



Sérgio Filipe Rodrigues

Mecanismos hidrodinâmicos e de transmissão de calor no impacto de múltiplas gotas

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Energia e Ambiente

Fevereiro/2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Mecanismos hidrodinâmicos e de transmissão de calor no impacto de múltiplas gotas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Hydrodynamic and heat transfer mechanisms in multiple droplets impact

Autor

Sérgio Filipe Rodrigues

Orientador

Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão

Júri

Presidente	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor José Joaquim da Costa Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Associação para o
Desenvolvimento da Aerodinâmica
Industrial

Coimbra, Fevereiro, 2017

Sic Parvis Magna

À minha família.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Miguel Panão toda a disponibilidade, apoio, conselhos, opiniões, críticas e orientação prestados, contribuindo de forma essencial para a realização deste trabalho . Agradecer também por toda a informação disponibilizada no âmbito do projecto "BISI - Biofuel Spray Impact in Aero-Engines" financiado por ADAI-LAETA.

Agradeço à Professora Doutora Ana Paula Piedade por providenciar a bomba peristáltica, elemento fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço aos restantes colegas de laboratório que contribuíram para a realização deste trabalho, criando um bom ambiente de trabalho e estando sempre disponíveis para ajudar, nomeadamente ao David Cabral, João Dionísio, Mário Bernardo e Filipa Carvalho.

Agradeço ao Sr. Fernando das oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica pelo auxílio na adaptação da instalação experimental.

Agradeço a todos os amigos que me acompanharam neste meu percurso académico e que fizeram com que fosse um percurso cheio de felicidade e de momentos inesquecíveis.

Agradeço à Beatriz por todo o apoio e compreensão nos momentos mais complicados. Sem ela as coisas teriam sido mais difíceis.

E por fim, um profundo obrigado à minha família pela paciência, compreensão e constante apoio e incentivo. Sem eles nada disto seria possível.

Resumo

O impacto de gotas é um fenômeno complexo e determinante em diversas aplicações, como no arrefecimento de superfícies e na preparação de uma mistura de combustível em motores de combustão interna. Os mecanismos de transmissão de calor e os resultados do impacto de múltiplas gotas na superfície são complexos e continuam a ser alvo de estudo. Este trabalho tem como objetivo caracterizar o resultado do impacto de múltiplas gotas em termos de transmissão de calor e, recorrendo à visualização de alta-velocidade, analisar as estruturas hidrodinâmicas resultantes da interação entre gotas após o impacto. O estudo destes fenômenos permite desenvolver modelos simplificados que tomem em consideração que o impacto de múltiplas gotas vai para além da soma de impactos de gotas individuais. Foram feitas incidir várias taxas de cadências de gotas de água e de biocombustível sobre uma superfície de cobre aquecida com o objetivo de caracterizar a transmissão de calor nos vários impactos. Foi caracterizado o impacto de uma gota singular sobre uma superfície quente bem como o impacto de várias gotas sobre um filme líquido, de modo a analisar as estruturas hidrodinâmicas criadas pelas interações entre os impactos. Para os parâmetros analisados, verificaram-se piores desempenhos de arrefecimento com o aumento das interações goticulares. Foi observada uma atomização secundária induzida termicamente para condições abaixo dos parâmetros críticos para a ocorrência da mesma. No impacto em filme líquido e em condições não suscetíveis à atomização secundária observou-se este fenômeno devido à interação entre várias gotas.

Palavras Chave: Transmissão de Calor, Impacto de gotas, Interação de gotas, Biodiesel

Abstract

Droplet impact is a complex and decisive phenomenon in many applications, such as surface cooling and in the fuel mixture preparation in internal combustion engines. The heat transfer mechanisms and the outcomes of droplet impingement on to a surface are complex and topics being constantly addressed. The present work aims to characterize the result of the impact of multiple droplets in terms of heat transfer and, using high-speed visualization, to analyse the hydrodynamic structures resulting from the interaction between droplets after the impact. The study of this phenomenon allows to develop simplified models that take into account that the impact of multiple drops goes beyond the sum of impacts of individual droplets. Several rates of water and biofuel droplets were released on a heated copper surface in order to characterize the heat transfer. The impact of a single drop on a hot surface was characterized as well as the impact of several drops on a liquid, in order to analyze the hydrodynamic structures created by the interactions between the impacts. For the parameters analyzed, worse cooling performance was observed with the increase in gotticular interactions. Thermally induced secondary atomization for conditions below the *splash-threshold* was verified. Concerning the impact on to liquid a film, secondary atomization was observed in conditions below the *splash-threshold* due to the interaction between several droplets.

Keywords: Heat Transfer, Droplet impingement, Droplet interactions, Biodiesel

Conteúdo

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura	xiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Estado Atual do Conhecimento	2
1.2.1 Dinâmica da gota em superfícies não aquecidas	2
1.2.2 Mecanismos de Transmissão de calor e dinâmica da gota numa superfície aquecida	10
1.2.3 Interação entre múltiplas gotas	16
1.3 Objetivos	22
2 Instalação Experimental	23
2.1 Sistema de aquecimento da superfície de impacto	23
2.1.1 Calibração do fluxo imposto	25
2.1.2 Calibração do caudal debitado pela bomba peristáltica	28
2.2 Geração de gotas	28
2.3 Líquidos de arrefecimento	29
3 Técnicas de Diagnóstico e Metodologia Experimental	31
3.1 Sistemas de diagnóstico	31
3.1.1 Medição de temperatura	31
3.1.2 Visualização	34
3.2 Metodologia Experimental	36
3.2.1 Caracterização da Transmissão de Calor	36

3.2.2	Caracterização do impacto de múltiplas gotas nos ensaios de Transmissão de Calor	37
3.2.3	Visualização dos mecanismos hidrodinâmicos associados aos múltiplos impactos de gotas	39
4	Análise de Resultados	43
4.1	Transmissão de calor no impacto de múltiplas gotas	43
4.1.1	Transmissão de calor com gotas de água	43
4.1.2	Transmissão de calor com gotas de biocombustível	45
4.1.3	Atomização secundária termicamente induzida	47
4.2	Mecanismos Hidrodinâmicos no impacto	50
4.2.1	Impacto de uma gota singular: diferenças entre líquidos e temperaturas de superfície	50
4.2.2	Atomização secundária induzida pela interação entre impactos .	52
5	Conclusões	61

Lista de Figuras

Figura 1.1	Representação do ângulo de contacto de uma gota com uma superfície sólida	3
Figura 1.2	Representação esquemática das estruturas da gota aquando do impacto numa superfície sólida. Comportamento típico para velocidades de impacto reduzidas. 1- Lamela; 2- Bordo; 3- Superfície sólida	4
Figura 1.3	Representação esquemática do resultado obtido por Mundo <i>et al.</i> (1995) para impactos com valores de We baixos. Imagem adaptada do mesmo trabalho.	4
Figura 1.4	Representação esquemática do resultado obtido por Mundo <i>et al.</i> (1995) para impactos com valores de We elevados. Imagem adaptada do mesmo trabalho.	5
Figura 1.5	Representação do fenómeno de deposição, adaptado de Yarin (2006)	5
Figura 1.6	Representação do fenómeno de <i>Prompt Splash</i> , adaptado de Yarin (2006)	6
Figura 1.7	Representação do fenómeno de <i>Corona Splash</i> , adaptado de Yarin (2006)	6
Figura 1.8	Representação dos fenómenos de <i>Rebound</i> e <i>Partial Rebound</i> , adaptado de Yarin (2006)	7
Figura 1.9	Representação do fenómeno de <i>Receding Break-up</i> , adaptado de Yarin (2006)	7
Figura 1.10	Representação das quatro fases distintas identificadas por Cossali <i>et al.</i> (1997). Imagem adaptada do mesmo trabalho.	9
Figura 1.11	Curva de ebulição típica, com os diferentes regimes de transferência de calor. Imagem adaptada de Correia (2011)	12

Figura 1.12 Exemplo dos efeitos da temperatura superficial num impacto goticular de dois líquidos diferentes. Imagem adaptada de Cossali <i>et al.</i> (2005)	15
Figura 1.13 Explosão da bolha de vapor na interface líquido-ar com a formação das bolhas denominadas por <i>pagode</i> . Imagem retirada de Cossali <i>et al.</i> (2005).	16
Figura 1.14 Ilustração do $l_{spacing}$ e da fase ϕ no caso de um impacto simultâneo (a) e num impacto múltiplo consecutivo (b). Imagem adaptada de Moreira <i>et al.</i> (2010)	17
Figura 1.15 Interação <i>coroa-a-coroa</i> . Resultado do impacto simultâneo de três gotas adjacentes num filme líquido. À esquerda a vista frontal, à direita a vista lateral. Imagem adaptada de Cossali <i>et al.</i> (2004)	18
Figura 1.16 Impacto de gotas de água com um diâmetro de 2 mm, uma velocidade de impacto de 3.36 m/s, com uma distância entre impactos de 8.4 mm e $0^\circ < \phi < 180^\circ$. Vista lateral e vista superior. Imagem adaptada de Roisman <i>et al.</i> (2002)	19
Figura 1.17 Impacto com gotas de água com um diâmetro de 2.64 mm, uma velocidade de impacto de 3.46 m/s, com uma distância de impacto de 5.39 mm e $0^\circ < \phi < 180^\circ$. Vista lateral e vista superior. Imagem adaptada de Roisman <i>et al.</i> (2002)	19
Figura 1.18 Impacto de um conjunto de gotas de água para uma temperatura abaixo da temperatura de saturação do fluido. Imagem adaptada de Cossali <i>et al.</i> (2004a).	20
Figura 1.19 Efeito da temperatura superficial no impacto de múltiplas gotas de água para o mesmo instante, num impacto com uma velocidade de 2.55m/s e com um espaçamento entre gotas de 1.6mm. Imagem adaptada de Cossali <i>et al.</i> (2004a).	21
Figura 1.20 Análise da dimensão das gotas secundárias, com uma velocidade de impacto de 2.55m/s, à esquerda para o caso do impacto singular e à direita para um impacto múltiplo. Imagem adaptada de Cossali <i>et al.</i> (2004a).	22

Figura 2.1	Representação esquemática dos elementos constituintes do bloco de aquecimento da superfície de impacto (Correia, 2011).	24
Figura 2.2	Cilindro de cobre maquinado em Correia (2011). Imagem adaptada do mesmo trabalho.	24
Figura 2.3	Variação do fluxo de calor imposto à superfície com a variação da posição do potenciômetro.	27
Figura 2.4	Caudal mássico debitado por uma agulha para cada posição da bomba peristáltica.	28
Figura 2.5	Bomba peristáltica e o suporte para as agulhas.	29
Figura 3.1	Esquema da instalação para a medição de temperatura. Adaptado de Correia (2011).	32
Figura 3.2	Exemplo da evolução da temperatura para um fluxo de calor imposto e um determinado caudal de gotas incidentes.	32
Figura 3.3	Exemplo da evolução da temperatura para um fluxo de calor imposto e quatro caudais de gotas incidentes distintos.	33
Figura 3.4	Distribuição da variação da temperatura da superfície estabilizada.	35
Figura 3.5	Esquema da instalação para visualização. Adaptado de Correia (2011).	35
Figura 3.6	Representação da zona onde se pretende incidir as gotas.	37
Figura 3.7	Ilustração das características analisadas.	38
Figura 3.8	Dimensões médias das características, em <i>mm</i>	38
Figura 3.9	Pontos de impacto e distribuição temporal entre impactos sucessivos na superfície para gotas de água (14.94 <i>gotas/s</i>) e de Biocombustível (17.54 <i>gotas/s</i>)	39
Figura 3.10	Pontos de impacto e distribuição temporal entre impactos sucessivos de gotas de biocombustível na superfície para uma cadência de gotas de 17.54 <i>gotas/s</i>	40
Figura 3.11	Diferentes taxas de cadência de gotas para os dois fluidos de arrefecimento.	41
Figura 4.1	Efeito da taxa de cadência de gotas de água no coeficiente de convecção, com uma distância de impacto de 90 <i>mm</i>	44

Figura 4.2	Efeito da taxa de cadência de gotas de água na eficiência de arrefecimento ebulitivo para os vários fluxos de calor impostos à superfície.	45
Figura 4.3	Efeito da taxa de cadência de gotas de biocombustível no coeficiente de convecção, com uma distância de impacto de 50 mm.	46
Figura 4.4	Impacto goticular à temperatura ambiente.	48
Figura 4.5	Impacto goticular numa superfície com a temperatura a rondar os 150°C.	48
Figura 4.6	Impacto goticular numa superfície com a temperatura a rondar os 230°C.	49
Figura 4.7	Variação do tamanho médio das principais gotas secundárias formadas ao longo do tempo.	50
Figura 4.8	Evolução da velocidade e do diâmetro do <i>bordo</i> para três casos distintos, com uma velocidade de impacto inicial de 0.88 m/s.	51
Figura 4.9	Impacto de uma gota de combustível na superfície seca de cobre, $We = 68$.	53
Figura 4.10	Impacto de uma gota de combustível num filme líquido fino, com uma velocidade de 1 m/s, $We = 68$.	54
Figura 4.11	Impacto de uma gota de combustível num filme líquido fino, com uma velocidade de 1.9 m/s, $We = 233$.	54
Figura 4.12	Interação entre os resultados de dois impactos goticulares. $We = 184$.	55
Figura 4.13	Interação entre os resultados de dois impactos goticulares. $We = 172$.	55
Figura 4.14	Interação entre os resultados de dois impactos goticulares. $We = 197$.	56
Figura 4.15	Interação entre os resultados de dois impactos goticulares, $We=189$.	56
Figura 4.16	Interação entre os resultados de dois impactos goticulares consecutivos, $We=169$.	57
Figura 4.17	Interação entre os resultados de dois impactos goticulares num filme líquido médio. $We=204$.	57
Figura 4.18	Interação entre os resultados de dois impactos goticulares num filme líquido médio. $We=168$.	58

Figura 4.19 Impacto goticular singular num filme líquido grosso. $We = 197$.	58
Figura 4.20 Interação entre os resultados de dois impactos goticulares num filme líquido grosso, $We=245$	59
Figura 4.21 Interação entre os resultados de dois impactos goticulares num filme líquido grosso, $We=193$	59

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Efeito dos diversos parâmetros nos resultados do impacto, adaptado de Rioobo <i>et al.</i> (2001). O sentido da seta indica se aumenta ou diminui critério de transição entre mecanismos. Se o sentido da seta for descendente, quer dizer a transição é antecipada.	8
Tabela 2.1	Propriedades termofísicas do laminado de fibra de vidro.	25
Tabela 2.2	Propriedades termofísicas dos fluidos à temperatura de 25°C.	29

Nomenclatura

A	Área [m^2]
Bi	Número de Biot
c_p	Calor específico sob pressão constante [$J/kg \cdot K$]
CHF	Fluxo de calor crítico [W/cm^2]
d	Diâmetro exterior [mm]
D	Diâmetro da gota [mm]
D_{max}	Diâmetro máximo de espalhamento [mm]
e_l	Espessura do filme líquido [mm]
E_{int}	Energia interna [J]
FPS	Frames por segundo
g	Aceleração gravítica [m/s^2]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2 \cdot K$]
h^*	Espessura do filme líquido adimensional
h_{fg}	Entalpia de vaporização [kJ/kg]
k	Condutibilidade térmica [$W/m \cdot K$]
K	Número de <i>Splash-threshold</i>
$l_{spacing}$	Distância entre pontos de impacto [mm]
L	Dimensão carecterística [mm]
La	Número de Laplace
L_a	Rugosidade da superfície [mm]
L_{nd}	Rugosidade da superfície adimensional
\dot{m}_l	Débito mássico do líquido [kg/s]
Nu	Número de Nusselt
N_k^{max}	Número de classe máximo

N_k^{min}	Número de classe mínimo
Oh	Número de Ohnesorge
q	Potência [W]
q''	Fluxo de calor [W/cm^2]
Ra	Número de Rayleigh
Re	Número de Reynolds
R_a	Rugosidade aritmética [mm]
R_{eq}	Resistência equivalente [Ω]
R_{nd}	Parâmetro adimensional relativo à rugosidade da superfície
$R''_{t,\delta}$	Resistência térmica unitária [m^2K/W]
t	Tempo decorrido [s]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
U	Velocidade de impacto [m/s]
V	Volume [m^3]
We	Número de Weber
We_c	Número de Weber crítico

Símbolos gregos

α	Difusibilidade térmica [m^2/s]
β	Coefficiente de expansão térmica [K^{-1}]
β_{max}	Parâmetro adimensional relativo ao diâmetro de espalhamento
γ	Variação de temperatura [%]
δ	Distância do termopar [mm]
η	Eficiência de arrefecimento [%]
θ	Ângulo de contacto [$^{\circ}$]
θ_i	Ângulo de impacto [$^{\circ}$]
μ	Viscosidade dinâmica [$kg/m \cdot s$]
ρ	Massa específica [kg/m^3]
σ	Tensão superficial [N/m]

τ	Parâmetro adimensional do tempo
ν	Viscosidade cinemática [m^2/s]
ϕ	Fase ou defasamento temporal entre dois impactos [$^\circ$]

Subscritos

∞	Ambiente
a	Agulha
ar	Ar ambiente
b	Bloco
cn	Convecção natural
el	Elétrica
es	Superfície estabilizada
f	Fluido
g	Convecção forçada pelas gotas
gs	Gota secundária
g,ag	Gota de água
g,bc	Gota de biocombustível
o	Gota incidente
pi	Perdas da instalação
rad	Radiação
s	Superfície
sat	Saturação

1 Introdução

1.1. Motivação

O impacto de gotas em superfícies é um fenómeno presente no nosso dia a dia. É a gota de café que cai na camisa branca de que tanto gostamos, as gotas da chuva a bater na calçada e nas poças de água, fenómenos que atraem sempre a atenção do observador. No entanto, a pesquisa científica destes impactos é especialmente direcionada para aplicações industriais e tecnológicas, essencialmente com objetivos de arrefecimento devido ao enorme potencial de transferência de calor que este fenómeno apresenta. Existem imensas aplicações de injeções de fluido através de gotas. O extintor de combate a incêndios é um exemplo básico, assim como a injeção de combustível na câmara de um motor de combustão interna. O *spray cooling* é um mecanismo muito utilizado nas indústrias tecnológicas e metalúrgicas para o arrefecimento de componentes eletrónicos ou materiais durante processos de fabrico.

Apesar de serem processos utilizados com muita frequência, a completa compreensão dos fenómenos dinâmicos e dos mecanismos de transmissão de calor que ocorrem aquando do impacto da gota com uma superfície ainda não é possível.

A unidade elementar do spray, a gota, tem vindo a ser alvo de estudo para perceber que tipo de comportamento esta tem quando incide sobre uma superfície com parâmetros bem definidos: se se deposita sobre a superfície ou se cria um *splash* que leva à formação de gotas secundárias a partir da gota inicial, denominando-se este fenómeno de atomização secundária. Grande parte destes estudos de impactos goticulares são realizados para uma só gota ou para impactos de várias gotas sobre condições muito controladas (impactos simultâneos de gotas, distâncias entre pontos de impacto e velocidades bem definidas, por exemplo) e, apesar destes resultados serem interessantes para perceber alguns fenómenos que ocorrem, não podem ser extrapolados para impactos mais densos, como são os dos sprays, pois nestes ocorrem outros fenómenos (interações entre gotas) que alteram de forma evidente o comportamento da gota.

É necessário um maior estudo experimental sobre o impacto da gota numa superfície admitindo a ocorrência de fenómenos que oferecem uma aleatoriedade aos resultados dos impactos.

1.2. Estado Atual do Conhecimento

No âmbito da temática em estudo, começar-se-á por abordar o comportamento da gota quando incide sobre superfícies secas ou na presença de um filme líquido, sem a influência da temperatura. De seguida, será feita uma breve revisão sobre os mecanismos de transmissão de calor que ocorrem aquando do impacto sobre a influência que a temperatura apresenta na dinâmica do impacto. Por fim, será abordado o tema que menos estudo tem recebido: a interação entre as várias gotas, que tipo de estruturas são formadas e qual a diferença que ocorre quando estas interações se dão em superfícies quentes.

1.2.1. Dinâmica da gota em superfícies não aquecidas

A dinâmica do fluido aquando do impacto da gota numa superfície sólida é um fenómeno complexo. As propriedades do fluido, da superfície e as condições de impacto influenciam o comportamento da gota e o tipo de resultado que advém do impacto. Quando a superfície de impacto se encontra à temperatura ambiente, os estudos presentes na literatura dividem-se entre impactos com superfície seca e impactos com presença de filme líquido. É importante perceber que diferenças a presença ou não de fluido influencia dinamicamente o impacto goticular.

É possível agrupar a grande parte das propriedades que têm influência no resultado do impacto goticular num determinado número de parâmetros adimensionais, sendo os seguintes os mais importantes e frequentemente usados na literatura:

- Número de Reynolds, que relaciona as forças de inércia e as forças viscosas que atuam sobre a gota:

$$Re = \frac{\rho \cdot D_o \cdot U_o}{\mu} \quad (1.1)$$

- Número de Weber, que relaciona a importância da inércia do fluido relativamente à tensão superficial:

$$We = \frac{\rho \cdot D_o \cdot U_o^2}{\sigma} \quad (1.2)$$

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

$$Oh = \frac{(We)^{1/2}}{Re} = v \left[\frac{\rho}{(D_o \cdot \sigma)} \right]^{1/2} \quad (1.3)$$

- Número de Laplace, representa a relação entre a tensão superficial e o transporte de quantidade de movimento do fluido:

$$La = \frac{\rho \cdot \sigma \cdot D_o}{\mu^2} \quad (1.4)$$

Impacto da gota em superfícies secas

Os impactos goticulares em superfícies sólidas e secas exibem comportamentos mais complexos quando comparados com os visualizados em impactos em filmes líquidos. Isto deve-se ao facto de o comportamento da gota ser influenciado pelas propriedades relativas à superfície, como por exemplo a rugosidade da superfície e a molhabilidade, sendo que esta última é uma propriedade específica do sistema de líquido/sólido/gás. A molhabilidade pode ser definida como a capacidade de um líquido em se espalhar e manter contacto com uma superfície sólida. O grau de molhabilidade é caracterizado pelo ângulo de contacto, θ . Quanto menor o ângulo de contato, maior será a molhabilidade.

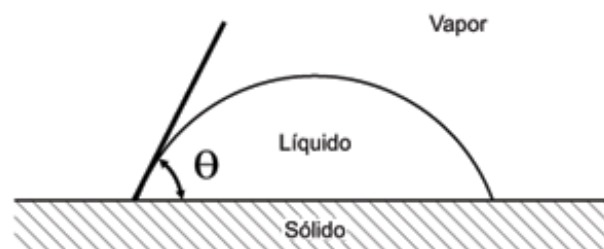


Figura 1.1: Representação do ângulo de contacto de uma gota com uma superfície sólida

De uma forma geral, a evolução temporal do impacto da gota divide-se em três fases distintas: a propagação de uma onda de choque interna no início do contacto (1^o fase), a formação de uma lamela, limitada pelo bordo, que se propaga radialmente a partir do ponto de impacto (2^a fase) e, por fim, a deformação e deposição da gota numa estrutura lisa e achatada (3^a fase).



Figura 1.2: Representação esquemática das estruturas da gota aquando do impacto numa superfície sólida. Comportamento típico para velocidades de impacto reduzidas. 1- Lamela; 2- Bordo; 3- Superfície sólida

A propriedade com maior influência no tipo de resultado do impacto goticular é a velocidade com que a gota incide na superfície, sendo que esta característica está incluída nos números adimensionais de We , Eq. 1.2 e Re , Eq. 1.1 e é geralmente com estes parâmetros que são feitas as análises na literatura. Se a velocidade da gota incidente for reduzida, e com isto números We e Re reduzidos, o líquido da gota espalha-se à volta do ponto de impacto, Fig. 1.3. Não existe energia cinética suficiente para criar outro tipo de estruturas, ao contrário do que acontece para velocidades de impacto superiores (Mundo *et al.* (1995)) .



Figura 1.3: Representação esquemática do resultado obtido por Mundo *et al.* (1995) para impactos com valores de We baixos. Imagem adaptada do mesmo trabalho.

Para valores superiores de We e Re , assim que a gota incide na superfície, o filme líquido espalha-se radialmente e forma-se uma estrutura denominada de *corona*, ou coroa, à volta da gota em deformação e que ascende ao longo do tempo enquanto o fluido da gota alimenta o filme líquido. Quando a totalidade da gota acaba de incidir na superfície, esta coroa atinge a sua dimensão máxima e torna-se mais fina devido à falta de fluido. Dependendo das condições de impacto, esta coroa pode acabar por

abater de forma suave e depositar-se sobre a superfície ou, se a energia de impacto for suficiente, desenvolve-se uma instabilidade que se propaga até à extremidade da coroa, resultando na desintegração desta estrutura em gotas secundárias, denominando-se este fenómeno de atomização secundária, Fig. 1.4, (Mundo *et al.* (1995)).



Figura 1.4: Representação esquemática do resultado obtido por Mundo *et al.* (1995) para impactos com valores de We elevados. Imagem adaptada do mesmo trabalho.

Para além da velocidade, também as propriedades do material e do fluido influenciam os resultados do impacto, revelando-se essas diferenças nas experiências de Rio-obo *et al.* (2001) de onde resultam seis tipos de resultados diferentes. Estes resultados encontram-se representados da Fig. 1.5 à Fig. 1.9.

- Deposição, Fig. 1.5, é um fenómeno que ocorre quando a gota se deforma e permanece colada, espalhando-se depois na superfície sem qualquer tipo de separação do líquido. É um fenómeno característico de impactos com velocidades reduzidas e idêntico à deposição verificada no trabalho de Mundo *et al.* (1995), com representação esquemática na Fig 1.3;



Figura 1.5: Representação do fenómeno de deposição, adaptado de Yarin (2006)

- *Prompt Splash*, Fig. 1.6, é observado somente em superfícies rugosas e é mais evidente quanto maior for a energia de impacto. É caracterizado pela libertação de pequenas gotas na zona de contacto do líquido com a superfície aquando da expansão da lamela;
- *Corona Splash*, Fig. 1.7, é caracterizado pela libertação de gotículas na coroa. É muito frequente este tipo de *splash* ocorrer quando o fluido das gotas apresenta tensões superficiais mais reduzidas e é também um fenómeno mais frequentemente verificado aquando do impacto de gotas em filmes líquidos. É idêntico ao *splash*



Figura 1.6: Representação do fenómeno de *Prompt Splash*, adaptado de Yarin (2006)

identificado no trabalho de Mundo *et al.* (1995) com representação esquemática na Fig 1.4;

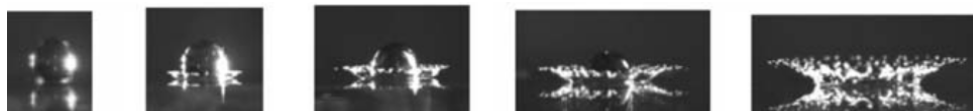


Figura 1.7: Representação do fenómeno de *Corona Splash*, adaptado de Yarin (2006)

- *Rebound e Partial Rebound*, Fig. 1.8, ocorrem somente quando a fase de recuo da lamela existe. Esta fase pode ocorrer dependendo do diâmetro máximo atingido pela lamela e do ângulo de contacto nessa fase. Para impactos muito energéticos este diâmetro atingido acaba por ser considerável, maior do que seria de esperar considerando o ângulo de contacto estático. A energia e a dimensão na lamela líquida no fim da fase de propagação pode ser suficientemente grande para não se dissipar na fase de recuo. Nestes casos, se a velocidade e a energia de recuo da lamela forem suficientemente elevados quando esta atinge o ponto de impacto, o líquido é comprimido e impulsionado verticalmente até à superfície. A diferença entre *rebound* e *partial rebound* reside no ângulo de contacto na fase de recuo. Para valores baixos do ângulo ocorre o *partial Rebound*, para valores superiores ocorre o *rebound*.
- *Receding Break-up*, Fig. 1.9, é um fenómeno dependente da molhabilidade do sistema. Depois de atingida a dimensão radial máxima do líquido, ocorre a retração. Ao retrair, o ângulo de contacto diminui. Se este ângulo atinge o valores próximos de 0, parte do líquido que se estava a retrair fica para trás, formando gotas individuais depositadas na superfície.

Como foi visto, dependendo das condições de impacto, pode ocorrer ou não o fenómeno de *splash* e, com este, a atomização secundária. O parâmetro que delimita a fronteira entre um impacto sem atomização secundária de um impacto com formação

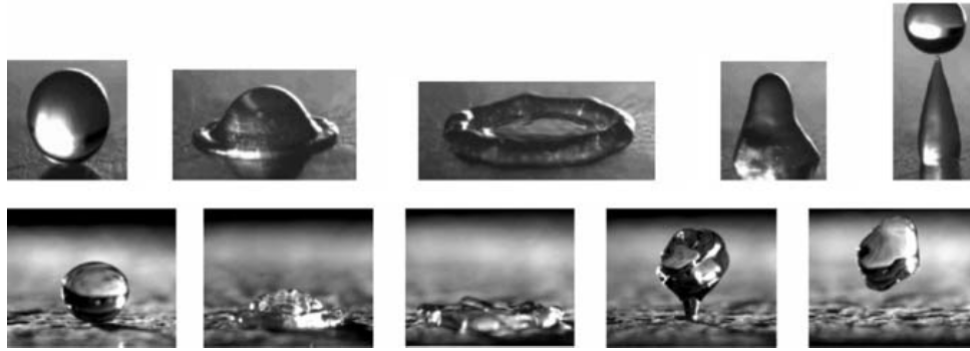


Figura 1.8: Representação dos fenômenos de *Rebound* e *Partial Rebound*, adaptado de Yarin (2006)



Figura 1.9: Representação do fenômeno de *Receding Break-up*, adaptado de Yarin (2006)

de gotas é o parâmetro *splash-threshold*, definido geralmente como $K = Oh^a \cdot We^b$, onde os parâmetros a e b variam de ensaios para ensaios dependendo das condições em que as experiências são realizadas, não existindo assim um valor de K que seja universal. Para além disso, este parâmetro K não tem em consideração as propriedades da superfície, como por exemplo a sua rugosidade, que influenciam de forma preponderante se ocorre ou não *splash*, (Rioobo *et al.* (2001)). Na revisão bibliográfica dos vários estudos e desafios da interação de um spray com uma superfície sólida de Moreira *et al.* (2010), é feito um resumo dos principais parâmetros K e as condições em que estes foram obtidos. Outros autores simplesmente definem o limite do regime através do número de We crítico, We_c , acima do qual é verificado o fenómeno de atomização secundária (Bai *et al.* (2002)).

Através de investigações e experiências sistemáticas em Rioobo *et al.* (2001), concluiu-se que a variação de alguns parâmetros promove a ocorrência dos diferentes tipos de resultados do impacto goticular num superfície sólida seca. Na Tabela 1.1 encontra-se sumariada a influência de alguns parâmetros, onde U_o é a velocidade de impacto, R_a é a rugosidade aritmética, definida como a diferença entre a rugosidade média da superfície em questão comparada com uma superfície plana, D_o o diâmetro da gota, μ a viscosidade dinâmica do fluido, σ a tensão superficial e, finalmente, θ

representa o ângulo de contacto.

Tabela 1.1: Efeito dos diversos parâmetros nos resultados do impacto, adaptado de Rioobo *et al.* (2001). O sentido da seta indica se aumenta ou diminui critério de transição entre mecanismos. Se o sentido da seta for descendente, quer dizer a transição é antecipada.

Aumento de	Deposition	Prompt Splash	Receding Break-up	Complete Rebound	Corona Splash	Partial Rebound
D_o	↓	↑				
σ		↓	↑	↑	↓	↑
μ	↑	↓	↓		↓	
R_a	↓	↑			↓	
θ			↑	↑		↑

O autor alerta para o facto da interdependência de alguns parâmetros. Refere, por exemplo, que a diminuição da tensão superficial do fluido leva a que a molhabilidade do sistema se altere. Dá também o exemplo de que um aumento da rugosidade da superfície influencia o ângulo de contacto.

Em diversos casos, como por exemplo no caso dos motores de combustão interna, as gotas de combustível não incidem só sobre uma superfície mas sim sobre um filme líquido formado por gotas que incidem instantes antes, aquando da injeção de combustível. Este filme líquido altera as condições de impacto das gotas e, por isso, o resultado da interação é diferente daquele que foi exposto até agora. É importante perceber que tipo de efeitos estes filmes líquidos têm sobre o resultado do impacto goticular e que diferenças apresentam em relação ao impacto numa superfície seca.

Impacto da gota num filme líquido

Antes de analisar os resultados dos impactos goticulares sobre os filmes líquidos é importante definir o filme líquido. São normalmente identificados quatro tipos de filmes líquidos e a sua classificação é baseada na razão entre a espessura do filme líquido, e_l , e o diâmetro da gota incidente, D_o , que resulta num parâmetro adimensional h^* , (Tropea & Marengo (1999)). Os filmes são, então, definidos como:

- *Thin film*, filme fino em que a espessura está compreendida entre $L_{nd} < h^* < R_{nd}^{0.16}$. Os impactos em filmes líquidos com esta espessura têm resultados dependentes das características da superfície;
- *Liquid film*, filme líquido com $R_{nd}^{0.16} < h^* < 1.5$ e com resultados ligeiramente dependentes das propriedades da superfície onde repousa o filme;
- *Shallow pool*, filme com $1.5 < h^* < 4$ onde o resultado do impacto goticular no filme depende somente da espessura do filme.
- *Deep pool*, filmes mais grossos com $h^* > 4$ onde os impactos são já independentes da espessura do filme.

onde $h^* = e_l/D_0$, $R_{nd} = R_a/D_0$, $L_{nd} = L_a/D_0$ com R_a já definido anteriormente e L_a representa a escala da rugosidade da superfície.

No impacto sobre filmes líquidos o processo desenvolve-se de forma semelhante ao impacto sobre superfícies secas. A gota incide no filme e o líquido espalha-se radialmente formando uma coroa. Dependendo das condições cinéticas do impacto, de forma semelhante ao impacto numa superfície seca, o impacto poderá terminar num abatimento e deposição da coroa ou na formação do *splash*. A Fig .1.10 representa um impacto num filme líquido onde as condições cinéticas são tais que ocorre atomização secundária.

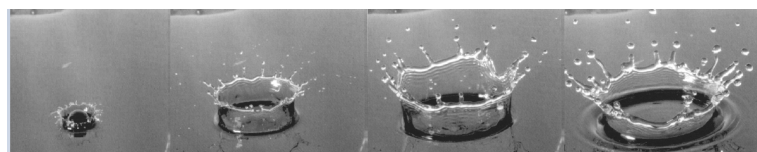


Figura 1.10: Representação das quatro fases distintas identificadas por Cossali *et al.* (1997). Imagem adaptada do mesmo trabalho.

O fenómeno de *splash* em filmes líquidos ocorre para velocidades relativamente grandes e é um fenómeno também dependente da espessura do filme líquido. Dois resultados comuns de *splash* em filmes líquidos são o *prompt splash* e o *delayed splash*. O primeiro tipo está associado à formação de gotas secundárias a partir da coroa enquanto esta ainda se encontra numa fase de ascensão, como pode ser visualizada na Fig .1.10. O segundo tipo é caracterizado pela libertação de gotas secundárias somente

quando a coroa atinge a sua dimensão máxima e se encontra totalmente desenvolvida. Esta atomização está intimamente associada ao abatimento e colapso da coroa, (Cossali *et al.* (1997)). A viscosidade do fluido tem influência diferente no caso do impacto em superfície seca, comparando com o que tem no caso do impacto num filme líquido. Para o primeiro caso, e observável na Tab. 1.1, é possível verificar que um aumento da viscosidade promove a ocorrência de *splash* e que no caso do impacto em filme líquido este parâmetro tende a inibir a ocorrência deste fenómeno. O *prompt splash* está associado a valores de Oh inferiores (viscosidades inferiores) e o *delayed splash* está associado a maiores viscosidades. A dimensão das gotas secundárias associadas ao *prompt splash* são inferiores ao fenómeno de *delayed splash*, (Cossali *et al.* (1997)).

De forma semelhante ao impacto numa superfície seca, procura-se determinar um valor K ou We_c que permita identificar a fronteira entre a deposição da gota e a ocorrência de *splash*. Não existe concordância entre os vários autores sobre este parâmetro. Alguns autores sugerem que para filmes finos o parâmetro K é independente da espessura do filme, sendo que o seu valor é idêntico ao caso do impacto numa superfície seca. No entanto, esta proposta não reúne consenso. Moreira *et al.* (2010) e Liang & Mudawar (2016) apresentam nas suas revisões um resumo das correlações usadas para estes impactos.

1.2.2. Mecanismos de Transmissão de calor e dinâmica da gota numa superfície aquecida

Os fenómenos de transferência de calor presentes em impactos goticulares continuam a ser alvo de estudo. As propriedades das gotas e da superfície de impacto têm influência nos processos térmicos. É reconhecida a complexidade deste tipo de impacto, mas a transferência de calor de uma superfície através do impacto goticular é conduzida em regimes que estão de acordo com a teoria da ebulição. Esta transferência ocorre na interface sólido-líquido quando a gota atinge a superfície, formando um filme líquido que fica em contacto com uma superfície mantida a uma temperatura acima da temperatura de saturação do fluido. Assim, a taxa de transferência de calor depende das propriedades termofísicas do líquido, da temperatura e das propriedades da superfície. De acordo com a teoria clássica da ebulição, existem quatro regimes distintos para a transferência de calor: regime de convecção natural, regime de ebulição nucleada,

regime transição e regime de ebulição de película, podendo ser observados na curva de ebulição representada na Fig. 1.11.

- Regime de evaporação na superfície livre: nesta fase, a transferência de calor da superfície aquecida para o fluido é feita apenas por condução e convecção natural, sem qualquer mudança de fase. Ocorre para uma temperatura superficial inferior à temperatura de saturação do fluido;
- Quando a temperatura da superfície é superior à temperatura de saturação, mas inferior à temperatura de fluxo de calor crítico (CHF), o regime presente é o regime de ebulição nucleada. O fluxo de calor transferido da superfície para o fluido é suficiente para causar a mudança de fase. Devido a este facto, começam a surgir pontos de nucleação de bolhas de vapor na interface superfície-fluido. À medida que a temperatura aumenta, as bolhas de vapor formadas intensificam-se e aumentam de dimensão, ascendendo desde a parede até à superfície livre do líquido. A transferência de calor aumenta à medida que aumenta a temperatura da superfície, até atingir a temperatura de fluxo de calor crítico, onde o fluxo de calor é máximo. O estabelecimento desta temperatura é bastante importante devido ao facto de não poder ultrapassada porque, a partir daí, estamos perante o regime de transição onde um pequeno aumento de temperatura da superfície em questão faz diminuir o fluxo de calor removido, o que poderá ter efeitos indesejáveis nas aplicações. A convecção, devido ao movimento ascendente das bolhas de vapor, é o principal mecanismo de transferência de calor nesta fase;
- No regime de transição, que ocorre a partir da temperatura de fluxo de calor crítico, ocorre a formação de uma película de vapor que cobre a superfície de aquecimento, atuando como um isolante, inibindo o contacto do líquido com a superfície e diminuindo assim a transferência de calor à medida que a temperatura da superfície aumenta. Quando a temperatura da superfície é suficiente para que se forme uma camada de vapor que isole totalmente a superfície do líquido, é atingido o ponto mínimo de fluxo de calor, denominando-se de temperatura de Leidenfrost;
- No regime de ebulição de película, que ocorre a partir da temperatura de Leidenfrost, uma película de vapor, estável e contínua, cobre por completo a superfície

de aquecimento, constituindo uma enorme resistência térmica. A transferência de calor aumenta com o aumento da temperatura da superfície devido à radiação que se torna preponderante para temperaturas mais elevadas.

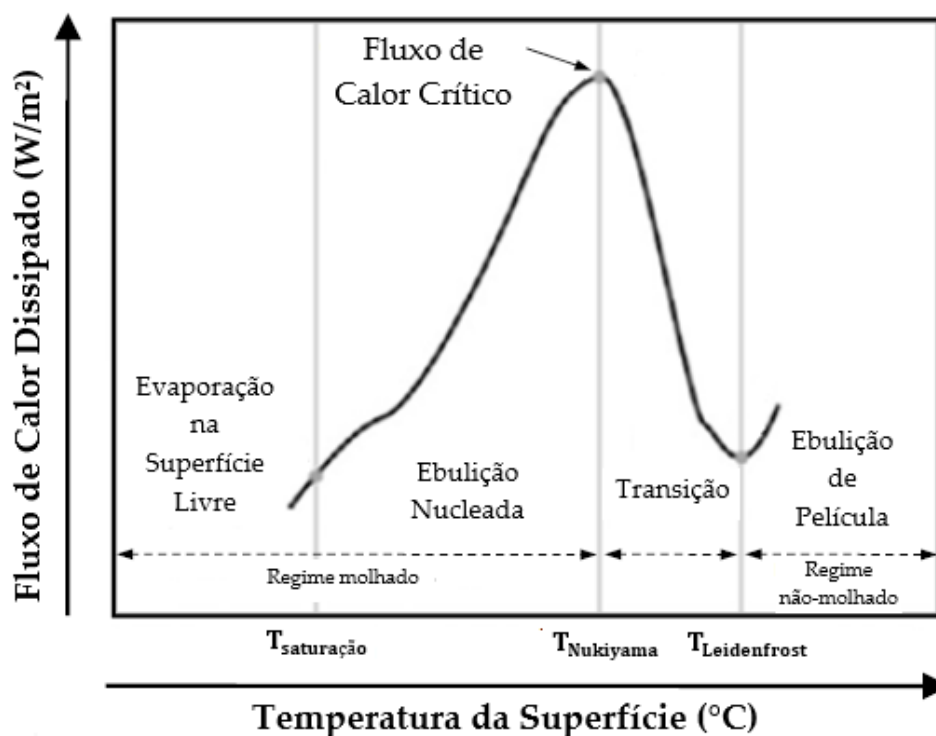


Figura 1.11: Curva de ebulição típica, com os diferentes regimes de transferência de calor. Imagem adaptada de Correia (2011)

A grande maioria dos estudos de avaliação da dissipação de calor são realizados recorrendo a sprays com uma grande variedade das propriedades das suas gotas e com incapacidade de regular essas propriedades, como por exemplo o diâmetro das gotas, as velocidades de impacto e os espaços temporais entres os mesmo. Recorrendo ao efeito piezo-elétrico, são criados geradores goticulares onde é possível regular os parâmetros, ao contrário do que acontece nos sprays. Foram poucos os investigadores que se dedicaram ao estudo dos fenómenos de transmissão de calor localizada promovida por um impacto de gotas em condições controladas. Com estes tipos de geradores, o arrefecimento promovido pelas gotas pode ser analisado desde filmes líquidos até à vaporização de uma gota individual. Os primeiros estudos concentraram-se em gotas de água e superfícies aquecidas a temperaturas acima da temperatura de Leidenfrost. Acima destas

temperaturas, as gotas que incidem na superfície não criam um filme líquido mas adquirem uma forma esferoidal e a taxa de vaporização da gota nestas condições é muito reduzida, devido ao facto de que a transferência de calor da superfície para a gota se faz através da camada de vapor por condução (Wachters & Westerling (1966)). Para um conjunto maior de temperaturas, as características de vaporização das gotas de água foram analisadas experimentalmente (Michiyoshi & Makino (1978)). Verificou-se também que, para o regime de ebulição nucleada, os resultados obtidos mostraram uma relação direta com a curva de ebulição em piscina de água (teoria clássica de ebulição), independentemente das condições da superfície. Algumas investigações modelaram e analisaram a taxa de fluxo de calor por unidade de área molhada. O fluxo de calor global pode ser aproximado para essas condições, atingindo valores que variaram entre 1 MW/cm^2 até 3.2 MW/cm^2 . O pré-aquecimento do fluido de arrefecimento, dos 20°C até 50°C , fez diminuir os valores de CHF até 20%. O autor conclui que o calor sensível do fluido representa uma fração significativa do calor removido da superfície aquecida (Halvorson *et al.* (1978)). O valor de CHF mostrou-se insensível à frequência de impacto das gotas e velocidades das mesmas para os parâmetros analisados por Sawyer *et al.* (1997). No entanto, ajustando o fluxo de calor por unidade de área molhada, o valor de CHF aumenta com a maior frequência de impacto e diminui para velocidades superiores. Foram atingidos valores de 5 MW/cm^2 para CHF. Para débitos mássicos idênticos, o espaçamento entre os pontos de impacto das gotas poderá influenciar o valor de CHF. Em condições ideais, o valor do fluxo crítico pode ser aumentado em cerca de 30%. Os fluxos dissipados variaram entre os 24 e os 297 W/cm^2 (Sawyer *et al.* (2008)).

Considerando a temperatura da superfície, sendo essa temperatura superior à temperatura de saturação do líquido das gotas, o fenómeno e o tipo de estruturas formadas serão totalmente diferentes quando comparadas com o impacto goticular à temperatura ambiente. A forma como o líquido aquece no interior da lamela, durante o espalhamento, tem sido discutida ao longo dos anos. O tempo que demora a ocorrer a transferência de calor é bastante superior ao tempo associado à dinâmica da gota durante o período inicial do espalhamento, isto é, não se observam diferenças significativas entre o espalhamento da gota em superfícies frias e superfícies aquecidas. Os resultados experimentais mostram que existe uma dependência da difusividade térmica da super-

fície. Para uma mesma temperatura superficial, o tempo necessário para se iniciar a ebulição, desde do momento de incidência da gota na superfície, é maior nas superfícies com baixa difusividade térmica (Cossali *et al.* (2008)). Para o caso de um impacto singular numa superfície aquecida, a temperatura da superfície e a do líquido varia ao longo da lamela, com exceção para os momentos iniciais após a incidência da gota, considerando-se que o fenómeno é isotérmico. O aumento da temperatura do líquido durante o espalhamento na superfície pode causar alterações das suas propriedades, o que leva a um aumento da dimensão máxima de espalhamento atingida nesta fase. Alguns resultados demonstram que o processo de ebulição dentro da lamela destrói algum movimento coerente do fluido durante o espalhamento, inibindo o recuo da lamela após esta atingir a sua dimensão máxima (Cossali *et al.* (2008)). Por outro lado, pontos quentes na lamela podem causar regiões de ebulição e vaporização enquanto outras partes do líquido ainda não atingiram esta condição (Healy *et al.* (2001)). Da mesma forma que a temperatura não é uniforme ao longo da lamela, o fluxo de calor transferido da superfície para o fluido também não o é, devido à não uniformidade da espessura da lamela durante o seu espalhamento. A não uniformidade do fluxo de calor durante o espalhamento cria diferentes gradientes de temperatura na estrutura, alterando as suas características e promovendo pontos quentes onde poderão ocorrer fenómenos ebulitivos mais cedo do que noutras partes da lamela (Pasandideh-Fard *et al.* (2000)).

Existem diferenças significativas na dinâmica da gota quando esta atinge a superfície aquecida a uma temperatura superior à temperatura de saturação do líquido, sendo que a mais importante é a libertação de gotas secundárias devido aos efeitos da temperatura, mesmo que as condições de impacto sejam abaixo do *splash-threshold*. Este fenómeno denomina-se de atomização secundária termicamente induzida. De realçar que, no geral, o We_c no impacto com uma superfície aquecida é significativamente inferior aos outros casos verificados anteriormente (Yao & Cai (1988)).

Na Fig 1.12 está representado o fenómeno para dois tipos diferentes de fluido e para duas temperaturas diferentes acima da temperatura de saturação de fluido. As temperaturas são normalmente obtidas para observar o comportamento do impacto em dois regimes diferentes: o regime de ebulição nucleada e o regime de ebulição em película.

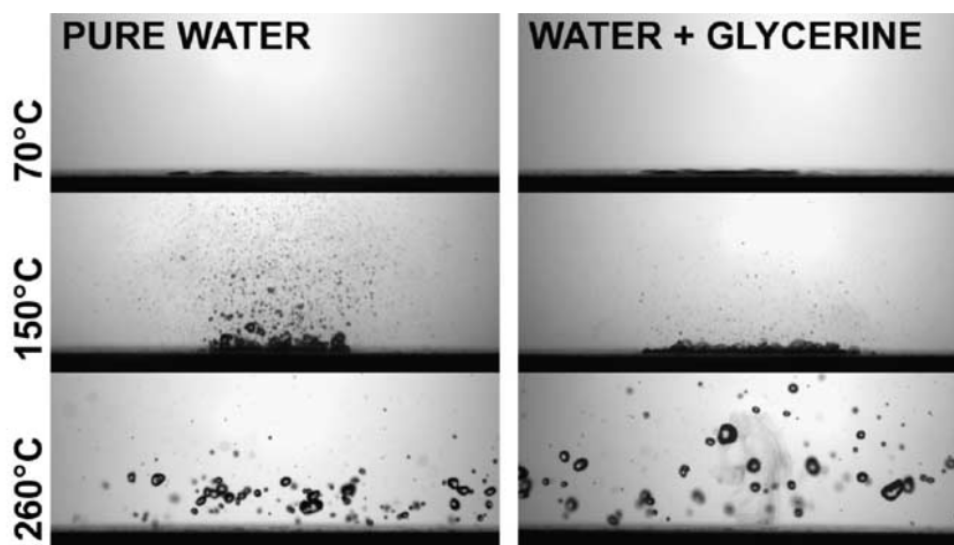


Figura 1.12: Exemplo dos efeitos da temperatura superficial num impacto goticular de dois líquidos diferentes. Imagem adaptada de Cossali *et al.* (2005)

Quando o regime de ebulição nucleada está a atuar, surgem nucleação de bolhas de vapor, que crescem e rompem a lamela líquida produzindo uma grande quantidade de gotas secundárias de tamanho reduzido que são projetadas numa direção vertical em relação ao ponto de impacto da gota. No caso do regime de ebulição em película, a elevada temperatura gera uma camada de vapor, logo após o impacto da gota, que levita porções do líquido. Esta diminuição da área de contacto entre o líquido e a superfície é responsável pelo menor número de gotas secundárias criadas mas com maiores dimensões, que se distribuem radialmente ao ponto de impacto. Os tempos necessários para que a atomização secundária se inicie são distintos. No caso da ebulição nucleada, são necessários alguns milissegundos após o contacto inicial da gota para que ocorra atomização secundária, ao contrário do que se verifica para o regime de ebulição em película, onde a criação de gotas secundárias ocorre logo após o impacto (Cossali *et al.* (2005) ,Cossali *et al.* (2008)).

Para o regime de ebulição nucleada, o crescimento das bolhas de vapor não depende da velocidade de impacto da gota. Para velocidades de impacto diferentes, a alteração da dimensão máxima atingida pela lamela é a característica mais interessante (Chaves *et al.* (1999)) . O mesmo autor propôs um mecanismo para a criação de gotas secundárias neste regime: a rutura de jatos finos causados pela explosão de bolhas de vapor através da lamela líquida. Com o aumento da temperatura superficial, a dimensão

destes jatos e o número de gotas secundárias formadas aumenta.

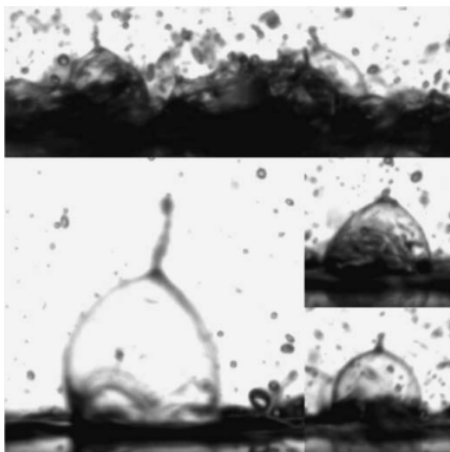


Figura 1.13: Explosão da bolha de vapor na interface líquido-ar com a formação das bolhas denominadas por *pagode*. Imagem retirada de Cossali *et al.* (2005).

Outro mecanismo proposto, que leva à atomização secundária, é a ejeção de jatos acima de umas estruturas denominadas por *pagode*, que criam gotas secundárias de tamanho reduzido (Cossali *et al.* (2005), Cossali *et al.* (2008)), como é visível na Fig. 1.13. É também sugerido que estas estruturas surjam em porções mais grossas da lamela aquando da sua expansão, que impulsiona o líquido numa direção vertical devido à alta pressão formada dentro da bolha de vapor (Liang *et al.* (2016)).

1.2.3. Interação entre múltiplas gotas

Através do impacto singular de gotas é possível perceber os mecanismos, estruturas e comportamentos fundamentais que estas apresentam. No entanto, em aplicações reais de injeção de gotas, o que acontece na superfície de impacto é muito mais complexo do que o que acontece num simples impacto goticular. Ocorre outro conjunto de fenómenos durante o impacto de sprays densos, que impede que os resultados obtidos para impactos singulares sejam extrapolados para este tipo de impacto mais complexo. O ponto de impacto das gotas não é o mesmo, as suas dimensões e velocidades variam e, naturalmente, ocorrerão interações entre gotas ou entre as estruturas resultantes dos impactos das gotas. Estas interações produzem estruturas hidrodinâmicas diferentes das produzidas no impacto singular de uma gota, descritas na Sub-Secção 1.2.1. Como irá ser exposto nesta secção, um resultado interessante destas interações envolve a atomização secundária. Como foi abordado na Sub-Secção 1.2.1, a atomização secundária

só ocorre para determinadas situações num impacto singular e só é possível quando as condições de impacto permitem atingir um certo valor do *splash-threshold*. Quando ocorrem interações entre as estruturas resultantes dos impactos goticulares, poderá ocorrer atomização secundária, mesmo que as condições de impacto estejam abaixo desse *splash-threshold*. É interessante rever, na literatura, e visualizar os resultados experimentais das várias interações entre as gotas. A maior parte dos ensaios realizados são feitos sobre condições de impacto controladas.

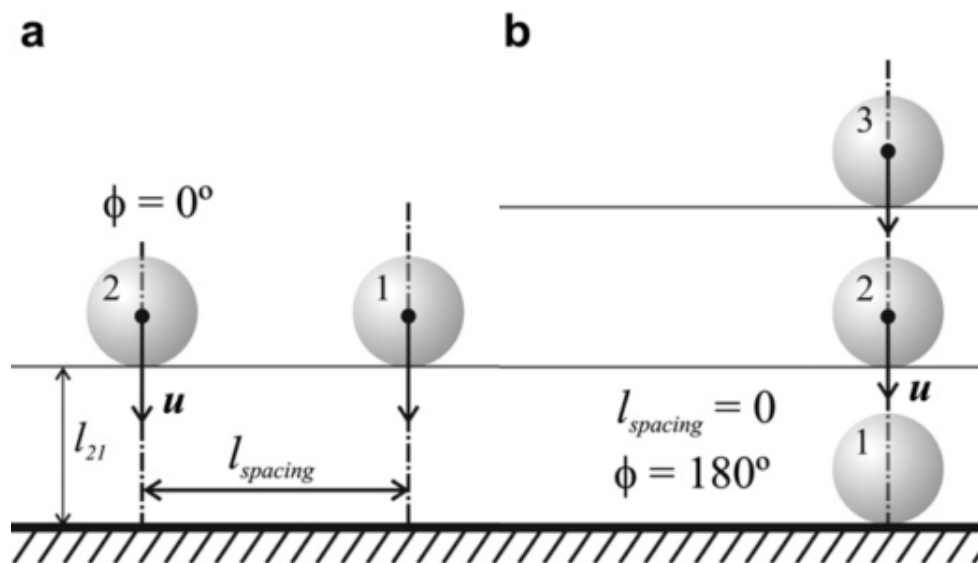


Figura 1.14: Ilustração do $l_{spacing}$ e da fase ϕ no caso de um impacto simultâneo (a) e num impacto múltiplo consecutivo (b). Imagem adaptada de Moreira *et al.* (2010)

Na Fig 1.14 encontram-se representados dois parâmetros que permitem categorizar os resultados presentes na literatura. O $l_{spacing}$ representa o espaçamento entre dois pontos de impacto e o ϕ , ou fase, representa o espaçamento temporal entre dois impactos na mesma superfície, (Moreira *et al.* (2010)). Por exemplo, e como representado na Fig 1.14 (b), o ponto de impacto é o mesmo, assim como o tempo entre os diferentes impactos das gotas. Estamos, então, perante impactos consecutivos. No caso (a), o instante de impacto das gotas é o mesmo, sendo que estas atingem pontos diferentes. Neste caso, estamos perante impactos múltiplos simultâneos. Para diferentes impactos surgirão diferentes resultados.

Em impactos simultâneos com condições bem definidas, ocorrem interações denominadas por *coroa-a-coroa*. É interessante comparar o que acontece quando ocorrem

estes tipos de interações com o que acontece num impacto singular. Foi o que fez Cossali *et al.* (2004) em condições de impacto suscetíveis à ocorrência de *splash* num impacto singular.

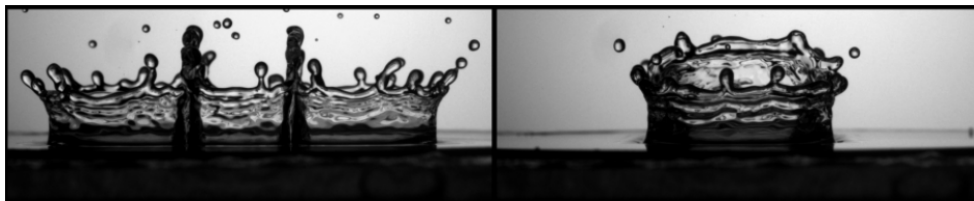


Figura 1.15: Interação *coroa-a-coroa*. Resultado do impacto simultâneo de três gotas adjacentes num filme líquido. À esquerda a vista frontal, à direita a vista lateral. Imagem adaptada de Cossali *et al.* (2004)

Esta interação, *coroa-a-coroa*, pode ser visualizada na Fig. 1.15, ocorrendo quando se forma uma coroa a partir de um impacto singular, interagindo com a coroa de uma gota adjacente. Estas interações só ocorrem se a distância entre os pontos de impactos das gotas for suficientemente próximo. Como é possível verificar pela Fig 1.15, na zona da interação forma-se um jato de líquido que se move na direção ascendente, atingindo alturas relativamente superiores quando comparadas com a altura da coroa num impacto singular. Este jato colapsa e origina gotas secundárias. A atomização secundária é menos evidente para filmes líquidos de maior espessura. A energia resultante do impacto é dissipada mais rapidamente em filmes grossos, o que torna todos os tipos de interação mais fracos. Da mesma forma, para velocidades de impactos menores, ocorre uma inibição da atomização secundária (Cossali *et al.* (2004)).

Os impactos podem não ser simultâneos, sendo possível manter a distância entre impactos mas atingindo a superfície em tempos diferentes e com a mesma frequência, como identificado na Fig 1.16.

Da mesma forma, ocorre uma interação *coroa-a-coroa* com a ascensão de um jato na interseção das duas *coroas*. No entanto, como o impacto das gotas é desfasado, este jato não ascende verticalmente, mas sim em direção da gota que incidiu mais cedo na superfície. Visualmente, este fenómeno está representado na Fig 1.17

Como foi referido anteriormente, o impacto da gota numa superfície aquecida é completamente diferente. Quando a temperatura da superfície é superior à temperatura de saturação do fluido, os regimes de ebulição influenciam o comportamento da gota.

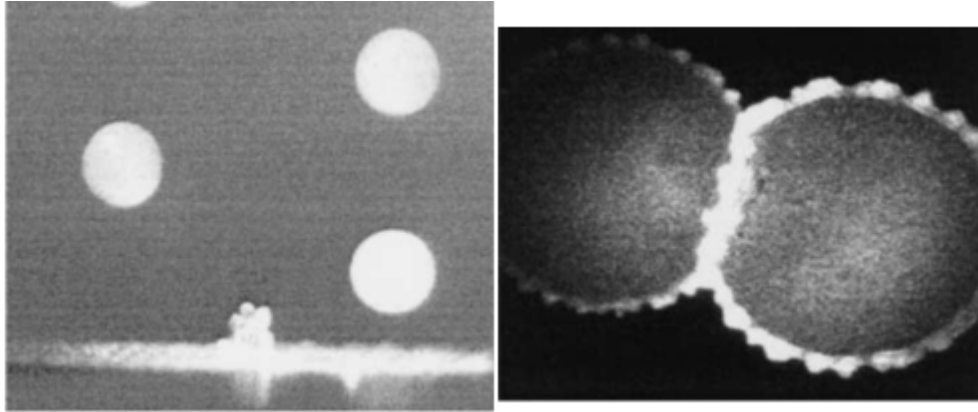


Figura 1.16: Impacto de gotas de água com um diâmetro de 2 mm , uma velocidade de impacto de 3.36 m/s , com uma distância entre impactos de 8.4 mm e $0^\circ < \phi < 180^\circ$. Vista lateral e vista superior. Imagem adaptada de Roisman *et al.* (2002)

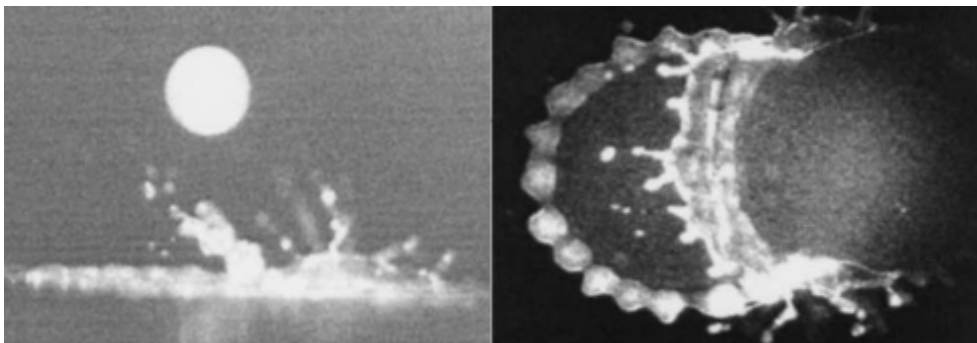


Figura 1.17: Impacto com gotas de água com um diâmetro de 2.64 mm , uma velocidade de impacto de 3.46 m/s , com uma distância de impacto de 5.39 mm e $0^\circ < \phi < 180^\circ$. Vista lateral e vista superior. Imagem adaptada de Roisman *et al.* (2002)

O trabalho de Cossali *et al.* (2004a) analisa experimentalmente o impacto de gotas adjacentes numa superfície a diferentes temperaturas de modo a abranger o regime de ebulição nucleada e de ebulição em película.

No caso da superfície sem presença de filme líquido, o principal efeito da interação de múltiplas gotas pode ser visualizado na Fig. 1.18. As condições de impacto para cada gota situam-se abaixo do *splash-threshold*, pelo que nenhuma atomização secundária ocorre a partir de uma gota isolada. Neste caso, ocorre interação entre as lamelas do líquido, formando um jato ascendente, que desestabiliza e produz gotas secundárias de tamanho considerável. A influência da temperatura no mesmo impacto modifica de forma substancial a sua morfologia, como pode ser verificada pela Fig. 1.19.

Para temperaturas mais elevadas, esses jatos criados pela interação são destruídos

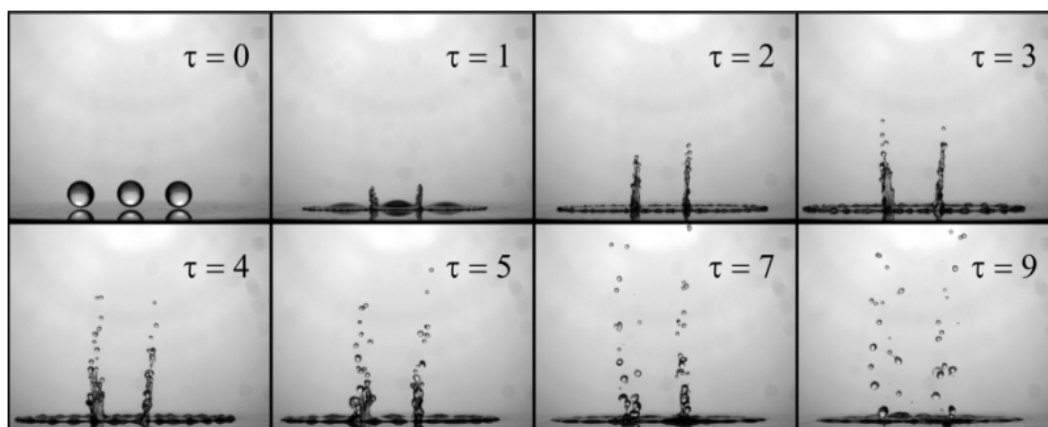


Figura 1.18: Impacto de um conjunto de gotas de água para uma temperatura abaixo da temperatura de saturação do fluido. Imagem adaptada de Cossali *et al.* (2004a).

pouco tempo depois da sua formação. Poucos instantes depois da captura da Fig 1.19, a lamela é destruída e levita completamente sobre a superfície. Para temperaturas acima dos 200°C , os jatos formados pela interação dinâmica dos impactos e a lamela da gota colapsam e produzem gotas de tamanho considerável. Na Fig 1.20 está presente uma análise à dimensão das gotas secundárias produzidas pela interação dinâmica e pelo efeito da temperatura. O autor conclui que para os resultados obtidos para a gama de temperaturas de 170°C a 260°C , casos em que a atomização termicamente induzida ocorre de forma considerável, os resultados são semelhantes, mostrando que a influência das interações dinâmicas não são importantes e que as gotas secundárias produzidas devido à temperatura são mais significativas. No entanto, para o caso do impacto à temperatura superficial de 145°C , o efeito das interações dinâmicas já é significativo, com um aumento substancial da dimensão das gotas secundárias (Cossali *et al.* (2004a)). Para o caso da temperatura a 80°C , a atomização secundária só ocorre quando estão presentes as interações dinâmicas porque, para essa temperatura, a atomização termicamente induzida não se verifica.

O espaçamento entre os pontos de impacto das gotas é importante para que ocorra atomização secundária quando a temperatura da superfície é inferior à temperatura de saturação. No caso em que estão presentes regimes ebulitivos, se o espaçamento entre gotas for menor, maiores serão as dimensões das gotas secundárias formadas. Relativamente à velocidade de impacto quando os regimes de ebulição estão presentes, se o espaçamento for suficiente para ocorrerem fortes interações entre gotas, o aumento

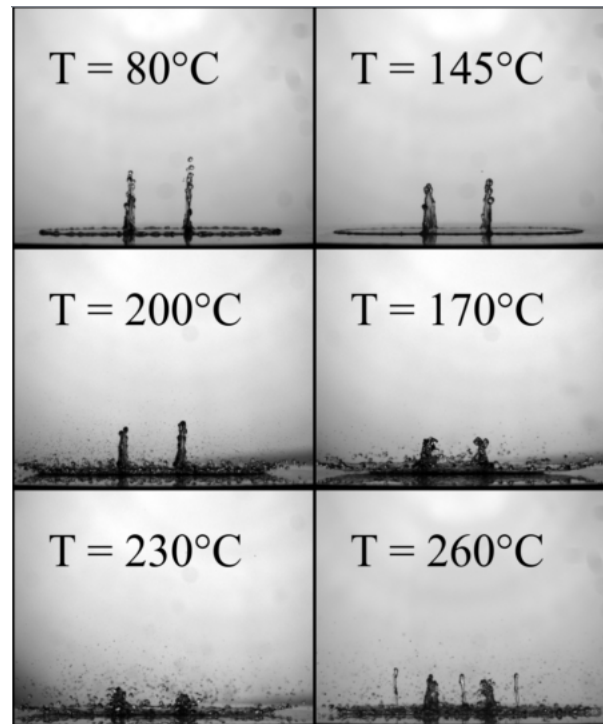


Figura 1.19: Efeito da temperatura superficial no impacto de múltiplas gotas de água para o mesmo instante, num impacto com uma velocidade de 2.55m/s e com um espaçamento entre gotas de 1.6mm . Imagem adaptada de Cossali *et al.* (2004a).

da velocidade de impacto aumenta a dimensão das gotas secundárias no regime de ebulição nucleada, enquanto que diminui o tamanho das gotas se estiver presente o regime de ebulição em película (Cossali *et al.* (2004a)).

Numa revisão das interações de massa e de quantidade de movimento durante a incidência de gotas num filme líquido, os autores Liang & Mudawar (2016) concluíram que as interações entre várias gotas durante o impacto goticular é um fenómeno que tem recebido menos atenção quando comparado com o impacto simples de uma só gota. O impacto de múltiplas gotas é um fenómeno complexo devido à interação das gotas e ao aumento da oscilação e instabilidade do filme líquido e, por isso, os autores concordam que não pode haver extrapolação da maior parte dos resultados do impacto singular para este tipo de impacto mais complexo. Concluem referindo que o impacto de múltiplas gotas é um tópico que necessita de trabalho experimental e teórico significativo.

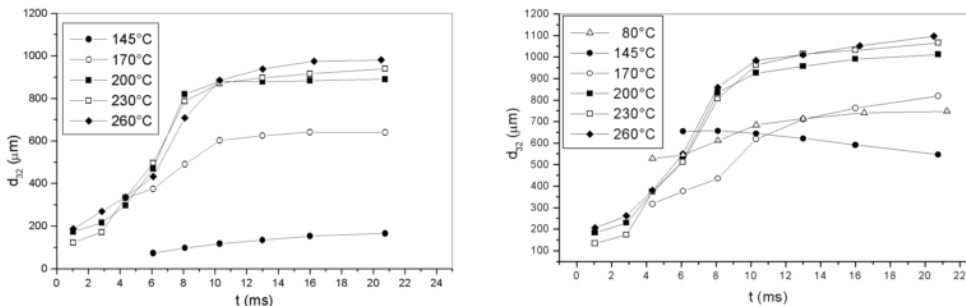


Figura 1.20: Análise da dimensão das gotas secundárias, com uma velocidade de impacto de 2.55 m/s , à esquerda para o caso do impacto singular e à direita para um impacto múltiplo. Imagem adaptada de Cossali *et al.* (2004a).

1.3. Objetivos

Os objetivos deste projeto são os seguintes:

- Criar um gerador goticular e adaptar uma instalação, já existente de trabalhos anteriores, de modo a ser possível incidir gotas sobre uma superfície quente;
- Caracterizar a transmissão de calor no impacto de múltiplas gotas (com origem em três agulhas) de dois líquidos diferentes (água e biocombustível);
- Caracterizar a incidência de uma gota singular e de várias gotas com recurso a uma câmara de alta velocidade e analisar as estruturas hidrodinâmicas formadas a partir da interação existente entre os múltiplos impactos.

2 Instalação Experimental

Pretende-se realizar o estudo fundamental da transferência de calor por impacto de múltiplas gotas numa superfície aquecida, perceber a influência da cadência das gotas, que tipo de taxas de arrefecimento se obtém e visualizar o impacto das gotas na superfície e a interação entre elas. Para tal, foi necessário projetar uma instalação experimental composta por dois elementos principais: i) a superfície aquecida; ii) e o sistema de produção de múltiplas gotas. No caso da superfície aquecida foi usado e adaptado um bloco previamente existente (Correia, 2011). Porém, no caso do sistema de geração de gotas, foi construído um sistema que produzisse múltiplas gotas, sendo a cadência alterada pela variação do caudal.

No projeto da instalação tiveram de ser consideradas as propriedades da superfície de teste e dos materiais que servem de isolamento para a mesma. Para que não haja forte resistência térmica entre a fonte de calor e a superfície exposta às gotas é necessário que o material seja bom condutor de calor. É também necessário conseguir isolar esta superfície em todas as faces, excepto na face exposta às gotas. O material isolante teria de suportar temperaturas elevadas, na ordem dos 250°C, e conseguir resistir às amplitudes térmicas aplicadas. Para a geração de gotas seria necessário usar agulhas para as criar e uma estrutura que as suportasse, onde fosse também possível variar a altura a que se encontram as agulhas. Além disso, seria necessário utilizar equipamento que possibilitasse a geração e regulação de elevados fluxos de calor e que pudesse ser aplicado de forma simples e o mais direta possível. Por fim, seria necessário construir um invólucro capaz de acomodar as várias peças projetadas de forma coesa.

2.1. Sistema de aquecimento da superfície de impacto

Nesta secção é descrito sucintamente o sistema de aquecimento de uma superfície plana onde incidirão as múltiplas gotas. A instalação experimental está representada esquematicamente na Fig. 2.1 e foi adaptada do trabalho de (Correia, 2011).

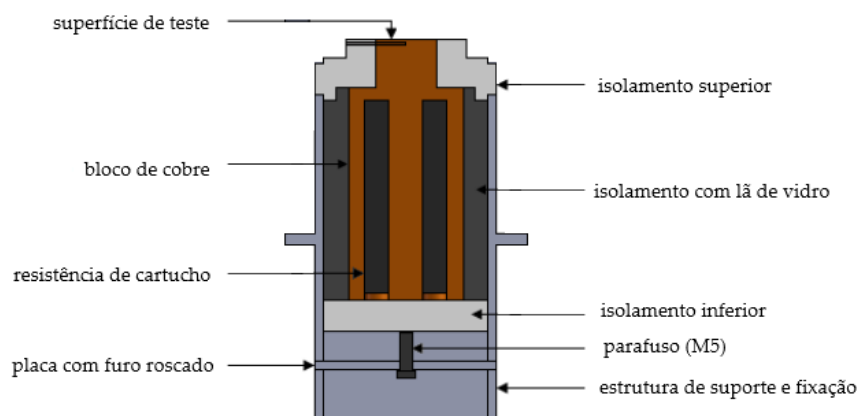


Figura 2.1: Representação esquemática dos elementos constituintes do bloco de aquecimento da superfície de impacto (Correia, 2011).

A superfície de impacto é quadrada, com 20 *mm* de largura, e está no topo de um paralelepípedo maquinado na extremidade de um bloco de cobre cilíndrico representado na Fig 2.2.



Figura 2.2: Cilindro de cobre maquinado em Correia (2011). Imagem adaptada do mesmo trabalho.

O cilindro do bloco de cobre é isolado (superior e inferiormente) por um laminado de fibra de vidro com resina de silicone, cujas propriedades estão sintetizadas na tabela 2.1. Este material não é poroso, evitando assim a absorção do líquido de arrefecimento.

Tanto o isolamento da parte superior como o topo do bloco de cobre possuem um furo centrado e com uma distância de 1.5 *mm* da superfície, no qual se insere um termopar para medir a temperatura da superfície. Para além de funcionar como isolante térmico, a peça de isolamento superior faz parte do sistema de fixação, aperto e confinamento da instalação experimental. A instalação é isolada com lâ de vidro ($k = 0.042 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$) em todo o espaço livre entre a estrutura em aço inoxidável e

Tabela 2.1: Propriedades termofísicas do laminado de fibra de vidro.

Propriedade	Valor
Coefficiente de expansão térmica, β	$5.5 \times 10^{-6} K^{-1}$
Condutibilidade térmica, k	$0.028 W/(m \cdot K)$
Temperatura máxima de operação	$220 ^\circ C$

o bloco de cobre.

A superfície é aquecida por efeito Joule, com quatro resistências elétricas de cartucho embutidas no bloco de cobre e ligadas entre si em paralelo de forma a minimizar a resistência equivalente e, conseqüentemente, maximizar a potência introduzida no aquecimento. A resistência elétrica total, R_{eq} , medida através de um multímetro, tem o valor de 42.7Ω , pelo que a potência elétrica máxima disponibilizada, supondo uma tensão máxima de $230 V$ (AC), é aproximadamente $1239 W$. Utilizou-se um potenciômetro, com uma capacidade para suportar uma potência máxima de $1400 W$ a $6 A$ e $230 V$, para regular a potência térmica imposta à instalação.

2.1.1. Calibração do fluxo imposto

O fluxo de calor imposto à superfície foi calibrado para diferenças de potencial entre $126 V$ e $197 V$. Para determinar esse fluxo é necessário fazer um balanço de energia ao bloco de cobre. A maior parte da superfície do bloco é isolada e, por isso, a condição fronteira é adiabática, excepto na superfície superior livre onde ocorre transferência de calor com o ambiente exterior e, posteriormente, com as gotas incidentes. Assim, o balanço de energia pode ser expresso como

$$\frac{dE_{int}}{dt} = q_{el} - q_{pi} - q_{cn} - q_{rad} = q_s - (q_{cn} + q_{rad}) \quad (2.1)$$

sendo o membro direito da equação a diferença entre a potência elétrica fornecida (q_{el}) e as perdas pela própria instalação para o exterior (q_{pi}) que, apesar de isolada, existem sempre, sendo o resultado dessa diferença o que se considera como potência imposta (q_s). Depois, existem ainda perdas por convecção natural (q_{cn}) e radiação (q_{rad}), sendo as suas ordens de grandeza inferiores à da potência imposta. Neste balanço, o bloco de cobre considera-se um sistema fechado, logo o balanço de energia que permite a

calibração do fluxo superficial de calor imposto é

$$q_s'' = \rho_b c_{p,b} \frac{V_b}{A_s} \frac{dT}{dt} + q_{cn}'' + q_{rad}'' \quad (2.2)$$

onde ρ_b , $c_{p,b}$, V_b e A_s são, respetivamente, a massa volúmica, o calor específico, o volume do bloco de cobre e a área de superfície livre superior.

Em cada ensaio, a variação linear da temperatura com o tempo medida a uma distância $\delta = 1.5mm$ da superfície livre deve-se ao período de aquecimento inicial (zona A da Fig. 3.2), correspondente ao fluxo imposto à superfície. Assim, a calibração é feita no início de cada experiência, através da medição do gradiente de temperatura $\frac{dT}{dt}$. O fluxo de calor removido por convecção natural q_{nc}'' obtém-se pela Lei de Newton

$$q_{nc}'' = \bar{h}_{cn}(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

tornando-se essencial determinar o valor de \bar{h}_{cn} . Este parâmetro pode ser estimado através das correlações empíricas desenvolvidas para a convecção natural. Pelo facto da temperatura não ser medida à superfície (T_s), mas a uma distância $\delta = 1.5mm$, assume-se que nessa distância o fluxo de calor é constante e expresso pela Lei de Fourier,

$$q_s'' = \frac{T_\delta - T_s}{R_{t,\delta}''}$$

em que $R_{t,\delta}'' = \frac{\delta}{k}$ [m^2K/W] corresponde à resistência térmica unitária. Assim,

$$T_s = T_\delta - q_s'' \cdot R_{t,\delta}'' \quad (2.4)$$

Como o algoritmo para o cálculo de \bar{h}_{cn} depende da temperatura da superfície (T_s), desenvolveu-se o seguinte algoritmo iterativo para fazer uma estimativa mais precisa dessa perda:

1. Inicialmente assume-se que a temperatura medida a δ é a mesma que à superfície, $T_s \approx T_\delta$;
2. Determinam-se as propriedades termofísicas do ar com base na temperatura média entre a superfície e o ar circundante, $\bar{T} = \frac{T_s + T_\infty}{2}$;
3. Calcula-se o número de Rayleigh,

$$Ra_s = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

em que a dimensão característica L corresponde à razão entre a área de superfície, A_s , e o seu perímetro, P_s ;

- Mediante a gama para Ra_s , para uma superfície quente no topo e numa condição adiabática em baixo, (Ozisik, 1985):

$$\begin{cases} Nu_s = 0.13Ra_s^{1/3}, & Ra < 2 \times 10^8 \\ Nu_s = 0.16Ra_s^{1/3}, & 5 \times 10^8 < Ra < 10^{11} \end{cases}$$

- Obtém-se o coeficiente de transmissão de calor associado à convecção natural:

$$\bar{h}_{cn} = Nu_s \frac{k_{ar}}{L};$$

- Determina-se também o valor de q''_{rad} e através das equações (2.2) e (2.3) determina-se o valor do fluxo imposto q''_s ;
- Determina-se um novo valor para T_s através da eq. (2.4), e se a diferença entre esse valor e o anterior for superior a $\epsilon = 10^{-4}$, volta-se ao passo 2 com o novo valor.

Os valores finais obtidos para a calibração do fluxo de calor imposto à superfície encontram-se representados na Fig 2.3.

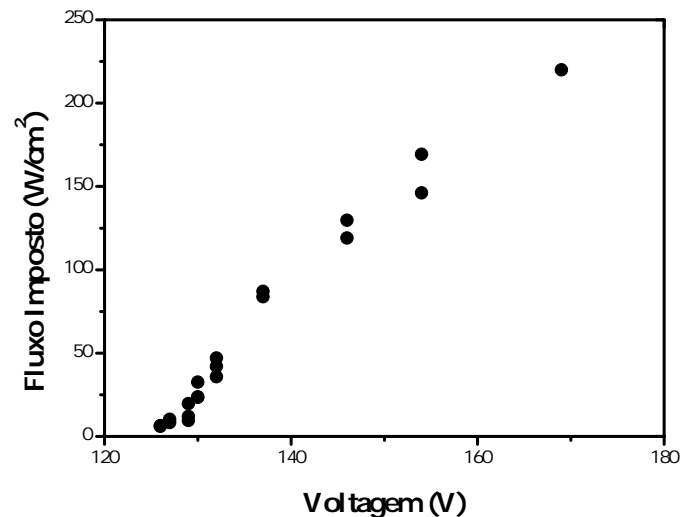


Figura 2.3: Variação do fluxo de calor imposto à superfície com a variação da posição do potenciômetro.

2.1.2. Calibração do caudal debitado pela bomba peristáltica

O caudal debitado por uma agulha hipodérmica foi analisado para ambos os líquidos de arrefecimento, por um período de 30 segundos, e para cada posição da bomba peristáltica. O volume de líquido debitado num recipiente foi pesado numa balança AND GF-3000 com um limite máximo de pesagem de 3600 g e uma precisão de 10^{-2} g. As medições foram feitas desde a posição 1 da bomba peristáltica até à posição 13. A partir desta posição e devido ao elevado caudal, não eram produzidas gotas mas sim um jato de líquido, pelo que não foram considerados caudais mássicos superiores aos da posição 13. Os valores obtidos para a água e para o biocombustível estão representados na Fig 2.4.

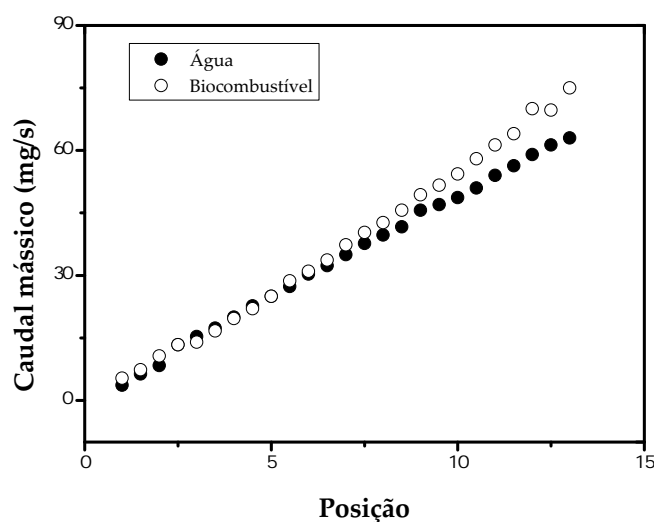


Figura 2.4: Caudal mássico debitado por uma agulha para cada posição da bomba peristáltica.

2.2. Geração de gotas

As gotas que incidem na superfície-teste são formadas a partir de agulhas sem bisel usualmente usadas em odontologia. Estas agulhas possuem um diâmetro exterior de 0.5 mm e um comprimento de 40 mm. O fluido escoava da bomba peristáltica para as agulhas através de um tubo de silicone com 2.5 mm de diâmetro interior. Utilizou-se uma bomba peristáltica ISM941 da *Ismatec*, de alta precisão e com múltiplos canais,

para controlar o caudal debitado. Assume-se que o caudal imposto em cada agulha é igual pois cada uma está individualmente ligada a um canal independente da bomba.

Um tubo PVC em meia-lua, previamente maquinado com furos igualmente distanciados, faz de suporte às agulhas. Por sua vez, este suporte está conectado a um parafuso roscado, apertado numa base de madeira, através do qual é possível variar a distância de impacto das gotas. Ambos os componentes encontram-se representados na Fig .2.5.



Figura 2.5: Bomba peristáltica e o suporte para as agulhas.

2.3. Líquidos de arrefecimento

Os líquidos usados nas experiências realizadas são a água e um biocombustível feito a partir de uma mistura de biodiesel com jet-fuel usado nas turbinas de aeronaves. Algumas das propriedades de ambos os líquidos encontram-se sintetizadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Propriedades termofísicas dos fluidos à temperatura de $25^{\circ}C$.

Propriedade	Água	Biocombustível
Massa específica, ρ	$997.0 \text{ kg}/\text{m}^3$	$780.6 \text{ kg}/\text{m}^3$
Viscosidade dinâmica, μ	$0.891 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	$2.287 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
Tensão superficial, σ	$71.97 \text{ mN}/\text{m}$	$25.2 \text{ mN}/\text{m}$

3 Técnicas de Diagnóstico e Metodologia Experimental

Neste capítulo são descritas as técnicas de diagnóstico usadas na caracterização do comportamento térmico devido ao impacto das múltiplas gotas e a morfologia desse impacto. Depois descreve-se a metodologia experimental delineada para caracterizar a transmissão de calor envolvida, bem como as estruturas hidrodinâmicas aquando do impacto das gotas.

3.1. Sistemas de diagnóstico

3.1.1. Medição de temperatura

A medição de temperatura foi idêntica à usada em Correia (2011), usando termopares. O termopar é um sensor que mede uma temperatura com base em efeito de Seebeck. Esse é obtido quando dois metais de diferentes tipos, unidos nas extremidades, formando um circuito fechado, produzem uma força electromotriz quando ocorre uma diferença de temperatura. Neste trabalho mede-se a variação da temperatura da superfície com um termopar do tipo K. Os termopares do tipo K são compostos por uma combinação de níquel-crómio (elemento positivo) e níquel-alumínio (elemento negativo), com uma gama de temperaturas que varia entre os $-200^{\circ}C$ e os $1200^{\circ}C$. A magnitude da força electromotriz é convertida num valor de temperatura quando o termopar é acoplado a um instrumento de leitura. O termopar do tipo K usado na instalação experimental possui um diâmetro exterior de 1 mm , estando este introduzido no furo referido na Sec. 2.1 e representado na Fig. 3.1.

O instrumento de leitura utilizado foi o *TC-08 Thermocouple Data Logger* da PICO[®] e o software utilizado foi fornecido pelo fabricante deste equipamento. A extremidade do termopar ficou localizada 1.5 mm abaixo do centro da superfície de teste. Os resultados térmicos disponibilizados pelo PICO[®] estão representados nas Fig. 3.2 e Fig. 3.3, onde estão, também, assinaladas as regiões A e B usadas na calibração do fluxo

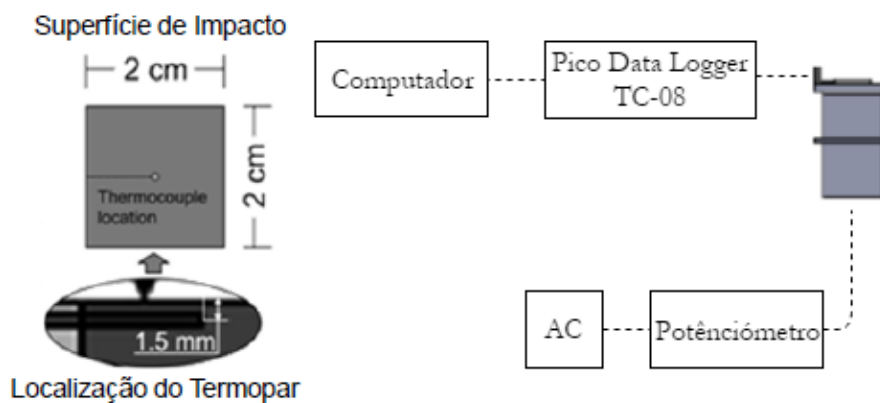


Figura 3.1: Esquema da instalação para a medição de temperatura. Adaptado de Correia (2011).

imposto e no cálculo do fluxo de calor removido pelas gotas incidentes, respetivamente.

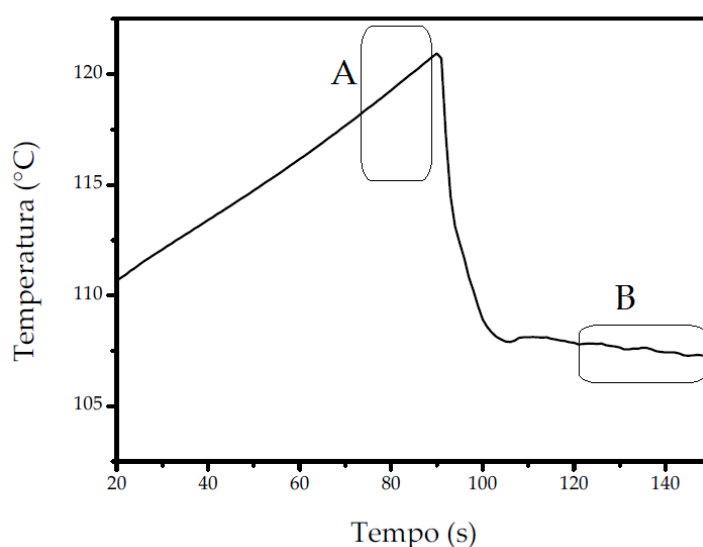


Figura 3.2: Exemplo da evolução da temperatura para um fluxo de calor imposto e um determinado caudal de gotas incidentes.

A metodologia definida para os ensaios experimentais consistiu em impôr um fluxo de calor ao bloco de teste, regulado pelo potenciômetro, e definir na bomba peristáltica o caudal mássico a debitar na superfície. Assim que o fluxo é imposto ao bloco o aumento de temperatura é constante e, em cada ensaio, o gradiente de temperatura é extraído das medidas (Zona A da Fig. 3.2) para determinar o valor do respetivo fluxo imposto, como explicado na Sub-Sec. 2.1.1. Assim que a temperatura da superfície ultrapassa os 120°C , faz-se-lhe incidir as gotas, resultando no decréscimo abrupto da

temperatura. A Zona B da Fig. 3.2 marca uma região de estabilização da temperatura, ou seja, o calor que é imposto equilibra o que é retirado por convecção forçada pelas gotas. A partir da temperatura de estabilização determina-se o coeficiente de transmissão de calor por convecção e obtêm-se também as curvas de análise para o impacto de múltiplas gotas sobre uma superfície. Em alguns casos foram considerados vários caudais num mesmo ensaio para um determinado fluxo imposto. O ensaio com um novo caudal era iniciado depois de se verificar inexistência de líquido na superfície. Como é possível verificar na Fig. 3.3 existe mais do que uma Zona B de onde são extraídos os dados para a análise. Em alguns casos a estabilização da temperatura não se verifica de forma plena, o que quer dizer que não foi atingido um equilíbrio energético.

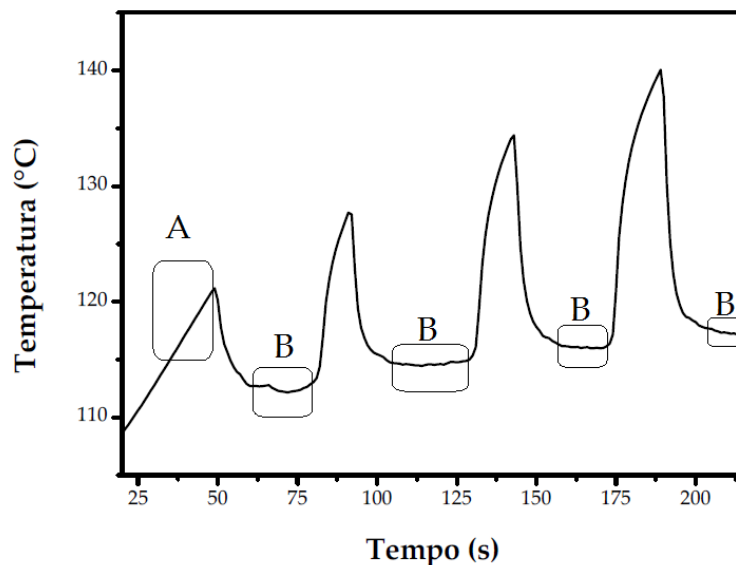


Figura 3.3: Exemplo da evolução da temperatura para um fluxo de calor imposto e quatro caudais de gotas incidentes distintos.

Foi então aplicado o seguinte critério para validar cada resultado térmico:

- Na situação em estudo, a superfície está sujeita a duas condições de fronteira diferentes ao longo do tempo, numa fase inicial a superfície está livre, sendo que numa fase mais tardia, a condição de fronteira será o impacto das gotas. No caso de uma aparelho ideal, a resposta do termopar à mudança da condição de fronteira seria imediata e os resultados térmicos mostrariam um *step*. Neste caso isto não se verifica e o aparelho de medida demora algum tempo até assumir por completo a nova condição de fronteira. Para cada experiência foi calculado o

$\frac{dT_s}{dt}$ instantâneo e com recurso a iterações, definido o espaço de tempo a analisar (ex. zona B da Fig. 3.3). Para uma primeira iteração, analisou-se os 10 últimos segundos da aparente estabilização da superfície para cada ensaio e foi calculada a temperatura média;

- Ao ponto de temperatura máximo de cada ensaio (antes da nova condição de fronteira se iniciar), foi retirado 63.2 % da diferença entre essa temperatura e a temperatura estabilizada resultante da primeira iteração. Foi analisado em que instante esta temperatura resultante se verificou. O dobro da diferença entre este instante e o instante em que ocorreu a temperatura máxima serve de intervalo de tempo para voltar a analisar a temperatura de estabilização da superfície;
- Este processo iterativo decorre até que o instante analisado seja o mesmo. Assim que o processo termina, o intervalo de tempo é analisado e a temperatura de estabilização da superfície final é definido;
- A partir deste intervalo de tempo, é calculado $\frac{dT_s}{dt}$ nessa região (zona B da Fig. 3.2);
- Um ensaio é apenas válido se se verificar que a variação da temperatura da superfície estabilizada, (γT_{es}) , for inferior a 10% daquela que seria a temperatura da superfície se o ensaio se realizasse por um período extra de 100 segundos, $\gamma T_{es} = \left[\left| \frac{dT_s}{dt} \right| \cdot \frac{100}{T_s} \right] \times 100\% < 10\%$.

Na Fig. 3.4 está representada a distribuição da variabilidade da temperatura da superfície estabilizada.

3.1.2. Visualização

Para se poder avaliar com maior pormenor os fenómenos ocorrentes na interface do líquido com a superfície e caracterizar as condições de impacto das gotas recorreu-se à visualização com uma câmara de alta-velocidade. No esquema apresentado na Fig 3.5, encontram-se representados os equipamentos implementados nesta técnica de diagnóstico.

Foi utilizada uma câmara de alta velocidade Phantom Miro 14x/34x, com uma lente Nikon. A visualização ocorre por retro-iluminação com um foco de luz LED de 50 W e

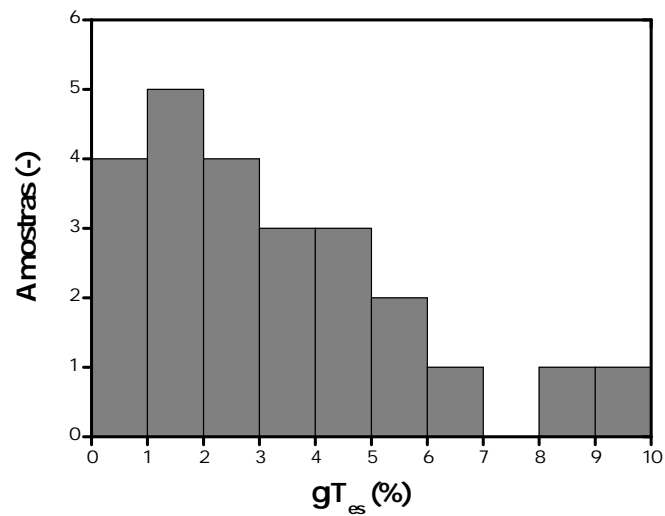


Figura 3.4: Distribuição da variação da temperatura da superfície estabilizada.

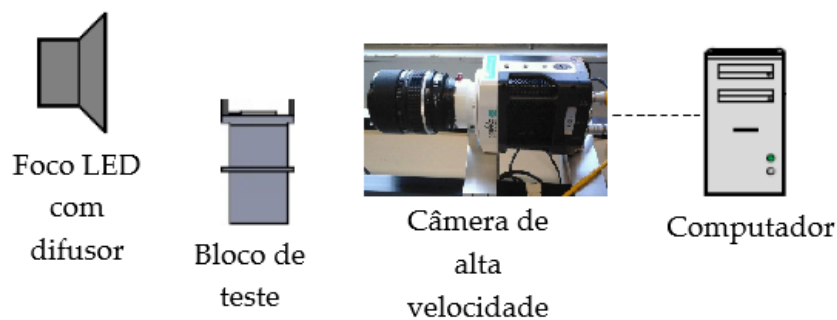


Figura 3.5: Esquema da instalação para visualização. Adaptado de Correia (2011).

com um difusor para uniformizar o plano de luz. Tanto para a análise dos fenómenos na interface do líquido com a superfície como para a caracterização do impacto das gotas, as imagens foram adquiridas com uma resolução de 1024×1024 , com um tempo de exposição de $10.02 \mu s$ e uma taxa de aquisição de 2000 FPS^1 , permitindo uma resolução temporal de 0.5 ms . A resolução usada para a análise das imagens obtidas foi de 12.06 pixels/mm .

¹FPS - *Frames Per Second*, número de imagens por segundo.

3.2. Metodologia Experimental

3.2.1. Caracterização da Transmissão de Calor

Após o impacto das múltiplas gotas a temperatura diminui como resultado da remoção de calor por parte das gotas incidentes. Porém, a temperatura não é medida à superfície, mas à distância de $\delta = 1.5mm$. Nesse sentido, é necessário perceber se as variações de temperatura provocadas pelo impacto das gotas são, ou não, capturadas por esse termopar. Isso pode ser feito através de uma análise do número de Biot que representa a razão entre a resistência à transmissão de calor no interior do corpo (resistência condutiva) e a resistência na interface sólido-fluido (resistência convectiva). O Biot expressa-se como

$$Bi = \frac{h_g \delta}{k_b}$$

em que h_g é o coeficiente de transmissão de calor por convecção forçada pelo impacto das gotas, δ a distância do termopar à superfície incidente e k_b a condutibilidade térmica do bloco. O objetivo da análise consiste em perceber se a temperatura em δ é uniforme, de tal modo que o termopar mede a temperatura na superfície. No caso de Bi ser muito inferior à unidade (usualmente $Bi < 0.1$) pode-se considerar que o corpo tem resistência interna desprezável, pelo que se pode admitir que a temperatura é uniforme em todo o corpo.

A análise para determinar o valor de h_g é muito semelhante à usada na calibração do fluxo imposto. Ou seja, fazendo um balanço de energia ao bloco de cobre, agora considerando convecção forçada e desprezando o termo da radiação,

$$\rho_b c_{p,b} \frac{V_b}{A_s} \frac{dT_s}{dt} = q_s'' - h_g(T_s - T_f) \quad (3.1)$$

Se no ensaio T_s estabilizar, $\frac{dT_s}{dt} \approx 0$, significa que o fluxo imposto é equilibrado pelo calor removido pelas múltiplas gotas, logo o coeficiente de transmissão de calor obtém-se a partir da eq. (3.1) como

$$h_g = \frac{q_s''}{T_s - T_f} \quad (3.2)$$

Porém, pode acontecer que o calor removido pelas gotas seja menor do que o fluxo imposto, pelo que o bloco continua a acumular calor. Nesse caso, $\frac{dT_s}{dt} > 0$ e $T_s = f(t)$. Embora esta seja uma equação diferencial, os resultados preliminares apontam para

que o gradiente de temperatura seja constante, logo o coeficiente de convecção obtém-se como

$$h_g(t) = \frac{q_s'' - \rho_b c_{p,b} \frac{V_b}{A_s} \frac{d\theta_s}{dt}}{\theta_s(t)} \quad (3.3)$$

em que $\theta_s(t) = T_s(t) - T_f$. Admitindo então que $\frac{d\theta_s}{dt}$ é constante, $h_g(t)$ é dependente apenas de $\theta_s(t)$. Assim, de modo a estimar o valor de Biot, analisou-se o caso mais desfavorável para que não se verifique $Bi < 0.1$, isto é, quando $h_g(t)$ é maior. O valor máximo de $h_g(t)$ para os resultados analisados foi de $4038 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Substituindo este valor em

$$Bi = \frac{h_g \delta}{k_b}$$

a condição de $Bi < 0.1$ é verificada pelo que se admite que as variações de temperaturas que ocorrem na superfície são captadas pelo termopar.

3.2.2. Caracterização do impacto de múltiplas gotas nos ensaios de Transmissão de Calor

Como a aleatoriedade faz parte das condições experimentais, através da visualização de alta-velocidade é possível medir a distância e intervalo de tempo entre impactos consecutivos, bem como as características das gotas incidentes em termos de diâmetro e velocidade.

O impacto das gotas foi alinhado com a diagonal da área quadrada da superfície de impacto, como está representado na Fig 3.6.

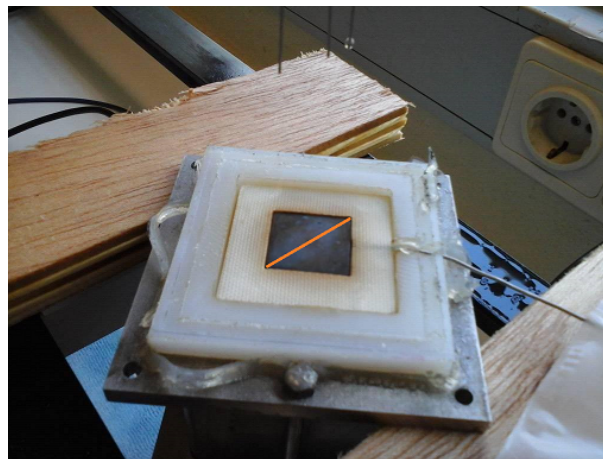


Figura 3.6: Representação da zona onde se pretende incidir as gotas.

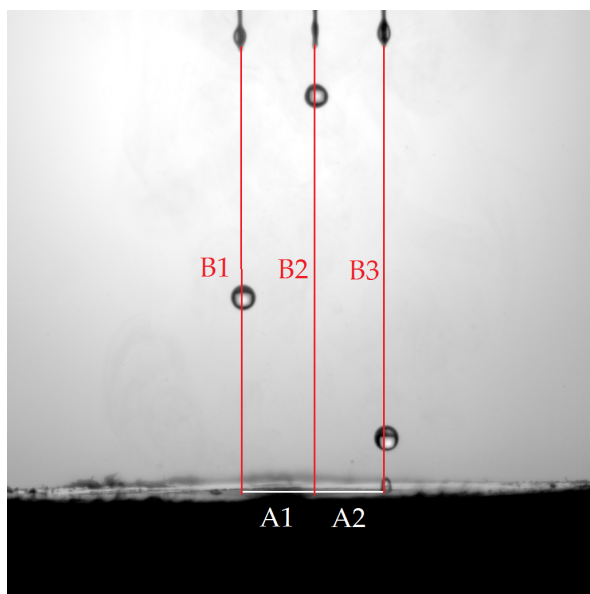


Figura 3.7: Ilustração das características analisadas.

Foi possível obter algumas características do impacto através das imagens capturadas. Utilizando como referência dimensional o diâmetro exterior das agulhas, $d_a = 0.5 \text{ mm}$, recorreu-se ao software ImageJ[®] para analisar imagens e quantificar o diâmetro das gotas e as distâncias entre impactos adjacentes onde ocorram interações entre as gotas. Na Fig 3.7 estão representadas algumas condições de impacto. Foi calculada a distância entre a ponta da agulha e a superfície ($B1$, $B2$ e $B3$) e as distâncias médias entre impactos ($A1$ e $A2$) foram calculados.

Foram medidos os diâmetros médios das gotas, sendo que as gotas de água apresentam um diâmetro médio de $\bar{D}_{g,ag} = 2.5 \pm 0.27 \text{ mm}$ e as gotas de biocombustível apresentam um diâmetro médio de $\bar{D}_{g,bc} = 2.1 \pm 0.18 \text{ mm}$.

De modo a analisar a aleatoriedade dos múltiplos impactos extraiu-se das imagens os pontos de impacto e intervalos de tempo decorrentes entre dois impactos sucessivos na superfície. Os resultados estão expostos na Fig 3.9.

Pela a análise da Fig .3.9, tanto para o caso das gotas de água como para o de biocombustível, o impacto está sensivelmente alinhado com a posição da agulha. As grandes diferenças devem-se ao intervalo de tempo entre dois impactos sucessivos na superfície. Verifica-se, assim, que o impacto é aleatório ao nível do intervalo entre impactos consecutivos e relativamente regular no espaçamento entre os pontos de impacto

Figura 3.8: Dimensões médias das características, em mm .

	Água	Biocombustível
A1	8.9	8.8
A2	7.3	7.8
B1	48.2	46.6
B2	48.4	47.2
B3	48.4	47.4

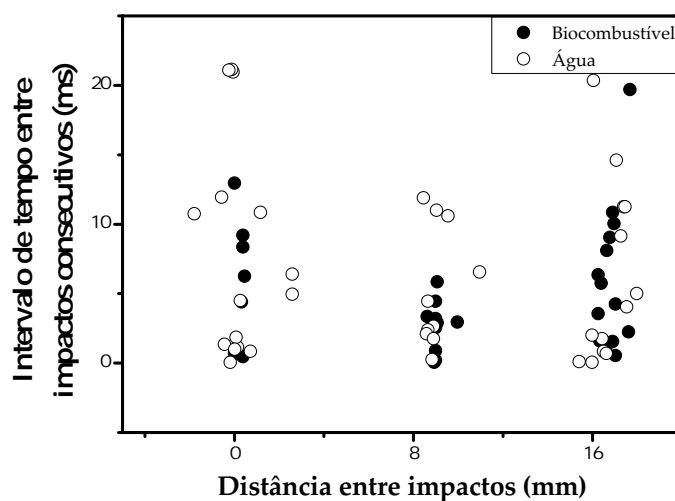


Figura 3.9: Pontos de impacto e distribuição temporal entre impactos sucessivos na superfície para gotas de água (14.94 gotas/s) e de Biocombustível (17.54 gotas/s)

das gotas.

3.2.3. Visualização dos mecanismos hidrodinâmicos associados aos múltiplos impactos de gotas

Os ensaios para a visualização dos mecanismos hidrodinâmicos de múltiplos impactos foram feitos usando apenas o biocombustível. Para o impacto caracterizado na sub-seção anterior, não ocorre interação entre impactos de forma bem visível. Para promover a ocorrência destes fenômenos, a altura das agulhas foi aumentada (de forma a se obter velocidades de impacto superiores, o We aumentou de 68 para valores que atingiram $We = 246$) e também foram aproximadas de modo a que o impacto das gotas fosse mais próximo. De forma análoga ao caso da caracterização do impacto da sub-seção anterior, foram analisados os pontos de impacto, o tempo que decorre entre dois impactos sucessivos na superfície e se ocorrem ou não interações, sendo que os resultados encontram-se expostos na Fig 3.10. O número de classes foi calculado recorrendo ao trabalho de Carvalho (2016), em que o número máximo de classes $N_k^{max} = Round(0.94N^{0.525}) = 7$, o número mínimo $N_k^{min} = Round(2.41N^{0.270}) = 7$ e N representa o número de impactos analisados.

Devido à aproximação das agulhas é possível verificar que a distância entre impactos é menor ocorrendo assim um número mais elevado de interações entre impactos de

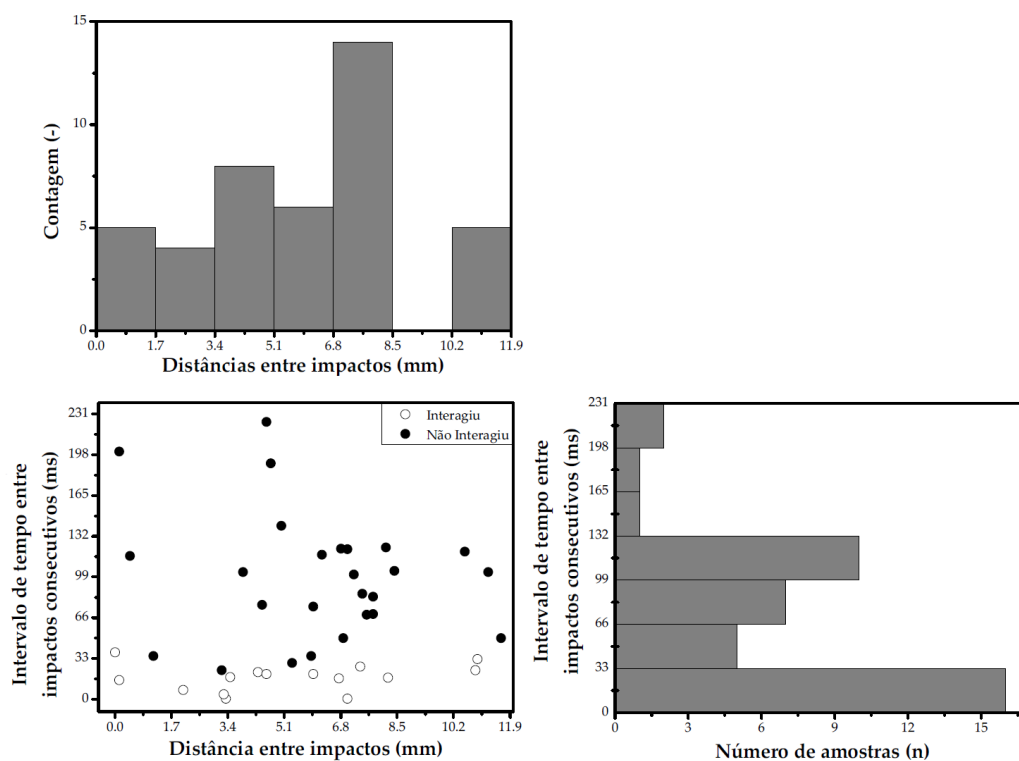


Figura 3.10: Pontos de impacto e distribuição temporal entre impactos sucessivos de gotas de biocombustível na superfície para uma cadência de gotas de 17.54 *gotas/s*.

gotas. De forma semelhante ao impacto nos ensaios de transmissão de calor, o tempo que decorre entre impactos consecutivos de duas gotas na superfície não segue nenhuma tendência. Verifica-se que o impacto ocorre aleatoriamente quer na distância entre impactos sucessivos quer no intervalo de tempo correspondente. Conclui-se que grande parte das interações ocorre para intervalos de tempo entre impactos sucessivos inferiores a 33 *ms*. Poder-se-à admitir que quanto maior for a taxa de cadência de gotas menor será o intervalo de tempo entre impacto, promovendo a interação entre gotas ou outras estruturas hidrodinâmicas.

Com recurso às imagens captadas pela câmara de alta velocidade, também foram identificadas as taxas de cadência das gotas para o maior e menor caudal mássicos. Para os valores intermédios, as taxas de cadência de gotas foram determinadas recorrendo a interpolações lineares visto que, pela análise da Fig 2.4, a evolução do débito mássico é linear. Estas taxas estão identificadas na Fig. 3.11.

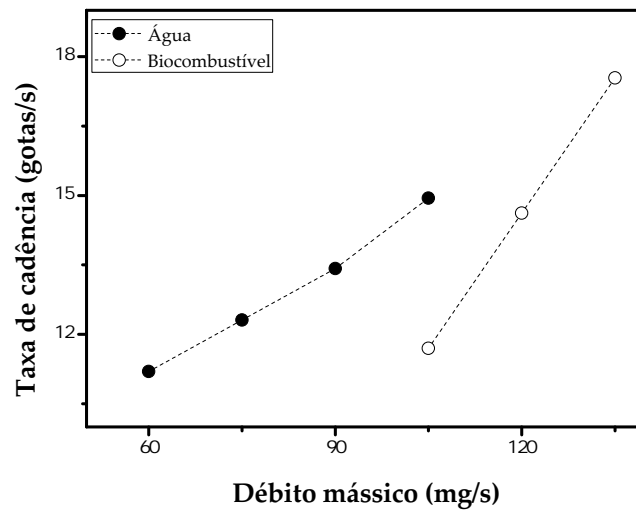


Figura 3.11: Diferentes taxas de cadência de gotas para os dois fluidos de arrefecimento.

4 Análise de Resultados

Como se constatou na introdução, da interação entre gotas nos múltiplos impactos com uma superfície resultam diversas estruturas hidrodinâmicas, diferentes das que acontecem quando o impacto da gota ocorre de forma singular. Daí que não seja totalmente correto extrapolar um spray como o somatório daquilo que acontece com impactos de gotas individuais. Assim, a análise dos resultados obtidos tem por objetivo caracterizar o comportamento térmico da superfície na presença de múltiplos impactos de gotas que interagem entre si. Um dos elementos considerados na interpretação dos resultados é a aleatoriedade inerente ao fenômeno, como ocorre no impacto de sprays. Pretende-se avaliar a capacidade de arrefecimento do impacto das múltiplas gotas, testando várias condições com diferentes caudais mássicos de modo a obter diferentes taxas de cadências de gotas. Procurou-se também visualizar o fenômeno do impacto das gotas na superfície de modo a caracterizar a atomização secundária termicamente induzida. Para além disso, recriaram-se condições para que fosse possível ocorrer interação entre gotas e, assim, categorizar as estruturas hidrodinâmicas resultantes dessas interações.

4.1. Transmissão de calor no impacto de múltiplas gotas

Este sub-capítulo tem como objetivo quantificar a transferência de calor promovida pelo impacto de gotas com várias taxas de cadências. Estes efeitos do impacto dos fluídos de arrefecimento na superfície foram analisados em termos de evolução temporal de temperaturas.

4.1.1. Transmissão de calor com gotas de água

Com os ensaios realizados pretende-se aferir o efeito global da incidência de gotas na superfície em relação à dissipação de calor. Para isso são construídas curvas representativas da relação entre a diferença da temperatura da superfície e a temperatura do fluído, ΔT , e o coeficiente de transferência de calor por convecção, h .

O primeiro conjunto de ensaios teve como objetivo a construção de uma curva com a finalidade de analisar a evolução do coeficiente de convecção, h , para diferentes taxas cadências de gotas. No regime permanente, para cada valor de temperatura da superfície foi calculado o coeficiente de transmissão de calor por convecção através da Eq. (3.2).

Tendo em conta a variabilidade de T_s , optou-se por calcular h_g em função de \bar{T}_s obtida nas regiões definidas para a análise em 3.1.1.

O efeito global da incidência de diferentes taxas de cadência de gotas no coeficiente de convecção está expresso nos resultados da Fig. 4.1.

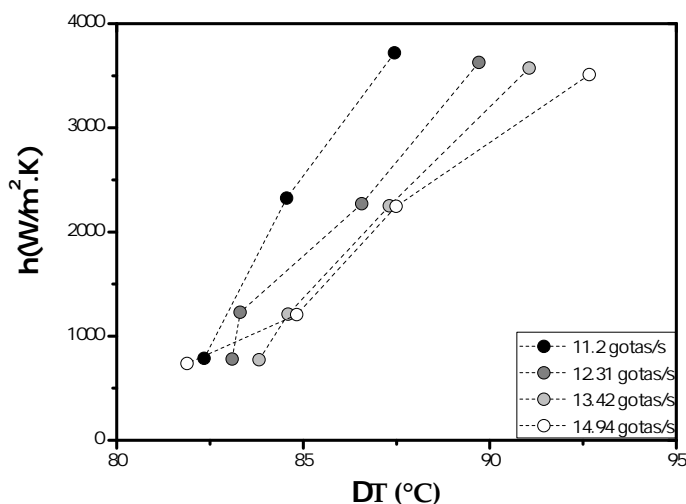


Figura 4.1: Efeito da taxa de cadência de gotas de água no coeficiente de convecção, com uma distância de impacto de 90 mm.

Pela análise da Fig. 4.1 pode-se verificar um comportamento semelhante da evolução do coeficiente de transmissão de calor por convecção para as diferentes taxas de cadência de gotas. De notar que, para valores semelhantes de h , menores taxas de cadência de gotas obtêm menores temperaturas de estabilização da superfície, em relação à temperatura do fluido (ΔT). Ora, isso significa uma maior capacidade de remover calor. Este facto poderá estar relacionado com a maior acumulação de filme líquido para taxas de cadências superiores, mitigando a mudança de fase, e eventualmente, reduzindo o fluxo de calor dissipado da superfície (Shedd (2007)). Para avaliar o desempenho que as diferentes taxas de cadência de gotas têm na remoção de calor, foi construído o gráfico representado na Fig. 4.2. A equação que quantifica o desempenho

de arrefecimentos é definida pela Eq .4.1:

$$\eta = \frac{q_s''}{\frac{\dot{m}_l}{A_s} [c_p(T_{sat} - T_f) + h_{fg}]} \quad (4.1)$$

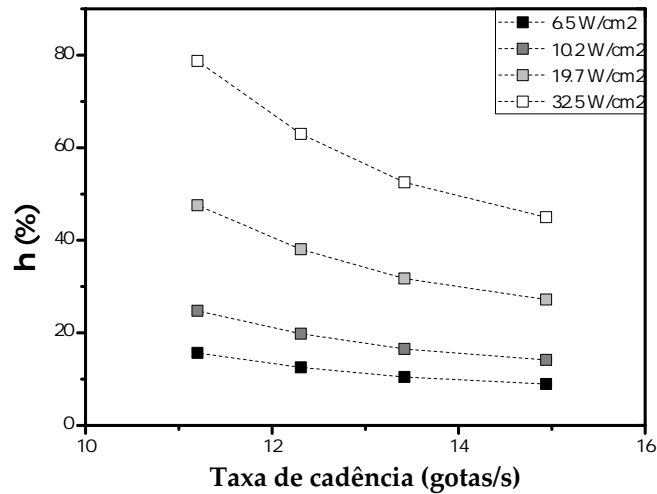


Figura 4.2: Efeito da taxa de cadência de gotas de água na eficiência de arrefecimento ebulitivo para os vários fluxos de calor impostos à superfície.

Pela análise da Fig. 4.2 pode-se concluir que a eficiência de arrefecimento ebulitivo diminui com o aumento da taxa de cadência de gotas, sendo que a eficiência é superior para os fluxos impostos superiores. Se a taxa de cadência de gotas for demasiado rápida, as gotas não atingem a superfície sem que as gotas dos impactos anteriores tenham mudado de fase. As gotas acumulam-se e formam-se um filme líquido sobre a superfície, que mitiga a mudança de fase, serve de resistência à remoção de calor e diminui a performance térmica das gotas.

4.1.2. Transmissão de calor com gotas de biocombustível

As experiências consideram também o efeito global da taxa de incidência de gotas na superfície aquecida com biocombustível, cobrindo uma gama de cadência semelhante às experiências água. A distância de impacto definida foi de 50 mm da superfície de teste. Os fenómenos ebulitivos não se conseguiram visualizar devido à quantidade considerável de compostos voláteis vaporizados.

Os resultados para a relação entre o coeficiente de convecção e a diferença entre a temperatura de estabilização e a do fluido estão representados na Fig .4.3.

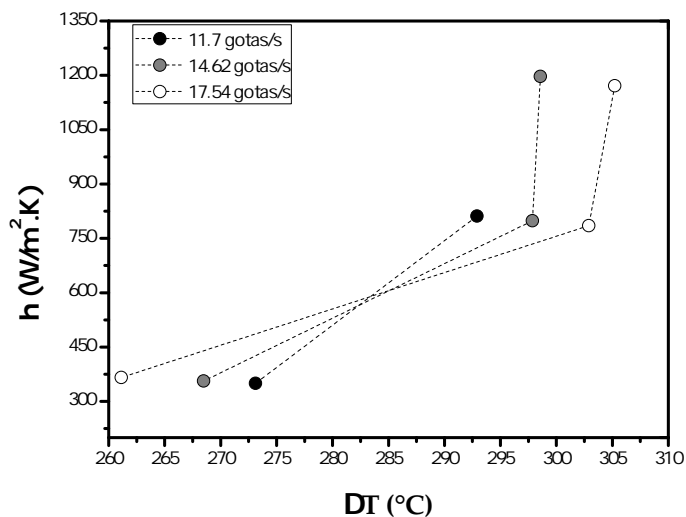


Figura 4.3: Efeito da taxa de cadência de gotas de biocombustível no coeficiente de convecção, com uma distância de impacto de 50 mm.

Pela análise da Fig. 4.3 pode-se verificar que, para valores de h inferiores a $500 W.m^{-2}K^{-1}$, as taxas de cadência de gotas menores atingem ΔT superiores, ao contrário do que se verificou para o caso da água. No entanto, esta tendência altera-se a partir dos $600 W/m^2.K$ em que cadências menores, atingem ΔT inferiores. De notar também que a partir dos $750 W/m^2.K$, para valores muito superiores de h , o ΔT mantém-se muito próximo, pelo que dá a entender que o fluido consegue manter a temperatura da superfície estável para a gama de valores de h considerados.

A evolução do dissipação de calor apresenta duas fases totalmente distintas. Os primeiros resultados aparentam estar inseridos no regime de evaporação de superfície livre devido à reduzida variação do fluxo de calor dissipado nos dois primeiros pontos de cada ensaio. No entanto o terceiro ponto ,para os caudas mais elevados, apresenta um valor de fluxo de calor dissipado muito superior para uma diferença reduzida de temperatura superficial estabilizada. O fluxo dissipado após o segundo ponto de cada ensaio aumenta de forma extraordinária. Da mesma forma que para o caso analisado anteriormente, a temperatura estabiliza para temperaturas superiores para caudais superiores iniciando um perda de eficiência de remoção de calor devido ao aumento da cadência de gotas.

Não foi possível fazer uma análise à eficiência de arrefecimento deste fluido devido à falta de informação de algumas das suas propriedades, nomeadamente, a temperatura de ebulição dessa mistura e a sua entalpia de vaporização.

4.1.3. Atomização secundária termicamente induzida

Quando as gotas incidem sobre uma superfície aquecida, em condições de ebulição nucleada, observa-se a formação de estruturas que desencadeiam a formação de gotículas como resultado da desintegração das bolhas formadas. Este fenómeno designa-se por atomização secundária termicamente induzida. Como referência, foi feito um ensaio com o impacto de uma gota na superfície à temperatura ambiente, representado na Fig 4.4. Considera-se que o instante inicial corresponde ao momento em que a gota toca na superfície. Depois, tomando como escala de tempo de referência a razão entre o diâmetro (D) e a velocidade da gota (v), D/v , adimensionalizou-se o instante referente a cada imagem (t) durante o processo de espalhamento da gota na superfície,

$$\tau = \frac{t.v}{D}$$

Todos os ensaios realizados para estudar este fenómeno foram feitos utilizando água. O diâmetro da gota de água é de 2.5 mm e esta incidiu sobre a superfície com uma velocidade de 0.9 m/s , resultando num $We = 28$. De acordo com Bai *et al.* (2002), para superfícies secas a transição entre os regimes de espalhamento (*spread*) e *splash* ocorre para um Weber crítico (We_c) dado por

$$We_c = 2630La^{-0.183} \quad (4.2)$$

em que $La = \rho\sigma D/\mu^2$ corresponde ao número de Laplace Neste caso,

$$We_c = 271.7 > We = 28$$

logo não é de esperar que haja atomização secundária, como se observa na Fig. 4.4.

Quando a temperatura da superfície é superior à de ebulição do líquido, observa-se a emergência de gotas por atomização secundária induzida pela ebulição nucleada corrente. Pode-se visualizar este mecanismo num ensaio realizado para uma temperatura de superfície de 150°C . Na Fig. 4.5 é possível verificar a evolução do fenómeno. Neste impacto a gota incide e espalha-se, de forma semelhante ao caso do impacto à temperatura ambiente. Uma vez depositada, o líquido recebe calor da superfície e atinge um

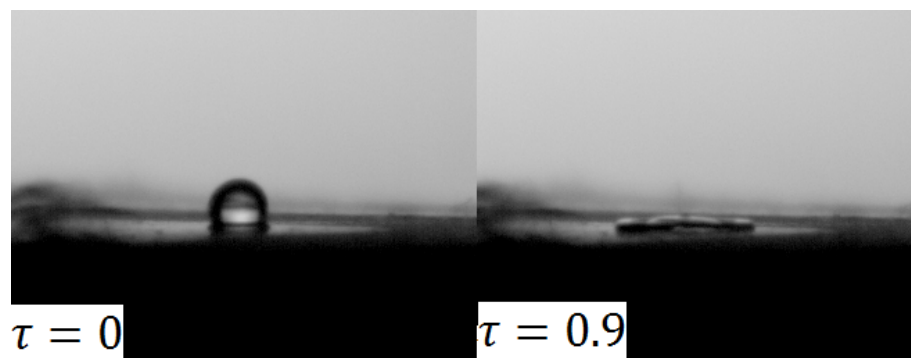


Figura 4.4: Impacto goticular à temperatura ambiente.

regime de ebulição com nucleação, isto é, com a formação de bolhas. O rebentamento dessas serve de mecanismo de atomização secundária, formando pequenas gotas, tendo a maior observada um diâmetro de $D_{gs} = 0.4 \text{ mm}$. De realçar que a gota secundária mais rápida atingiu uma velocidade de $U_{gs} = 0.9 \text{ m/s}$, valor similar à velocidade da gota incidente.

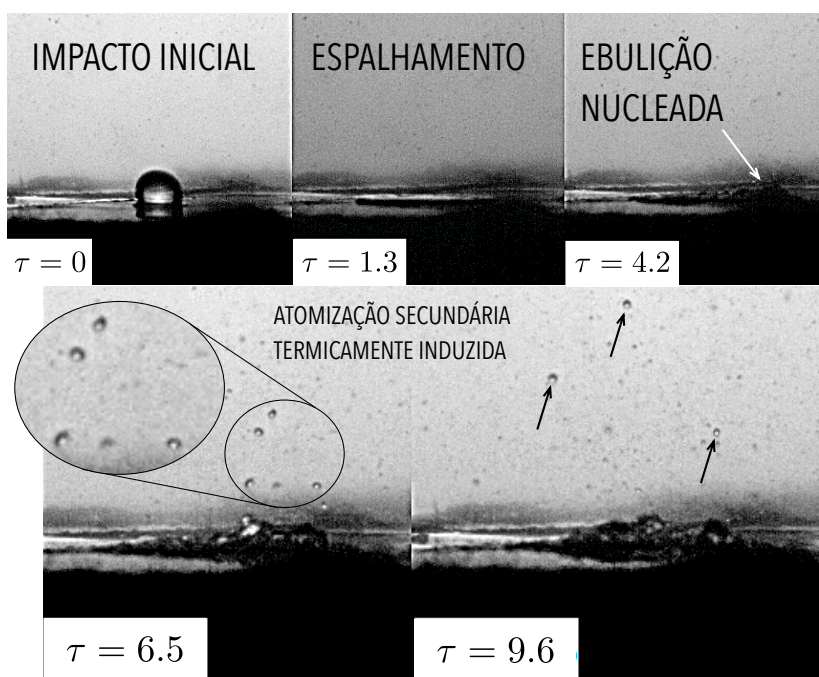


Figura 4.5: Impacto goticular numa superfície com a temperatura a rondar os 150°C .

Para uma temperatura superficial de, aproximadamente, 230°C a ocorrência de uma atomização termicamente induzida é visível, estando representada a sua evolução na Fig 4.6. Analogamente aos impactos anteriores, a gota incide e espalha-se. Após o espalhamento, o líquido começa, subitamente, a afastar-se da superfície, "levitando". Isto acontece devido a uma película de vapor que se forma entre a superfície de impacto

e o líquido, impedindo o contacto direto entre ambos. É possível verificar a ocorrência de atomização secundária com gotas de tamanho bastante considerável, identificando-se uma gota com um diâmetro de 1.2 mm , quase metade do valor da gota inicial que foi de 2.6 mm . A gota mais rápida atingiu uma velocidade 0.7 m/s , valor próximo da velocidade de impacto da gota inicial que foi de 0.8 m/s .

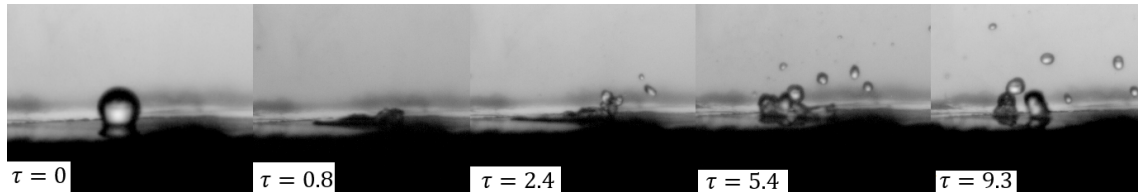


Figura 4.6: Impacto goticular numa superfície com a temperatura a rondar os 230°C .

Neste caso, pelo facto da superfície estar aquecida, as correlações para o Weber crítico, a partir do qual ocorre *splash*, alteram-se. Assim, recorrendo à correlação de Yao & Cai (1988), validada para diâmetros entre 0.6 e 3.5 mm e temperatura da superfície entre $100 < T_s < 380^\circ\text{C}$,

$$\text{We}_c = 12.89 + 0.85\theta_i - 0.0053\theta_i^2 \quad (4.3)$$

em que θ_i corresponde ao ângulo de impacto em graus ($^\circ$) e que no caso das presentes experiências, é de $\theta_i = 90^\circ$. Assim,

$$\text{We}_c = 46.46 > \text{We} = 23.1$$

logo não se prevê que haja atomização secundária por via de mecanismos de desintegração, como o *splash*. Assim, é possível observar que a temperatura promove a atomização secundária em condições abaixo do critério. Nomeadamente, formam-se diferentes tipos de gotas secundárias, dependendo do regime de ebulição em que se encontram. Para o regime de ebulição com nucleação, as gotas formadas são mais pequenas, mas atingem velocidades superiores. No regime de ebulição em película (*film boiling*), as gotas formadas são muito maiores e mais lentas.

Na Fig. 4.7 estão representadas as variações das dimensões médias das maiores gotas secundárias verificadas para o caso de uma superfície com a temperatura a rondar os 150°C e para o caso de uma superfície com uma temperatura de 230°C . O comportamento observado é semelhante ao reportado em Cossali *et al.* (2004a). Para o caso

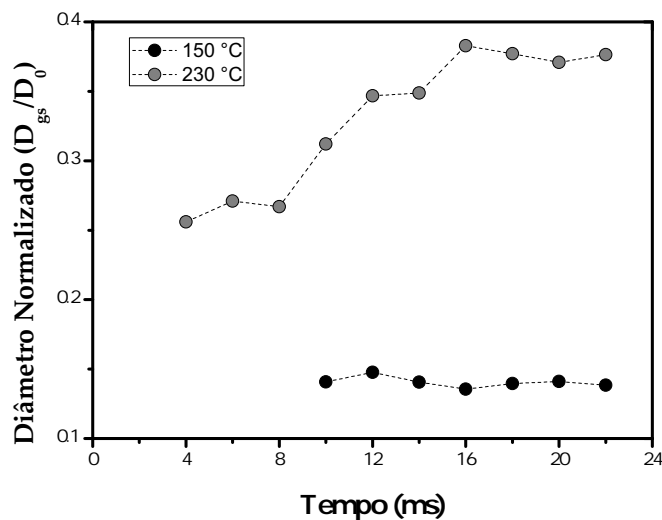


Figura 4.7: Variação do tamanho médio das principais gotas secundárias formadas ao longo do tempo.

da superfície a 150°C , a atomização ocorre mais tarde quando comparada com o outro caso em estudo e a dimensão média das gotas secundárias mantém-se regular ao longo do tempo. Para o caso da superfície a 230°C a atomização secundária termicamente induzida ocorre pouco tempo depois da incidência na superfície. Depois, é de notar que as gotas formadas possuem um dimensão bastante superior às formadas a uma temperatura mais baixa. No entanto, ao longo do tempo, a atomização induz a formação de gotas de maior dimensão, atingindo um valor médio várias vezes superior às gotas secundárias formadas quando a temperatura da superfície está em $T_s = 150^{\circ}\text{C}$.

4.2. Mecanismos Hidrodinâmicos no impacto

4.2.1. Impacto de uma gota singular: diferenças entre líquidos e temperaturas de superfície

No decorrer dos vários ensaios, obtiveram-se imagens relativas a impactos de gotas individuais na superfície sem influência de outros parâmetros como, por exemplo, outras gotas ou presença de filme líquido. Mecanismos como a atomização secundária a partir de uma gota singular estão descritos nas sub-seções 4.1.3 e 4.2.2. Esta subsecção destina-se a uma análise da velocidade de expansão do bordo da gota em espalhamento e da dimensão máxima atingida para alguns casos distintos. Recorrendo à visualização

de alta-velocidade e análise de imagens, foram analisadas as duas características atrás referidas com intervalo de 0.5 ms e com uma velocidade de impacto de $0.88 \pm 0.12 \text{ m/s}$. Os resultados estão expostos na Fig .4.8.

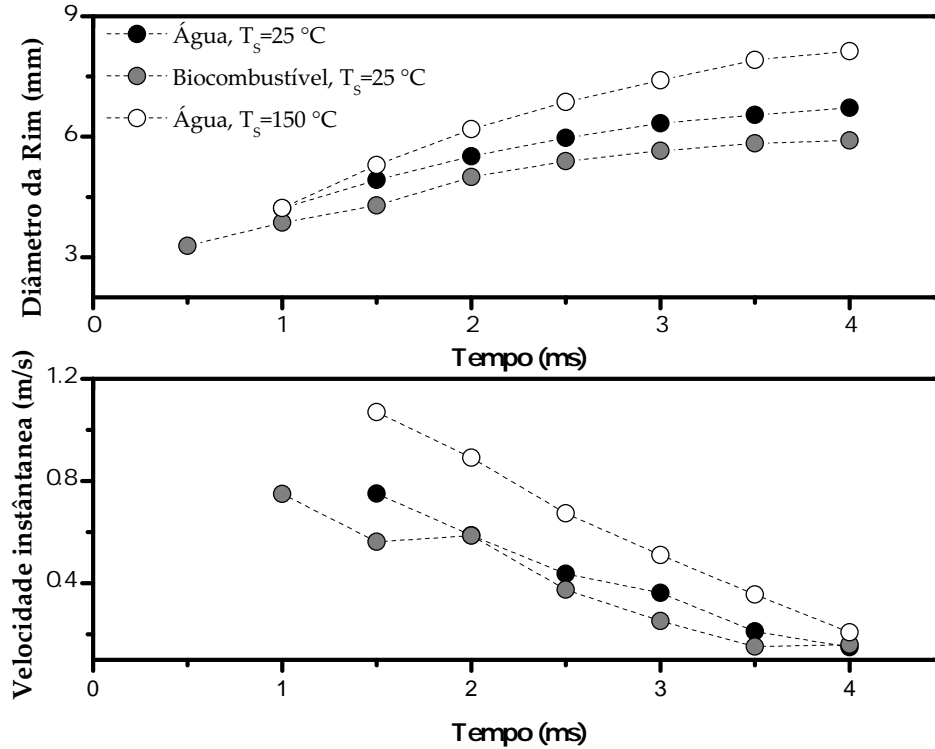


Figura 4.8: Evolução da velocidade e do diâmetro do *bordo* para três casos distintos, com uma velocidade de impacto inicial de 0.88 m/s .

Para as condições de superfície à temperatura ambiente, a gota de biocombustível apresenta menores velocidades de expansão e atinge uma menor dimensão máxima que a gota de água. Este facto pode ser explicado pelas próprias propriedades dos fluídos, nomeadamente, a molhabilidade. Recorrendo ao trabalho de Yoon & DesJardin (2006), pode-se fazer uma estimativa da dimensão máxima de ambos os casos, recorrendo aos números de Weber e Reynolds, e comparar com os resultados experimentais. Os autores estimam que o diâmetro máximo de espalhamento, D_{max} , pode ser estimado como $D_{max} = \beta_{max} \cdot D_0$, a partir do diâmetro inicial (D_0) e de β_{max} que se define como:

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{12 + We}{3(1 - \cos(\theta)) + 4 \frac{We}{\sqrt{Re}}}} \quad (4.4)$$

em que θ corresponde ao ângulo de contacto. Recorrendo a esta formulação, para o caso da água à temperatura ambiente, o diâmetro máximo teórico (6.8 mm) foi previsto com

alguma precisão quando comparado com o resultado experimental (6.7 *mm*). No caso do biocombustível, a situação é idêntica, sendo que o resultado experimental (5.91 *mm*) é semelhante comparativamente ao valor previsto (5.94 *mm*).

Quando comparamos as características para a gota de água no caso de uma superfície à temperatura ambiente com uma superfície quente, os resultados são diferentes. É possível verificar que o aumento da temperatura resulta em maiores velocidades de espalhamento, levando a que o bordo se estenda por uma área maior. Este é um resultado interessante e sugere que, para esta temperatura, a transferência de calor da superfície para a gota poderá influenciar, localmente, as suas propriedades e, consequentemente, o espalhamento da lamela, permitindo-a obter velocidades e dimensões superiores. Cossali *et al.* (2008) avançaram uma explicação semelhante quando verificaram que, para o caso em que a superfície se encontra a uma temperatura suficiente elevada para iniciar a ebulição do fluido, não existe o retrocesso do bordo da lamela, depois de se atingir a dimensão máxima, tal como acontece quando a gota incide numa superfície à temperatura ambiente.

No ensaios realizados não se verifica de forma nítida ou resolva o retrocesso do bordo da lamela, o que pode ser devido às velocidades de impacto não serem suficientes elevadas para que isso aconteça.

Como verificado na Sub-secção 4.1.3, também foi possível analisar impactos singulares de gotas para uma superfície à temperatura de 230°C, mas devido à atomização secundária ter início pouco tempo depois da gota incidir na superfície, torna-se difícil avaliar a velocidade de avanço e a dimensão do bordo para cada instante, inviabilizando esta quantificação.

4.2.2. Atomização secundária induzida pela interação entre impactos

Como referido anteriormente, a distância entre os pontos de impacto das gotas não permite que ocorra interação entre as coroas emergentes no mecanismo de *splash*. Assim, as extremidades das agulhas foram ajustadas de modo a promover interações. De realçar que todos os ensaios feitos para analisar a interação de gotas foram realizados utilizando o biocombustível.

Embora a secção anterior tenha sido dedicada ao impacto de uma só gota, como

fase preliminar dos ensaios com múltiplas gotas, e no sentido de ter um termo de comparação, foram realizados ensaios com biocombustível para obter informação sobre o comportamento aquando do impacto singular.

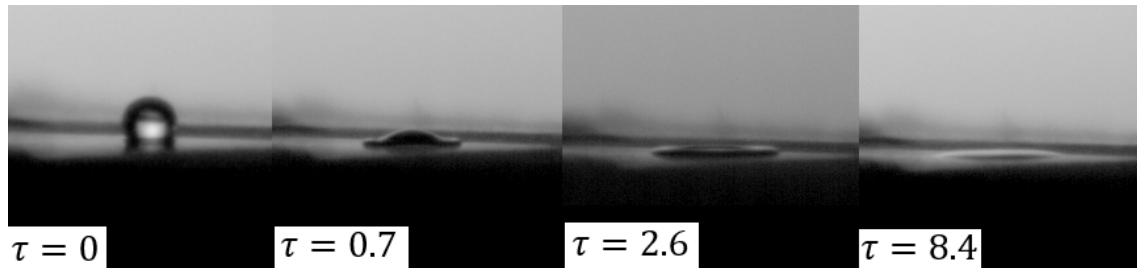


Figura 4.9: Impacto de uma gota de combustível na superfície seca de cobre, $We = 68$.

A Fig 4.9 mostra o espalhamento aquando do impacto de uma gota com um diâmetro de 2.2 mm a uma velocidade de impacto de 1 m/s , resultando num Weber de impacto de $We = 68$. Observa-se o espalhamento e deposição da gota na superfície. Não existe qualquer tipo de atomização secundária. Aplicando novamente o critério definido em Bai *et al.* (2002) para ocorrência de atomização secundária por *splash* em superfícies secas, dado pela Eq. (4.2), verifica-se que

$$We_c = 508 > We = 68$$

logo não é de esperar que haja atomização secundária, como se observou.

Depois, foi depositada uma fina camada de filme líquido na superfície de cobre de modo a facilitar a ocorrência de uma coroa tipicamente observada no mecanismo de *splash* e repetiu-se o ensaio. Para casos com filmes líquidos, o valor crítico de Bai *et al.* (2002) para que ocorra *splash* é:

$$We_c = 1320La^{-0.183} \quad (4.5)$$

E nesta experiência,

$$We_c = 256 > We = 68$$

logo também não é de esperar que haja atomização secundária, como se observa na Fig 4.10. De forma semelhante ao ensaio anterior, a gota espalha-se e deposita-se no filme sem atomização secundária.

De modo a nos aproximarmos da ocorrência de atomização secundária, aumentou-se a altura de origem da gota para que esta adquirisse velocidades de impacto superiores.

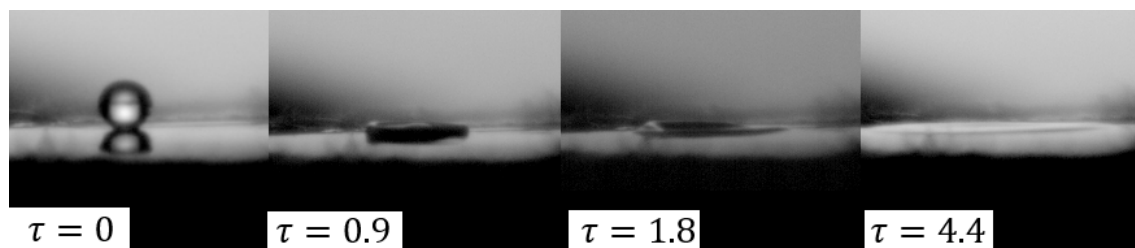


Figura 4.10: Impacto de uma gota de combustível num filme líquido fino, com uma velocidade de 1 m/s , $We = 68$.

Na Fig 4.11 é possível observar o resultado desse impacto. Neste ensaio, a gota atinge a superfície com uma velocidade de 1.9 m/s e o diâmetro da gota é sensivelmente o mesmo para todos os ensaios, resultando num valor para Weber de $We = 233$. Aplicando o critério dado na Eq. (4.5),

$$We_c = 256 > We = 233$$

, significando isso que se está próximo da ocorrência de *splash*, com formação de coroa, mas não se deveria observar, segundo o critério, qualquer atomização secundária, como acontece.

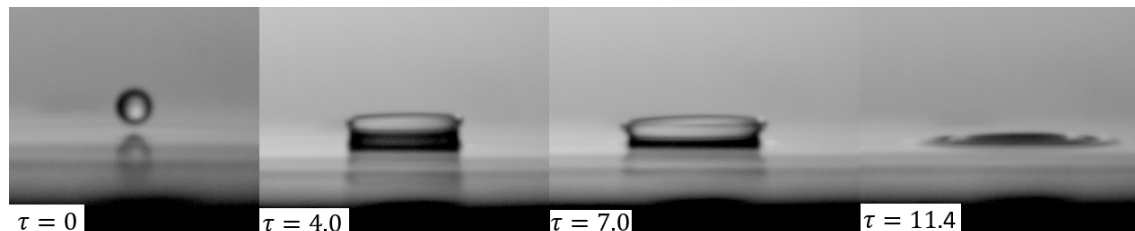


Figura 4.11: Impacto de uma gota de combustível num filme líquido fino, com uma velocidade de 1.9 m/s , $We = 233$.

A coroa ascende e atinge uma altura máxima de 2.7 mm e obtém, para essa altura, um diâmetro de 8.3 mm .

Passando para o caso em que se pretende induzir interação entre as gotas, manteve-se a altura e aproximaram-se as pontas das agulhas. Uma vez que a interação é um fenómeno contigente, mesmo em *sprays*, foram necessários vários ensaios para visualizar algum tipo de estrutura hidrodinâmica resultante dessa interação. Os valores de Weber (We) referem-se ao impacto da gota após o impacto de uma que leva à formação de um filme líquido por espalhamento.

A Fig 4.12 contém um exemplo dessas interações. Em $\tau = 0$ ocorre o início do

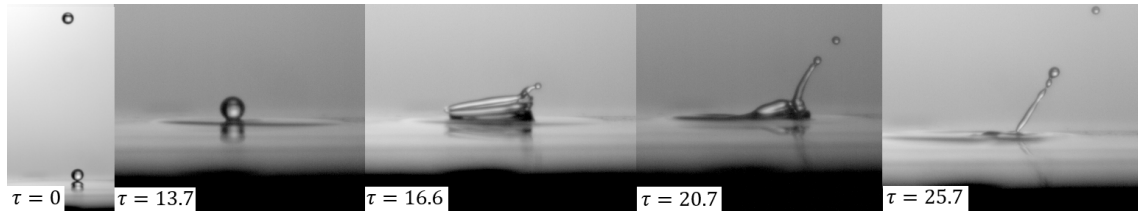


Figura 4.12: Interação entre os resultados de dois impactos goticulares. $We = 184$.

primeiro impacto. A segunda gota atinge o filme de líquido formado pela primeira 17 ms depois, a uma distância de 1.6 mm do ponto de impacto da primeira. Como resultado desta interação, emerge uma coroa e dessa um jato inclinado no sentido do primeiro impacto. Para $\tau = 16.6$ é possível observar a formação de uma gota secundária que será libertada pelo jato. Essa gota adquire uma velocidade de 1.4 m/s . Para $\tau = 25.7$ ocorre ainda a libertação de uma outra gota, com um diâmetro menor de 0.9 mm , menos de metade do valor das gotas incidentes.

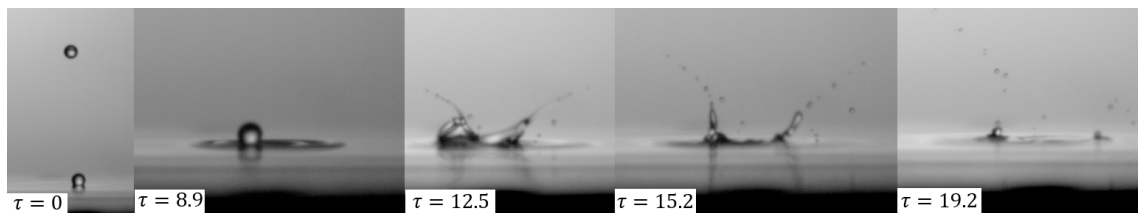


Figura 4.13: Interação entre os resultados de dois impactos goticulares. $We = 172$.

Um outro exemplo de interação está representado na Fig 4.13. Neste caso, o espaçamento temporal entre interações é inferior ao caso anterior. A segunda gota incide sobre o filme de líquido formado pela primeira 12 ms depois. O ponto de impacto é mais próximo do que no caso anterior, ou seja, com um espaçamento entre impactos de 1.3 mm . Como se observa, a interação é diferente. Desta vez ocorre a ascensão de dois jatos mais finos, e formam-se gotas secundárias em maior número e com menor tamanho. No entanto, na fase final, visível para $\tau = 19.2$, surgiu uma gota secundária de maior dimensão que apresenta um diâmetro de 0.9 mm . A gota secundária mais rápida adquiriu uma velocidade de 1.5 m/s , valor ligeiramente inferior à velocidade de impacto da segunda gota que foi de 1.6 m/s .

No caso da Fig 4.14, as gotas incidem no filme líquido formado por uma gota prévia, quase em simultâneo, com os seus pontos de impacto distanciados de 2.5 mm . O resultado é a ascensão de duas coroas que atingem uma altura reduzida, mas dessa

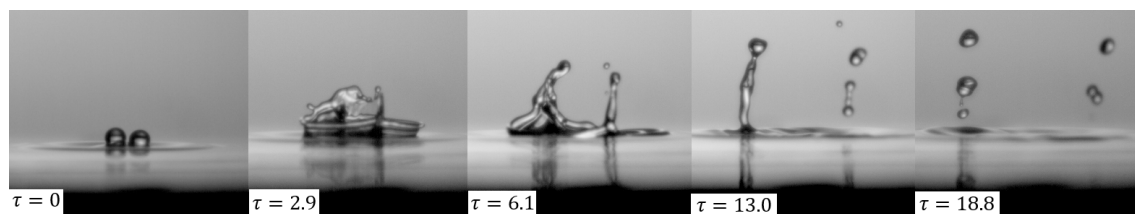


Figura 4.14: Interação entre os resultados de dois impactos goticulares. $We = 197$.

interação forma-se uma lamela ascendente, que se divide em dois jatos, atingindo o maior jato uma altura de 7.1 mm , valor duas vezes superior ao valor comum das coroas verificadas em impactos singulares, o que se poderia explicar pela soma das componentes verticais da velocidade de propagação das duas coroas em interação. A partir deste jato formam-se várias gotas secundárias de tamanho considerável, sendo que a maior gota secundária possui um diâmetro de, aproximadamente, 1.5 mm , enquanto a dimensão das gotas incidentes é de 2.1 mm . As velocidades destas gotas secundárias foram mais reduzidas neste caso, assumindo a mais rápida um valor de 0.4 m/s .

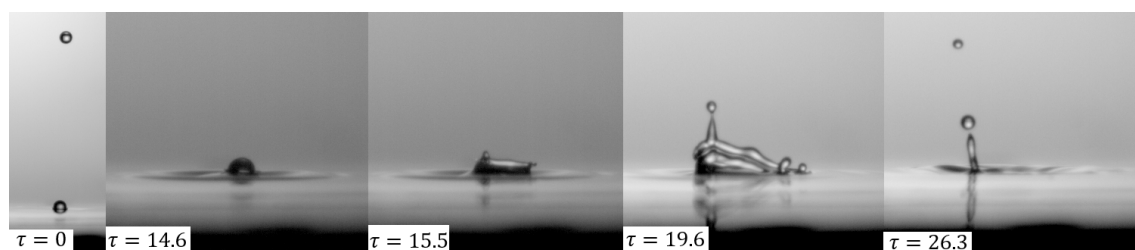


Figura 4.15: Interação entre os resultados de dois impactos goticulares, $We=189$.

Na Fig 4.15 está representada uma interação proveniente do impacto consecutivo de duas gotas quase no mesmo ponto, e com um intervalo de tempo de 18 ms . De forma semelhante à interação na Fig 4.12, surge uma coroa assimétrica e a ascensão de um jato inclinado no sentido da propagação dessa coroa. A atomização secundária resulta em gotas com diâmetro de, no máximo, 1.3 mm . A velocidade da gota secundária mais rápida foi de 0.6 m/s .

No caso da Fig 4.16, o desfasamento temporal é o mais significativo com a segunda gota a atingir a superfície 40 ms depois da primeira. De notar que a segunda gota atinge o filme que tem uma ligeira oscilação. Como resultado, o segundo impacto forma uma coroa com dimensões semelhantes às verificadas no impacto singular para as mesmas condições. No entanto, a ligeira instabilização induzida pela presença prévia de filme

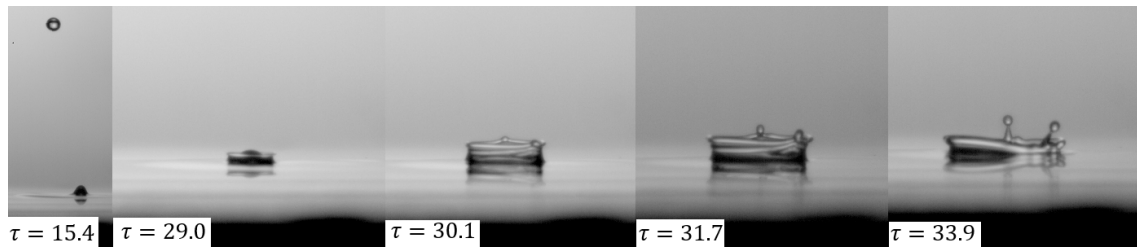


Figura 4.16: Interação entre os resultados de dois impactos giculares consecutivos, $We=169$.

líquido dinâmico leva a que esta coroa forme jatos em dois pontos que originam duas gotas secundárias com um diâmetro médio de 0.8 mm .

Nas Figuras 4.17 e 4.18, o filme líquido onde as gotas incidem é ligeiramente mais espesso. No caso da interação da Fig 4.17, a segunda gota atinge a superfície 23 ms após o primeiro impacto. Como é possível observar para o instante normalizado $\tau = 18.5$, ocorre a formação de uma bossa (*hump* como é designada na literatura), emergente após o colapso da coroa quando o líquido da gota retrocede depois de atingir a sua dimensão máxima. A bossa formada pela primeira gota chega a atingir uma altura de 2 mm . A segunda gota incide a uma distância de 2.6 mm dessa bossa, e da coroa formada pelo segundo impacto, que não ascende significativamente, logo, não se visualiza qualquer atomização.

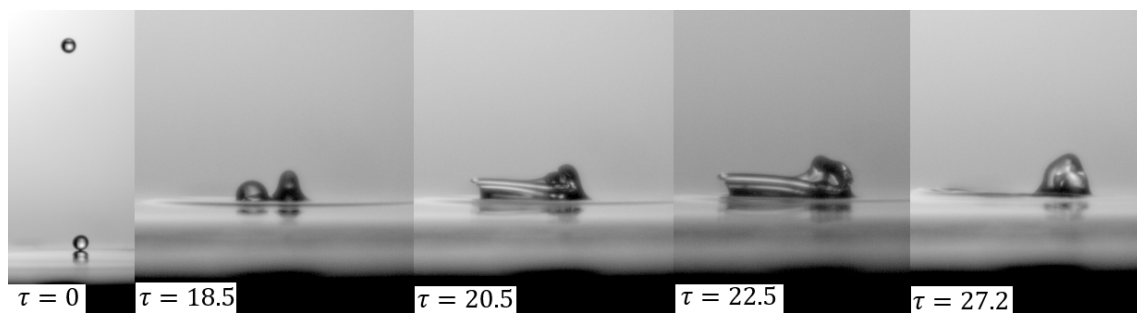


Figura 4.17: Interação entre os resultados de dois impactos giculares num filme líquido médio. $We=204$.

No caso do impacto observado na Fig 4.18, o desfasamento entre os impactos é pequeno, de tal modo que a segunda gota atinge a coroa formada pelo primeiro impacto. Parte da segunda coroa propaga-se, mas não atinge uma altura significativa. Não se observa qualquer atomização.

É possível afirmar que, para estes dois casos em que o filme de líquido era mais

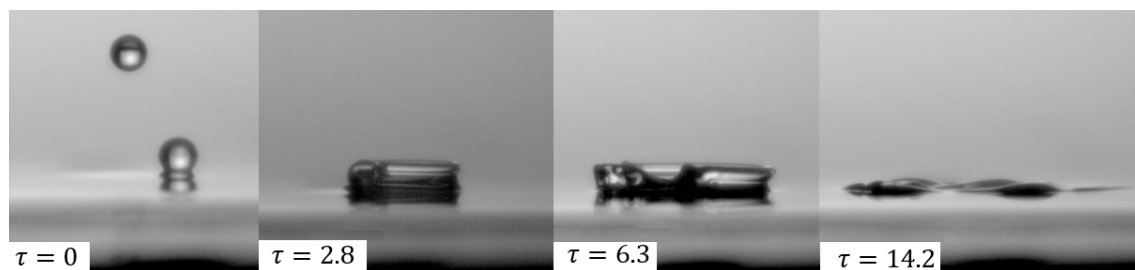


Figura 4.18: Interação entre os resultados de dois impactos goticulares num filme líquido médio. $We=168$.

espesso, não ocorrendo atomização secundária, sugere a influência da espessura do filme de líquido nesse processo. Assim, também nos múltiplos impactos de gotas, a espessura do filme desempenha um papel importante que deve ser tido em consideração no desenvolvimento de critérios para determinar a ocorrência de atomização secundária, assim como o tipo de estrutura formada após o impacto.

De modo a avaliar morfológicamente, o efeito que uma espessura maior do filme de líquido pode ter nas estruturas hidrodinâmicas associadas à interacção aquando dos múltiplos impactos, observou-se o impacto de uma gota, de modo a tê-lo como referência (ver Fig 4.19).

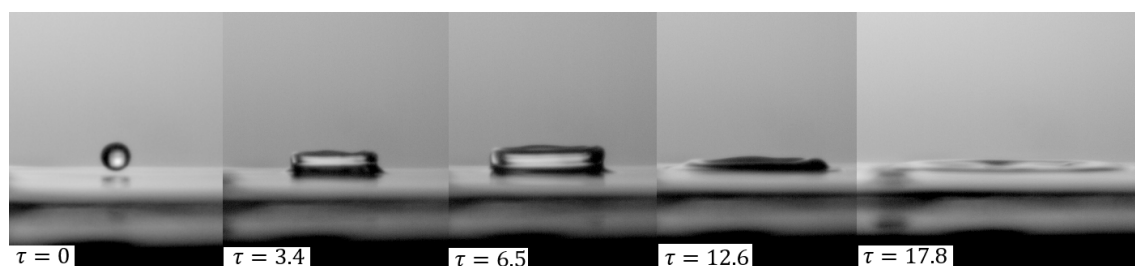


Figura 4.19: Impacto goticular singular num filme líquido grosso. $We = 197$.

Observa-se uma formação inicial de uma coroa, mas que se propaga pouco, misturando-se com o filme. A sua altura máxima é de 2 mm , valor inferior ao obtido para a espessura do filme mais fino. Os resultados das interações de impactos goticulares para este filme líquido estão representados nas Figuras 4.20 e 4.21. No caso da Fig 4.20, as duas gotas atingem o filme quase simultaneamente, distanciadas de 3.4 mm . Formam-se duas coroas e, a partir da interacção destas, formam-se dois jatos que atingem uma altura máxima de 4.9 mm . Comparando com a altura máxima dos jatos formados na interacção da Fig 4.14, a altura atingida no caso do filme mais grosso é 69% do valor

obtido para o caso do filme mais fino. No caso do filme mais grosso, estes jatos não libertam qualquer gota secundária, acabando por colapsar e depositar sobre o filme.

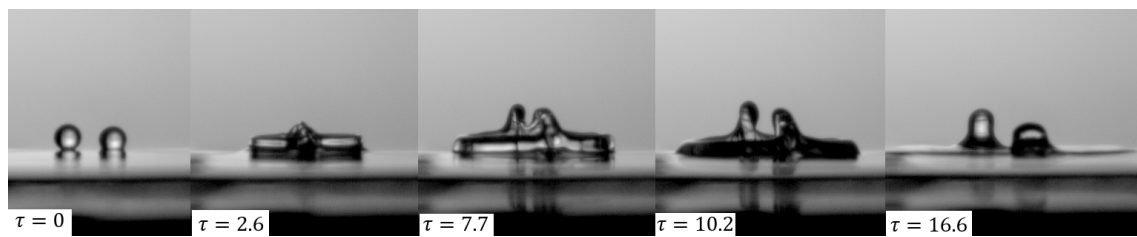


Figura 4.20: Interação entre os resultados de dois impactos goticulares num filme líquido grosso, $We=245$.

Após o colapso destes jatos, uma outra gota atinge o filme líquido em movimento, estando esse impacto representado na Fig 4.21. É possível observar a formação de uma coroa irregular com um jato inclinado para o lado esquerdo, sem qualquer tipo de libertação de gotas.

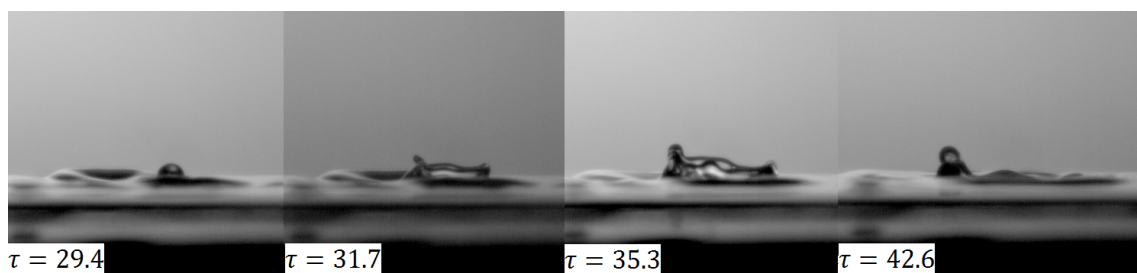


Figura 4.21: Interação entre os resultados de dois impactos goticulares num filme líquido grosso, $We=193$.

Pode-se concluir que, em condições abaixo do valor de Weber crítico, pode ocorrer atomização secundária desde que haja interação com uma outra gota ou estrutura hidrodinâmica. Conclui-se também que o filme mais grosso inibe a atomização secundária e altera de forma decisiva as dimensões das estruturas hidrodinâmicas geradas pela interação entre gotas devido a uma maior dissipação de energia pelo filme líquido.

5 Conclusões

O impacto de *sprays* é um fenómeno presente em diversas técnicas de arrefecimento de superfícies, pintura ou motores de combustão interna. Nestes últimos, o impacto de spray pode levar à deposição de um filme de líquido que afeta o consumo de combustível, bem como a emissão de poluentes, nomeadamente, hidrocarbonetos não queimados para a atmosfera. No sentido de otimizar os sistemas de injeção e câmara de combustão, o desenvolvimento de motores exige um conhecimento dos mecanismos hidrodinâmicos no impacto de gotas em superfícies secas e molhadas, bem como o efeito desse impacto sobre a transmissão de calor envolvida quando as superfícies estão aquecidas. Contudo, a maior parte dos modelos de impacto de *sprays* assentam em critérios que definem as transições entre os mecanismos hidrodinâmicos resultantes desse impacto em relação às gotas. Isto é, estas poderão depositar, refletir, espalhar-se pela superfície ou formar uma coroa e de instabilidades no seu bordo gerar gotas secundárias (mecanismo conhecido por *splash*). Esses critérios são usualmente definidos com base em experiências de gotas individuais. Porém, num spray, os múltiplos impactos de gotas implicam a interação entre elas, dando origem a mecanismos de atomização secundária não previstos no impacto de gotas individuais. O mesmo acontece quando a superfície está aquecida. Não só os mecanismos são afetados por essa condição fronteira, como pode ocorrer uma atomização secundária termicamente induzida pelo rebentamento de bolhas formadas por ebulição nucleada. Dada a complexidade dos fenómenos envolvidos e do carácter aleatório dos mesmos no impacto do spray, a fenomenologia associada à interação nos múltiplos impactos é diferente, bem como o efeito sobre a transmissão de calor. Assim, o objetivo desta dissertação consiste nos primeiros passos de um estudo mais aprofundado da interação entre múltiplos impactos de gotas tendo em conta a aleatoriedade entre impactos consecutivos e avaliar o efeito dessa interação na transmissão de calor e nos mecanismos hidrodinâmicos envolvidos. Para isso foram realizados diversos ensaios experimentais nos quais se impôs fluxos de calor elevados e instalou-se um gerador de gotas com a possibilidade de variar o caudal mássico debitado e, conseqüentemente, a

taxa de cadência de gotas. Realizaram-se ensaios experimentais, no sentido de quantificar os máximos fluxos de calor dissipados para várias taxas de cadência de gotas, para dois tipos de fluídos de arrefecimento diferentes.

Os ensaios experimentais com água e biocombustíveis evidenciam a presença de um regime de ebulição nucleada abaixo do fluxo crítico. Devido às propriedades dos diferentes líquidos, as temperaturas de estabilização para o biocombustível são superiores às da água. No caso dos ensaios com água, maiores taxas de cadência de gotas inibem uma eficiente remoção de calor devido à formação de um filme líquido sobre a superfície. Foram também captadas imagens que permitiram analisar morfológicamente a incidência da gota ($We = 28$) numa superfície quente e que diferenças existem na atomização secundária para duas temperaturas de superfície diferentes (150°C e 230°C). Claramente, a maior diferença é no tamanho das gotas secundárias formadas, com gotas secundárias formadas a 230°C de diâmetros 3 vezes superiores às formadas a 150°C . Com recurso às imagens também foi possível analisar o velocidade de avanço e diâmetro máximo atingido pelo bordo da coroa para os diferentes fluídos e para o caso da água, para diferentes temperaturas de superfície, sendo que tanto o diâmetro máximo e a velocidade de avanço do bordo foram observados para a gota de água a uma temperatura da superfície de 150°C . Foi analisada também a atomização secundária induzida pela interação entre gotas. Verificou-se que, para um impacto num filme líquido de uma gota com $We = 28$, nenhuma atomização secundária foi visível. A velocidade foi aumentada ($We = 125$) e obteve-se um impacto sem atomização secundária. No entanto, quando o impacto da gota é influenciado por outro impacto, a atomização secundária ocorre para as mesmas condições, $We = 125$. Foram analisadas várias imagens de interações entre gotas, mediram-se as dimensões e velocidades das gotas secundárias e identificadas algumas estruturas morfológicas destes impactos. Foi também verificada uma influência da espessura do filme líquido na atomização secundária, inibindo a ocorrência deste fenómeno.

Sugestões de trabalhos futuros

O estudo realizado neste trabalho faz parte de um projeto mais amplo que contempla a análise dos fluxos de dissipação de calor para o biocombustível que foi analisado. Sugere-se que uma análise mais completa seja feita a esse líquido de arrefecimento sendo

que para isso, será necessária a construção de uma outra instalação experimental que suporte as elevadas temperaturas necessárias para a correta análise de transmissão de calor desse fluido. Propõe-se também uma análise à interação de gotas, com o fluido do biocombustível mas para uma amostra maior de condições de impacto, maiores números de Weber e, se possível, realizar uma análise teórica aos resultados. Por outro lado, propõe-se também uma nova instalação ou técnica de medida que permita obter medições mais sensíveis às variações de temperatura , para identificar a influência das gotas secundárias na taxa de arrefecimento da superfície.

Bibliografia

- Bai, C. X., Rusche, H., & Gosman, A. D. 2002. Modeling of Gasoline Spray Impingement. *Atomization and Sprays*, **12**(1-3), 1–28.
- Carvalho, A. F. S. 2016. Teoria de informação e complexidade aplicadas à caracterização de sprays. *Departamento de Engenharia Mécânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Dissertação de Mestrado*.
- Chaves, H., Kubitzek, A. M., & Obermeier, F. 1999. Dynamic processes occurring during the spreading of thin liquid films produced by drop impact on hot walls. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **20**, 470–476.
- Correia, A. M. 2011. Desenvolvimento de sistemas de Intermittent Spray Cooling com sprays multijacto para a gestão térmica de equipamentos electrónicos de potência. *Instituto Superior Técnico, Dissertação de Mestrado*.
- Cossali, G. E., Coghe, A., & Marengo, M. 1997. The impact of a single drop on a wetted solid surface. *Experiments in Fluids*, **22**, 463–472.
- Cossali, G. E., Marengo, M., & Santini, M. 2004. Impact of a Single and Multiple Drop Array on a Liquid Film. *ILASS - Europe 2004, 19th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems , Nottingham, 2004*, 493–500.
- Cossali, G. E., Marengo, M., & Santini, M. 2004a. Drop array impacts on heated surfaces: secondary atomization characteristics. *XIX International Conference ILASS, Nottingham, 2004*.
- Cossali, G. E., Marengo, M., & Santini, M. 2005. Secondary atomisation produced by single drop vertical impacts onto heated surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **29**(8), 937–946.

- Cossali, G. E., Marengo, M., & Santini, M. 2008. Thermally induced secondary drop atomisation by single drop impact onto heated surfaces. *Multiphase Sci. Technol.*, **29**(1), 167–177.
- Halvorson, P. J., Carson, R. J., Jeter, S. M., & Abdel-Khalik, S. 1978. Critical heat flux limits for a heated surface impacted by a stream of liquid droplets. *Journal of Heat Transfer*, **116**(3), 679–685.
- Healy, W. M., Hartley, W. M., & S.I., S. I. Abdel-Khalik. 2001. On the validity of the adiabatic spreading assumption in droplet impact cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **44**, 3869–3881.
- Liang, G., & Mudawar, I. 2016. Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **101**, 577–599.
- Liang, G., Mu, X., Shen, S., Quan, S., & Zhang, J. 2016. Contact vaporization of an impacting drop on heated surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **74**, 73–80.
- Michiyoshi, I., & Makino, K. 1978. Heat transfer characteristics of evaporation of a liquid droplet on heated surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **21**, 605–613.
- Moreira, A. L. N., Moita, A. S., & Panão, M. R. 2010. Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much a single droplet impact research is useful? *Prog Energy Comb. Sci.*, **36**, 554–580.
- Mundo, C., Sommerfeld, M., & Tropea, C. 1995. Droplet-Wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow*, **21**(2), 151–173.
- Ozisik, M. N. 1985. Heat Transfer: A Basic Approach. *McGraw-Hill Book Company*.
- Pasandideh-Fard, M., Aziz, S. D., Chandra, S., & Mostaghimi, J. 2000. Cooling effectiveness of water drop impingement on a hot surface. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **22**, 201–210.

- Rioobo, R., Tropea, C., & Marengo, M. 2001. Outcome of drop impact on solid surfaces. *Atomization and Sprays*, **11**, 155–165.
- Roisman, I. V., Prunet-Foch, B., Tropea, C., & Vignes-Adler, M. 2002. Multiple Drop Impact onto a Dry Solid Substrate. *Journal of Colloid and Interface Science*, 396–410.
- Sawyer, M. L., Jeter, S. M., & Abdel-Khalik, S. 1997. Critical heat flux correlation for droplet impact cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40**(9), 2123–2131.
- Sawyer, M. L., Jeter, S. M., & Abdel-Khalik, S. 2008. Boiling heat transfer rates for small precisely placed water droplets on a heated horizontal plate. *Journal of Heat Transfer*, **130**(5), 054504.
- Shedd, T. A. 2007. Next generation spray cooling: High heat flux management in compact spaces. *Heat Transfer Engineering*, **28**(2), 87–92.
- Tropea, C., & Marengo, M. 1999. The impact of drops on walls and films. *Multiphase Sci. Technol.*, **11**(1), 19–36.
- Wachters, L.H.J., & Westerling, N.A.J. 1966. The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state. *Chemical Engineering Science*, **26**(11), 1047–1056.
- Yao, Shi-Chune, & Cai, K. Y. 1988. The dynamics and leidenfrost temperature of drops impacting on a hot surface at small angles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **1**(4), 363–371.
- Yarin, A. L. 2006. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing... *Annu Rev Fluid Mech*, **38**, 159–192.
- Yoon, S. S., & DesJardin, P. E. 2006. Modelling spray impingement using linear stability theories for droplet shattering. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **50**, 469–489.