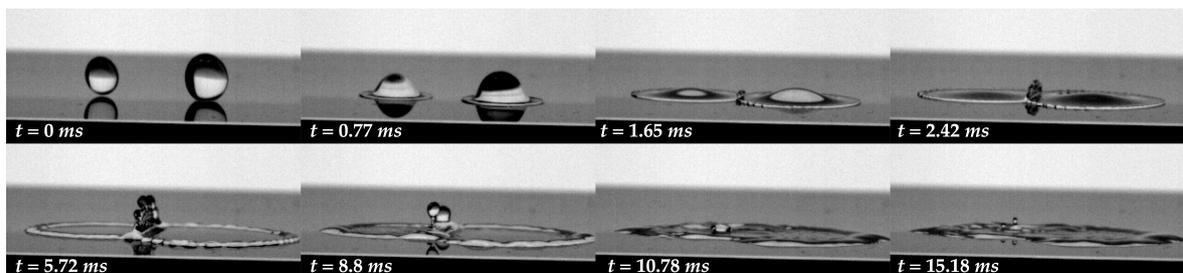


Figura 4.9: Interação resultante do impacto simultâneo, ( $l = 7.117 \text{ mm}$ ,  $\Delta t = 0.107 \text{ ms}$ ) de duas gotas com tamanhos diferentes (2.51 mm à esquerda e 3.2 mm à direita).



## 5. Conclusões

No dia a dia dependemos de *Sprays* para diversas aplicações técnicas, nomeadamente na agricultura, no uso de aspersores para extinção de fogos, na pintura de automóveis e aeronaves, nos motores de combustão interna ou mesmo no arrefecimento de superfícies. A otimização destas aplicações é necessária na medida em que na maioria das vezes, este tipo de aplicações deve usar a menor quantidade de líquido (tinta, adubo, combustível, etc) para realizar a tarefa. Do ponto de vista ecológico é muito importante não desperdiçar recursos, por exemplo, a pintura de uma aeronave que seja feita tendo em conta estudos relativos à dispersão de gotas, deposição do líquido na superfície, etc, vai proporcionar uma aplicação da tinta mais homogénea que irá não só proteger muito melhor, como também irá rentabilizar a quantidade de tinta usada. Esta quantidade de tinta que não é desperdiçada serve para diminuir bastante o peso final da aeronave, o que proporciona uma diminuição do consumo de combustível. Para isso é necessário compreender como se comportam os impactos múltiplos, sendo necessário ter informações sobre se existe deposição do fluido ou se este atomiza, ou ainda, quais as estruturas que se formam durante a interação entre impactos.

Como se pode comprovar, lendo alguns dos estudos apresentados no segundo capítulo, existem alguns modelos utilizados para realizar simulações numéricas. Contudo, na maioria dos casos, (têm como grande inconveniente fazerem) a previsão relativa aos impactos múltiplos é feita através de uma extrapolação de modelos com impactos singulares. Esta suposição de que as interações entre gotas tem o mesmo comportamento e geram as mesmas estruturas que aquando da análise de uma gota isolada é algo que se considera errado, com base na literatura e como também foi exposto anteriormente.

Esta teoria pôde ser verificada no presente estudo, uma vez que todos os testes foram feitos pondo as agulhas à mesma altura. Como se pode verificar na Fig. 4.3, o comportamento do impacto de uma gota isolada gera o fenómeno denominado de deposição. O mesmo não acontece quando se analisa as imagens do subcapítulo 4.3.1, onde a interação entre os impactos simultâneos de duas gotas provoca o aparecimento de uma coluna de líquido vertical na zona de contacto, podendo também gerar o aparecimento de atomização secundária ou não.

Posto isto, o objetivo principal deste projeto baseia-se na tentativa de criar um protótipo capaz de gerar impactos simultâneos entre múltiplas gotas, fenómeno bastante particular e, com isso, abrir caminho para estudos futuros nesta área, tentando compreender, com maior exatidão, como é que este fenómeno aleatório se comporta. Este estudo dividiu-se em quatro principais etapas distintas, a fim de ser possível obter impactos simultâneos entre gotas com diferentes tamanhos e gerar aleatoriedade neste sentido. Inicialmente foi idealizado e posteriormente montado, um protótipo capaz de fixar os tubos e agulhas bem como capaz de colocar as agulhas em diferentes posições, alturas e distâncias a fim de conseguir uma maior aleatoriedade nos impactos. De notar que este foi um dos principais desafios deste projeto, uma vez que me proporcionou a oportunidade de idealizar um projeto de raiz, sendo posteriormente desenhado na

totalidade no computador recorrendo ao *software AUTODESK INVENTOR*. De seguida o protótipo ganhou forma através da impressão 3D, uma vez que a maioria dos componentes foram fabricados deste modo. Por outro lado a construção da estrutura metálica também se revelou desafiante na medida em que a sua montagem exigiu pôr em prática um conjunto de competências adquiridas por mim anteriormente. Com o protótipo montado, foi possível dar início a toda a parte experimental, afim de obter os dados necessários. Para isso elaborou-se uma função no *software MATLAB* que permitisse obter os valores do diâmetro das gotas em análise. De seguida, em ambiente laboratorial, foram feitos vários ensaios para cada uma das agulhas em análise e para diferentes valores de caudal volúmico, a fim de ser possível determinar o tempo de formação destas e perceber com exatidão o momento em que estas se destacam da agulha e iniciam a sua queda. Por fim relacionou-se, através da elaboração de um gráfico, o tempo de queda para cada agulha tendo em conta o caudal volúmico no momento. Juntando estes quatro principais passos, foi possível obter o resultado pretendido, uma vez que se tornou viável a captação de imagens de vários impactos simultâneos e ainda foi exequível realizá-lo, variando a dimensão das gotas em cada experiência, com o intuito de criar a aleatoriedade de um *spray*, no que diz respeito a dimensão das partículas de líquido por ele formadas e que interagem aquando da aplicação do mesmo.

### 5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como forma de continuação deste projeto, a proposta que apresento para trabalhos futuros passa, por em primeiro lugar, conseguir otimizar um pouco mais a sincronização da queda das gotas em análise. Para isto, e como foi mencionado anteriormente, penso que seria vantajoso explorar, se seria possível controlar as bombas de seringas em simultâneo, recorrendo a um computador.

Por outro lado, penso que seria de grande interesse desenvolver um algoritmo capaz de analisar parâmetros como a velocidade de impacto das gotas intervenientes, a distancia entre elas durante a queda e o mais importante seria talvez fazer uma análise das dimensões das coroas formadas por ambas as gotas e comparar com a dimensão da lamela que se forma na vertical, após a interação das duas coroas. O desenvolvimento deste algoritmo, capaz de identificar todos estes parâmetros provenientes da interação de impactos simultâneos entre múltiplas gotas, pode ajudar a reduzir a lacuna existente no conhecimento relativo a este fenómeno.

## Bibliografia

- [1] ALN Moreira, AS Moita, and MR Panao. Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful? *Progress in energy and combustion science*, 36(5):554–580, 2010.
- [2] Stanley Middleman. *Modeling axisymmetric flows: dynamics of films, jets, and drops*. Academic Press, 1995.
- [3] GE Cossali, Marco Marengo, and Maurizio Santini. Multiple drop impact on heated surface. *Proceedings of the 9th ICLASS, Sorrento, Italy*, 11, 2003.
- [4] Joseph D Berry, Michael J Neeson, Raymond R Dagastine, Derek YC Chan, and Rico F Tabor. Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry. *Journal of colloid and interface science*, 454:226–237, 2015.
- [5] Etienne Portuguez, Arnaud Alzina, Philippe Michaud, Maksoud Oudjedi, Agnès Smith, et al. Evolution of a water pendant droplet: Effect of temperature and relative humidity. *Natural Science*, 9(01):1, 2017.
- [6] RJ Adrian, M Gharib, W Merzkirch, D RockweH, and JH Whitelaw. Experimental fluid mechanics.
- [7] Enrico MAGLI and Thomas BECKER. A machine learning approach in pendant drop tensiometry using image moments.
- [8] AC Merrington and EG Richardson. The break-up of liquid jets. *Proceedings of the Physical Society (1926-1948)*, 59(1):1, 1947.
- [9] Xiaoguang Zhang. Dynamics of growth and breakup of viscous pendant drops into air. *Journal of colloid and interface science*, 212(1):107–122, 1999.
- [10] NB Vargaftik, BN Volkov, and LD Voljak. International tables of the surface tension of water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 12(3):817–820, 1983.
- [11] Arthur Mason Worthington. *A study of splashes*. Longmans, Green, and Company, 1908.
- [12] Alexander L Yarin et al. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing. *Annual review of fluid mechanics*, 38(1):159–192, 2006.
- [13] Romain Rioboo, Cameron Tropea, and Marco Marengo. Outcomes from a drop impact on solid surfaces. *Atomization and sprays*, 11(2), 2001.

- [14] Ilia V Roisman, B Prunet-Foch, C Tropea, and M Vignes-Adler. Multiple drop impact onto a dry solid substrate. *Journal of colloid and interface science*, 256(2):396–410, 2002.
- [15] CHR Mundo, M Sommerfeld, and C Tropea. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process. *International journal of multiphase flow*, 21(2):151–173, 1995.
- [16] J Palacios, P Gómez, C Zanzi, J López, and J Hernández. Experimental study on the splash/deposition limit in drop impact onto solid surfaces. *Proceedings of 23rd ILASS-2010, Brno, Czech Republic*, 2010.
- [17] Cameron Tropea and Ilia V Roisman. Modeling of spray impact on solid surfaces. *Atomization and sprays*, 10(3-5), 2000.
- [18] Gianpietro Cossali, Marco Marengo, and Maurizio Santini. Impact of single and multiple drop array on a liquid film. In *19th Annual Meeting of ILASS, Nottingham, UK, 06-08/09/2004*, pages 1–8. ILASS Europe, 2004.
- [19] Ilia V Roisman and Cameron Tropea. Impact of a drop onto a wetted wall: description of crown formation and propagation. *Journal of Fluid Mechanics*, 472:373–397, 2002.
- [20] Curtis Waguespack. *Mastering Autodesk Inventor 2014 and Autodesk Inventor LT 2014: Autodesk Official Press*. John Wiley & Sons, 2013.
- [21] MATLAB. *version 9.12 (R2022a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2022.
- [22] CX Bai, H Rusche, and AD Gosman. Modeling of gasoline spray impingement. *Atomization and Sprays*, 12(1-3), 2002.

## Apêndice A

As seguintes tabelas indicam todos os valores retirados experimentalmente do respetivo tempo de queda de cada gota formada por cada agulha em análise, onde foram realizados um conjunto de 15 medições para cada caudal volúmico.

Agulha 1					
Caudal Volúmico [mL/hr]	5	10	15	20	25
Tempo de Queda [s]	4,791	2,909	1,673	1,21	1,000
	4,82	2,897	1,669	1,214	0,998
	4,815	2,889	1,678	1,217	1,002
	4,794	2,912	1,674	1,213	1,004
	4,799	2,898	1,678	1,211	0,998
	4,813	2,895	1,668	1,214	1,002
	4,809	2,899	1,672	1,217	0,997
	4,798	2,903	1,675	1,216	1,001
	4,795	2,901	1,676	1,219	1,004
	4,811	2,894	1,671	1,215	1,005
	4,807	2,897	1,672	1,213	0,999
	4,803	2,906	1,67	1,216	1,007
	4,797	2,900	1,672	1,212	1,004
	4,796	2,897	1,671	1,215	0,996
	4,804	2,903	1,681	1,211	1,005
Média [s]	4,803	2,899	1,672	1,214	1,002
Desvio Padrão [s]	0,008413	0,005739	0,003534	0,002482	0,003243
Incerteza [%]	0,09	0,10	0,11	0,10	0,16

Tabela 1: Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 1, para os diferentes caudais volúmico estabelecidos.

Agulha 2					
Caudal Volúmico [mL/hr]	5	10	15	20	25
Tempo de Queda [s]	6,78	3,654	2,438	1,878	1,478
	6,813	3,659	2,441	1,883	1,488
	6,821	3,65	2,435	1,881	1,483
	6,787	3,649	2,439	1,884	1,491
	6,798	3,652	2,445	1,889	1,485
	6,799	3,658	2,447	1,879	1,489
	6,782	3,655	2,439	1,882	1,483
	6,815	3,653	2,449	1,880	1,489
	6,8191	3,651	2,451	1,885	1,481
	6,8212	3,649	2,459	1,882	1,484
	6,7816	3,675	2,448	1,879	1,488
	6,7985	3,648	2,441	1,884	1,48
	6,7977	3,657	2,44	1,875	1,483
	6,808	3,647	2,443	1,887	1,481
	6,8023	3,643	2,445	1,885	1,479
Média [s]	6,799	3,652	2,443	1,882	1,483
Desvio Padrão [s]	0,013967	0,007171	0,005933	0,003544	0,003914
Incerteza [%]	0,10	0,10	0,12	0,10	0,13

Tabela 2: Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 2, para os diferentes caudais volúmico estabelecidos.

Agulha 3					
Caudal Volúmico [mL/hr]	5	10	15	20	25
Tempo de Queda [s]	10,813	5,455	3,699	2,865	2,431
	10,783	5,459	3,700	2,860	2,437
	10,839	5,447	3,712	2,865	2,439
	10,822	5,472	3,696	2,861	2,429
	10,835	5,468	3,703	2,871	2,433
	10,8433	5,472	3,703	2,863	2,433
	10,8516	5,476	3,703	2,876	2,432
	10,8599	5,470	3,713	2,867	2,438
	10,8682	5,484	3,704	2,860	2,431
	10,8765	5,468	3,704	2,873	2,430
	10,825	5,461	3,704	2,865	2,431
	10,8931	5,465	3,705	2,887	2,430
	10,827	5,456	3,714	2,869	2,429
	10,809	5,503	3,705	2,862	2,445
	10,818	5,457	3,706	2,864	2,429
Média [s]	10,835	5,468	3,704	2,865	2,431
Desvio Padrão [s]	0,02777	0,013098	0,004847	0,006949	0,004444
Incerteza [%]	0,13	0,12	0,07	0,12	0,09

Tabela 3: Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 3, para os diferentes caudais volúmico estabelecidos.

Agulha 4					
Caudal Volúmico [mL/hr]	5	10	15	20	25
Tempo de Queda [s]	12,956	6,697	4,392	3,339	2,723
	13,002	6,683	4,387	3,337	2,719
	12,976	6,685	4,379	3,331	2,727
	12,989	6,682	4,388	3,324	2,726
	12,989	6,701	4,383	3,339	2,731
	12,978	6,699	4,382	3,337	2,733
	13,012	6,667	4,399	3,338	2,714
	13,007	6,68	4,389	3,334	2,725
	13,032	6,695	4,398	3,322	2,721
	12,987	6,702	4,405	3,317	2,728
	13,009	6,705	4,403	3,32	2,74
	12,989	6,707	4,387	3,328	2,725
	12,997	6,694	4,398	3,321	2,722
	13	6,697	4,404	3,329	2,728
	12,987	6,699	4,400	3,337	2,726
Média [s]	12,989	6,697	4,392	3,331	2,726
Desvio Padrão [s]	0,017	0,01072	0,00829	0,007503	0,005909
Incerteza [%]	0,07	0,08	0,10	0,11	0,11

Tabela 4: Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 4, para os diferentes caudais volúmico estabelecidos.

Agulha 5					
Caudal Volúmico [mL/hr]	5	10	15	20	25
Tempo de Queda [s]	16,195	8,139	5,387	4,137	3,324
	16,185	8,171	5,408	4,137	3,307
	16,202	8,178	5,406	4,141	3,312
	16,212	8,162	5,399	4,129	3,302
	16,205	8,162	5,409	4,143	3,319
	16,246	8,175	5,412	4,141	3,297
	16,189	8,179	5,398	4,131	3,314
	16,198	8,161	5,419	4,138	3,329
	16,222	8,172	5,422	4,156	3,319
	16,256	8,175	5,426	4,136	3,307
	16,258	8,164	5,409	4,134	3,294
	16,211	8,179	5,432	4,133	3,312
	16,243	8,166	5,416	4,140	3,304
	16,252	8,161	5,402	4,130	3,316
	16,247	8,159	5,4125	4,15	3,299
Média [s]	16,212	8,166	5,409	4,137	3,312
Desvio Padrão [s]	0,0253793	0,010191	0,011197	0,007123	0,009839
Incerteza [%]	0,08	0,06	0,10	0,09	0,15

Tabela 5: Tempo de queda de uma gota proveniente da Agulha 5, para os diferentes caudais volúmico estabelecidos.

Listing 1: Código desenvolvido para determinar o diâmetro da gota. A função recebe a imagem a analisar e o diâmetro da agulha em milímetros. De seguida, retorna o diâmetro da gota em milímetros.

```
1
2 function [D_mm] = diametro_gota(img, dim_agulha_mm)
3
4     % fazer upload da imagem
5     img = imread(img);
6
7     % converter imagem para gray
8     img_gray = rgb2gray(img);
9
10    % binarizar a imagem com um threshold de 0.55
11    bw = imbinarize(img_gray, ...
12        'adaptive','ForegroundPolarity','dark','Sensitivity',0.55);
13
14    % apagar ruído
15    bw_comp = bwareaopen(imcomplement(bw),500);
16
17    % preencher formas
18    bw = bwareaopen(imcomplement(bw_comp),3000,4);
19
20    % fronteiras dos corpos
21    [B,L] = bwboundaries(imcomplement(bw));
22
23    stats = regionprops('table',L,'Centroid', ...
24        'MajorAxisLength','MinorAxisLength')
25
26    % coordenadas dos centroides da agulha e da gota
27    centroids = cat(1,stats.Centroid);
28    centroid_y = centroids(:,2);
29
30    % coordenadas do centroide da gota corresponde ao par de ...
31    % coordenadas que tiver o maior valor em y
32    centroid_gota = find(centroid_y==max(centroid_y));
33
34    % coordenadas do centroide da gota corresponde ao par de ...
35    % coordenadas que tiver o menor valor em y
36    centroid_agulha = find(centroid_y==min(centroid_y));
37
38    % maior eixo da gota e da agulha
39    max_axis = stats.MajorAxisLength;
40
41    % menor eixo da gota e da agulha
42    min_axis = stats.MinorAxisLength;
43
44    % diametro da gota será a média do maior e menor eixo da gota
45    D_pixel = (max_axis(centroid_gota) + min_axis(centroid_gota))/2;
46
47    % diametro da agulha será obtida pelo menor eixo da agulha
48    dim_agulha_pixel = min_axis(centroid_agulha);
49
50    % resolução da imagem
51    resol = dim_agulha_mm / dim_agulha_pixel;
52
53    % diametro da gota em milimetros
54    D_mm = D_pixel * resol;
55 end
```

Listing 2: Código desenvolvido para determinar parâmetros da gota. A função recebe a imagem a analisar e o diâmetro da gota do lado direito, em milímetros. De seguida, retorna a coordenada y do centróide da gota do lado direito e as distâncias verticais e horizontais entre ambas as gotas, em milímetros. label

```

1 function [cent_mm, dist_y_mm, dist_x_mm] = dim_y_dist(img, dim_dt)
2
3
4 % fazer upload da imagem
5 img = imread(img);
6
7 % converter imagem para gray
8 img_gray = rgb2gray(img);
9
10 % binarizar a imagem com um threshold de 0.55
11 bw = imbinarize(img_gray, ...
12     'adaptive', 'ForegroundPolarity', 'dark', 'Sensitivity', 0.55);
13
14 % apagar ruído
15 bw_comp = bwareaopen(imcomplement(bw), 500);
16
17 % preencher formas
18 bw = bwareaopen(imcomplement(bw_comp), 3000, 4);
19
20 % fronteiras dos corpos
21 [B,L] = bwboundaries(imcomplement(bw));
22
23 stats = regionprops('table', L, 'Centroid', ...
24     'MajorAxisLength', 'MinorAxisLength')
25
26 centroids = cat(1, stats.Centroid);
27 centroid_y = centroids(:, 2);
28 centroid_x = centroids(:, 1);
29 centroid_gota_dt = find(centroid_x == max(centroid_x))
30 centroid_gota_esq = find(centroid_x == min(centroid_x))
31
32 max_axis = stats.MajorAxisLength;
33 min_axis = stats.MinorAxisLength;
34
35 D_pixel = (max_axis(centroid_gota_dt) + ...
36     min_axis(centroid_gota_dt))/2;
37
38 resol = dim_dt / D_pixel;
39
40 % distância vertical entre centróides
41 dist_y_pixel = ...
42     centroid_y(centroid_gota_dt) - centroid_y(centroid_gota_esq);
43
44 % distância vertical entre centróides
45 dist_x_pixel = ...
46     centroid_x(centroid_gota_dt) - centroid_x(centroid_gota_esq);
47
48 % distâncias em mm
49 dist_y_mm = dist_y_pixel * resol;
50 dist_x_mm = dist_x_pixel * resol;
51
52 % retirar centroide da gota
53 cent_pix = centroid_y(centroid_gota_dt);

```

```

51
52     % converter centroide em mm
53     cent_mm = cent_pix * resol;
54 end
    
```

Tabela 6: Valores dos diferentes diâmetros, retirados do *software MATLAB*

Caudal Volúmico [mL/hr]	Diâmetro da Gota [mm]				
	Agulha 1	Agulha 2	Agulha 3	Agulha 4	Agulha 5
5	0,9213	2,0147	2,2887	2,5367	3,199
10	0,9122	2,0138	2,3087	2,4967	3,2009
15	0,915	2,0192	2,2748	2,5124	3,1894
20	0,9186	2,0113	2,2685	2,499	3,2139
25	0,9222	2,0063	2,3059	2,5381	3,214
Média [mm]	0,9186	2,0138	2,2887	2,5124	3,2009
Desvio Padrão [mm]	0,00378	0,004236	0,016095	0,017831	0,009426
Incerteza [%]	0,36	0,18	0,62	0,62	0,26

Tabela 7: Valores calculados para obter as diferentes áreas projetadas para cada gota criadas pelas cinco agulhas escolhidas

Caudal Volúmico [mL/hr]	Área Projetada da Gota [mm]				
	Agulha 1	Agulha 2	Agulha 3	Agulha 4	Agulha 5
5	0,666641	3,187944	4,114032	5,053917	8,037451
10	0,653537	3,185096	4,186247	4,895788	8,047002
15	0,657555	3,202201	4,064212	4,957554	7,989284
20	0,662739	3,177193	4,041731	4,904812	8,112498
25	0,667944	3,161416	4,176099	5,059497	8,113003
Média [mm]	0,662739	3,185096	4,114032	4,957554	8,047002
Desvio Padrão [mm]	0,005446	0,013393	0,057874	0,070527	0,04742
Incerteza [%]	0,72	0,37	1,23	1,25	0,52