



**FCTUC** FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Pressão de impacto em sprays multijacto aplicados a chuveiros**

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

**Autor**

**André Cesário Albuquerque Cardoso**

**Orientador**

**Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogal** 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, setembro, 2015**



## Resumo

O conforto sentido pela pressão de impacto da água no corpo humano durante o duche é um dos fatores que caracteriza o desempenho de um chuveiro. Neste estudo, o conceito de pressão de impacto entre o spray de gotas do atomizador multijato e o corpo do ser humano é analisado, de modo a aferir se este é uma boa opção em relação ao uso dos chuveiros convencionais, em termos do efeito da pressão de impacto sobre o conforto e do ponto de vista da redução do consumo de água.

Neste sentido, construiu-se uma instalação experimental que permite estudar o efeito da pressão de impacto exercida por um atomizador multijato com a distância. As experiências realizadas evidenciam que a pressão de impacto varia com o caudal volúmico e com a distância a que o atomizador se encontra do corpo humano, conferindo uma boa sensação de conforto, de acordo com os padrões que se encontram na literatura.

A análise baseada na pressão de impacto do spray multijato indica que a poupança de água prevista com o uso desta estratégia não compromete o conforto. Nomeadamente, a pressão de impacto diminui com a distância, embora não atinja valores inferiores ao mínimo exigido para o conforto da experiência de duche.

**Palavras Chave:** Pressão de impacto, Spray multijato, Chuveiro, Conforto, Experiência de um chuveiro



## Abstract

The comfort felt by the impact pressure of the water on the human body during the shower is one of the factors that characterizes the performance of a showerhead. In this dissertation, the main goal is to study the impact pressure between the spray produced by multijet atomization and the human body. It is analysed in this way to assess if this atomizer is a good option relatively to conventional showerheads, in terms of the effect of impact pressure on comfort, and from the point of view of reducing water consumption.

In this sense, an experimental installation has been built that allows to study the effect of impact pressure exerted by the atomizer with the distance of impact. The experiments performed evidence that the impact pressure varies with the flow rate and with the distance between the atomizer and the human body, allowing a good sensation of comfort.

The analysis based on the impact pressure of the multijet sprat indicates that the reduction in the amount of water used does not compromise comfort. Namely, the impact pressure decreases with the distance, but does not attains values below the minimum required for a comfortable shower experience.

**Keywords:** Impact pressure, Multijet spray, shower, Comfort, Shower experience



*Only one who devotes himself to a cause with his whole strength and soul can be a true master. For this reason mastery demands all of a person.*

*Albert Einstein*

*Aos meus pais e amigos*



## Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta resulta de todo o esforço realizado ao longo destes 5 anos sendo apenas possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

### *Ao meu orientador Miguel Rosa Oliveira Panão*

- Por todo o acompanhamento, esforço, ajuda e conhecimento que me forneceu ao longo desta tese.

### *Aos meus amigos e colegas*

- Sem estes acho que seria impossível concretizar este trabalho seja pela ajuda, seja pelo ânimo que me deram quando me senti mais desgastado, desanimado e pelas intermináveis horas de trabalho que realizámos em conjunto ao longo destes anos.

### *A toda a minha família*

- Por me ajudarem em tudo o que precisei ao longo de toda a minha vida e pelo apoio incondicional que depositaram em mim.

### *A Coimbra*

- Por todo o conhecimento que me foi atribuído pelo enorme e qualificado corpo de docentes da tua universidade. Por todos os momentos que me trouxeste sejam bons ou maus, obstáculos que se me depararam ao longo deste tempo em que vivi em ti, que me ajudaram a ser a pessoa que sou agora. Um grande obrigado a ti Coimbra, pode ser o culminar de uma fase da minha vida mas levarei em mim tudo o que me ensinaste, não é um adeus mas sim um até já...



# Conteúdo

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Conforto . . . . .	2
1.2 Chuveiros . . . . .	4
1.3 Noções sobre uma atomização multijato . . . . .	6
1.4 Pressão de Impacto . . . . .	8
1.5 Objetivos . . . . .	9
<b>2 Instalação e Metodologia Experimental</b>	<b>11</b>
2.1 Instalação experimental . . . . .	11
2.1.1 Atomizador . . . . .	12
2.1.2 Sensor de pressão . . . . .	14
2.2 Metodologia experimental . . . . .	16
<b>3 Análise e Discussão dos Resultados</b>	<b>19</b>
3.1 Pressão de Impacto do spray . . . . .	19
3.2 Considerações teóricas sobre a pressão de impacto de um spray . . . . .	22
<b>4 Sumário e Conclusões</b>	<b>25</b>



# Lista de Figuras

Figura 1.1	Exemplos de chuveiros: a) Convencionais; b) Assistidas a ar; c) Atomização de água (nebia.com) . . . . .	5
Figura 1.2	Esquema paramétrico de um spray causado por dois jatos [Panão & Delgado (2012)]. . . . .	7
Figura 1.3	Espectro da folha de líquido obtido quando $N_j = 2$ (Panão & Delgado, 2014). . . . .	8
Figura 2.1	Instalação Experimental . . . . .	12
Figura 2.2	Atomizador . . . . .	12
Figura 2.3	Representação do Atomizador com o sensor de Pressão . . . . .	13
Figura 2.4	Válvula de Regulação de Caudal . . . . .	14
Figura 2.5	Relação entre o caudal da rede e o caudal do atomizador. . . . .	14
Figura 2.6	Sensor de Pressão . . . . .	15
Figura 2.7	Membrana . . . . .	16
Figura 2.8	Desnível provocado pelo caudal de $4.29l/min$ a $10\text{ cm}$ de distância. . . . .	17
Figura 2.9	Gráfico RGB. . . . .	18
Figura 3.1	Efeito da distância de impacto do spray na variação da pressão de impacto com o caudal volúmico. . . . .	20
Figura 3.2	Comparação da pressão de impacto em função do caudal volúmico entre um chuveiro multijato e diversos chuveiros convencionais. . . . .	21
Figura 3.3	Gradiente de pressão de impacto ao longo da trajetória do chuveiro multijato. . . . .	22
Figura 3.4	Comparação da pressão de impacto teórica com os valores experimentais. . . . .	24



# Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Coefficiente de correlação resultante do tamanho médio de uma gota . . . . .	7
Tabela 1.2	Critérios de transição de <i>spread</i> para <i>splash</i> no impacto de gotas em filme de líquido. . . . .	9
Tabela 3.1	Resultados teóricos para a pressão dinâmica com base nas características estimadas para as gotas do spray. . . . .	23
Tabela 1	Pressão em função do caudal a 0.1m. . . . .	29
Tabela 2	Pressão em função do caudal a 0.2m. . . . .	29
Tabela 3	Pressão em função do caudal a 0.3m. . . . .	29
Tabela 4	Pressão em função do caudal a 0.45m. . . . .	30
Tabela 5	Pressão de impacto em função da altura. . . . .	30



# Nomenclatura

$A$	Área [ $m^2$ ]
$c_d$	Coefficiente de descarga
$d$	Diâmetro [ $mm$ ]
$d_{10}$	Diâmetro médio aritmético [ $mm$ ]
$E_{diss}$	Energia dissipada [ $J$ ]
$F$	Força [ $N$ ]
$g$	Aceleração gravítica ( $= 9.81m/s^2$ )
$h$	Desnível [ $mm$ ]
$h_f$	Espessura do filme de líquido [ $mm$ ]
$La$	Número de Laplace ( $= (\sigma \cdot \rho \cdot d) / \mu^2$ )
$L_{pi}$	Distância percorrida pelos jatos [ $mm$ ]
$N_j$	Número de jatos
$p_{dg}$	Pressão dinâmica da gota ( $= (1/2) \cdot \rho \cdot u_g^2$ ) [ $Pa$ ]
$p_i$	Pressão de impacto [ $Pa$ ]
$P_{imp}$	Pressão de impacto no sensor ( $= \rho \cdot g \cdot h$ ) [ $Pa$ ]
$P_{exp}$	Pressão de impacto obtida experimentalmente [ $Pa$ ]
$Q$	Caudal Volúmico [ $l/min$ ]
$res$	Resolução da imagem [ $\mu m/mm$ ]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]
$u$	Velocidade [ $m/s$ ]
$We$	Número de Weber ( $= (\rho \cdot u^2 \cdot d) / \sigma$ )
$Z$	Distância ao atomizador [ $cm$ ]

## Símbolos gregos

$\delta$	Relação ente $h_f$ e $d_g$ ( $= h_f/d_g$ )
$\theta$	Ângulo de incidência
$\mu$	Viscosidade dinâmica [ $kg/m \cdot s$ ]
$\rho$	Massa específica [ $kg/m^3$ ]
$\sigma$	Tensão superficial [ $W/m^2 \cdot K$ ]

## Subscritos

g	gota
j	jato

## Acrónimos

<i>EPA</i>	Agência Protetora do Ambiente Americana
<i>RGB</i>	RED-GREEN-BLUE

# 1 Introdução

A água é um dos elementos mais importantes da Natureza e indispensável à vida, em geral, e à saúde humana em particular, pelo que uma gestão sustentável do seu consumo é uma das prioridades ao nível mundial. Com o aumento da população e a alteração dos hábitos higiénicos, esse consumo aumentou substancialmente. A utilização ineficaz da água conduz ao risco de exaurir este recurso natural para as gerações vindouras e, assim, dar origem a problemas ecológicos e sociais graves. Em consonância com esta linha de preocupação, é relevante sensibilizar, consciencializar e educar a sociedade para a utilização da água de forma equilibrada. Daí a necessidade de reduzir ao máximo o seu consumo utilizando tecnologias e equipamentos adequados promovendo a qualidade de vida numa perspetiva integrada.

Em Portugal, pouco mais de 1/3 do consumo de água em habitação é consumida em chuveiros (Vieira *et al.*, 2007). E, mesmo se essa grandeza varia entre países, é reconhecido este tipo de consumo como um dos mais significativos. Aliás, em Zadeh *et al.* (2014) argumenta que os dois grandes motores do consumo de água em chuveiros são o *comportamento do utilizador* e a *eficiência tecnológica*. Como o primeiro fator possui um carácter subjetivo, não é fácil atuar a esse nível numa escala de tempo relativamente curta, o que não acontece no que diz respeito ao segundo fator. Daí a importância do desenvolvimento de tecnologias que reduzam o consumo de água em duche, que passa muito pelo design da cabeça de chuveiro, porém mantendo uma experiência de duche agradável. Nesse sentido, Alkhaddar & Phipps (2008) afirmam que uma "boa experiência de duche" tem como requisito principal um adequado escoamento de água pelo corpo, significando isso volume suficiente de água à temperatura de conforto que mantém o corpo aquecido e um enxaguar satisfatório. Em termos físicos, isso caracteriza-se pela:

- *caudal de água*: valor global e capacidade de o ajustar;
- *padrão do spray*: distribuição do spray ao longo da sua trajetória (cone de dis-

persão, "spray cone") e características das gotas (tamanho e velocidade);

- temperatura da água: valor à saída da cabeça de chuveiro, gradiente térmico com a distância e estabilidade;
- *pressão de impacto*: sensação de (des)conforto produzida pelas gotas ao incidirem no corpo humano.

A presente dissertação foca-se neste último aspeto.

A pressão de impacto da água proveniente de um chuveiro é uma grandeza escalar que mede a força de um determinado número de gotas que incide sobre uma determinada área, resultando numa sensação de conforto ou não. A questão que se coloca é: como quantificar algo subjetivo como o conforto associado à pressão de impacto de gotas no corpo humano.

### 1.1. Conforto

O conforto é um tema essencial para as sociedades atuais. Diariamente, as pessoas são confrontadas com estímulos comerciais que ligam produtos à noção de conforto. Nesta ótica, não é simples definir o conforto, uma vez que não existe uma definição universalmente aceite na literatura. A origem da palavra conforto vem do Latim *confortus*, particípio passado do verbo *confortare*, “fortalecer, conferir força”. Mais tarde adquiriu o sentido de “aliviar, aplacar, suavizar”. Inicialmente, esse foi o significado do francês *confort*, que no século XIII deu origem ao inglês *comfort* e, na língua portuguesa, à palavra *conforto*. Com a Revolução Industrial, o significado de conforto alterou-se considerando ser uma necessidade lícita e comprometida com a modernização. A partir da década de 50, a definição de conforto faz parte da apresentação de estudos ergonómicos. A primeira significação operacional para conforto, definiu conforto como “a ausência de desconforto”. Independentemente de muitos autores ainda utilizarem o desconforto como uma medida do conforto, outros julgam que existem poucas evidências de que o conforto seja a inexistência de desconforto. Nos dias de hoje, o conforto também é apresentado como um conceito associado ao prazer a “um estado prazeroso de harmonia fisiológica, física e psicológica entre o ser humano e o ambiente”, sendo que diferencia entre o sentimento de relaxamento e bem estar obtido

pelo conforto, enquanto o desconforto estaria relacionado a questões biomecânicas e fisiológicas.

O que os vários conceitos e definições têm em comum é a subjetividade e dependência da opinião do sujeito em um dado momento, por causas intrínsecas (utilizador) e extrínsecas (ambiente): a “apropriação testada pelo utente final durante ou logo após o uso do produto” que se manifesta de três formas: desconforto, conforto (ou confortável) e não desconforto. Assim, a questão do significado do conforto e quais as suas dimensões é um tema que propicia polêmica nos meios acadêmicos (Linden & Guimarães, 2005).

Do ponto de vista da engenharia, a subjetividade associada ao conforto dificulta a definição de valores limite que possam servir de critério na avaliação de um produto, como é o caso de cabeças de chuveiro. Aliás, a literatura é escassa quanto à relação entre “sensação de conforto” e pressão aplicada ao corpo humano. Num contexto muito diferente, pressão na pele aplicada por tecidos com fins terapêuticos, Liu *et al.* (2005) define diversos níveis de pressão: *leve* (1333 – 2133Pa) para prevenir veias varicosas/trombose/fadiga; *pequena* (2453 – 3333Pa) para curar pequenas varicosidades/dores musculares/varises iniciais durante a gravidez; *moderada* (3346 – 4000Pa) para curar veias varicosas moderadas/edemas; e *forte* (4853 – 5333Pa) para curar sérias veias varicosas/edemas graves/úlceras nas pernas/patologias linfáticas. Porém, a escala encontrada nos poucos trabalhos que referem a ligação entre conforto e pressão de impacto de um chuveiro aponta para uma ordem de grandeza inferior.

O relatório da Agência Protetora do Ambiente americana (EPA), com base em inquéritos feitos a diversos utilizadores, indica que a força mínima exigida a um spray de chuveiro para garantir conforto é de  $0.56N$ , avaliada a uma distância de  $0.4572m$  (18"), resultando numa pressão de impacto de  $p_i = 3.4Pa$  (WaterSense, 2010), ou seja, um valor muito abaixo daquilo que se obtém usualmente para chuveiros ( $20 < p_i < 300Pa$ , Alkhaddar *et al.* (2007)). Porém, estes valores assentam numa estratégia de dispersão de água recorrendo a jatos e não gotas. E, ainda que esses jatos destabilizem para formar gotas quando incidem na pele, essas possuem um tamanho maior do que as gotas produzidas por processos de atomização à saída da cabeça de chuveiro.

### 1.2. Chuveiros

O princípio desta tese é o de fazer uma ligação entre o conforto do utilizador (através do estudo da pressão de impacto) e a poupança de água. Em média gastamos  $35l/dia/pessoa(l/d/p)$  de água por dia se tomarmos um duche, enquanto que num banho chega a gastar-se perto de  $80l$  (Alkhaddar & Phipps, 2008). É claro que os valores variam entre países; por exemplo, enquanto no Reino Unido há dados que apontam para um gasto de  $12l/d/p$  e no Brasil  $55l/d/p$ , Portugal situa-se em cerca de  $44l/d/p$  (Vieira *et al.*, 2007). O gasto de água recomendado deveria rondar os  $15l/dia/pessoa$  (Gleick, 1996), quase 3 vezes inferior ao valor atualmente obtido em média para o caso português.

Temos duas soluções para resolver este problema: 1) ou se reduz o tempo dispendido a tomar banho, embora esse possa variar dependendo de aspetos relacionados com a higiene pessoal, como por exemplo o tempo necessário para retirar os produtos usados no cabelo, que, no caso dos utilizadores de cabelo comprido, se prolonga um pouco mais; 2) ou se reduz o coeficiente de descarga ( $c_d$ ), introduzindo uma perda de carga, isto é, o commumente designado por redutor de caudal. No primeiro caso, por exemplo, a Unilever está a tentar desenvolver champôs de cabelo que sejam mais fáceis de remover, promovendo assim, potencialmente, uma redução do tempo necessário para se estar no chuveiro (reduzindo desta forma a quantidade de água utilizada) (Critchley & Phipps, 2007). Mas a opção mais comum é a segunda. Como já é do conhecimento público, cada cabeça de chuveiro tem o seu tipo de dispersão de água, mas usualmente a estratégia envolve jatos, embora tenhamos os mais variados padrões e designs, sendo que estes variam consideravelmente na sua capacidade de conseguir manter os seus padrões quando o caudal é alterado. Ultimamente, a atomização da água em gotas tem emergido como uma estratégia de duche que potencialmente reduz o consumo de água (Panão & Delgado (2012) e Nebia (2015)).

Apesar do caudal poder ser reduzido com a introdução de uma simples restrição no fluxo, isto pode levar a consequências indesejáveis (como exemplo temos os sistemas de habitação para o aquecimento de água necessitam de um caudal mínimo para funcionar, sem este caudal mínimo não obtemos água quente, causando desconforto), devido à ligação existente entre o fluxo e as suas propriedades (Critchley & Phipps, 2007).

Naturalmente, parece que a forma mais eficaz de se conseguir uma poupança de água será através do design da cabeça de chuveiro de forma a esta reduzir o caudal, mantendo a satisfação dos utilizadores quanto à experiência de duche. A Fig. 1.1 apresenta exemplos de algumas cabeças de chuveiro, desde as mais convencionais (a), às que introduzem ar no jato como forma de proporcionar conforto e obter alguma poupança de água (b) e uma que aplica a atomização como estratégia inovadora de redução do consumo de água (c).



**Figura 1.1:** Exemplos de chuveiros: a) Convencionais; b) Assistidas a ar; c) Atomização de água (nebia.com)

Os chuveiros designados por convencionais são os que mais se utilizam em habitações particulares, mas não são os mais eficientes. Isto advém do facto de serem chuveiros que debitam água através de jatos com uma velocidade inversamente proporcional ao seu número, porém, com um coeficiente de descarga aproximadamente igual a  $c_d \approx 1$ , logo a poupança de água que poderia existir pelo design é quase inexistente.

Os chuveiros assistidos a ar, introduzem o que se designa por “fração de vazio” (*void fraction*) nos jatos de água, fazendo com que a aparência do volume de “líquido” seja aproximadamente a mesma, fomentando uma poupança de água que pode mesmo chegar a cerca de 35% em relação aos chuveiros convencionais, enquanto mantêm uma sensação de limpeza e conforto. Porém, as limitações quanto à área de corpo coberta tendem a produzir dispositivos relativamente grandes e custosos (como se observa na Fig. 1.1b).

Por fim, os chuveiros que atomizam água em gotículas favorecem um aumento da relação “área coberta”-“volume de água dispendido”, ou seja, a água chega a uma maior área zona do corpo sem que o utilizador se dê conta de que consome, efetivamente, menos água. Essa poupança pode chegar a cerca de 70% em relação ao caudal usado

em chuveiros convencionais, sem comprometer a sensação de limpeza e a facilidade de se retirar os produtos de higiene que se utilizam durante o duche. É no contexto desta estratégia que se insere o trabalho desenvolvido nesta dissertação, nomeadamente, no que diz respeito à estratégia de atomização que será aprofundada na secção seguinte.

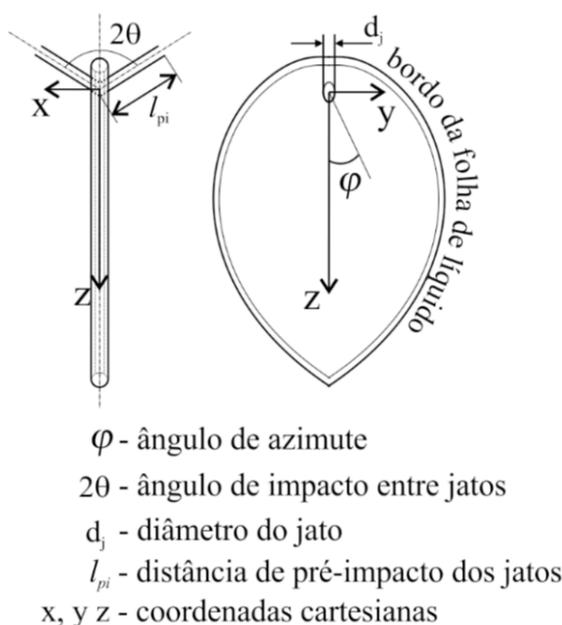
### 1.3. Noções sobre uma atomização multijato

A atomização multijato origina, tal como o nome sugere, um spray de gotas produzidas pelo impacto simultâneo de um determinado número de jatos ( $N_j$ ). Após o impacto do jatos, forma-se uma folha de líquido e a partir de instabilidades no bordo geram-se ligamentos e da desintegração dos ligamentos se formam as gotas (Panão & Delgado, 2014). É uma estratégia de atomização que funciona a uma baixa pressão de injeção, relativamente a outros atomizadores. Por exemplo, quando usada em injetores Diesel reduz a pressão de injeção de uma ordem de grandeza para obter gotas com as mesmas características. Assim, aplicada a chuveiros, permite obter um spray de gotas com caudais relativamente baixos ( $\approx 1.5l/min$ ).

Neste estudo empregou-se a atomização multijato baseada em pares de dois jatos. Podemos analisar o spray, nomeadamente, os jatos que o descrevem, partindo das características dos mesmos, tais como o diâmetro  $d_j$  e a velocidade do jato  $u_j$ , a distância percorrida pelos jatos até ao impacto num ponto  $L_{pi}$ , o ângulo de incidência dos jatos  $2\theta$ , as propriedades físicas do líquido - massa volúmica, viscosidade cinemática e tensão superficial - e as condições do meio ambiente (Fig. 1.2)

Visto que o valor de  $d_j$  faz parte do design do atomizador e, por isso, é conhecido, para estimar o diâmetro médio das gota produzidas, recorre-se a correlações empíricas entre as características das gotas e a geometria do atomizador. Segundo Panão & Delgado (2014), a relação entre o diâmetro médio aritmético e o diâmetro do jato, pode ser expressa em função da dinâmica do jato através do número adimensional de Weber ( $We_j = \frac{\rho u_j^2 d_j}{\sigma}$ ), em que  $\rho$  e  $\sigma$  correspondem à massa específica e tensão superficial do líquido, respetivamente, e da geometria do atomizador expressa em função do ângulo entre os jatos no mesmo plano ( $2\theta$ ):

$$\frac{d_{10}}{d_j} = a \cdot We_j^b \cdot f(\theta)^c \quad (1.1)$$



**Figura 1.2:** Esquema paramétrico de um spray causado por dois jatos [Panão & Delgado (2012)].

em que  $f(\theta) = (1 - \cos(\theta))^2 / \sin(\theta)^3$ . Seguindo os resultados apresentados por Panão & Delgado (2014), que estão particularmente orientados para sprays multijatos com baixos caudais, os coeficientes assumem os valores sintetizados na Tabela 1.1.

Equação	a	b	c	$R^2$
(1.1)	2.0795	-0.151	-0.1635	0.6324

**Tabela 1.1:** Coeficiente de correlação resultante do tamanho médio de uma gota

Uma vez estimada a razão  $d_{10}/d_j$ , determina-se o diâmetro  $d_{10}$  com base no diâmetro projetado para os jatos. Um outro aspeto refere-se à velocidade. Na Fig. 1.3 estão representados os vetores de velocidade das gotas produzidas. De acordo com Panão & Delgado (2014), para a configuração do atomizador usado no presente trabalho, em média, a velocidade das gotas é  $u_g/u_j = 2.8669 \times We_j^{-0.15678}$ . Pelo facto desta correlação ter sido desenvolvida para caudais menores do que os previstos para este trabalho, far-se-à uma extrapolação dos resultados. Porém, tanto quanto foi possível consultar na literatura, é o único trabalho que apresenta, até à data desta dissertação, correlações

para a velocidade das gotas em atomização multijato.



**Figura 1.3:** Espectro da folha de líquido obtido quando  $N_j = 2$  (Panão & Delgado, 2014).

A questão que se coloca é, tratando-se de gotas com uma determinada velocidade, qual será a pressão de impacto produzida na pele. É sobre essa característica da "experiência de duche" aplicada a sprays multijato que será dedicada a próxima secção.

### 1.4. Pressão de Impacto

A pressão como é do conhecimento geral corresponde a uma força aplicada sobre a uma determinada área, sendo que esta pode ser obtida através de instrumentos como o barómetro, transdutor de pressão piezoelétrico, manómetro ou um medidor de vácuo. Neste caso, o spray de gotas incidirá sobre o corpo humano e a análise da pressão de impacto é local. Assim, existem diversos mecanismo hidrodinâmicos associados ao impacto de uma gota. Essa pode “colar” à superfície (*stick*); refletir (*rebound*); espalhar-se na forma de um disco (*spread*); e gerar uma atomização secundária por *splash*. A ocorrência destes mecanismos depende essencialmente da comparação entre a energia cinética e a de superfície das gotas, expressa pelo número adimensional de Weber para as características da gota incidente,

$$We_g = \frac{\rho u_g^2 d_g}{\sigma}$$

em que  $u_g$  e  $d_g$  correspondem à velocidade e ao diâmetro da gota, respetivamente. Para a gama de valores típica do spray multijato, os regimes mais importantes serão o de espalhamento (*spread*) e o *splash*.

Existem diversos critérios de transição, mas os mais recorrentes na literatura são sumarizados na Tabela 1.2.

**Tabela 1.2:** Critérios de transição de *spread* para *splash* no impacto de gotas em filme de líquido.

Referência	Critério	
Bai <i>et al.</i> (2002)	$We_c = 1320La_g^{-0.183}$	
Wang <i>et al.</i> (2002)	$0.1 < \delta \leq 1$	$We_c = 1375.7\delta + 340$
	$\delta > 1$	$We_c = 1043.8 + 232.6/\delta - 1094.4/\delta^2 + 1576.4/\delta^3$

Na tabela,  $La_g = \frac{\sigma \rho d_g}{\mu^2}$  corresponde ao número de Laplace, que relaciona as forças de tensão superficial e as viscosas, e  $\delta = h_f/d_g$  à razão entre a espessura do filme de líquido ( $h_f$ ) e o diâmetro da gota incidente ( $d_g$ ).

Em qualquer um destes, poder-se-ia considerar, em primeira instância, que toda a pressão dinâmica da gota

$$p_{dg} = \frac{1}{2} \rho u_g^2 \quad (1.2)$$

se converte em pressão de impacto ( $p_i$ ). Porém, isso não é aproximado da realidade, pois, associado à formação de filme de líquido, bem como ao impacto nesse filme, está associada dissipação de energia em termos viscosos e de tensão superficial ( $E_{diss}$ ), pelo que apenas parte da energia cinética será traduzida na energia de impacto. Em modelos numéricos de impacto de sprays, como em Bai *et al.* (2002), a energia dissipada contabiliza-se por ser o máximo entre 80% da energia cinética, ou o resultado de uma expressão. Assim, significa que o mínimo admissível são os 80% da energia cinética de impacto da gota num filme de líquido.

## 1.5. Objetivos

Esta dissertação pretende caracterizar a pressão de impacto obtida por um chuveiro produzido com base num atomizador multijato, tendo em conta a distância entre o atomizador e uma superfície, bem como o caudal injetado. O estudo da aplicação

de uma tecnologia de atomização no projeto de uma cabeça de chuveiro pretende promover a redução do consumo de água gasto num duche, mantendo um nível de conforto aceitável para um banho.

Para isso foi elaborada uma instalação laboratorial que permitisse medir a pressão de impacto do chuveiro para diversas alturas entre a saída de água do atomizador e um sensor de pressão de tubos desenvolvido para o efeito. Para cada posição, foram realizados ensaios para diferentes valores de caudal. Através da análise e discussão dos resultados, pretende-se determinar linhas orientadoras para o design deste tipo de sistemas, verificando a sua viabilidade.

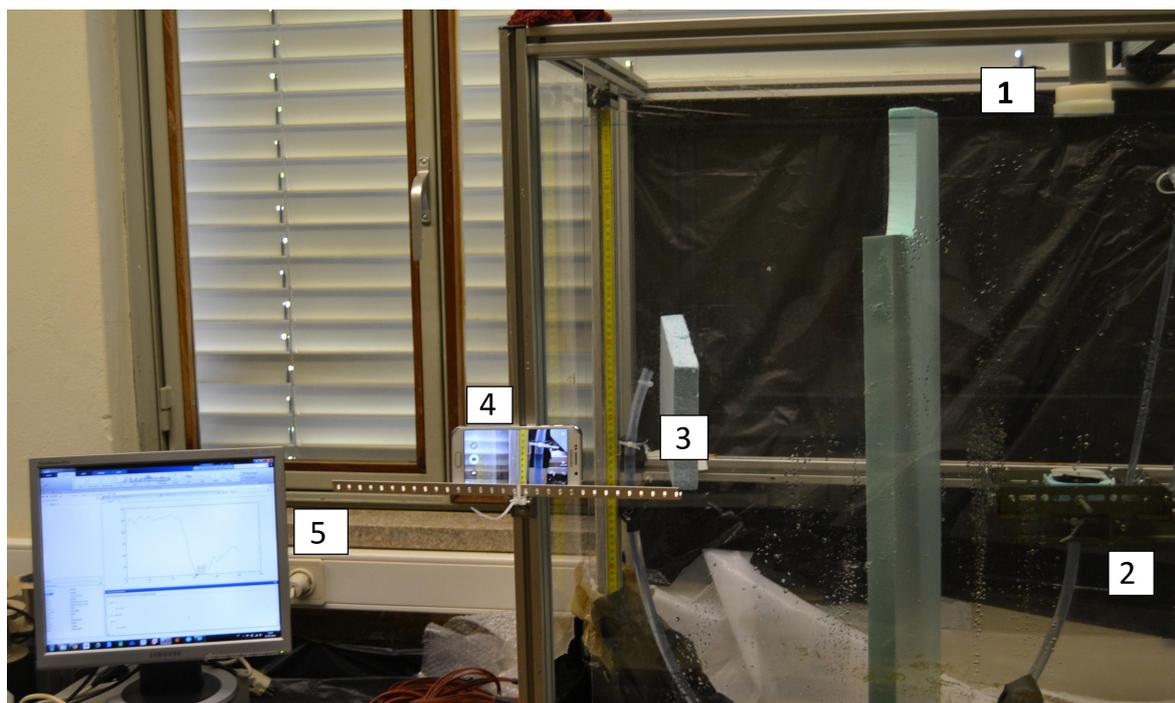
## 2 Instalação e Metodologia Experimental

Para caracterizar a pressão de impacto de um chuveiro com a particularidade de utilizar a atomização multijacto como forma de dispersar a água, construiu-se uma instalação experimental que pretende simular a incidência do spray no corpo humano, assumindo, como foi antes referido, um modelo geométrico simplificado do impacto numa superfície horizontal. Partindo deste princípio podemos assumir que esta experiência seria em tudo semelhante ao que acontece num duche. Neste capítulo são descritos os vários componentes da instalação, bem como a metodologia experimental usada neste trabalho.

### 2.1. Instalação experimental

A instalação experimental é constituída por: um atomizador que produz um spray multijato; um sensor de pressão de membrana (usada num funil de vidro); um sistema de atravessamento montado numa estrutura que permite definir a altura entre a saída da água e o atomizador; e uma válvula de regulação de caudal. A Fig. 2.1 mostra a instalação na sua globalidade e seus componentes.

- 1: Atomizador - Cabeça de Chuveiro em estudo;
- 2: Sensor de pressão - Manómetro de Tubo;
- 3: Zona de medição/régua - Onde se mede a pressão de impacto por variação da altura da coluna de água;
- 4: Câmara - Para a obtenção de imagens do deslocamento de água;
- 5: Computador - Para o tratamento de imagens e análise dos resultados.



**Figura 2.1:** Instalação Experimental

### 2.1.1. Atomizador

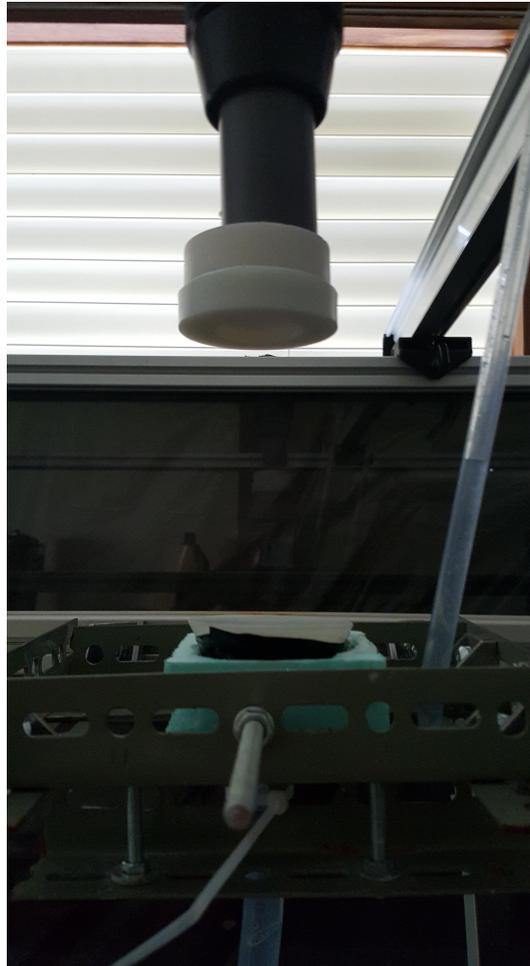
O atomizador usado neste trabalho possui um design único, sendo que, no futuro, poderá estar sujeito a patente. Logo, a informação das suas características inserida neste documento é limitada por questões de confidencialidade (Fig. 2.2). O design foi realizado com base no trabalho de Panão & Delgado (2014).



**Figura 2.2:** Atomizador

Este tem a particularidade de atomizar água, produzindo um spray, com um caudal relativamente reduzido e produzir uma sensação de conforto que se pretende avaliar.

O efeito de spray é obtido por impacto de jatos existentes na base do atomizador. Em termos de posicionamento, o atomizador é mantido na vertical, de forma a estar sempre nivelado enquanto as experiências estivessem a decorrer como pode ser visto através da Fig. 2.3.



**Figura 2.3:** Representação do Atomizador com o sensor de Pressão

O spray produzido apresenta uma dispersão de gotas relativamente uniforme com um ângulo suficiente para cobrir o corpo.

### **Calibração do coeficiente de descarga do atomizador**

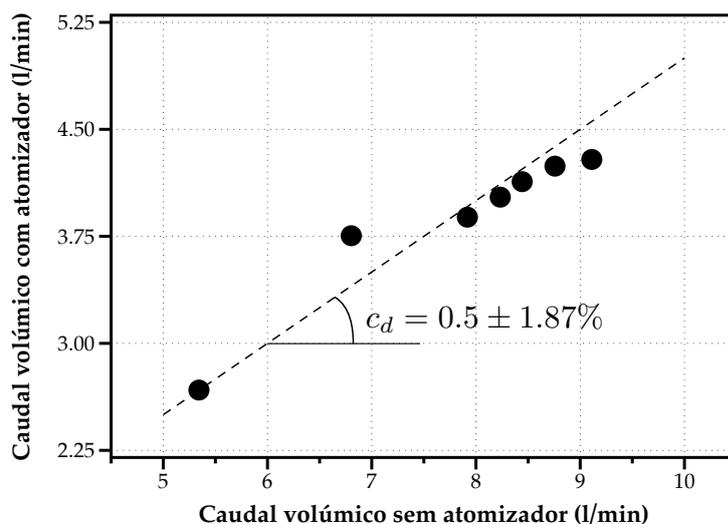
Para calibrar o coeficiente de descarga do atomizador é necessário variar o caudal. Para isso recorreu-se à instalação de uma válvula de regulação de caudal (Fig. 2.4).

A calibração do coeficiente de descarga ( $c_d$ ) do atomizador foi feita utilizando um recipiente de 5l. Nesse recipiente fizeram-se marcações de 1.5l em 1.5l, calibradas utilizando a massa específica da água ( $\rho$ ) à  $T_{amb}$  de 25°C.



**Figura 2.4:** Válvula de Regulação de Caudal

Foram realizados 9 ensaios para a obtenção de cada caudal, com e sem atomizador, para 7 posições da válvula reguladora de caudal. A calibração pode ser vista na Fig. 2.5. onde são apresentado os caudais médios dos ensaios realizados, com e sem atomizador, em que obteve uma incerteza entre 0.14 – 2.99% em relação à média com um intervalo de confiança de 95%.



**Figura 2.5:** Relação entre o caudal da rede e o caudal do atomizador.

O coeficiente de descarga médio obtido foi  $c_d = 0.50 \pm 1.87\%$ , o que significa uma redução de caudal de 50% em relação ao caudal da rede.

### 2.1.2. Sensor de pressão

O sensor de pressão é um manómetro de membrana (Fig. 2.6). Os manómetros são geralmente instrumentos simples que permitem medir a diferença de pressão entre dois pontos num fluido considerado incompressível e estático, esta medição é possível



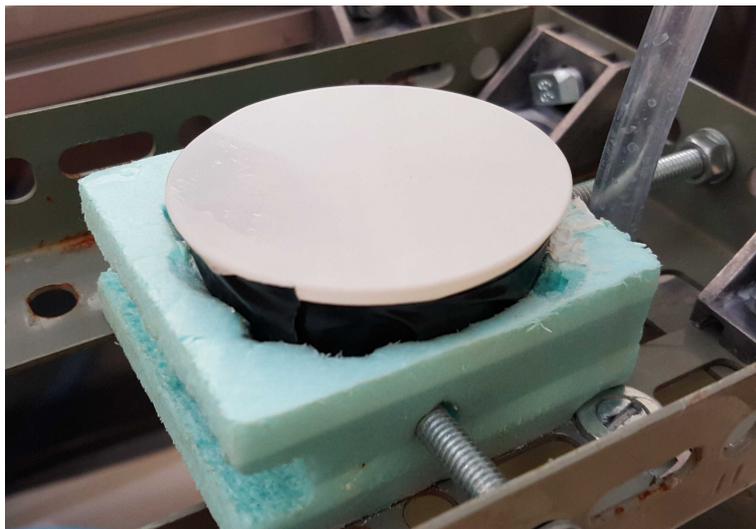
**Figura 2.6:** Sensor de Pressão

através da diferença de alturas entre os dois pontos considerados, em que um deles está à pressão atmosférica. O manómetro de membrana desenvolvido possui um funil de vidro tapado com uma membrana (Fig. 2.7) ligado a um tubo disposto em forma de U. Depois de introduzida a água, o funil fica totalmente cheio e a posição da extremidade aberta à pressão atmosférica é ajustada, de modo a assegurar que a membrana está na horizontal, sem qualquer curvatura. Assim, a água em ambas as extremidades está à pressão atmosférica. Qualquer deformação na membrana flexível altera a altura da coluna de água, permitindo medir o diferencial de pressão causado pelo impacto do spray. A extremidade do tubo aberta ao ar está junto a uma régua que permite medir qualquer variação da altura. O registo dessa alteração é fotográfico, gravando digitalmente a altura antes e após o impacto do spray.

A pressão de impacto exercida sobre o sensor pode ser obtida através de

$$P_{imp} = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$

em que  $\rho$  corresponde à massa específica de água,  $g = 9.81m/s^2$  à aceleração da gravidade e  $h$  à altura medida por análise de imagem descrita na secção seguinte.



**Figura 2.7:** Membrana

## 2.2. Metodologia experimental

As experiências realizadas têm o intuito de quantificar o efeito que a distância entre a cabeça do chuveiro e o corpo humano, bem como o caudal, têm sobre a pressão. Pretende-se aferir se a redução do caudal associada a um tipo de chuveiro baseado na atomização de líquido, neste caso, um atomização multijato, corresponde positivamente, ou não, aos níveis de conforto esperados numa experiência de chuveiro.

As alturas consideradas são 10, 20, 30 e 45 *cm*, sendo que o último valor é o recomendado na literatura para aferir a pressão mínima exigida para conforto num duche (WaterSense, 2010). Assim, o protocolo de cada ensaio experimental possui os seguintes passos:

1. Ajustar o sensor à distância de medição pretendida;
2. Garantir que a membrana se encontra sem curvatura, seca e paralela à base do atomizador;
3. Obter imagem do nível sem atomização;
4. Abertura da válvula de regulação de caudal num dos sete caudais ;
5. Deixar correr a água durante dez segundos para garantir estabilização do caudal à saída do atomizador, verificando se a zona de leitura não apresenta oscilações que possam influenciar as imagens retiradas para posterior análise;

6. Obter imagem do desnível;
7. Alterar o caudal;
8. Realizar o protocolo acima descrito para os sete caudais em estudo, mantendo todas as condições exigidas. As fotografias são todas realizadas à mesma distância e com um zoom digital (x 2.5) .
9. Após a aquisição de todas as imagens referentes aos vários caudais para a mesma distância ao atomizador (Z), procede-se à alteração dessa distância, repetindo os passos até este;

Para medir a pressão de impacto que gerou o desnível contido nas imagens adquiridas, realizou-se uma análise de processamento de imagem em MATLAB.

### Análise de processamento de imagem

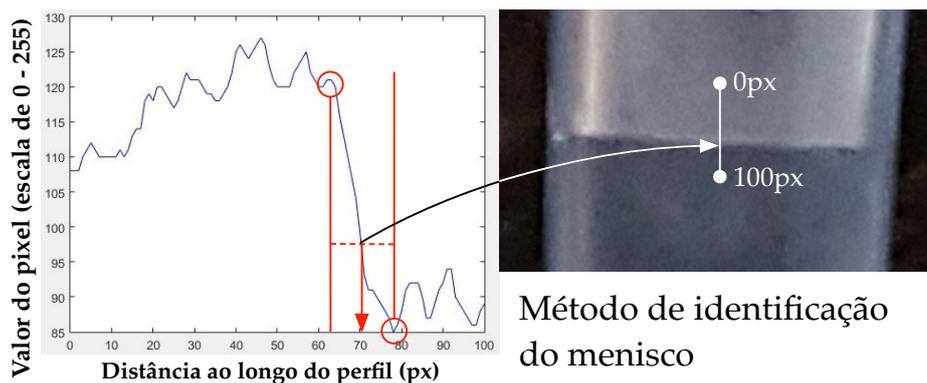
A análise começa por obter a resolução da imagem a partir da de referência obtida para cada altura. Para isso contabiliza-se o número de píxeis em linha reta existente entre  $1mm$  visualizado na régua. Uma vez que todas as imagens foram retiradas nas mesmas condições, a resolução que se obteve e foi utilizada ao longo da análise de imagem foi de  $31\mu m/pixel$ . Uma vez que os deslocamentos são da ordem do mm, a resolução aponta para uma precisão na medida da ordem das centésimas de milímetro. A Fig. 2.8 mostra sucintamente a forma como é medido o desnível. A partir da imagem de referência obtém-se  $y_0$  e cada imagem com spray incidente produz pressão que eleva o desnível a  $y_1$ , logo, a altura pretendida é  $h = y_1 - y_0$ .



**Figura 2.8:** Desnível provocado pelo caudal de  $4.29l/min$  a  $10\text{ cm}$  de distância.

Porém, para obter uma localização mais precisa, recorre-se à análise da evolução dos valores dos píxeis, em termos das cores fundamentais, uma vez que as imagens são RGB (*Red-Green-Blue*).

A partir do perfil dos valores dos píxeis (escala de 0 - 255 para cada cor), o menisco localiza-se entre o valor máximo de Y a partir do qual há um decréscimo acentuado



**Figura 2.9:** Gráfico RGB.

do valor dos píxeis, e o mínimo. O menisco identifica-se como estando a metade desse mesmo decréscimo, para isso recorremos à função da mediatriz para o localizar. A Fig. 2.9 ilustra o método utilizado.

Este processo é realizado para todas as imagens, sendo que, após a localização do menisco em cada uma, faz-se a diferença entre os meniscos a multiplicar pela resolução (Fig. 2.8)

$$h = (y_1 - y_0) \cdot res$$

obtendo assim a distância em milímetros do desnível. A pressão de impacto do spray obtém-se a partir da que está associada ao peso da coluna de água deslocada, de acordo com a Eq. 2.1. Este processo é realizado para as imagens obtidas para cada altura e caudal.

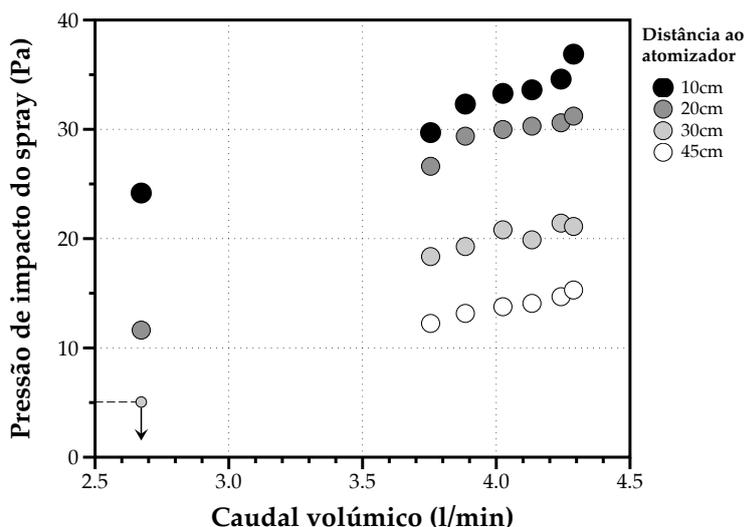
## 3 Análise e Discussão dos Resultados

Este capítulo é dedicado à caracterização da pressão de impacto para vários caudais ao longo da trajetória do spray. Analisa-se também a pressão teórica exercida por uma gota sobre a área do sensor e faz-se discussão dos resultados obtidos experimentalmente do ponto de vista do conforto.

### 3.1. Pressão de Impacto do spray

As condições de operação definidas incluem uma variação do caudal de 2.65 – 4.52l/min para distâncias de impacto de 10 – 45cm. A Fig. 3.1 sintetiza os resultados obtidos para os diversos ensaios experimentais. A diferença grande entre o primeiro valor de caudal e o segundo deve-se a uma limitação da válvula reguladora de caudal. Esta indica 6 estados de funcionamento, em que o primeiro corresponde já a  $Q = 3.4l/min$ , pelo que se procurou antes desse estado, o caudal a partir do qual existe atomização para a configuração do protótipo, resultando em  $Q = 2.65 l/min$ . Ou seja, neste protótipo, um caudal inferior a este não produz atomização. É por isso que, na Fig. 3.1, a pressão de impacto, tendo em conta o menor caudal volúmico para distâncias superiores a 30cm, torna-se de tal forma pequena ( $< 5 Pa$ ) que o erro que estava associado às medições tornava a técnica de tratamento de imagem e de medida desadequadas, não sendo possível realizar medições dado os muito baixos valores de pressões de impacto.

Os resultados obtidos evidenciam que, dos dois parâmetros em estudo, o que produz um efeito dominante sobre a pressão de impacto é a distância ao atomizador. De facto, a pressão de impacto de um sistema convencional varia com o caudal volúmico debitado e com o número de jatos à saída da cabeça de chuveiro. Em relação ao caudal, essa pressão depende, essencialmente, da pressão dinâmica do líquido e esta depende do quadrado da velocidade que, por sua vez, é proporcional ao caudal ( $Q = A \cdot u$ ), assumindo que a área não varia. Logo, uma variação de caudal exerce uma variação



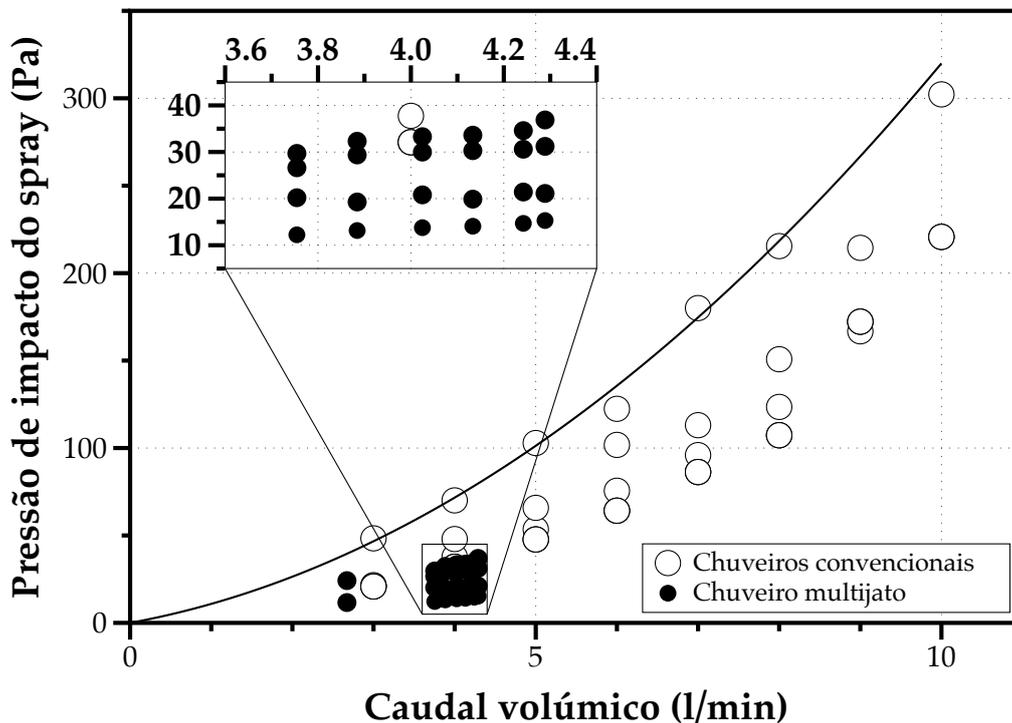
**Figura 3.1:** Efeito da distância de impacto do spray na variação da pressão de impacto com o caudal volumétrico.

quadrática na pressão dinâmica do jato e, conseqüentemente, sobre a pressão de impacto. É por esse motivo que muitos chuveiros alteram a pressão, alterando o número de jatos, ou seja, o caudal em cada um. Por outro lado, uma pequena experiência com um chuveiro convencional mostra que a pressão sentida no corpo quando os jatos de água incidem nos ombros aumenta se nos formos afastando da cabeça de chuveiro. Portanto, num sentido empírico, em chuveiros convencionais, o gradiente de pressão ao longo da trajetória é positivo. Porém, com um atomizador multijato, os resultados evidenciam precisamente o contrário. Neste caso, os jatos colidem para atomizar a água, logo, é interessante notar que, ao contrário da estratégia convencional, a pressão de impacto deixa de depender dos jatos e, por isso, indica ser relativamente independente do caudal. Este aspecto, por si, é inovador, pois permite ao utilizador variar o caudal sem que isso produza um efeito significativo sobre a pressão de impacto. Por outro lado, o facto da pressão de impacto diminuir com a distância significa que não tende a produzir desconforto, demonstrando-se uma grande diferença relativamente às cabeça de chuveiro convencionais.

Sabe-se pela literatura (WaterSense, 2010) que, para uma cabeça de chuveiro passar nas normas impostas pela *Environmental Protection Agency* (EPA), esta tem de ter uma pressão de impacto superior a  $3.4 Pa$ , para uma distância de  $45.72 cm$ . Não só o atomizador em estudo cumpre esta norma imposta pela agência americana, como

a cumprir utilizando um caudal relativamente reduzido ( $\sim 4\text{ l/min}$ ). Isto significa que uma cabeça de chuveiro com base numa estratégia de atomização tende a produzir conforto e promover a poupança de água, ao mesmo tempo que assegura uma adequada área de corpo coberta de água, proporcionando uma boa experiência de duche.

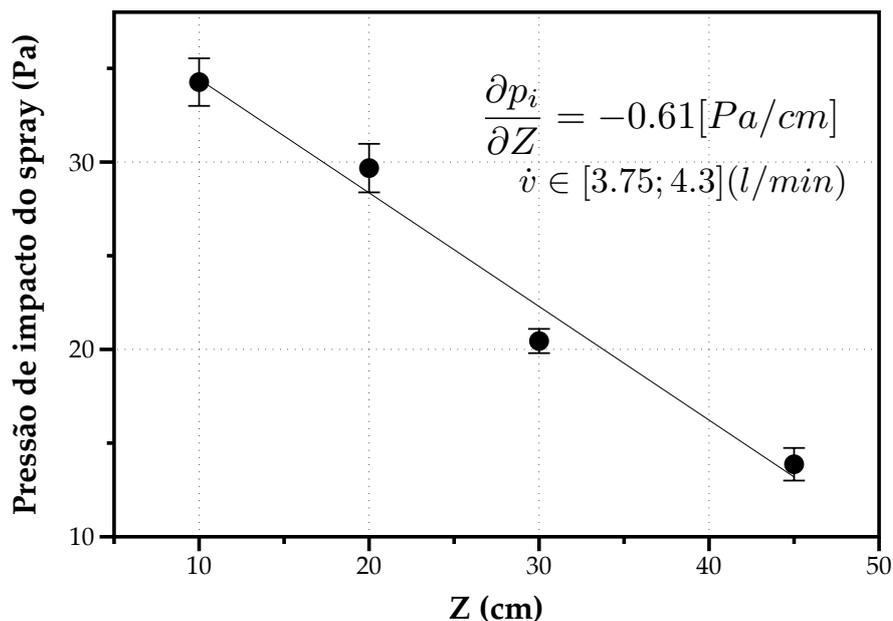
Porém, importa a este ponto comparar os resultados obtidos com o que se obtém para chuveiros convencionais. A Fig. 3.2 contém dados retirado da literatura (Alkhad-dar *et al.* , 2007) para a pressão de impacto obtida por diversos tipo de cabeças de chuveiro existentes no mercado, onde se verifica a pressão de impacto em função do caudal volúmico debitado. Em geral, os valores obtidos de pressão de impacto com um chuveiro multijato são da mesma ordem de grandeza dos obtidos num sistema convencional para caudais baixos, embora tendam a produzir maior conforto (menor pressão de impacto) com a distância, superando os sistemas convencionais. Os dois pontos mais à esquerda do gráfico são referentes ao menor caudal  $2.67\text{ l/min}$  para as alturas de  $10\text{ cm}$  e de  $20\text{ cm}$ .



**Figura 3.2:** Comparação da pressão de impacto em função do caudal volúmico entre um chuveiro multijato e diversos chuveiros convencionais.

O facto de se ter variado a distância entre o atomizador e o sensor de pressão,

permite determinar a evolução da pressão de impacto do spray ao longo da trajetória e obter o respetivo gradiente de pressão. A Fig. 3.3 contém a média dos valores obtidos dos vários caudais ( $3.75 \sim 4.44 \text{ l/min}$ ) para cada altura considerada, juntamente com a equação que nos indica o decréscimo da pressão de impacto por cada centímetro percorrido, ou seja, para cada centímetro de afastamento do atomizador a pressão de impacto minimui em  $0.61 \text{ Pa}$ .



**Figura 3.3:** Gradiente de pressão de impacto ao longo da trajetória do chuveiro multijato.

Tendo estes resultados presentes, em seguida analisa-se teoricamente o que seria expectável para a pressão de impacto com base nos mecanismos hidrodinâmicos de impactos de gotas em filme de líquido, começando pelas características das gotas que constituem o spray.

### 3.2. Considerações teóricas sobre a pressão de impacto de um spray

Um dos fatores importantes na análise consiste em estimar as características do spray que é produzido a partir das correlações em Panão & Delgado (2014). O diâmetro médio aritmético das gotas  $d_{10}$  produzidas obtém-se através da relação

$$d_{10} = 2.0795 \cdot 0.001 \cdot We_j^{-0.151} \cdot f(\theta)^c \quad (3.1)$$

Assumindo que 80% da energia cinética das gotas é dissipada no impacto (ver secção 1.4), considera-se que apenas 20% da pressão dinâmica da gota seria convertida em pressão de impacto. Assim, para os diferentes caudais usados no trabalho, a Tabela 3.1 mostra os valores das características das gotas, pressão de impacto e força equivalente considerando como área de referência a que está associada ao diâmetro da gota

$$A = \pi \cdot \frac{d_{10}^2}{4}$$

ao incidir sobre um filme de líquido, ao passo que, se a superfície estivesse seca, talvez fosse mais adequado usar o diâmetro de espalhamento (*spread*). Segundo a literatura (Panão & Delgado, 2014), a velocidade das gotas do spray correlaciona-se com as características do jato como

$$\frac{u_g}{u_j} = 2.8669 We_j^{-0.15678}$$

em que  $We_j = \rho u_j^2 d_j / \sigma$  corresponde ao número de Weber do jato. A temperatura considerada para as propriedades da água é de 25°C.

<i>Caudal</i> [L/min]	2.67	3.75	3.88	4.02	4.13	4.24	4.29
$d_{10}$ [mm]	0.974	0.879	0.871	0.861	0.854	0.848	0.845
$u_g$ [m/s]	8.87	11.2	11.5	11.8	12.0	12.2	12.3
$p_{dg}$ [kPa]	34.4	62.8	65.9	69.2	71.7	74.3	75.4
$F_g$ [N] × 10 <sup>3</sup>	5.86	7.61	7.81	8.03	8.19	8.36	8.43

**Tabela 3.1:** Resultados teóricos para a pressão dinâmica com base nas características estimadas para as gotas do spray.

Teoricamente, a pressão de impacto de um spray contém os contributos do impacto que  $N_g$  gotas de água exercem sobre a área do sensor. A área sensível do sensor onde a água vai exercer a sua força tem um diâmetro de 6cm. A Fig. 3.4 compara a pressão de impacto teórica de uma gota distribuída pela área do sensor com os valores de pressão de impacto medidos para as distâncias de 20cm e 45cm. Embora cientes de que nem todos os pressupostos teóricos tenham sido considerados, sobretudo pelo facto

do impacto das gotas ocorrer num filme de líquido com características dinâmicas e da influência que o impacto de gotas na vizinhança de uma possa ter na pressão final, os resultados evidenciam que a pressão de impacto diminui com o aumento da distância, devido à dispersão de gotas no ângulo do spray, ou seja, como menos gotas incidem sobre a superfície, a pressão de impacto diminui, sendo essa uma das vantagens do uso de uma estratégia de atomização em chuveiros para garantir uma sensação de conforto.

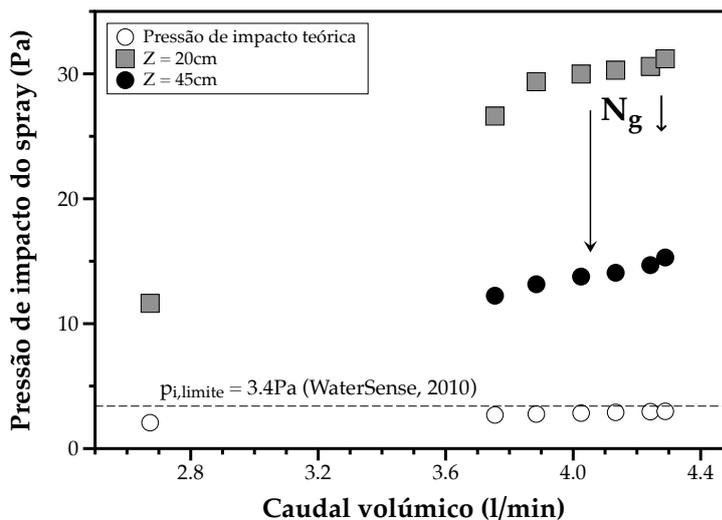


Figura 3.4: Comparação da pressão de impacto teórica com os valores experimentais.

## 4 Sumário e Conclusões

O conforto aliado à experiência de chuveiro tem um papel de extrema importância quando se pretende conhecer a pressão de impacto de um chuveiro no corpo humano. No mercado existem disponíveis vários tipos de cabeças de chuveiro, de entre eles, o que utiliza um caudal volúmico menor é a cabeça de chuveiro que introduz ar dentro das gotas de água. Porém, a quase totalidade das estratégias usadas em tecnologia de cabeças de chuveiro baseia-se em jatos de água. Mesmo quando referem produzir um spray de água, esse ocorre a partir de instabilidades nos jatos ao longo da sua trajetória. Porém, a abordagem diferente explorada nesta dissertação envolve antes a atomização da água na própria cabeça de chuveiro. Isso leva a que se consiga espalhar água pelo corpo com caudais volúmicos inferiores aos produzidos pelo tipo de cabeça de chuveiro mais económico assistido a ar. Assim, o trabalho teve por base o estudo do desempenho de um protótipo de cabeça de chuveiro que produz um spray por atomização multijato.

Nesta dissertação, o argumento foca-se essencialmente na avaliação da tecnologia de atomização em termos de conforto da água ao incidir no corpo, designadamente quanto ao gradiente de pressão em relação à distância à cabeça do chuveiro, e também quanto ao efeito do caudal de água debitado.

Para a concretização deste estudo, foi construída uma instalação que permite medir a variação da pressão de impacto axialmente (ao longo da trajetória do spray), enquanto se varia o caudal (de um spray produzido pelo protótipo de atomizador multijato). As condições definidas para o caudal de água do atomizador cobrem uma gama de  $2.67 - 4.44\text{ l/min}$  e as distâncias analisadas vão de  $10\text{ cm}$  a  $45\text{ cm}$  em congruência com as normas (neste caso, americanas) e com os padrões normais de utilização.

Com base no modelo de pressão de impacto elaborado, os resultados evidenciam que:

- a pressão de impacto diminui com a distância à cabeça do chuveiro, tendência contrária à dos chuveiros convencionais;

- com uma gama de variação de caudal de  $1.8\text{ l/min}$ , a pressão de impacto não é influenciada de forma acentuada, sendo que, as variações de pressão para a mesma altura são quase insignificantes;
- para caudais relativamente pequenos (e.g.  $2.67\text{ l/min}$ ) e distâncias superiores a  $30\text{ cm}$ , a pressão de impacto medida é de tal modo pequena ( $< 5\text{ Pa}$ ) que o erro associado às medições torna a técnica de medida desadequada, não sendo possível medir a distâncias superiores
- por fim, segundo a literatura (WaterSense, 2010), o conforto de um duche implica que a pressão tem de ser maior do que  $3.4\text{ Pa}$ , para uma distância de  $45.72\text{ cm}$ . Portanto, não só o atomizador multijato cumpre as especificações de pressão exigidas para baixos caudais ( $\sim 4\text{ l/min}$ ) como assegura uma área adequada de corpo coberta de água.

### Linhas orientadoras de investigações futuras

O estudo realizado nesta dissertação possibilitou um progresso no trabalho realizado anteriormente em relação à aplicação de uma estratégia de atomização multijato no desenvolvimento de cabeças de chuveiro que permitem uma redução substancial do caudal de água usado, enquanto proporcionam uma "boa experiência de duche". Nesta ótica, os resultados alcançados implicam mais desenvolvimentos nos seguintes aspetos:

- melhoria do sensor para uma versão eletrónica do mesmo, visto que permite controlar a precisão dos dados adquiridos e possibilitar maiores taxas de aquisição, de modo a realizar estudos em regime transiente;
- utilização de uma câmara de alta-velocidade com resolução adequada, de modo a visualizar o impacto das gotas e estudar a sua relação com o conforto, isto é, procurando diminuir a lacuna entre a objetividade de uma medida e a subjetividade associada à sensação do conforto num duche;
- estudo da influência do ângulo de impacto na pressão, fazendo ensaios para vários ângulos de forma a simular o que acontece no corpo humano;
- realizar uma campanha de testes do atomizador diretamente no corpo humano para averiguar o nível de conforto;

- realizar ensaios com um chuveiro elétrico convencional, ou aquele que é assistido a ar, para obter dados nas mesmas condições que os da atomização, de modo a melhorar a comparação entre os sistemas de produção de chuveiro com jatos ou por atomização.



# Anexo - Dados medidos para a pressão de impacto

Para uma distância de 0.1 m e para a gama de caudais volúmicos pré-definidos obtiveram-se os seguintes resultados (tabela 1):

Caudal [L/min]	2.67	3.75	3.88	4.02	4.13	4.24	4.29
$P_{exp}[Pa]$	24.17	29.70	32.31	33.29	33.61	34.59	36.88

**Tabela 1:** Pressão em função do caudal a 0.1m.

Para uma distância de 0.2 m e para a gama de caudais volúmicos pré-definidos obtiveram-se os seguintes resultados (tabela 2):

Caudal [L/min]	2.67	3.75	3.88	4.02	4.13	4.24	4.29
$P_{exp}[Pa]$	11.62	26.61	29.37	29.98	30.29	30.59	31.21

**Tabela 2:** Pressão em função do caudal a 0.2m.

Para uma distância de 0.3 m e para a gama de caudais volúmicos pré-definidos obtiveram-se os seguintes resultados (tabela 3):

Caudal [L/min]	2.67	3.75	3.88	4.02	4.13	4.24	4.29
$P_{exp}[Pa]$		18.36	19.27	20.80	19.89	21.41	21.11

**Tabela 3:** Pressão em função do caudal a 0.3m.

Para uma distância de 0.45 m e para a gama de caudais volúmicos pré-definidos obtiveram-se os seguintes resultados (tabela 4):

Caudal [L/min]	2.67	3.75	3.88	4.02	4.13	4.24	4.29
$P_{exp}[Pa]$		12.24	13.16	13.77	14.07	14.69	15.29

**Tabela 4:** Pressão em função do caudal a 0.45m.

A Tabela (5) mostra de uma forma quantificada os valores da pressão de impacto para as várias alturas juntamente com o erro relativo de cada uma associado.

Altura [m]	10	20	30	45
$P_{exp}[Pa]$	33.4	29.7	20.1	13.9
Erro rel. [%]	1.91	1.52	0.95	0.87

**Tabela 5:** Pressão de impacto em função da altura.

# Bibliografia

- Alkhaddar, R A, Phipps, D, Morgan, R, Karci, B, & Hordesseux, J. 2007. Saving water in showers. *Journal of Physics: Conference Series*, **76**(1), 012064.
- Alkhaddar, Rafid, & Phipps, David. 2008. Water efficiency in leisure centres. *Journal of Retail and Leisure Property*, 169.
- Bai, CX, Rusche, H, & Gosman, AD. 2002. Modeling of gasoline spray impingement. *ATOMIZATION AND SPRAYS*, **12**, 1–27.
- Critchley, Richard, & Phipps, David. 2007. Water and Energy Efficient, Showers: Project Report. *United Utilities*, 1–54.
- Gleick, P.H. 1996. Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs. *Water International*, **21**, 83–92.
- Linden, J.C.S, & Guimarães, L.B.M. 2005. O conceito de conforto a partir da opinião de especialistas. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul–Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção*, 1–2.
- Liu, Rong, Kwok, Yi Lin, Li, Yi, Lao, Terence T H, Zhang, Xin, & Dai, Xiao Qun. 2005. Objective Evaluation of Skin Pressure Distribution of Graduated Elastic Compression Stockings. *Dermatologic Surgery*, **31**(6), 615–624.
- Nebia. 2015. *Nebia Showers*. <http://nebia.com>. [Online; accessed 26-September-2015].
- Panão, M.R.O., & Delgado, J.M.D. 2012. As vantagens da atomização multijato. *In: IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia*.

- Panão, M.R.O., & Delgado, J.M.D. 2014. Toward the design of low flow-rate multijet impingement spray atomizers. *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 170–179.
- Vieira, P., Almeida, M. Do C., Baptista, J.M., & Ribeiro, R. 2007. Household water use: a Portuguese field study. *Water Science & Technology: Water Supply*, **7**(5-6), 193.
- Wang, An-Bang, Chen, Chi-Chang, & Hwang, Wun-Chin. 2002. On Some New Aspects of Splashing Impact of Drop-Liquid Surface Interactions. *Pages 303–306 of: Rein, Martin (ed), Drop-Surface Interactions*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol. 456. Springer Vienna.
- WaterSense, EPA Environmental Protection Agency. 2010. *WaterSense - Specification for Showerheads Supporting Statement*. Tech. rept.
- Zadeh, Sarah, Hunt, Dexter, & Rogers, Christopher. 2014. Socio-Technological Influences on Future Water Demands. *Water*, **6**(7), 1961–1984.