

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ATOMIZAÇÃO DO JATO LÍQUIDO EM UM LAVADOR VENTURI

NÉSTOR ALEJANDRO GÓMEZ PUENTES

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves

São Carlos – SP

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ATOMIZAÇÃO DO JATO LÍQUIDO EM UM LAVADOR VENTURI

NÉSTOR ALEJANDRO GÓMEZ PUENTES

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves

São Carlos – SP

2008

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

G633aj

Gomez Puentes, Néstor Alejandro.
Atomização do jato líquido em um lavador venturi /
Néstor Alejandro Gomez Puentes. -- São Carlos : UFSCar,
2008.
98 f.

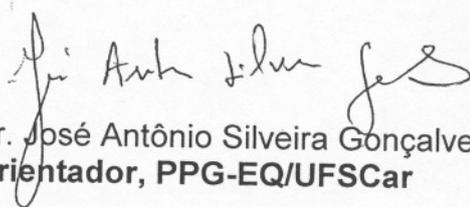
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2008.

1. Atomização. 2. Lavador venturi. 3. Jato - penetração. 4.
Jato - trajetória. 5. Imagens fotográficas. I. Título.

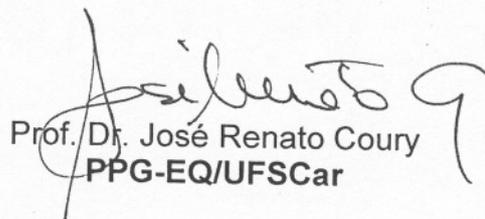
CDD: 667.9 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
NÉSTOR ALEJANDRO GOMEZ PUNTES APRESENTADA AO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SÃO CARLOS, EM 22 DE AGOSTO DE 2008.

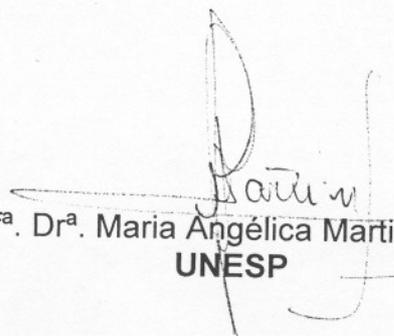
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves
Orientador, PPG-EQ/UFSCar



Prof. Dr. José Renato Coury
PPG-EQ/UFSCar



Profª. Drª. Maria Angélica Martins Costa
UNESP

A Deus por ser arquiteto
e construtor do meu caminho.

À minha família,
à minha mãe **Blanca Ligia**,
ao meu pai **Mariano** e aos meus
irmãos **Mario Leonardo** e **Andrea del Pilar**
pela força, o apoio moral e financeiro, porque sempre
acreditaram em mim sem pensar em desistir e concluir este curso.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. **Dr. José Antônio Silveira Gonçalves** por sua orientação, paciência, dedicação e ter acreditado em mim.

Ao **Eng. Flávio Keniti Kimura** pela valiosa ajuda e contribuição no desenvolvimento experimental deste trabalho na aquisição das imagens fotográficas do jato em processo de atomização. Muito obrigado!

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da universidade Federal de São Carlos por ter concedido a realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido.

Ao Prof. **Dr. José Renato Coury** (DEQ-UFSCar) e à **Eng. Vádila Giovana Guerra** (DEQ-UFSCar) pela valiosa contribuição durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Prof^a **Dr.^a Mônica Lopes Aguiar** (DEQ-UFSCar) pela contribuição e pelas sugestões no Exame de Qualificação.

Aos Professores Doutores da banca de Mestrado, **José Renato Coury** (DEQ-UFSCar) e **Maria Angélica Martins Costa** (UNESP), por aceitarem a responsabilidade de avaliar este trabalho e pela valiosa contribuição.

Aos professores e funcionários de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, meus colegas e amigos pelo apoio e companheirismo quando precisado, em especial: **Simone, Tatiana (Taty), Ivana, Vádila, Letícia, Tiago, Marcos Felicetti, Edinalda, Marina, Juliana Milanez e Wania.**

Às pessoas que formaram a minha família neste período vivido aqui em São Carlos **Ana Maria, Hernán, Mauricio** e minhas atuais companheiras de república **Carolina e Margarita**, muito obrigado!

A toda minha **família** que esteve presente sempre nos momentos difíceis apoiando-me.

A todos aqueles que me ajudaram a chegar e concluir esta etapa da vida.

Finalmente, dedico esta dissertação a Deus que foi quem fez possível que tudo isto acontecesse em minha vida.

RESUMO

Os lavadores de gases do tipo Venturi são equipamentos muito conhecidos por suas aplicações, nas quais a eficiência de coleta de partículas exigida seja superior a 90%. Utiliza-se líquido, na forma de gotas, para coletar os poluentes. Concentram-se em regiões próximas as trajetórias dos jatos de injeção de líquido e dispersam-se pelo equipamento, em razão da turbulência.

Alguns dos principais fenômenos que afetam a eficiência de coleta de um lavador Venturi como a penetração e trajetória do jato (distância percorrida pelo jato até o início de desprendimento de filamentos e formação de gotas) e o ângulo de espalhamento formado no interior da garganta são apresentados. Com a finalidade de conseguir-se uma melhor compreensão das variáveis mencionadas acima, obtiveram-se imagens fotográficas do processo de atomização de um jato líquido na garganta do lavador Venturi, com velocidades do gás na garganta entre 59 e 74m/s, velocidades do jato entre 3,18 e 19,10m/s e diferentes orifícios de injeção de líquido na garganta.

ABSTRACT

Pease-Anthony Venturi gas scrubbers are well known equipments used when collection efficiency demands are superior to 90%. It utilizes liquid, in the form of droplets, to collect the pollutants. Initially, the droplets are concentrated in areas near the trajectory of jets from injection of liquid. The droplets are dispersed throughout the equipment, by reason of turbulence.

Some of the main phenomena that affect the collection efficiency of a Pease-Anthony Venturi scrubber, as the penetration and trajectory of the liquid jet (distance covered for the liquid jet until its atomization) and the angle of spreading formed inside the throat are presented. With the purpose of obtaining a better understanding of the variables mentioned above, photographic images of the process of atomization of a liquid jet into the throat of a Pease-Anthony Venturi scrubber were taken, with throat gas velocities between 59 and 74m/s, jet velocities between 3.18 and 19.10m/s and liquid injected into the throat through different orifices.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
NOMENCLATURA	xiii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - Generalidades	3
2.2 - Atomização e Dispersão do Líquido	4
2.2.1 - Mecanismos de atomização	5
2.2.2 - Trajetória do jato	9
2.2.3 - Dispersão de gotas	11
2.3 - Técnicas Óticas de Medida Laser	13
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 - Equipamento	17
3.2 - Condições Experimentais	20
3.3 - Obtenção de Imagens Fotográficas do Jato em Processo de Atomização	21
3.4 - Ângulo de espalhamento	22
3.5 - Trajetória do jato.....	22
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 - Ângulo de espalhamento	25
4.2 - Trajetória do jato	27
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	41
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
APÊNDICE A - Imagens Fotográficas do Processo de Atomização no Interior da Garganta do Lavador Venturi Usadas nos três Testes	45
APÊNDICE B - Ângulo de Espalhamento	60
APÊNDICE C - Trajetória do Jato	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Esquema de um lavador Venturi típico	3
Figura 2.2 –	Mecanismo de atomização por cisalhamento contínuo	7
Figura 2.3 –	Esquema da ruptura de um jato líquido em uma corrente de ar Transversal segundo Linne <i>et al.</i> (2005)	8
Figura 2.4 –	Trajectoria e penetração de um jato transversal segundo Viswanathan <i>et al.</i> (1983)	9
Figura 2.5 –	Esquema da simulação da injeção de líquido em processo de atomização segundo Yoon (2005)	10
Figura 2.6 –	Simulação da dispersão, distribuição e tamanho de partículas segundo Yoon (2005)	13
Figura 2.7 –	Desenho esquemático da <i>Particle Image Velocimetry (PIV)</i>	14
Figura 2.8 –	Desenho esquemático do <i>Laser Doppler Anemometry (LDA)</i>	15
Figura 2.9 –	Desenho esquemático do <i>Doppler Global Velocimetry(DGV)</i>	16
Figura 2.10 –	Desenho esquemático do <i>Laser Two-Focus Anemometry</i>	16
Figura 3.1 –	Vista geral simplificada do aparato experimental usado	18
Figura 3.2 –	Esquema do lavador Venturi usado no presente experimento.....	18
Figura 3.3 –	Garganta de vidro utilizada para obter as imagens	19
Figura 3.4 –	Esquema frontal da garganta e configurações para a injeção de líquido	19
Figura 3.5 –	Plano do circuito eletrônico do flash	22
Figura 4.1 –	Exemplo da ruptura de um jato líquido em uma corrente de ar transversal com as variáveis objeto de estudo	24
Figura 4.2 –	Exemplo da ruptura de um jato líquido em uma corrente de ar transversal com as variáveis objeto de estudo vista desde outra perspectiva	25
Figura 4.3 –	Imagens dos jatos na configuração 2 para a Réplica 1, $Q_l=600\text{mL}/\text{min}$, $V_j=12,73\text{m}/\text{s}$ e (a) $V_g=59\text{m}/\text{s}$; (b) $V_g=74\text{m}/\text{s}$	26
Figura 4.4 –	Imagens dos jatos na configuração 2 para a Réplica 1, $V_g=59\text{m}/\text{s}$ e (a) $V_j=6,37\text{m}/\text{s}$ ($Q_l=300\text{mL}/\text{min}$), (b) $V_j=19,10\text{m}/\text{s}$ ($Q_l=900\text{mL}/\text{min}$).....	26
Figura 4.5 –	Resultados experimentais do ângulo de espalhamento obtidos na configuração 2 para cada uma das condições de processo	27
Figura 4.6 –	Variação da perda de massa em relação a constante e na configuração 1, $Q_l=600\text{mL}/\text{min}$, $V_j=12,73\text{m}/\text{s}$ e $V_g=59\text{m}/\text{s}$	29
Figura 4.7 –	Imagens dos jatos na configuração 1 para a Réplica 1 com a trajectoria do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves <i>et al.</i> (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $Q_l=600\text{mL}/\text{min}$, $V_j=12,73\text{m}/\text{s}$	30
Figura 4.8 –	Resultados da trajetória do jato na configuração 1, $Q_l=600\text{mL}/\text{min}$, $V_j=12,73\text{m}/\text{s}$	31
Figura 4.9 –	Imagens dos jatos na configuração 1 para a Réplica 1 com a trajectoria do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves <i>et al.</i> (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $Q_l=600\text{mL}/\text{min}$, $V_g=59\text{m}/\text{s}$	32-33

Figura 4.10 –	Resultados da trajetória do jato na configuração 1, $V_g=59\text{m/s}$	34
Figura 4.11–	Imagens dos jatos na configuração 3 para a Réplica 1 com a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves <i>et al.</i> (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $Q_l=900\text{mL/min}$, $V_j=9,55\text{m/s}$	35-36
Figura 4.12–	Resultados da trajetória do jato na configuração 3, $Q_l=900\text{mL/min}$, $V_j=9,55\text{m/s}$	37
Figura 4.13–	Imagens dos jatos na configuração 3 para a Réplica 1 com a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves <i>et al.</i> (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde) , $V_g=59\text{m/s}$..	38
Figura 4.14–	Resultados da trajetória do jato na configuração 3, $V_g=59\text{m/s}$	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Condições experimentais para a injeção de líquido nas configurações 1 e 2	20
Tabela 3.2 – Condições experimentais para a injeção de líquido na configuração 3	21

NOMENCLATURA

Letras latinas

A	Área, m^2
Q	Vazão, mL/min
V	Velocidade, m/s
x	Distância ao longo da direção lateral, mm
y	Distância ao longo da direção transversal, mm

Letras gregas

θ	Ângulo de espalhamento
----------	------------------------

Subscritos

l	líquido
g	gás
j	jato

1 – INTRODUÇÃO

A limpeza de gases é uma importante operação em muitas indústrias, como metalúrgicas, de papel e celulose, ácidos e álcalis, gás natural, inseticidas, fertilizantes, tintas, cimento e outras. Esta operação tem vários objetivos, como a redução de poluentes e o controle da poluição, a recuperação de produtos valiosos, a simples purificação do gás ou a proteção de equipamentos a jusante.

Um equipamento muito utilizado em limpeza de gases é o lavador Venturi, por ser relativamente simples e muito eficiente. O líquido é normalmente injetado através de orifícios na garganta do Venturi, na forma de jatos transversais que são logo atomizados formando muitas gotículas. Inicialmente, concentradas em regiões próximas as trajetórias dos jatos, as gotas dispersam-se pelo equipamento, em razão da turbulência. O desempenho de um lavador Venturi depende do tamanho e da distribuição espacial de gotas em seu interior. Uma má distribuição, caracterizada pela presença de regiões de alta e baixa concentração de gotas, possibilita a passagem de muitos contaminantes sem que haja choque dos mesmos com as gotas, diminuindo consideravelmente a eficiência do equipamento.

A melhor teoria que se dispõe no momento para auxiliar a projetar um perfil de distribuição de gotas é a “dica” de Fathikalajahi *et al.* (1996) de que uma melhor distribuição é obtida quando a penetração máxima da linha central do jato, um conceito introduzido por Viswanathan *et al.* (1983) e questionado por Gonçalves *et al.* (2004), for cerca de 35% da distância entre a parede que contém o orifício e a parede oposta. Esta teoria foi obtida a partir da análise de um caso particular em que muitas das variáveis mencionadas acima não foram estudadas.

Uma vez que grande parte dos custos operacionais de lavadores Venturi está associada ao uso do líquido, estudos mais detalhados do perfil de distribuição de gotas na garganta de lavadores Venturi, em virtude das características do sistema de injeção utilizado, dos mecanismos de atomização e da turbulência dos jatos e do meio, podem gerar conhecimentos que por meio dos quais, torna-se possível o dimensionamento de um lavador de modo a otimizar a distribuição de gotas, maximizando a eficiência e minimizando o uso de líquido. Tais estudos podem resultar em um barateamento da tecnologia de lavagem de gases e controle de emissão de poluentes industriais para a atmosfera.

Diante da importância de obter-se uma melhor compreensão dos fenômenos de atomização dos jatos; e estabelecer com clareza as relações entre penetração e trajetória do jato (distância percorrida pelo jato até o início de desprendimento de filamentos e formação de gotas) e o ângulo de espalhamento formado no interior da garganta, este trabalho tem como finalidade obter e analisar imagens em processo de atomização.

2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresentam-se as principais investigações feitas nos últimos anos sobre injeção, atomização e dispersão de jatos líquidos; assim como as principais técnicas óticas de medida laser.

2.1- Generalidades

Lavadores Venturi são equipamentos industriais usados geralmente na limpeza de gases, pelas altas eficiências de coleta de partículas. Um lavador Venturi pode ter seção transversal circular ou retangular e está constituído por 3 partes diferentes: a seção convergente, a garganta e a seção divergente, como ilustrado na Figura 2.1.

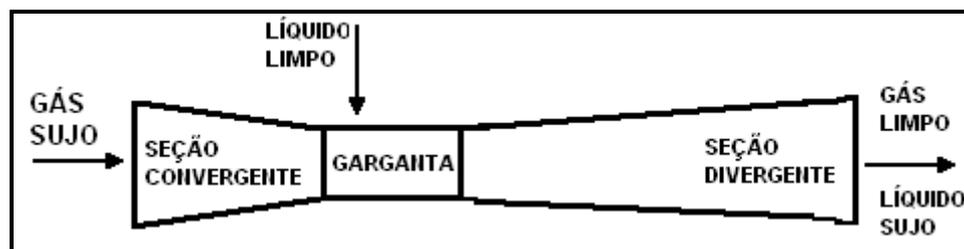


Figura 2.1- Esquema de um lavador Venturi típico.

O gás sujo, carregado de partículas, entra no lavador Venturi pela seção convergente, é acelerado devido ao estreitamento do duto e forçado a fluir com alta velocidade na garganta e sofre desaceleração na seção divergente.

O líquido de lavagem é injetado no lavador Venturi, usualmente na garganta e de formas diferentes; a mais comum destas é através de orifícios feitos sobre as paredes do equipamento. Gonçalves (2000) aborda de uma maneira ampla e detalhada os diferentes sistemas de injeção que têm sido utilizados em lavadores Venturi.

O líquido injetado pela alta velocidade do gás na garganta do Venturi é rapidamente atomizado, sendo que primeiro é desintegrado em filamentos finos que se desprendem formando um grande número de gotas com tamanhos muito variados. As gotas formadas pela atomização do líquido coletam as partículas, principalmente pelo mecanismo de impactação inercial. As gotas recém formadas, além de estarem quase paradas em relação ao gás, são, em média, muito maiores de que as partículas. As

moléculas do gás, leves e portanto com menor quantidade de movimento, desviam-se com facilidade das gotas em seu caminho. As partículas, com maior massa e inércia, não conseguem mudar rapidamente sua trajetória, e acabam por chocar-se com alguma gota. Dependendo da energia envolvida no choque, uma partícula pode ou não ficar aderida.

2.2- Atomização e Dispersão do Líquido

A injeção de jatos líquidos no interior de correntes gasosas é comum em muitas aplicações tecnológicas e um bom exemplo é a limpeza de gases. Por este motivo, o estudo e o interesse na atomização de jatos líquidos de vários pesquisadores. As pesquisas fundamentais com jatos estão direcionadas para a performance com jatos injetados paralelamente ou transversalmente a correntes gasosas. Uma excelente revisão dos estudos feitos de injeção de jatos até o ano 2000 foi feita por Gonçalves (2000).

Alguns dos estudos feitos nos últimos anos, sobre a injeção de jato paralelo e de jato transversal foram realizados por Schelling *et al.* (1999), Gonçalves *et al.* (2000), Aísia *et al.* (2001), Fernández Alonso *et al.* (2001), Costa (2002), Costa *et al.* (2003), Gonçalves *et al.* (2004), Gañán-Calvo (2005), Liu *et al.*(2005), Ribeiro (2005) e Viswanathan *et al.* (2005).

Schelling *et al.* (1999) estudaram a influência da atomização de um jato paralelo em um túnel de vento vertical de 300mm de diâmetro, com velocidades de ar maiores a 30m/s e vazão de líquido entre 0,083 e 0,278Kg/s.

Aísia *et al.* (2001) usaram a técnica ótica laser *Phase Doppler Anemometry (PDA)* para medir a concentração e o fluxo local de gotas de um jato paralelo injetado por um orifício de 12mm de diâmetro em uma tubulação de 1m de comprimento.

Gañán-Calvo (2005) propôs uma atomização de líquido de um jato paralelo, no qual o diâmetro interno do tubo de alimentação de líquido era igual ao diâmetro do tubo na saída depois da mistura líquido-ar. As duas secções encontravam-se separadas por uma distância de 0,065mm. Diâmetro do tubo 0,9mm e vazão de líquido igual a 20mL/min.

Liu *et al.* (2005) estudaram o efeito de um jato líquido injetado paralelamente sob o diâmetro médio de Sauter (SMD). O SMD foi medido usando o *Malvern Laser Particle Sizer*. O mínimo SMD foi obtido com velocidades do jato entre 1,5 e 4m/s.

Viswanathan *et al.* (2005) usaram o *Doppler Particle Analyzer (PDPA)* como técnica ótica laser para medir o tamanho e distribuição de partícula no interior de um lavador Venturi. Velocidades de gás na garganta entre 45 e 75m/s, e relações líquido-gás entre 0,4 e 1,8m³-líquido/1000m³-gás.

A conclusão geral obtida em todos os trabalhos foi que a geometria de injeção, o tipo de injeção do jato usado e o fluxo de líquido para interagir na corrente gasosa têm uma influência importante na distribuição e dispersão do líquido, e, portanto, no desempenho do equipamento; observando-se que o arrasto de poluentes depende do espalhamento do jato no interior do equipamento.

Dos estudos feitos em lavadores Venturi que falam sob a quantidade, localização, forma, inclinação e diâmetro dos orifícios de injeção, a velocidade dos jatos, o ângulo da seção convergente do Venturi e a velocidade do gás, conclui-se que a distribuição e tamanho das gotas é função das características do sistema de injeção utilizado, dos mecanismos de atomização e da turbulência dos jatos e do meio. Estas variáveis que tem sido investigadas podem ser manipuladas com o objetivo de modificar o perfil de distribuição de gotas para obter uma elevada eficiência na coleta de material particulado. Entretanto, as relações entre estas variáveis e o perfil de distribuição de gotas ainda não foram estabelecidas com clareza.

2.2.1- Mecanismos de Atomização

Quando um jato líquido emerge de um bocal como um corpo contínuo de forma cilíndrica, a ação sobre a superfície do jato de forças coesivas e disruptivas gera um aumento nas oscilações e perturbações. Sob condições favoráveis, as oscilações são ampliadas e o corpo líquido desintegra-se em gotas. Este processo é definido como uma *atomização primária*. As gotas formadas sofrem desintegração em gotas de tamanhos menores, em um fenômeno conhecido como *atomização secundária*.

Yoon (2004) estudou um modelo não linear baseado no mecanismo de instabilidade da camada limite. Conclui que velocidades de jato menores geram maiores

deformações na superfície do jato, levando esta instabilidade em comprimentos de onda maiores.

Mayer (2004) analisou as características da superfície de um jato líquido paralelo injetado em um orifício de 2mm de diâmetro. O líquido e gás usados eram etanol e nitrogênio, respectivamente. Foram feitos testes com pressões entre 0,1 e 6,5MPa, velocidades de injeção do líquido entre 2 e 20m/s, e velocidades de gás entre 0 e 200m/s. Determinou que a velocidade de injeção do jato é um parâmetro importante na instabilidade do jato porque, para velocidades de jato maiores, tem-se os menores comprimentos de onda. Encontrou-se que a magnitude do comprimento de onda diminui com o incremento da velocidade de injeção de jatos crescente, sugerindo que o desenvolvimento de onda de superfície é altamente dependente da velocidade de injeção e da energia turbulenta contida no jato. Concluiu-se que, com aumento de pressão, o comprimento e amplitude de onda são menores na superfície do jato, salientando que para uma mesma pressão a amplitude não parece ser afetada significativamente.

Gonçalves (2000), em seus estudos, identificou 3 mecanismos de atomização, citados por Williams (1970, *apud* Roberts e Hill, 1981):

1. Formação e crescimento de ondas capilares
2. Formação e crescimento de ondas de aceleração
3. Mecanismo do “Cisalhamento contínuo” (*Steady-shear*)

Os dois primeiros mecanismos coexistem com predominância das ondas capilares quando as forças de pressão dinâmica são grandes.

O terceiro mecanismo envolve a distorção da seção transversal do jato a modo de achatar o mesmo, e o desprendimento de filamentos ou gotas das extremidades do jato por uma ação combinada de tensões tangenciais e tensões superficiais, como mostrado na Figura 2.2.

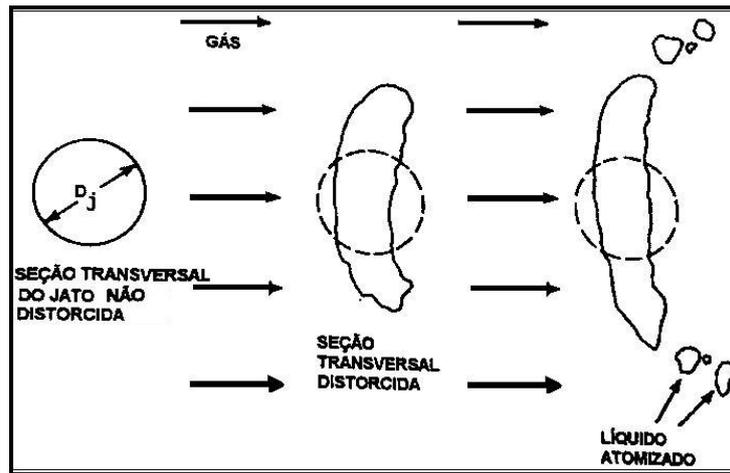


Figura 2.2- Mecanismo de atomização por cisalhamento contínuo.

Nota-se na Figura 2.2, que a atomização do jato não é instantânea ou concentrada em um único ponto. No entanto, ocorre por um descascamento progressivo, com desprendimento de lascas ou ligamentos que logo se transformam em um grande número de gotículas.

Linne *et al.* (2005) estudaram a injeção de um jato transversal, variando o diâmetro do jato entre $7,89 \times 10^{-4}$ e $1,73 \times 10^{-3}$ m, velocidades de gás entre 66,7 e 106,7 m/s, e velocidades de líquido entre 17,4 e 29 m/s. Divulgou que o balanço de arraste aerodinâmico, a inércia do líquido, a tensão superficial, e as forças viscosas levam à deformação da coluna de líquido, curvando e rompendo o jato gradualmente, formando pequenos ligamentos logo do ponto de curvatura para, finalmente, por causa das mesmas forças, romperem aqueles ligamentos e formar gotas conforme mostra a Figura 2.3. Esse estudo evidência que não existe um único ponto de atomização e que existem múltiplos pontos de formação de gotas como foi concluído por Gonçalves (2000) e Costa (2002).

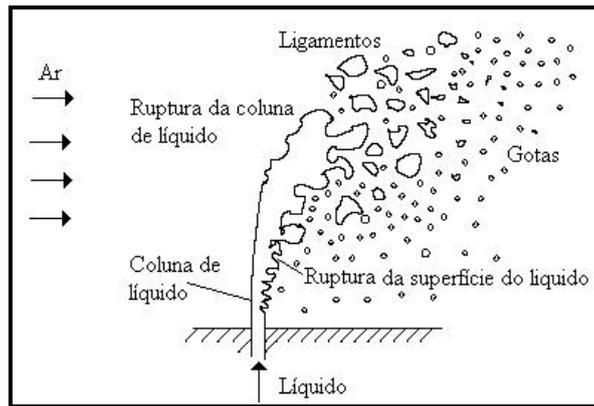


Figura 2.3 – Esquema da ruptura de um jato líquido em uma corrente de ar transversal segundo Linne *et al.* (2005).

Gonçalves (2000), para injeção de jatos transversais injetados na garganta do lavador Venturi, observou que: a) existe um descascamento gradual do jato, ou seja, não existe um único ponto de atomização ou desintegração do jato, mas sim um desprendimento contínuo de massa; b) este descascamento ou perda de massa não começa na base do jato, mas somente após uma certa distância da mesma; e c) as gotas tendem a herdar, uma quantidade de movimento na direção da trajetória do jato.

Em 1999, Schelling *et al.* notaram que a entrada de fluxo através do orifício de injeção é proporcional à distância axial e ao quadrado da raiz da taxa de momentum inicial vezes a densidade do fluido circundante. A taxa de momentum inicial do spray é determinada pelo perfil do fluxo total de líquido e o perfil da velocidade, usando a técnica de medida tipo laser phase-doppler-anemometry (PDA).

Aísa *et al.* (2001) ressaltaram que as características do fluxo estudado estão marcadas especialmente pelas condições de injeção do jato, dispersão e sua trajetória. As condições de saída do fluxo e a geometria do orifício são parâmetros importantes na dispersão das partículas.

Gonçalves *et al.* (2000) e (2004) notaram que a atomização do líquido é um dos parâmetros mais importantes, já que depende da configuração do líquido injetado e das condições do fluxo. Nesses estudos, também comenta-se que a geometria do equipamento deve ser considerada e não se deve ignorar para se obter bons resultados experimentais, e que, a distribuição das partículas é função dos parâmetros de desenho do sistema de injeção e das velocidades dos fluidos.

2.2.2- Trajetória do jato

Ilustra-se na Figura 2.4 conceitualmente o modelo do jato que foi desenvolvido por Viswanathan *et al.* (1983). De acordo com este modelo, o jato pode ser caracterizado por duas distâncias, a penetração do jato (l^{**}) e a penetração máxima da linha central do jato (l^*). O jato segue uma trajetória curva intacto, isto é, sem perder massa, até um certo ponto, de coordenadas (z_0) e (l^*), no qual é atomizado.

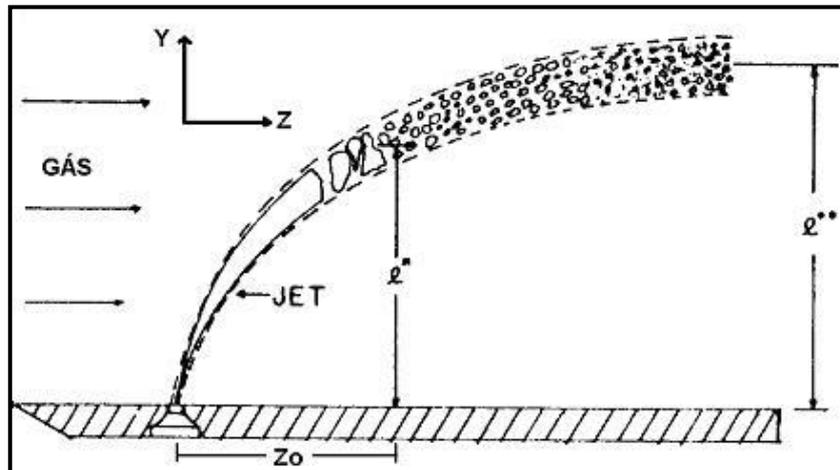


Figura 2.4 - Trajetória e penetração de um jato transversal segundo Viswanathan *et al.* (1983).

Entretanto, sabe-se que não existe um único ponto de atomização ou desintegração do jato, existem vários pontos de formação de gotas, situados ao longo da trajetória do jato e este desprendimento inicia-se a uma pequena distancia da penetração do jato.

Gonçalves (2000) comenta, que todos os modelos multidimensionais, para lavadores Venturi, que foram desenvolvidos até a publicação de sua pesquisa, assumiram que a atomização do jato ocorre em um único ponto, a partir do qual as gotas começam a espalhar-se. A localização exata deste ponto de atomização depende do modelo de trajetória do jato usado.

Schelling *et al.* (1999) concluíram que a influência do líquido e o espalhamento do jato sob o arrasto de partículas resulta pela distância axial desde a saída do atomizador. Encontraram que a influência da velocidade do escoamento de líquido sob

o arrasto pode ser explicado por mudanças no espalhamento do jato, notando-se que para espalhamentos largos obtêm-se um arrasto alto.

A transferência de calor e massa entre as partículas de líquido e gás são especialmente influenciados pelos seguintes parâmetros:

- Área interfacial por unidade de volume,
- Velocidade relativa entre as partículas e o gás, e,
- As diferentes concentrações entre a interface e a massa do gás, isto influenciado pela proporção do gás entrando no jato.

A transferência de momentum no jato, entre as partículas e o gás é contínuo durante a dispersão. Conseqüência disto a velocidade decresce devido à constante desaceleração.

Yoon (2005) desenvolveu uma simulação para observar como se atomiza e dispersa um jato líquido injetado submetido a uma corrente gasosa. Nesta pesquisa encontrou-se que o descascamento do jato começa após a injeção do líquido, quase no mesmo instante. Isto confirma e garante o observado por Gonçalves (2000) e Costa (2002). Na Figura 2.5, mostra-se a simulação da injeção do líquido em processo de atomização.

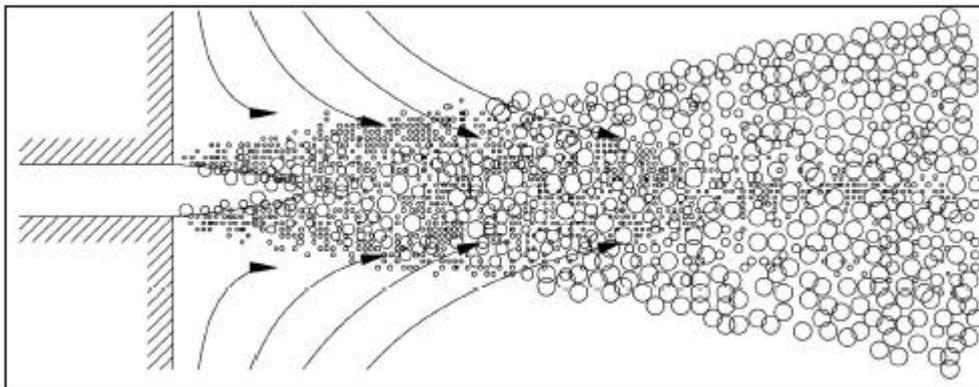


Figura 2.5 - Esquema da simulação da injeção de líquido em processo de atomização segundo Yoon (2005).

2.2.3- Dispersão das gotas

As versões mais modernas da modelagem de lavadores Venturi consideram como um parâmetro de grande importância a dispersão de gotas no interior do equipamento após a atomização. A avaliação deste parâmetro mostrou ter uma implicação direta na eficiência de coleta dos lavadores. Nos lavadores Venturi, a remoção de partículas é uma função de vários parâmetros, como velocidade do gás, razão líquido-gás, diâmetro do bocal, método de injeção de líquido, tamanho do lavador, e localização dos bocais. Nestes equipamentos estes parâmetros podem ser ajustados de forma que as gotas fiquem tão uniformemente distribuídas quanto possível.

Em 1999, Schelling *et al.* comentaram que a influência do fluxo coaxial no espalhamento do jato ocorre a altas velocidades de fluxo de gás, que faz com que o jato estenda-se pelo duto conseguindo um ótimo arrasto, concordando com o exposto nos estudos feitos por Fernández Alonso *et al.* (2001) e Costa *et al.* (2003), nos quais determinou-se que o fator de maior influência no tamanho de partícula é a velocidade do gás injetado e em menor proporção a relação líquido/gás. O tamanho de partícula (medido usando a técnica de difração laser) muda na trajetória pelo equipamento, espalhando-se progressivamente no interior e em seu percurso.

Liu *et al.* (2005) concluíram que, devido à complexidade com que se desenvolve o processo de dispersão do líquido neste tipo de atomização (injeção de jato paralelo), o tamanho de partícula (medido com o Malvern Laser Particle) depende da geometria do orifício de injeção, da geometria do jato líquido, das propriedades físicas do líquido e do gás, da velocidade do gás e da relação do fluxo líquido/gás. Fatores que ainda não se estudam com clareza. Em 2005, Gañan-Calvo comenta que a distribuição do tamanho de partícula depende do diâmetro do orifício, da velocidade do gás, da tensão superficial do líquido e da viscosidade do líquido.

Em 2000, Gonçalves apresentou uma nova descrição matemática do fenômeno de dispersão. Estudou experimentalmente a evolução da distribuição do tamanho das gotas ao longo do lavador Venturi, para a injeção de líquido tanto na forma de jatos quanto na forma de filme, por meio da técnica da difração de raios laser, e os principais modelos que tem sido utilizados para descrever este fenômeno foram avaliados à luz dos resultados, propondo uma descrição alternativa; e a distribuição da concentração de

gotas na garganta de um lavador Venturi com injeção através de um único jato, medida através de amostragem isocinética. O modelo de Fathikalajahi *et al.* (1996) para descrever este fenômeno foi avaliado à luz dos resultados, e um novo modelo, que leva em conta a trajetória, o momento, e o processo gradual de perda de massa do jato é apresentado.

Após a atomização, as gotas são distribuídas não uniformemente na sua seção transversal. No estudo feito por Aísa *et al.* (2001), usa-se Phase Doppler Anemometry (PDA) para fazer medida exata dos parâmetros de partícula como velocidade, diâmetro e tempo de trânsito entre outras. O PDA tem sido uma das técnicas mais usadas para a medida da concentração e o fluxo de partículas esféricas.

Em 2002, Costa faz uma boa revisão dos pesquisadores que fizeram modelagens matemáticas da eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi. Encontrou-se que alguns dos principais fenômenos que afetam a eficiência de coleta de um lavador Venturi foram também estudados experimentalmente, tais como a penetração do jato, a fração do líquido atomizado que se deposita como filme na parede, a dispersão das gotas, o tamanho e a evolução das gotas ao longo da garganta do Venturi. Gonçalves *et al.* (2004) comenta também, que o uso de um bom modelo de dispersão pode ajudar a otimizar o tamanho das gotas na garganta do lavador e assim usar somente o líquido necessário, reduzindo os custos operacionais. Em 2005, Ribeiro apresenta que a modelagem de lavadores Venturi tem como principais objetivos:

- Explicar os mecanismos que operam nos lavadores Venturi
- Predizer a queda de pressão e a eficiência de coleta como uma função das condições operacionais e de projeto do Venturi
- Otimizar o lavador pela estimativa das parâmetros operacionais requeridos para se obter a menor queda de pressão em uma dada eficiência de coleta (Allen,1996; *apud* Ribeiro, 2005)).

Conclui-se que:

- A eficiência é uma função da distribuição do líquido de limpeza, e

- Um aumento da velocidade do gás na garganta provocou um aumento na eficiência de coleta.

Yoon (2005) simulou a dispersão, distribuição e tamanho das gotas na sua seção transversal. A Figura 2.6 ilustra o fenômeno.

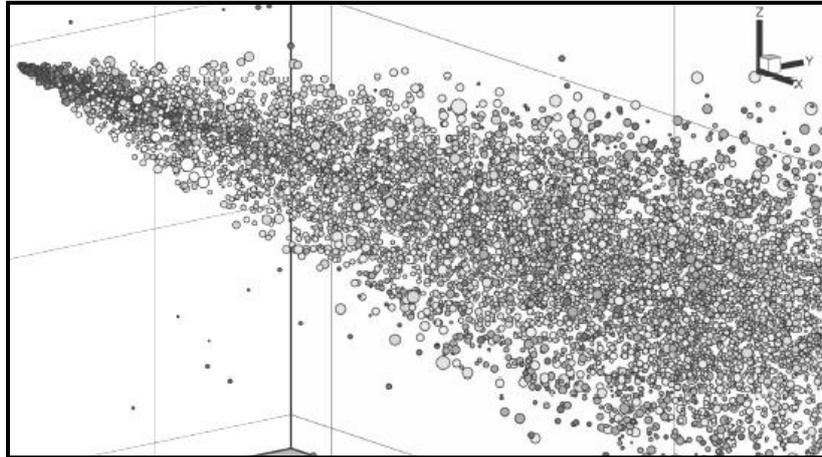


Figura 2.6 - Simulação da dispersão, distribuição e tamanho de gotas segundo Yoon (2005).

Nota-se na Figura 2.6 que as gotas formadas são espalhadas rapidamente ao longo de sua seção transversal, além disso, existem gotas de diversos tamanhos escoando simultaneamente, também de acordo com as afirmações de (Gonçalves, 2000; Costa, 2002). Viswanathan *et al.* em 2005, em seus estudos concluíram que o grau de dispersão das partículas em direção radial depende da turbulência com que se difundem as gotas. A distribuição de partículas é uma função do diâmetro da gota. A polidispersão das gotas decresce com uma alta velocidade do gás, sendo esta a variável mais notável na distribuição e tamanho da partícula, mais que a relação líquido/gás.

2.3- Técnicas Óticas de Medida Laser

As técnicas óticas de medida laser são usadas em numerosas áreas e em especial em aquelas que fazem estudos de fluidos.

Segundo Lawson (2003), alguns tipos de fluidos podem ser medidos usando técnicas laser estabelecidas como: *Particle Image Velocimetry (PIV)*, *Particle Tracking Velocimetry (PTV)*, *Laser Doppler Anemometry (LDA)*, *Doppler Global Velocimetry*

(DGV), *Laser Two-Focus Anemometry*, *Laser Fluorescence Methods*, *Spectroscopy Methods* e *Semi-quantitative Methods*, entre outros.

- **PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV)**

PIV é a técnica de medida de “*Planar Velocity*” em que o laser é colocado na superfície de interesse do fluido a ser estudado. Como se observa na Figura 2.7.

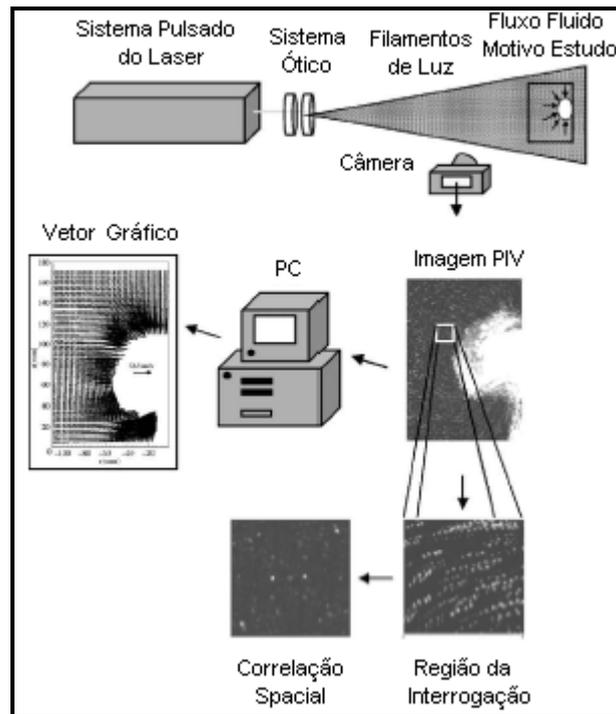


Figura 2.7 - Desenho Esquemático da *Particle Image Velocimetry (PIV)*

As medidas, fazem-se por meio de sistemas microscópicos com uma alta resolução ótica. Permitindo conhecer perfis de velocidade e de fluxo.

A PIV faz medidas de velocidade usando “*Volume Illumination*” por meio de filamentos de luz laser.

- **PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY (PTV)**

A PTV é uma técnica alternativa à PIV, já que segue a trajetória individual de cada partícula, oferecendo vantagens em processos onde se leva a cabo o fluxo de fluidos.

Com esta técnica a imagem é inicialmente exposta a um pulso de curta e depois a um pulso de longa duração. A imagem é ópticamente correlacionada com múltiplos filtros espaciais acoplados. O filtro espacial e a correlação permite diferenciar as diferentes deformações do fluxo, neste caso faria diferenciar entre o fluxo uniforme e o fluxo rotacional.

- **LASER DOPPLER ANEMOMETRY (LDA)**

A técnica LDA tem estado disponível por mais de 20 anos. Esta técnica permite a medida simultânea da velocidade do fluido e o tamanho de partícula que por ele escoam.

Um LDA comum é apresentado na Figura 2.8.

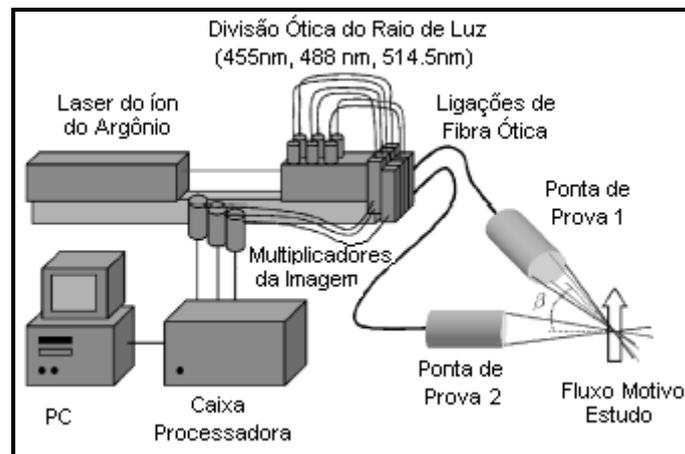


Figura 2.8 - Desenho Esquemático do *Laser Doppler Anemometry (LDA)*

Cada dupla de raios laser possui três componentes que convergem no mesmo ponto, transformando dados de velocidade em três dimensões. A configuração de luz dispersada está em cada ponta de teste, contendo a ótica da transmissão e da recepção no ponto de medida a ser testado no fluxo.

- **DOPPLER GLOBAL VELOCIMETRY (DGV)**

A técnica DGV permite medir partículas muito pequenas por meio de três câmeras de referência para poder identificar os componentes do fluxo, como é apresentada na Figura 2.9.

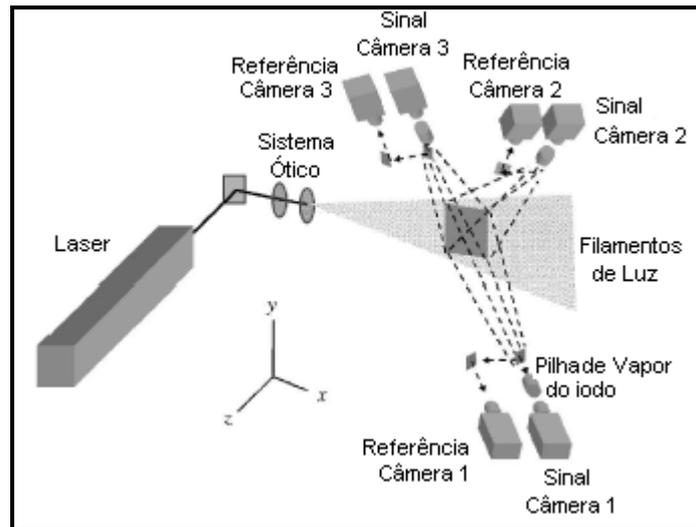


Figura 2.9 - Desenho Esquemático do *Doppler Global Velocimetry (DGV)*.

- **LASER TWO-FOCUS ANEMOMETRY**

Esta é uma técnica de medida de velocidade em um sistema bidimensional, podendo obter dados instantâneos de velocidade em um ponto determinado do fluxo.

O sistema está composto por dois raios de enfoque separados e enfocados na direção do ponto de fluxo selecionado, como se observa na Figura 2.10.

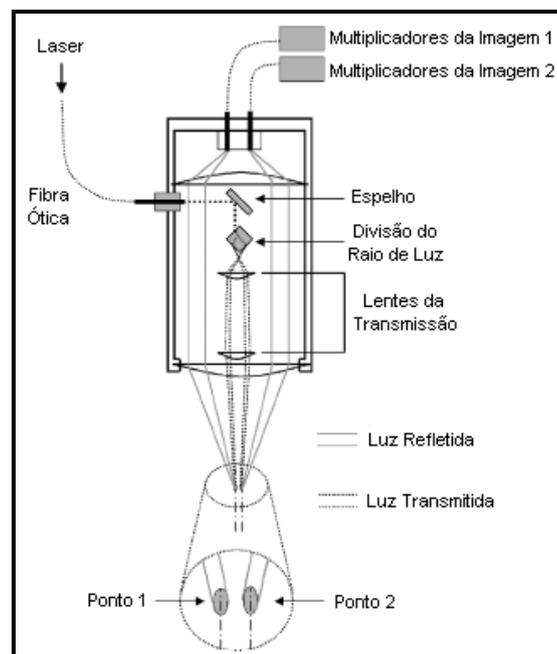


Figura 2.10 - Desenho Esquemático do *Laser Two-Focus Anemometry*.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se o equipamento e a metodologia utilizada para a obtenção de imagens fotográficas do jato líquido em processo de atomização.

3.1- Equipamento

Foram realizados experimentos com um lavador Venturi em bancada de laboratório com o objetivo de obter imagens do processo de atomização de um jato líquido. O lavador está disponível no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar), com as seguintes características principais:

- Lavador montado a partir de seções independentes de modo a facilitar modificações geométricas.
- Construído em acrílico, para permitir visualização. A seção de teste da garganta utilizada para fotografia é feita com partes em vidro e não contém tomada de pressão.
- Seção transversal retangular, com todas as peças de 40 mm de altura.
- Largura da entrada e saída do equipamento de 75mm.
- Demais componentes incluem soprador, bomba para o líquido, manômetros e tubos de pitot.

A Figura 3.1 mostra o esquema geral do lavador Venturi.

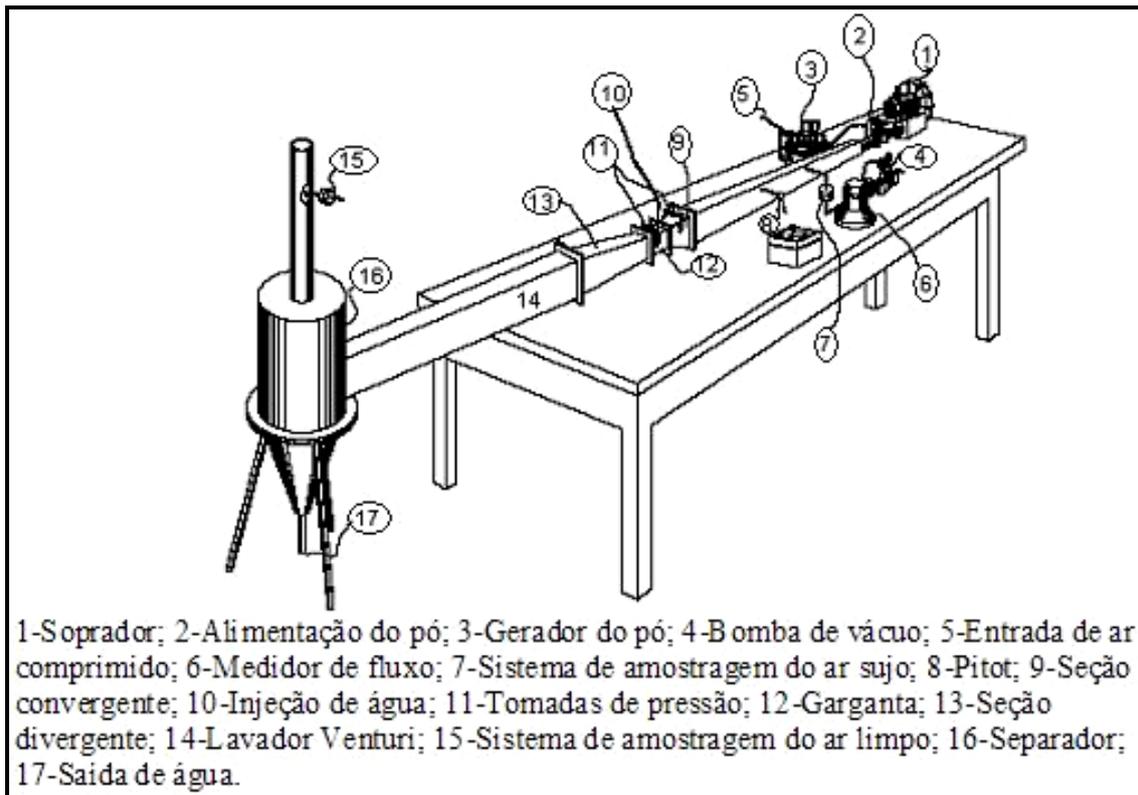


Figura 3.1 - Vista geral simplificada do aparato experimental usado.

Usou-se um lavador Venturi de geometria retangular posicionado horizontalmente como é observado na Figura 3.2.

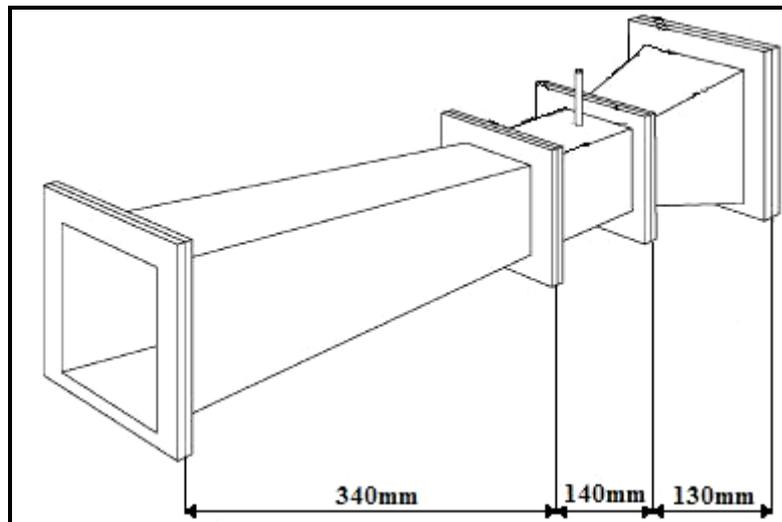


Figura 3.2- Esquema do lavador Venturi usado no presente experimento.

Utilizou-se uma seção especial para a garganta com 3 orifícios para injeção de líquido com parede frontal de vidro, parede lateral e inferior de fundo preto conforme mostra a Figura 3.3 para facilitar o contraste das imagens.

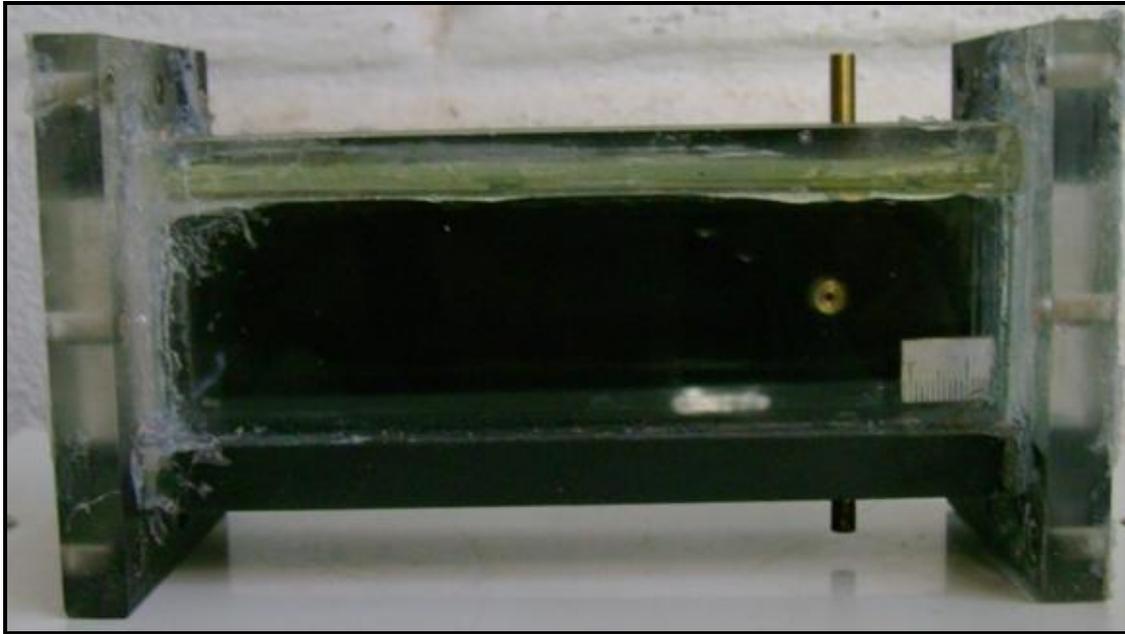


Figura 3.3- Garganta de vidro utilizada para obter as imagens.

As dimensões da seção transversal da garganta eram de 40 x 27 mm. Água foi injetada através de orifícios com 1 mm de diâmetro. O número de orifícios para injeção de líquido foi variado de 1 a 3. As configurações de injeção do líquido podem ser vistas na Figura 3.4. A injeção de líquido foi efetuada por uma bomba helicoidal tipo MS e as vazões de água foram medidas através de um rotômetro. A corrente de ar foi gerada por um soprador radial modelo Cr-8.

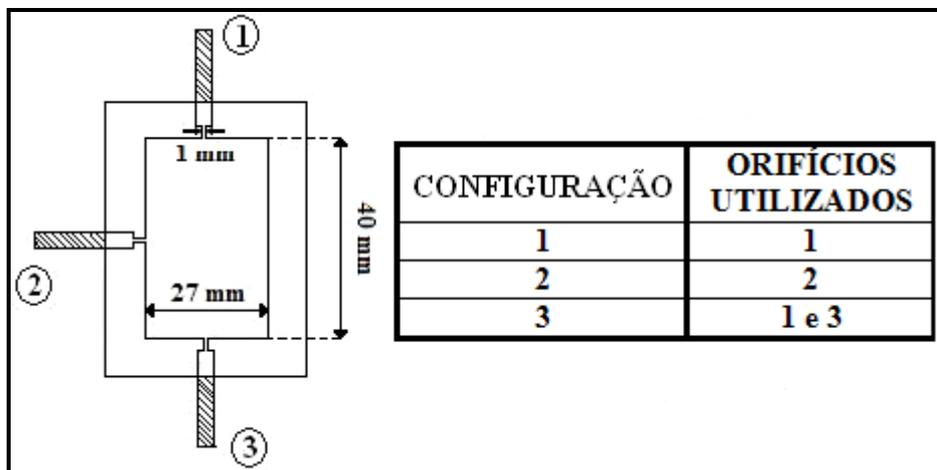


Figura 3.4- Esquema frontal da garganta e configurações para a injeção de líquido.

3.2- Condições Experimentais

Conhecido o tamanho do orifício de injeção de líquido e o valor da vazão de líquido dado pelo rotâmetro é possível calcular a velocidade do jato para cada um dos casos tratados como é apresentado na Equação 3.1:

$$V_j = \frac{Q_l}{A_{\text{orifício}}} \quad (3.1)$$

Conhecida a velocidade de gás na entrada do lavador Venturi, e as dimensões na entrada do lavador e na garganta calcula-se a área em cada uma das partes, com os dados anteriores é possível calcular a velocidade do gás na garganta para cada um dos casos tratados como é apresentado na Equação 3.2:

$$V_{\text{gás entrada lavador}} * A_{\text{entrada lavador}} = V_{\text{gás garganta}} * A_{\text{garganta}} \quad (3.2)$$

Nos 3 testes foram utilizados as seguintes velocidades de gás: 59, 64, 69 e 74m/s. A velocidade do gás, vazão de líquido e velocidade do jato são mostradas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Condições experimentais para a injeção de líquido nas configurações 1 e 2.

Vg (m/s)	Ql (mL/min)	Vj (m/s)
59-64-69-74	300	6,37
	600	12,73
	900	19,10

Tabela 3.2 – Condições experimentais para a injeção de líquido na configuração 3.

Vg (m/s)	QI (mL/min)	Vj (m/s)
59-64-69-74	300	3,18
	600	6,37
	900	9,55
	1200	12,73

3.3- Obtenção de Imagens Fotográficas do Jato em Processo de Atomização

Existem muitas técnicas e equipamentos comerciais alternativos e sofisticados disponíveis para a obtenção de imagens que utilizam câmaras filmadoras de altíssima velocidade (> 50.000 quadros por segundo) sincronizados com pulsos de luz laser com duração de 25ns cada, como os mencionados na seção 2.3. No entanto, pelo fato de que estes equipamentos têm um alto custo, seja qual for, escolhesse um circuito eletrônico flash devido à fácil construção, baixo custo e ao barateamento de gastos no desenvolvimento deste trabalho.

Para a obtenção de imagens fotográficas do jato líquido em processo de atomização a garganta era iluminada com um circuito eletrônico flash, que se colocava na parte superior dela e mantinha acionado por um período de tempo de $6\mu\text{s}\pm 0,1\mu\text{s}$ que era sincronizado com uma filmadora digital da marca Sony modelo DCR-DVD 403 com resolução de 3 megapixel e velocidade de obturação de $250\mu\text{s}\pm 5\mu\text{s}$.

A Figura 3.5 mostra o plano do circuito eletrônico do flash usado na obtenção de imagens fotográficas do jato em processo de atomização.

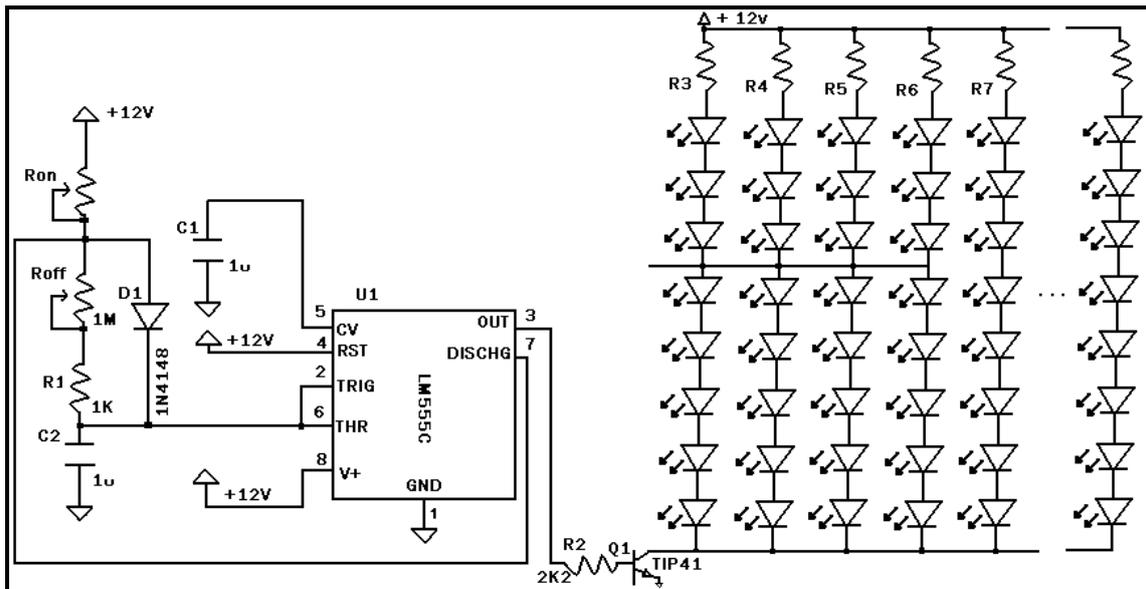


Figura 3.5 - Plano do circuito eletrônico do flash.

3.4- Ângulo de Espalhamento

Utilizou-se o software AutoCAD 2006 para medir o ângulo de espalhamento em cada uma das imagens obtidas na configuração 2. A medida foi feita da seguinte forma:

- Para cada condição experimental selecionava-se a melhor imagem e traçava-se uma linha em cada um dos extremos na periferia do espalhamento do jato, deixando-o entre as duas linhas;
- Tendo as linhas feitas, media-se o ângulo de espalhamento;
- Novamente selecionava-se outra imagem com as mesmas condições experimentais e repetia-se a metodologia descrita. A média dos dois valores obtidos era aceita como resultado final.

3.5- Trajetória do Jato

As imagens obtidas nas configurações 1 e 3 foram analisadas em computador, com auxílio do software ImagePro e a ferramenta PAINT. A metodologia utilizada para analisar as imagens era a seguinte:

- Para cada condição experimental selecionava-se a melhor imagem na qual era possível visualizar a trajetória do jato e o início da atomização;

- Com a ferramenta de medida do ImagePro fazia-se a calibração sobre a imagem com uma distância de valor conhecido na fotografia, permitindo a conversão de pixels a milímetros;
- Com o recurso de medidas manuais posicionava-se o cursor sobre a imagem do jato e determinavam-se as coordenadas x e y de vários pontos sobre a trajetória do jato;
- Desta mesma imagem também era determinado o ponto onde iniciava o desprendimento de filamentos e a formação de gotas;
- Conhecido o valor de conversão entre pixels e milímetros da calibração, a imagem era levada à ferramenta PAINT do computador e era possível desenhar na fotografia a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) e a trajetória do Modelo adaptado proposto aqui neste trabalho;
- Novamente selecionava-se uma nova imagem com as mesmas condições experimentais e repetia-se todo o processo.

NOTA: Todos os dados foram tratados em duplicatas, serão mostrados de forma parcial no capítulo seguinte e de forma total no Apêndice.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais obtidos do estudo trajetória do jato, da distância percorrida pelo jato até o início do desprendimento de filamentos e formação de gotas e do ângulo de espalhamento do jato são apresentados neste capítulo.

Depois de selecionar as melhores e mais representativas imagens fotográficas obtidas experimentalmente no processo de atomização do jato líquido para as condições operacionais mostradas nas Tabelas 3.1 e 3.2, foram analisadas com auxílio do software AutoCAD 2006, o software ImagePro e a ferramenta PAINT do computador, disponível no DEQ/UFSCar. Nelas era possível visualizar a trajetória do jato, assim como a formação de ondas de superfície e o ângulo de espalhamento, como é mostrado na Figura 4.1 e na Figura 4.2, fazendo possível a medição experimental da trajetória do jato, distância percorrida pelo jato até o início do desprendimento de filamentos e formação de gotas, e o ângulo de espalhamento do jato. Embora, têm-se imagens na qual é visualizado o fenômeno, para alguns casos era impossível medir as variáveis mencionadas acima porque não se observavam com a suficiente clareza os parâmetros objeto de estudo.

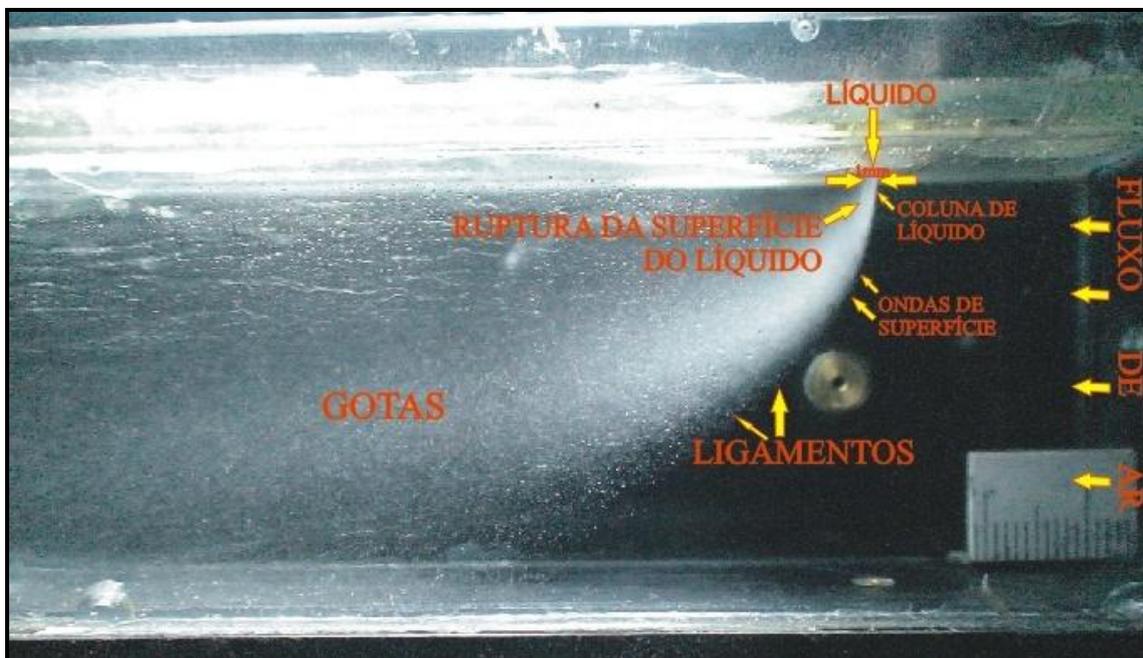


Figura 4.1 - Exemplo da ruptura de um jato líquido em uma corrente de ar transversal com as variáveis objetos de estudo.

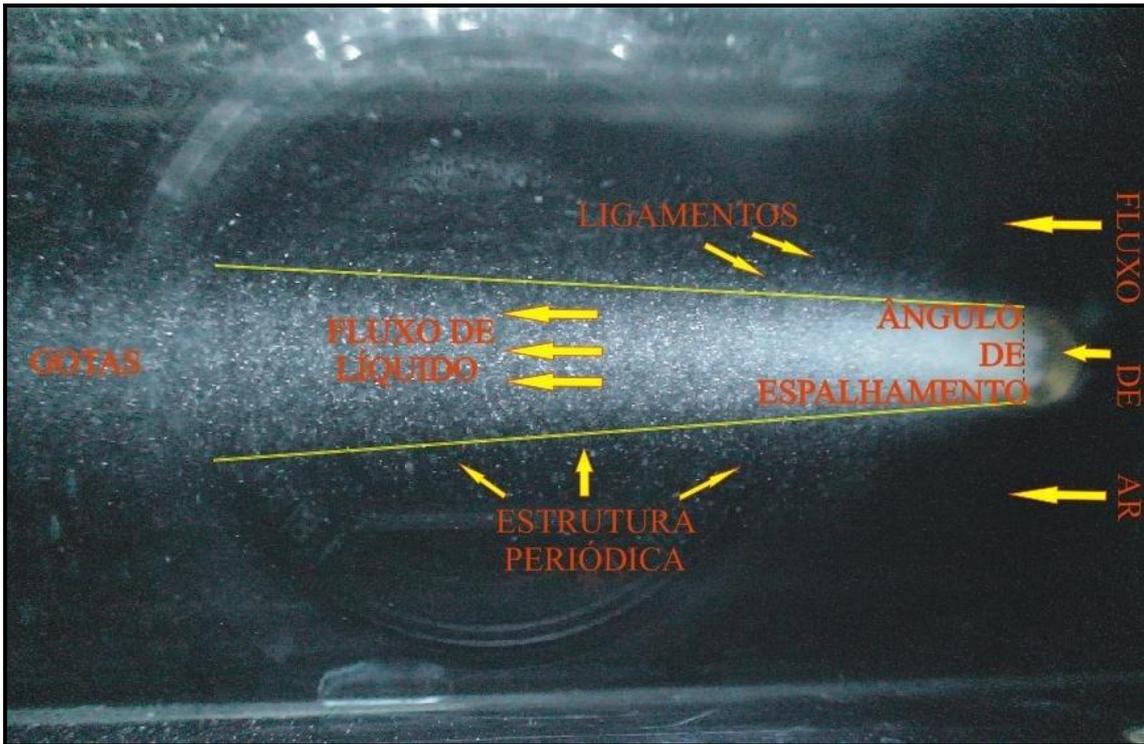


Figura 4.2 - Exemplo da ruptura de um jato líquido em uma corrente de ar transversal com as variáveis objeto de estudo vista desde outra perspectiva.

NOTA: As medidas foram feitas na periferia externa do jato líquido e estas dependem do olho do observador.

Os resultados do estudo das imagens fotográficas do jato em processo de atomização obtidos no interior da garganta do lavador Venturi, sob as condições operacionais mencionadas no capítulo 3, são mostrados nas figuras a seguir.

4.1- Ângulo de Espalhamento

Considerando as configurações de injeção de líquido apresentadas no capítulo 3, para a configuração 2, mediu-se nas imagens o ângulo de espalhamento do jato líquido no interior da garganta com a metodologia exposta na seção 3.1.1. As Figuras 4.3 e 4.4 mostram como foi feita a medida deste parâmetro, e em todos os casos usou-se o mesmo processo. Visualiza-se na Figura 4.3 o ângulo de espalhamento do jato mantendo constante a vazão de líquido e conseqüentemente a velocidade do jato e variando a velocidade do gás para a Réplica I. Comparando as imagens (a) e (b) observa-se que para uma velocidade de gás maior obtém-se um ângulo de espalhamento

quase igual, em média, nos dois casos. A Figura 4.4 mostra o ângulo de espalhamento do jato no interior da garganta mantendo constante a velocidade do gás e variando a velocidade do jato para a Réplica I. A comparação entre (a) e (b) demonstra que para uma velocidade do jato maior tem-se um ângulo de espalhamento maior.

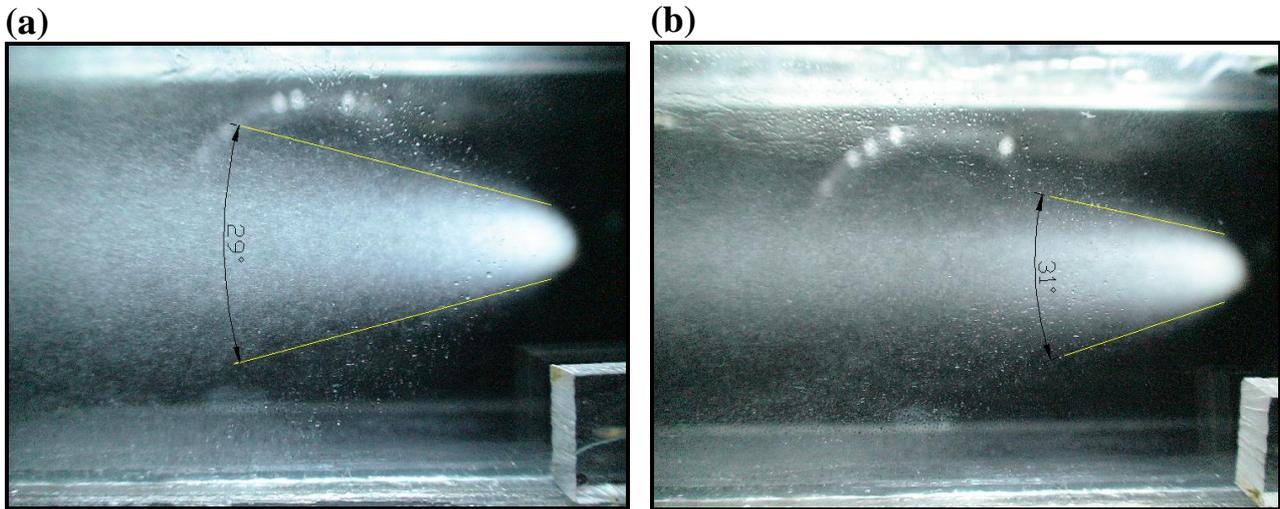


Figura 4.3 – Imagens dos jatos na configuração 2 para a Réplica I, $Q_l=600\text{mL/min}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ e (a) $V_g=59\text{m/s}$; (b) $V_g=74\text{m/s}$.

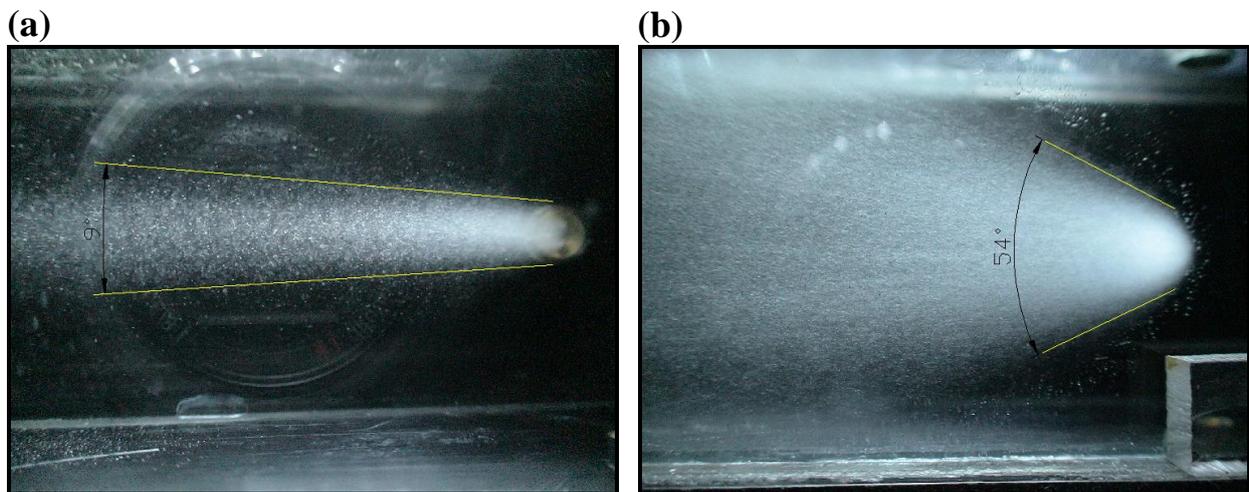


Figura 4.4 – Imagens dos jatos na configuração 2 para a Réplica I, $V_g=59\text{m/s}$ e (a) $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$), (b) $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$).

As observações podem ser corroboradas nos resultados da Figura 4.5 para cada uma das condições operacionais, na qual se evidencia que seja qual for a velocidade do gás para uma mesma vazão de líquido o valor do ângulo de espalhamento do jato

líquido no interior da garganta é quase o mesmo, provando que este é uma função forte da vazão de líquido já que aumenta na medida que aumenta a velocidade do jato.

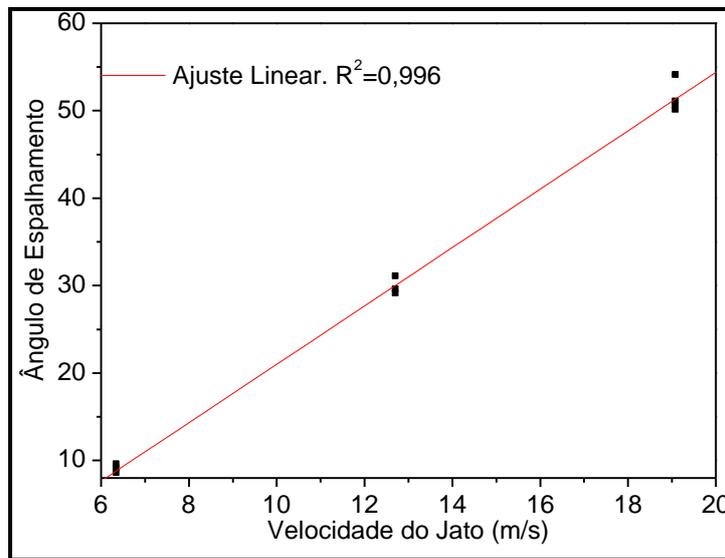


Figura 4.5 – Resultados experimentais do ângulo de espalhamento obtidos na configuração 2 para cada uma das condições de processo.

Depois de correlacionar os dados, obteve-se uma equação que relaciona $[\theta = f(V_j)]$, como é mostrado na Equação 4.1:

$$\theta = 3,339 * V_j - 12,386 \quad (4.1)$$

No Apêndice A e B podem-se encontrar as demais imagens fotográficas usadas na medida do ângulo de espalhamento do jato líquido no interior da garganta do lavador Venturi, para a configuração 2, além da tabela com os resultados experimentais das medidas.

4.2- Trajetória do Jato

Considerando as configurações de injeção de líquido apresentadas no capítulo 3, para a configuração 1 e 3, mediu-se nas imagens a trajetória do jato e a distância percorrida até o início de desprendimento de filamentos e formação de gotas, segundo a metodologia apresentada na seção 3.1.2. Contudo, na configuração 3 não foi possível visualizar com clareza a trajetória do jato e a distância percorrida até o início de desprendimento de filamentos e formação de gotas para cada velocidade de gás na

vazão de 300mL/min ($V_j=3,18\text{m/s}$), já que ele ficava paralelo à parede da garganta por causa da baixa velocidade do jato.

Essas medidas foram comparadas com o Modelo Gonçalves *et al.* (1999) que usa constantes experimentais de ajuste para o cálculo das trajetórias teóricas. As constantes são: $e = 0,5$; $K = 1$; $\beta = 0,348$ (valores propostos por Adelberg, 1967; *apud* Gonçalves, 2000), no qual Adelberg (1967) para a constante e propõe um valor 9 vezes menor, e $c = 16,46$.

De acordo com Adelberg (1967, *apud* Gonçalves, 2000) a taxa de perda de massa do jato é dada pela Equação 4.2:

$$\dot{m} = \frac{K_A \rho_l}{eD_j - \lambda_{m\sigma}} \left\{ \frac{2}{5} f_p \left[(eD_j)^{5/2} - \lambda_{m\sigma}^{5/2} \right] - v[eD_j - \lambda_{m\sigma}] \right\} \quad (4.2)$$

onde $(e.D_j)$ é a fração do diâmetro do jato, (ρ_l) é a densidade do líquido, (v) é um parâmetro de dissipação viscosa, (f_p) é um parâmetro de força dado pela Equação 4.3 e $(\lambda_{m\sigma})$ é o mínimo comprimento de onda dado pela Equação 4.4:

$$f_p = \frac{\beta(\pi/2)^{1/2} \rho_g V_g^2}{(\rho_l \sigma)^{1/2}} \quad (4.3)$$

$$\lambda_{m\sigma} = 15,8326 \left[\frac{\mu_l (\sigma / \rho_l)^{1/2}}{\beta \rho_g V_g^2} \right]^{2/3} \quad (4.4)$$

onde (ρ_g) e (V_g) são a densidade e velocidade do gás, respectivamente, (σ) é a tensão superficial e (μ_l) é a viscosidade dinâmica.

Das equações mencionadas acima e , K , e β são parâmetros de ajuste experimental.

No presente trabalho fez-se um novo ajuste empírico dessas constantes fundamentado em nova evidência e encontrou-se que uma adaptação do modelo representou muito bem os pontos experimentais do presente trabalho. Os novos valores propostos para as constantes foram: $e = 0,7$; $K = 0,7$; $\beta = 0,348$ e $c = 0,1$.

Roberts e Hill (1981, *apud* Gonçalves, 2000) comentaram que os comprimentos de onda experimentais máximos são da ordem de grandeza do diâmetro do jato, o que

sugere um valor para a constante e mais próximo da unidade, e também é mais próximo do valor que se está propondo neste trabalho. Porém, Costa (2002) usou para a constante e o valor de 0,2 que diferia do valor de 0,5 usado originalmente no modelo, comentando que a trajetória predita pelo modelo original ficou abaixo dos pontos experimentais e que o valor de 0,2 representou bem os pontos experimentais na faixa das variáveis operacionais e os dados de Gonçalves (2000).

Avaliando o valor da constante e encontrou-se que para maiores valores, maior é a taxa de perda de massa, e que para valores menores, menor é a taxa de perda de massa. Na Figura 4.6, observa-se a comparação da taxa de perda de massa para as mesmas condições experimentais e diferentes valores de e , conferindo o dito anteriormente. Com uma menor taxa de perda de massa o jato permanece como tal a uma distância maior antes de começar o despreendimento de filamentos e formação de gotas, dando início à atomização. A escolha dos valores destas constantes dependem dos dados experimentais provenientes das fotografias, observando que com uma qualidade maior das imagens obtêm-se valores mais próximos ao real. Nota-se que as imagens obtidas por Gonçalves (2000) e Costa (2002) não eram nítidas o suficiente para visualizar com clareza o ponto onde iniciava a atomização.

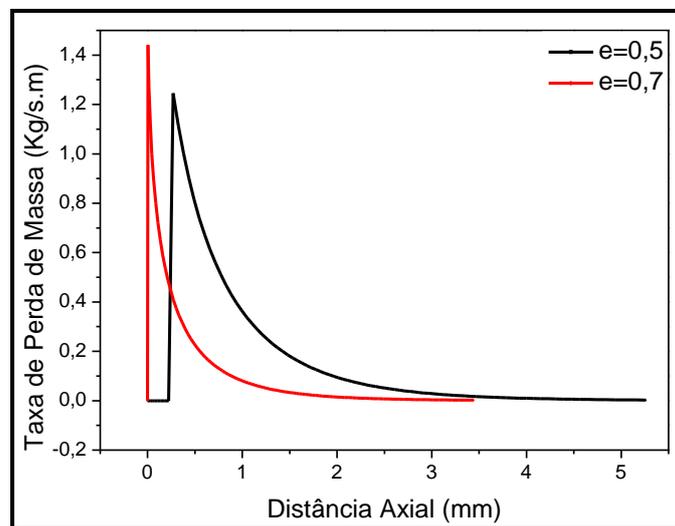
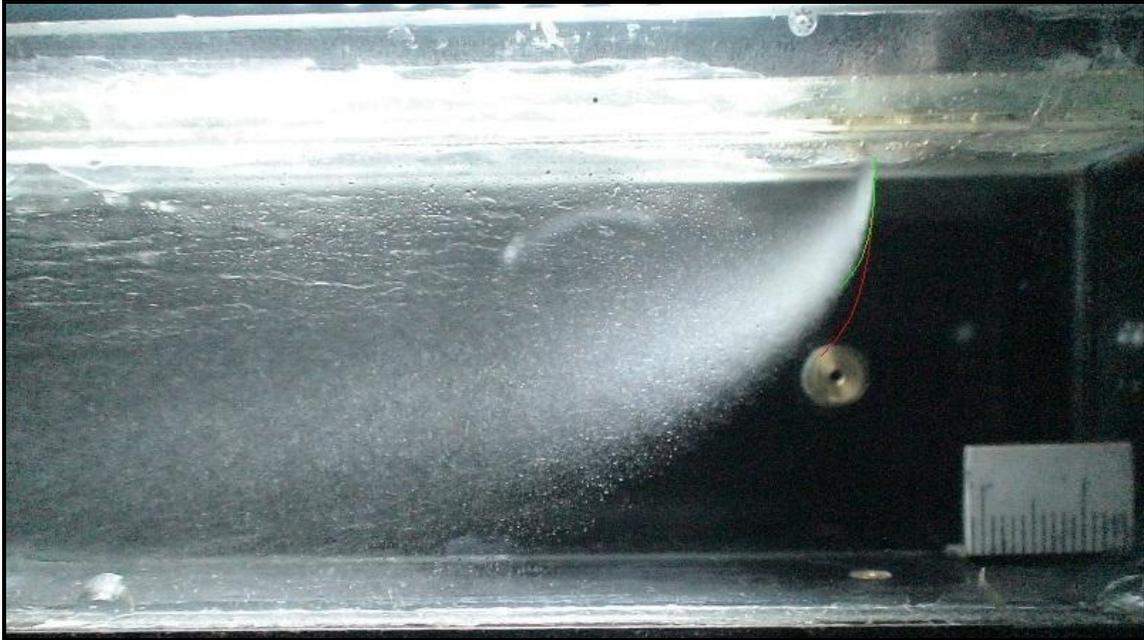


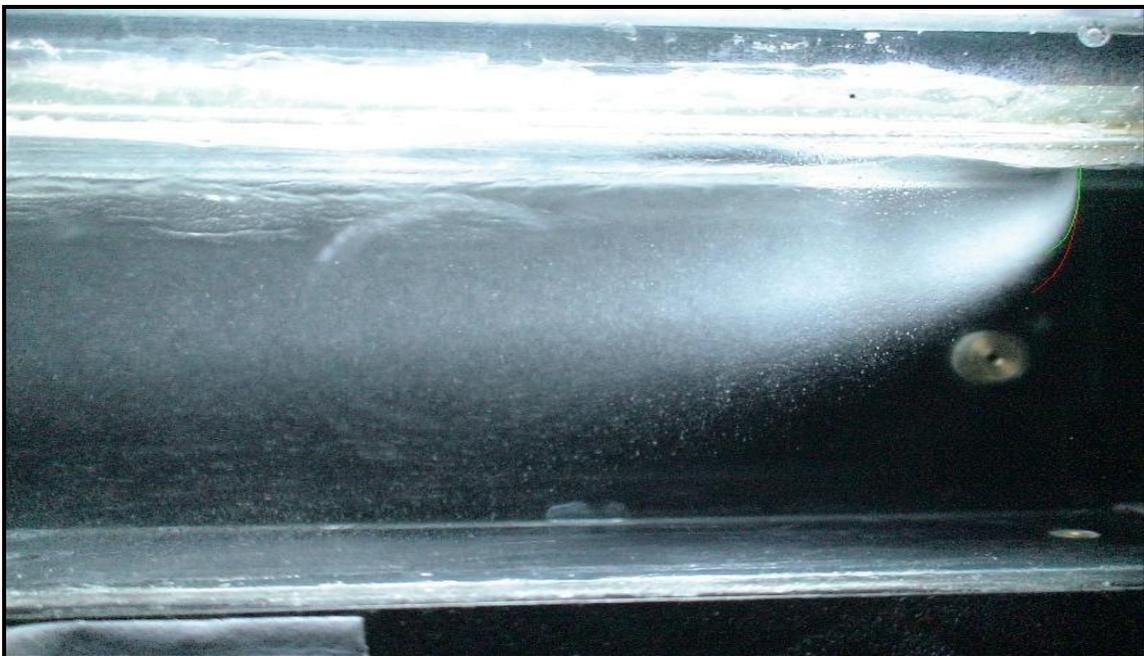
Figura 4.6 - Variação da perda de massa em relação à constante e na configuração 1, $Q_l=600\text{mL}/\text{min}$ ($V_j=12,73\text{m}/\text{s}$) e $V_g=59\text{m}/\text{s}$.

Mostra-se na Figura 4.7 as imagens da trajetória do jato através da injeção de líquido por 1 orifício mantendo constante a velocidade do jato e variando a velocidade do gás sobrepondo nela a trajetória do jato encontrada pelo Modelo

Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e o adaptado (linha verde). Comparando as imagens (a) e (b) observa-se que o aumento na velocidade do gás proporcionou um maior achatamento do jato líquido, gerando assim jatos menos penetrantes para uma mesma vazão de líquido.



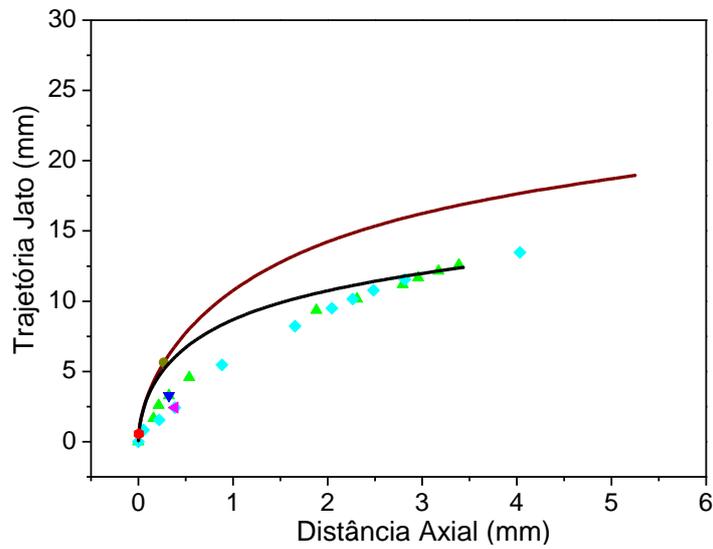
(a) $V_g=59\text{m/s}$



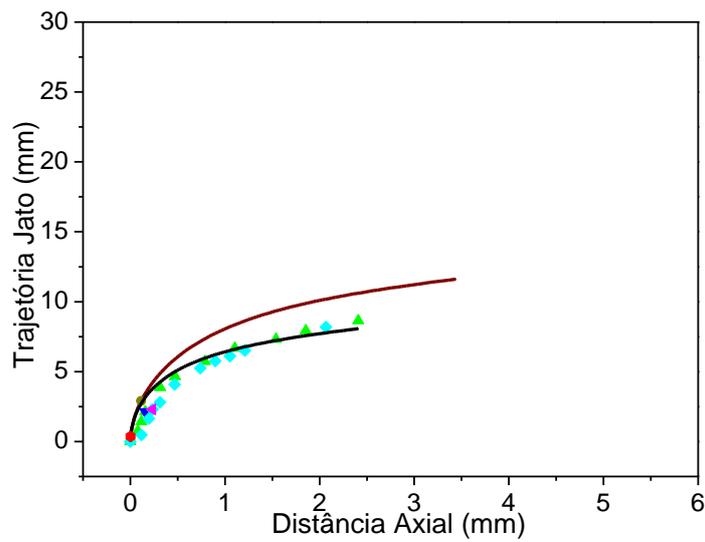
(b) $V_g=74\text{m/s}$

Figura 4.7 – Imagens dos jatos na configuração 1 para a Réplica I com a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $Q_l=600\text{mL/min}$, $V_j=12,73\text{m/s}$.

Na Figura 4.8 observa-se que para um mesmo valor de velocidade do jato a atomização ocorre mais rápido quando a velocidade do gás é maior, neste caso em (b).



(a) $V_g=59\text{m/s}$

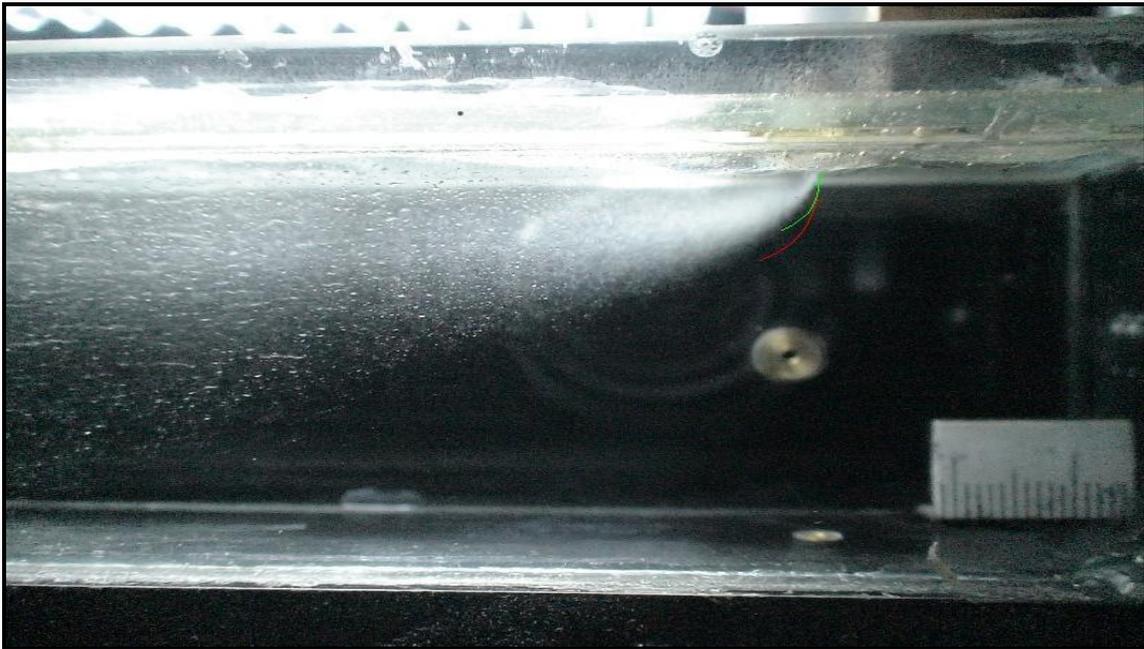


(b) $V_g=74\text{m/s}$

- | | |
|----------------------------------|--|
| — Modelo Gonçalves et al. (1999) | ● Início da atomização Modelo |
| ▲ Réplica I | ▼ Início da atomização Réplica I |
| ◆ Réplica II | ◀ Início da atomização Réplica II |
| — Adaptado Modelo | ● Início da atomização Adaptado Modelo |

Figura 4.8 – Resultados da trajetória do jato na configuração 1, $Q_I=600\text{mL/min}$, $V_j=12,73\text{m/s}$.

A Figura 4.9 apresenta a trajetória do jato no interior da garganta por 1 orifício mantendo constante a velocidade do gás e variando a vazão de líquido e conseqüentemente a velocidade do jato, sobrepondo nela a trajetória do jato encontrada pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e o adaptado (linha verde). Comparando as imagens (a) e (b) observa-se que o aumento na vazão de líquido proporcionou jatos mais penetrantes por causa do aumento na velocidade do jato.



(a) $Q_l=300\text{mL}/\text{min}$ ($V_j=6,37\text{m}/\text{s}$)

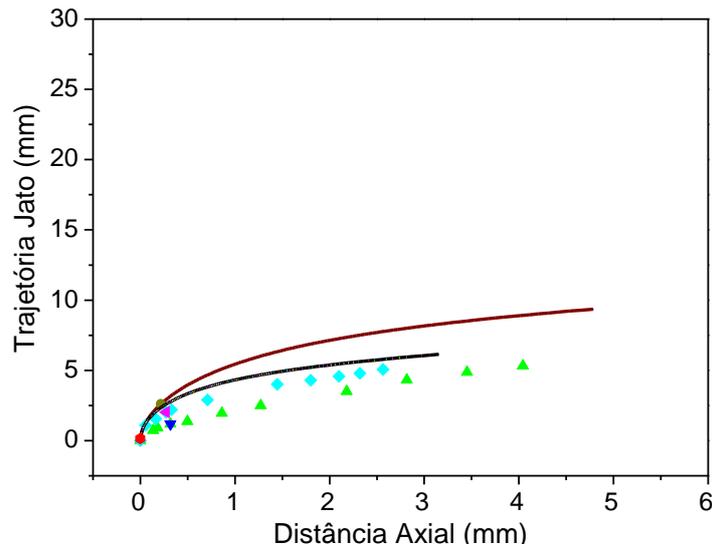
Figura 4.9 – Imagens dos jatos na configuração 1 para a Réplica I com a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $V_g=59\text{m}/\text{s}$.



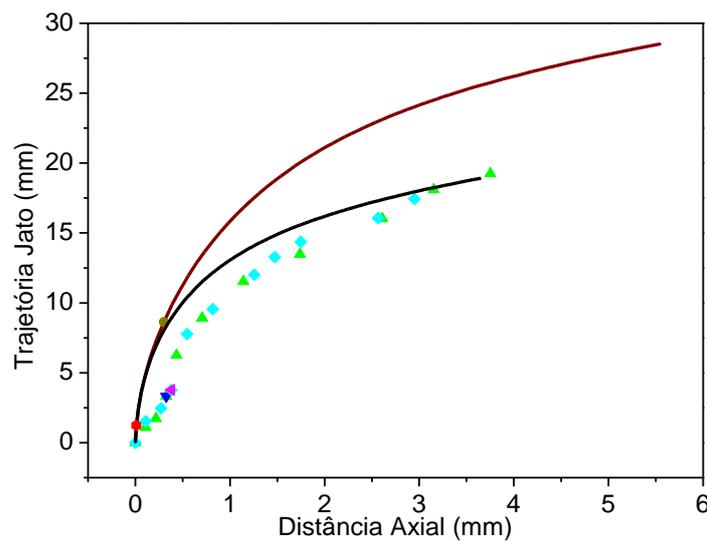
(b) $Q_l=900\text{mL}/\text{min}$ ($V_j=19,10\text{m}/\text{s}$)

Figura 4.9 (continuação) - Imagens dos jatos na configuração 1 para a Réplica I com a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $V_g=59\text{m}/\text{s}$.

Nota-se na Figura 4.10 que existe uma relação direta e muito forte entre a velocidade do jato e a trajetória dele na garganta, evidenciando que para um mesmo valor de velocidade de gás e diferentes valores de vazão de líquido a atomização inicia mais rápido quando a velocidade do jato é menor.



(a) $Q_l=300\text{mL/min}$ ($V_j=6,37\text{m/s}$)



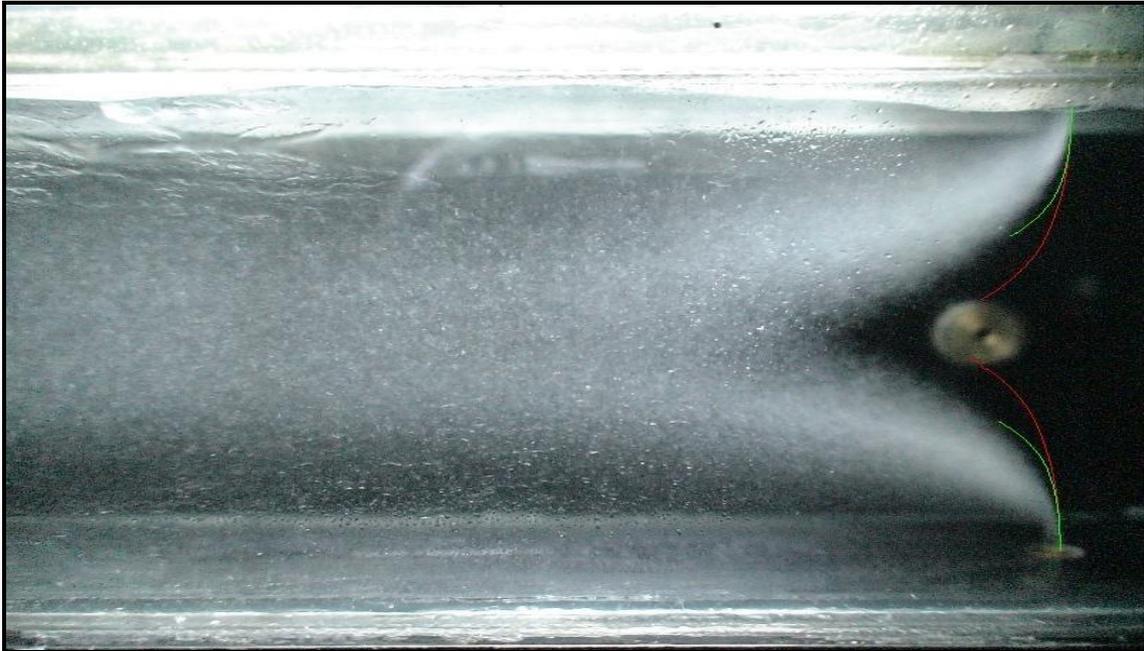
(b) $Q_l=900\text{mL/min}$ ($V_j=19,10\text{m/s}$)

- | | |
|----------------------------------|--|
| — Modelo Gonçalves et al. (1999) | ● Início da atomização Modelo |
| ▲ Réplica I | ▼ Início da atomização Réplica I |
| ◆ Réplica II | ◀ Início da atomização Réplica II |
| — Adaptado Modelo | ● Início da atomização Adaptado Modelo |

Figura 4.10 – Resultados da trajetória do jato na configuração 1, $V_g=59\text{m/s}$.

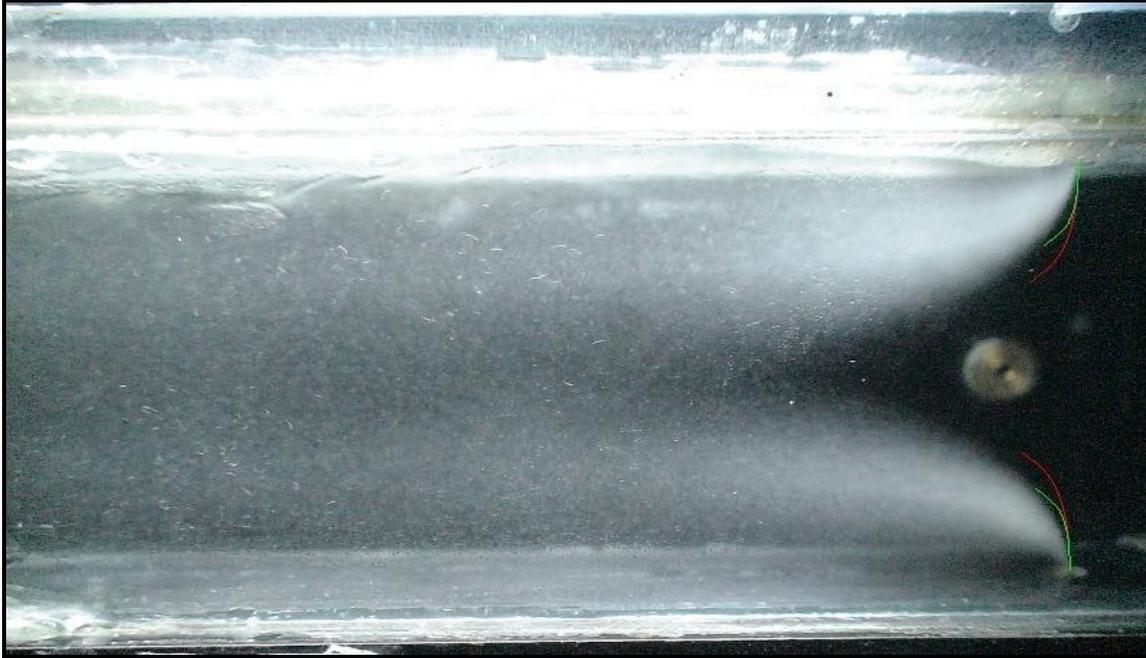
Observa-se na Figura 4.11 as imagens da trajetória do jato através da injeção de líquido por 2 orifícios mantendo constante a velocidade do jato e variando a velocidade do gás sobrepondo nela a trajetória do jato encontrada pelo Modelo Gonçalves *et al.*

(1999) e o adaptado (linha verde). Encontra-se que o que ocorre em um jato acontece da mesma maneira no outro, que é o que se esperaria que acontecesse fisicamente na teoria, observando a ação da gravidade sob o jato superior, dando a aparência de um jato mais penetrante respeito do jato inferior. É possível visualizar nesta figura que ocorre o mesmo que se encontrou na Figura 4.7.



(a) $V_g=59\text{m/s}$

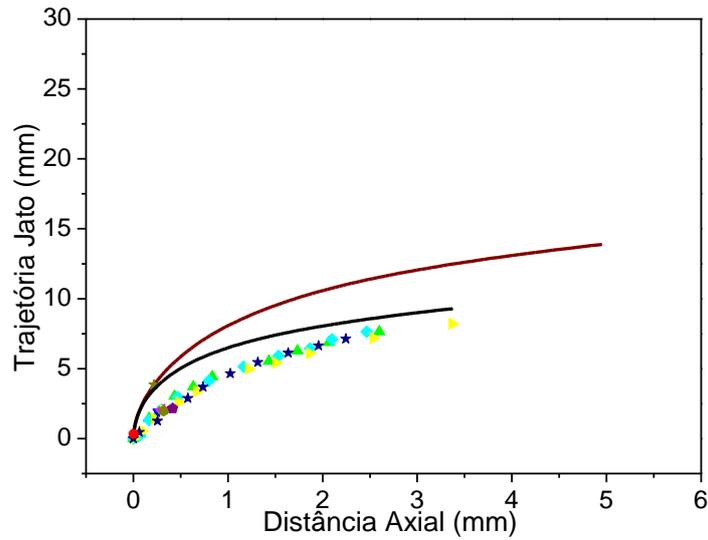
Figura 4.11 – Imagens dos jatos na configuração 3 para a Réplica I com a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $Q_l=900\text{mL/min}$, $V_j=9,55\text{m/s}$.



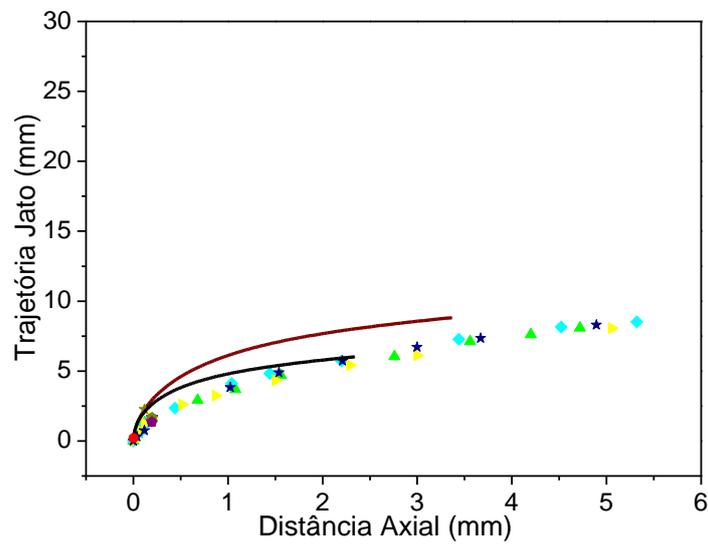
(b) $V_g=74\text{m/s}$

Figura 4.11 (continuação) – Imagens dos jatos na configuração 3 para a Réplica I com a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $Q_l=900\text{mL/min}$, $V_j=9,55\text{m/s}$.

Na Figura 4.12, confere-se experimentalmente que o que acontece em um jato ocorre da mesma maneira no outro. Nesta figura visualiza-se o mesmo que foi observado na Figura 4.8.



(a) $V_g=59\text{m/s}$



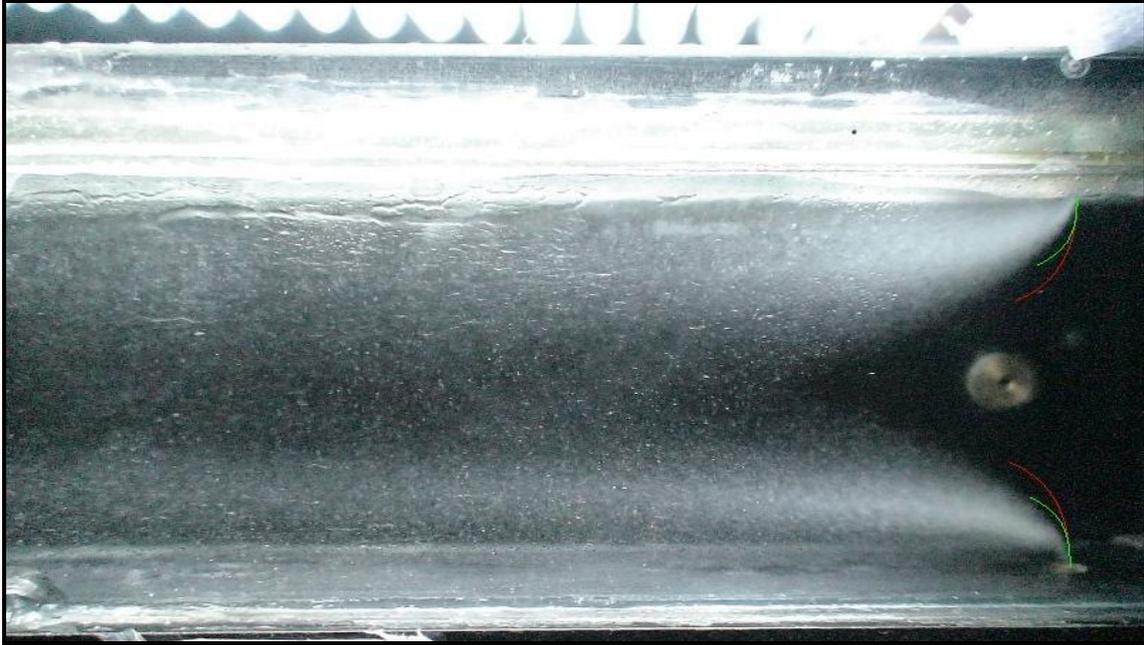
(b) $V_g=74\text{m/s}$

- | | |
|----------------------------------|--|
| — Modelo Gonçalves et al. (1999) | ★ Início atomização Modelo |
| ▲ Réplica I Jato Superior | ▼ Início atomização Réplica I Jato Superior |
| ◆ Réplica I Jato Inferior | ◆ Início atomização Réplica I Jato Inferior |
| ▶ Réplica II Jato Superior | ◆ Início atomização Réplica II Jato Superior |
| ★ Réplica II Jato Inferior | ◆ Início atomização Réplica II Jato Inferior |
| — Adaptado Modelo | ◆ Início atomização Adaptado Modelo |

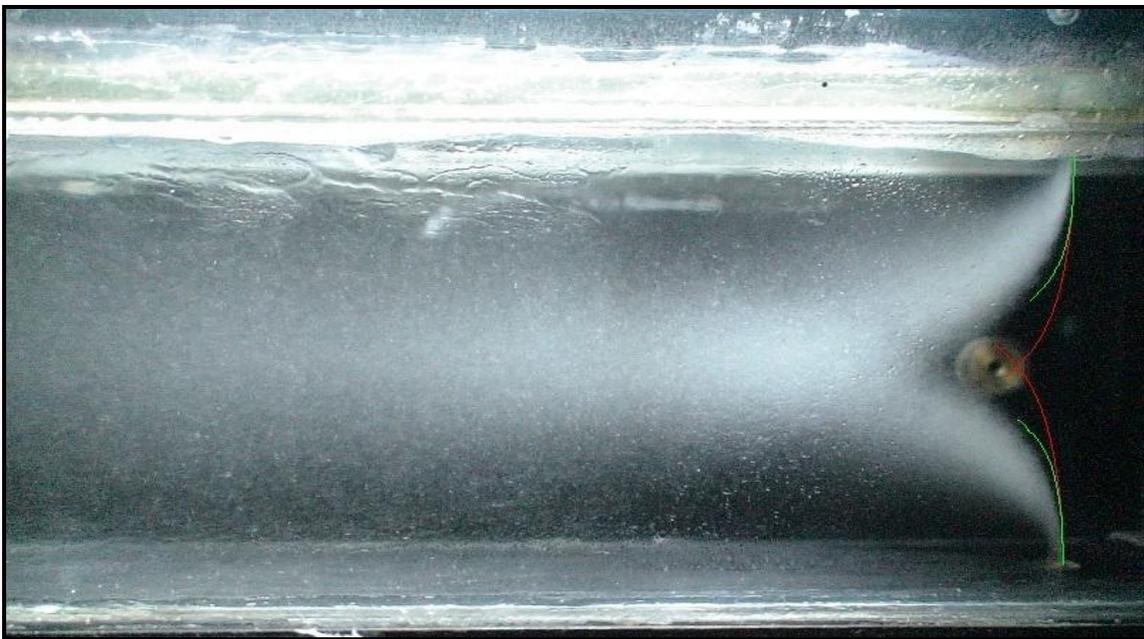
Figura 4.12 – Resultados da trajetória do jato na configuração 3, $Q_l=900\text{mL/min}$, $V_j=9,55\text{m/s}$.

A Figura 4.13 apresenta a penetração do jato no interior da garganta por 2 orifícios mantendo constante a velocidade do gás e variando a vazão de líquido e conseqüentemente a velocidade do jato, sobrepondo nela a trajetória do jato encontrada

pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e o adaptado (linha verde). Comparando o acontecido aqui com o ocorrido na Figura 4.9 observa-se o mesmo comportamento.



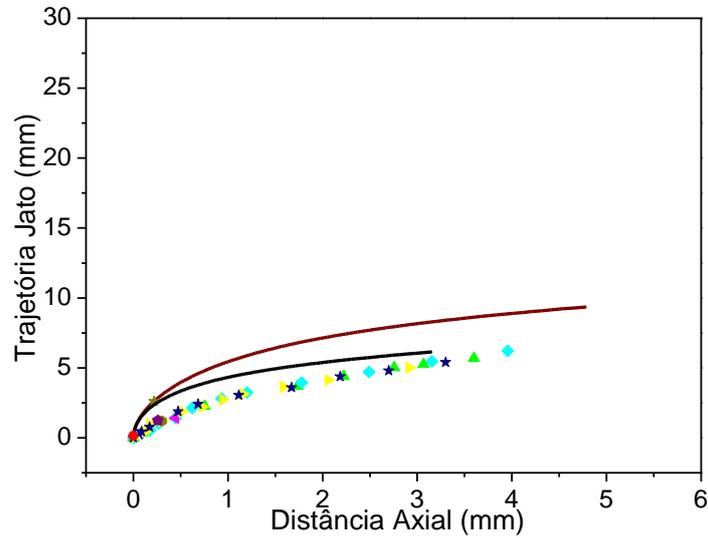
(a) $Q_l=600\text{mL}/\text{min}$ ($V_j=6,37\text{m}/\text{s}$)



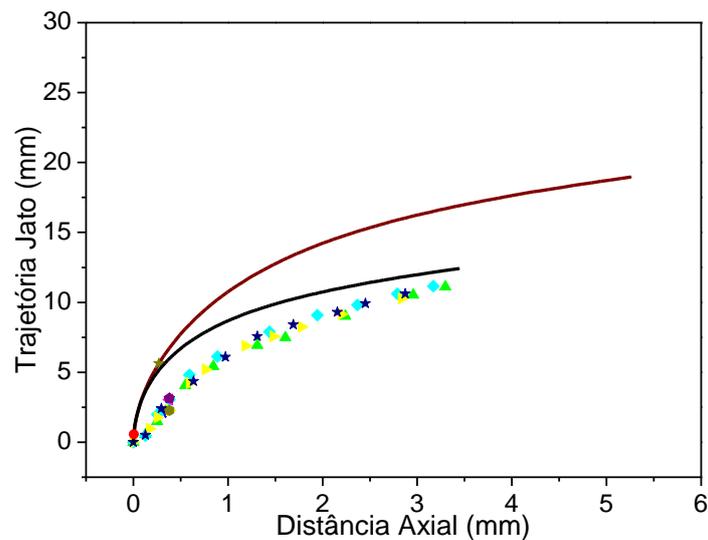
(b) $Q_l=1200\text{mL}/\text{min}$ ($V_j=12,73\text{m}/\text{s}$)

Figura 4.13 – Imagens dos jatos na configuração 3 para a Réplica I com a trajetória do jato fornecida pelo Modelo Gonçalves *et al.* (1999) (linha vermelha) e adaptado (linha verde), $V_g=59\text{m}/\text{s}$.

Observa-se na Figura 4.14 que existe uma relação direta e muito forte entre a velocidade do jato e a penetração dele na garganta, como é observado na Figura 4.10, evidenciando que para um mesmo valor de velocidade do gás e diferentes valores de vazão de líquido a atomização inicia mais rápido quando a velocidade do jato é menor.



(a) $Q_l=600\text{mL/min}$ ($V_j=6,37\text{m/s}$)



(b) $Q_l=1200\text{mL/min}$ ($V_j=12,73\text{m/s}$)

- | | |
|----------------------------------|--|
| — Modelo Gonçalves et al. (1999) | ★ Início atomização Modelo |
| ▲ Réplica I Jato Superior | ▼ Início atomização Réplica I Jato Superior |
| ◆ Réplica I Jato Inferior | ◆ Início atomização Réplica I Jato Inferior |
| ▶ Réplica II Jato Superior | ● Início atomização Réplica II Jato Superior |
| ★ Réplica II Jato Inferior | ◆ Início atomização Réplica II Jato Inferior |
| — Adaptado Modelo | ● Início atomização Adaptado Modelo |

Figura 4.14 – Resultados da trajetória do jato na configuração 3, $V_g=59\text{m/s}$.

Através das Figuras 4.7 a 4.14, observa-se que no modelo adaptado a atomização inicia mais cedo, o mesmo foi verificado pelo estudo Gonçalves (2000) e Costa (2002) que a uma pequena distância logo após a penetração da coluna líquida inicia-se a atomização do jato e esta ocorre ao longo do mesmo com um desprendimento contínuo de massa.

As imagens obtidas com a metodologia exposta neste trabalho no capítulo 3, que são melhores que as obtidas no trabalho de Gonçalves (2000) deixam claro que a atomização de fato ocorre mais cedo, embora as imagens ainda não tenham qualidade suficiente para permitir a visualização exata do ponto inicial da atomização. Assim, nota-se que o modelo adaptado é capaz de representar melhor a trajetória do jato.

Visualiza-se que a dispersão das gotas é rápida devido à quantidade de filme líquido que é observado na parede no interior da garganta.

As fotografias obtidas nas configurações 1 e 3, bem como tabelas com as medidas da trajetória do jato e o ponto aonde ocorre a atomização, e demais figuras com os resultados encontra-se no apêndice A, B e C.

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Do estudo das imagens fotográficas do jato líquido em processo de atomização no interior da garganta do lavador Venturi conclui-se que:

- Para uma mesma vazão de líquido e diferentes velocidades de gás, obtêm-se um ângulo de espalhamento quase igual.
- Para uma mesma velocidade de gás e diferentes velocidades do jato, têm-se um ângulo de espalhamento maior para a vazão de líquido maior. Provando que este é uma função forte da velocidade do jato.
- Encontrou-se uma expressão que correlaciona o ângulo de espalhamento em função da velocidade do jato, da forma $[\theta = f(V_j)]$.
- Não existe um único ponto de atomização, mas sim um desprendimento contínuo de massa, influenciado pelas condições de operação, que começa logo após de uma certa distância da base do jato.
- Há uma dependência direta e muito forte entre a vazão de líquido e a trajetória do jato no interior da garganta. Isto é que para um mesmo valor de velocidade do jato o desprendimento de filamentos ocorre mais rápido quando a velocidade do gás é maior e que para um mesmo valor de velocidade de gás e diferentes valores de vazão de líquido o início da atomização acontece mais rápido quando a velocidade do jato é menor.
- Os novos valores das constantes de ajuste experimental para o modelo adaptado representou muito bem os pontos experimentais do presente trabalho.
- As imagens obtidas do processo de atomização no interior da garganta do lavador Venturi foram aceitáveis para a medida do ângulo de espalhamento e da trajetória e distância percorrida pelo jato até o início do desprendimento de filamentos e formação de gotas. Contudo, a qualidade delas não foi a esperada para medir os principais parâmetros das ondas de superfície formadas na superfície externa do jato.

- Sugere-se o uso de uma técnica ótica de medida laser na captura de imagens, como as estudadas no capítulo 2, para visualizar com clareza as variáveis de estudo e minimizar o erro do observador na medida e assim poder aperfeiçoar o modelo de predição da atomização do jato líquido no interior da garganta de um lavador Venturi proposto por Gonçalves (1999).

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÍSA, L.; GARCÍA, J. A.; CERECEDO, L. M.; GRACÍA PALACÍN, I.; CALVO, E. Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet. *International Journal of Multiphase Flow*. 28, p. 301–324. 2001.

COSTA M., MARIA ANGÉLICA. Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi. *Tese Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. CCET-EQ*. 2002.

COSTA, M. A. M.; HENRIQUE, P. R.; GONÇALVES, J. A. S. and COURY, J. R.. Droplet size in a rectangular Venturi scrubber. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. v. 21, n. 02, p. 335-343. 2003.

FATHIKALAJAHI, J.; TALAIE M. R.; TAHERI M. Theoretical study of nonuniform droplet concentration distribution on Venturi scrubber performance. *Particule Science and Technology*. v. 14, p. 153-164, 1996.

FERNÁNDEZ ALONSO, D.; GONÇALVES, J. A. S.; AZZOPARDI, B. J.; COURY, J. R. Drop size measurements in Venturi scrubbers. *Chemical Engineering Science*. 56, p. 4901-4911. 2001.

GAÑÁN-CALVO, A. M. Enhanced liquid atomization: From flow-focusing to flow-blurring. *Applied Physics Letters*. 86, p. 21410101-21410103. 2005.

GONÇALVES, JOSÉ ANTÔNIO SILVEIRA. Aspectos da modelagem matemática de lavadores Venturi. *Tese Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. CCET-EQ*. 2000.

GONÇALVES, J. A. S.; FERNÁNDEZ ALONSO, D.; MARTINS COSTA, M. A.; AZZOPARDI, B. J.; COURY, J. R. Evaluation of model available for the prediction of pressure drop in Venturi scrubbers. *Journal of Hazardous Materials*. B81, p. 123-140. (2000).

GONÇALVES, J. A. S.; COSTA, M. A. M.; AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Atomization of liquids in a Pease-Anthony Venturi scrubber. Part II. Droplet dispersion. *Journal of Hazardous Materials*. B116, p. 147-157. 2004.

- LAWSON, N. J. The application of laser measurement techniques to aerospace flows. *Proc. Instn Mech. Engrs.* v. 218, Part G. 2003.
- LINNE, MARK A.; PACIARONI, M.; GORD, J. R.; MEYER, T. R. Ballistic imaging of the liquid core for a steady jet in crossflow. *Optical Society of America.* v. 44, n. 31, p. 6627-6633. 2005.
- LIU, H. F.; LI, W. F.; CAO, X. K.; XU, J. L.; CHEN, X. L.; WANG, Y. F.; YU, G. S.; WANG, F. C.; YU, Z. H. Effect of liquid jet diameter on performance of coaxial two-fluid airblast atomizers. *Chemical Engeneering and Processing.* 45, p. 240-245. 2005.
- MAYER, W. O. H.; BRANAM, R. Atomization characteristics on the surface of a round liquid jet. *Experiments in Fluids.* 36, p. 528–539. 2004.
- RIBEIRO, ANA PAULA RODRIGUES ALVES. Estudo da eficiência de coleta em um lavador Venturi com injeção de líquido por multi-orifícios. *Tese Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. CCET-EQ.* 2005.
- ROBERTS, D. B.; HILL, J. C. Atomization in a Venturi scrubber. *Chemical Engineering Communication.* v. 12, p. 33-68. 1981.
- SCHELLING, J.; REH, L. Influence of atomizer design and coaxial gas velocity on gas entrainment into sprays. *Quemical Engeneering and Processing.* 38, p. 383-393. 1999.
- VISWANATHAN, S.; LIM, D. S. and MADHUMITA B. RAY. Measurements of Drop Size and Distribution in an Annular Two-Phase, Two-Component Flow Occurring in a Venturi Scrubber. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, p. 7458-7468. 2005.
- VISWANATHAN, S.; ST. PIERRE, C. C.; GNYP, A. W. Jet penetration measurements in a Venturi scrubber. *Canadian Journal of Chemical Engineering.* v. 61, p. 504-508. 1983.
- YOON, SAM S.; HEISTER STEPHEN D. A nonlinear atomization model based on a boundary layer instability mechanism. *Physics of Fluids.* v. 16, n. 1, p. 47-61. 2004.
- YOON, S. S. Droplet distributiond at the liquid core of a turbulent spray. *Physics of Fluids.* 17, p. 03510301-03510324. 2005.

APÊNDICE A

**Imagens Fotográficas do Processo de Atomização no Interior da Garganta do
Lavador Venturi Usadas nas três Configurações**

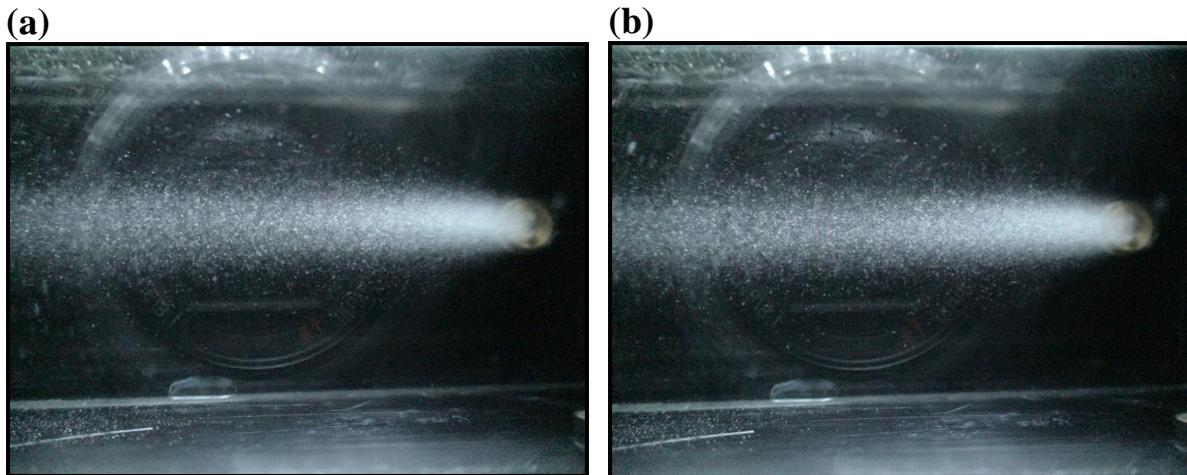


Figura A.1 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g= 59\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

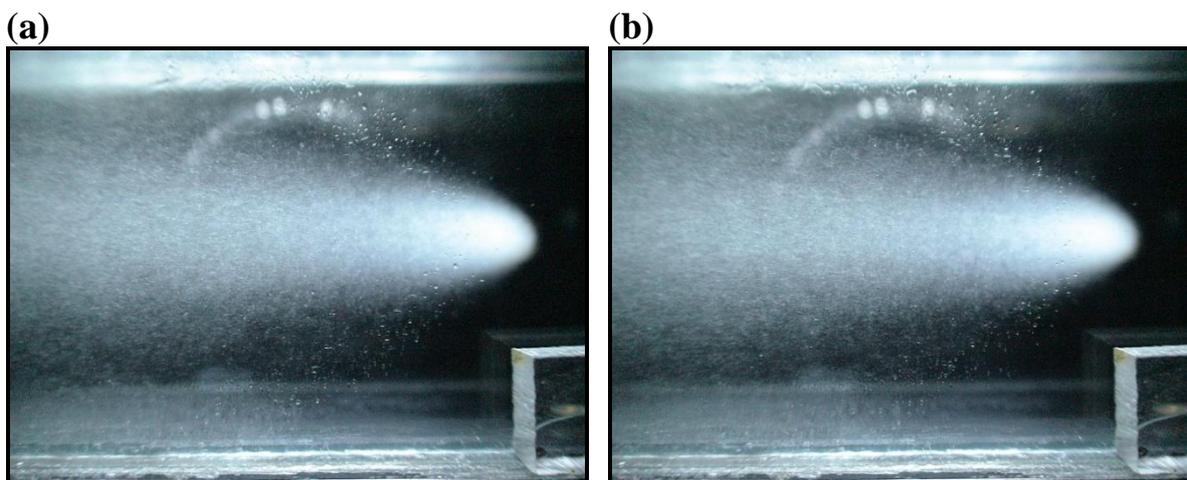


Figura A.2 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g= 59\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

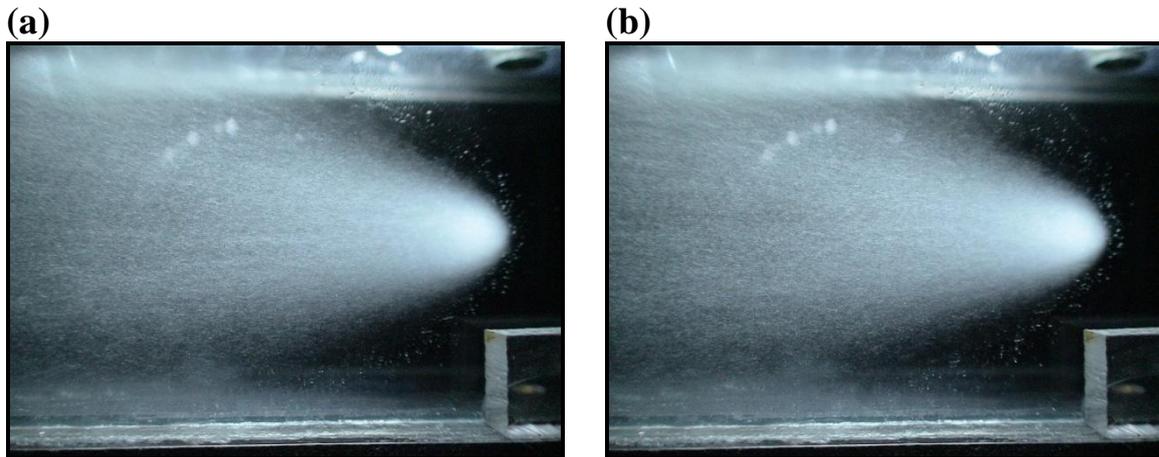


Figura A.3 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=59\text{m/s}$, $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

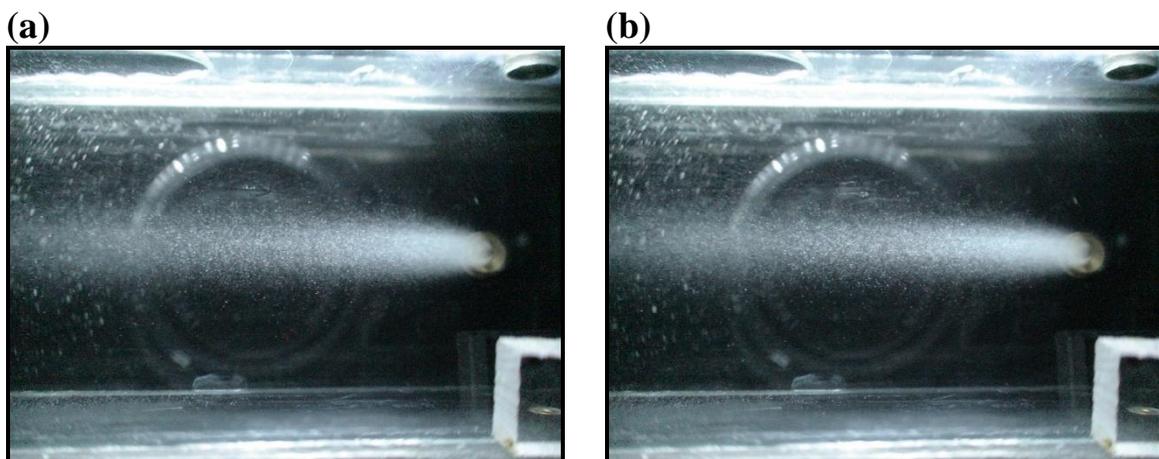


Figura A.4 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=64\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

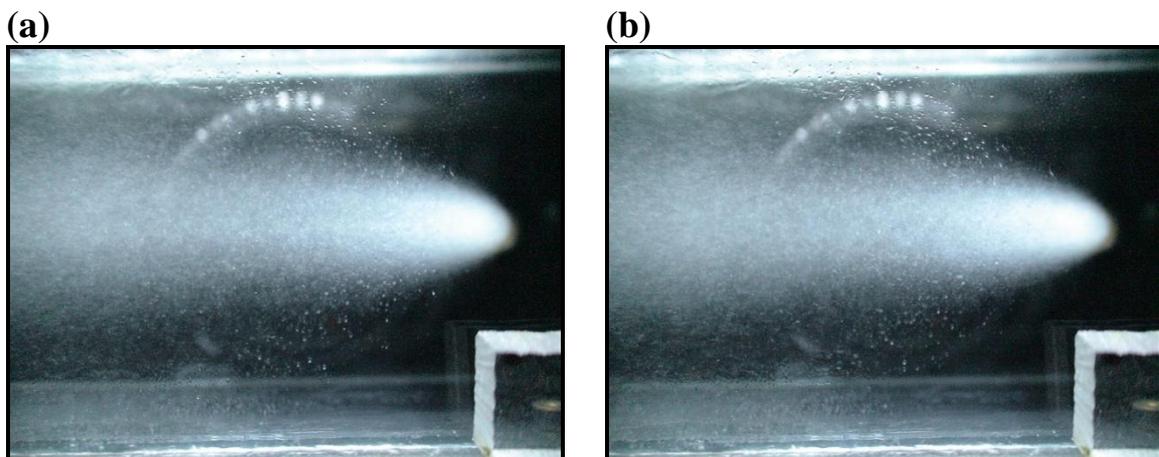


Figura A.5 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=64\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

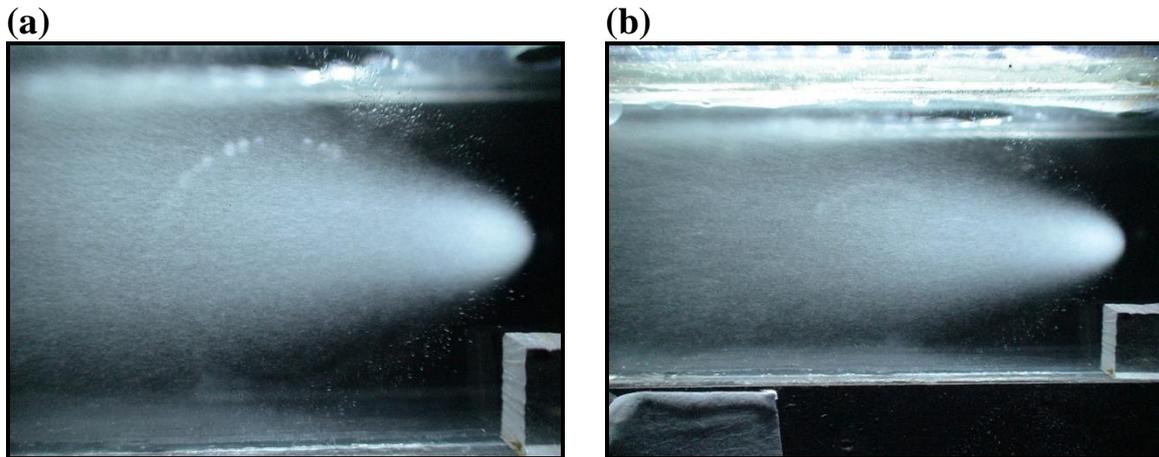


Figura A.6 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=64\text{m/s}$, $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

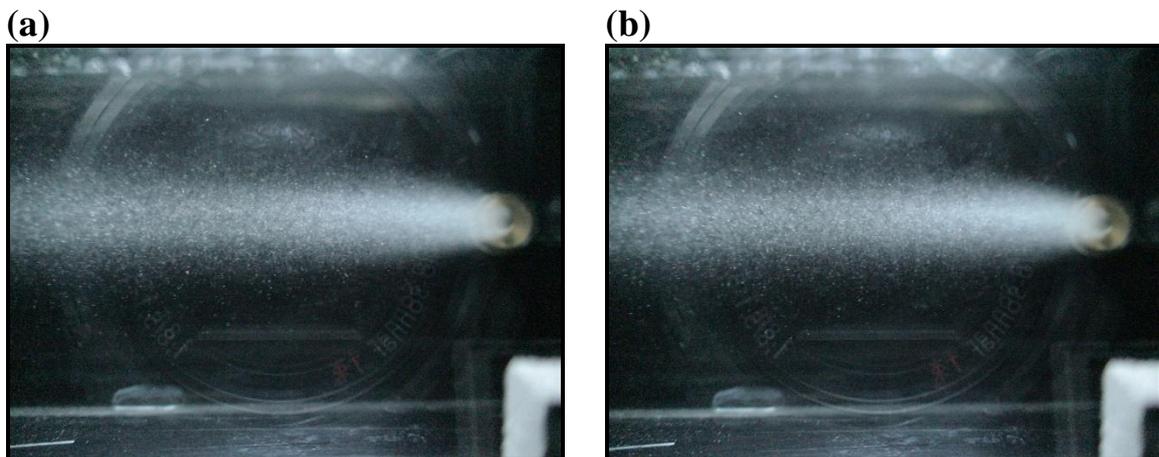


Figura A.7 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=69\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

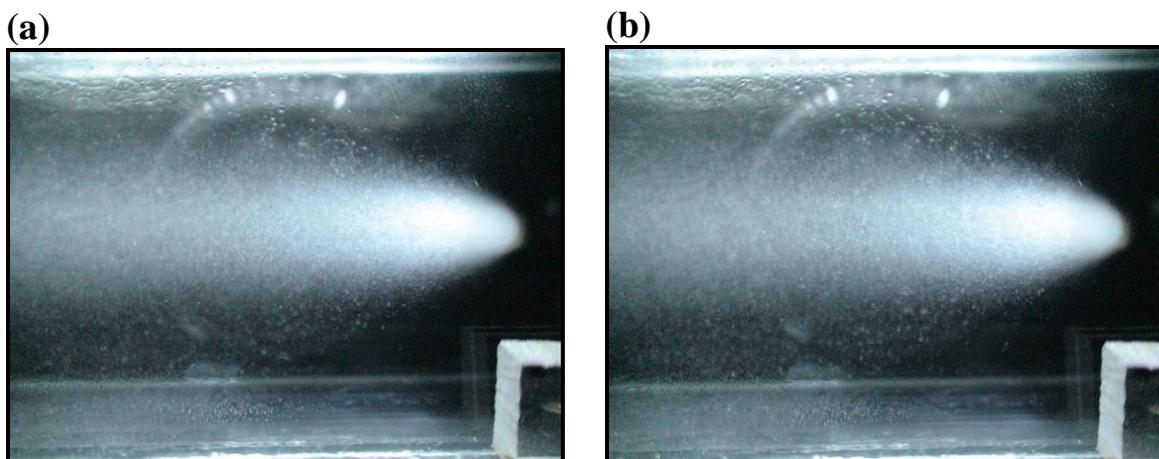


Figura A.8 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=69\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

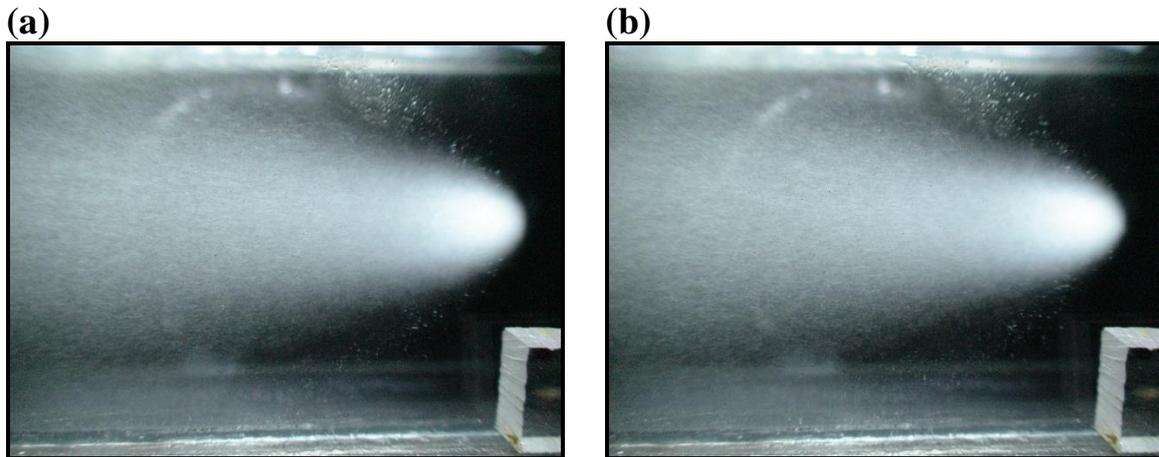


Figura A.9 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=69\text{m/s}$, $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

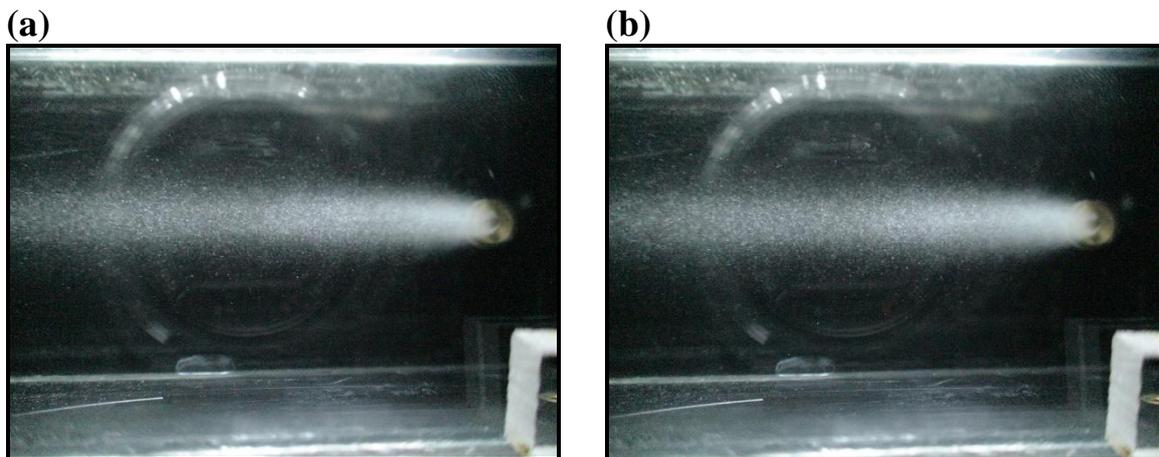


Figura A.10 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

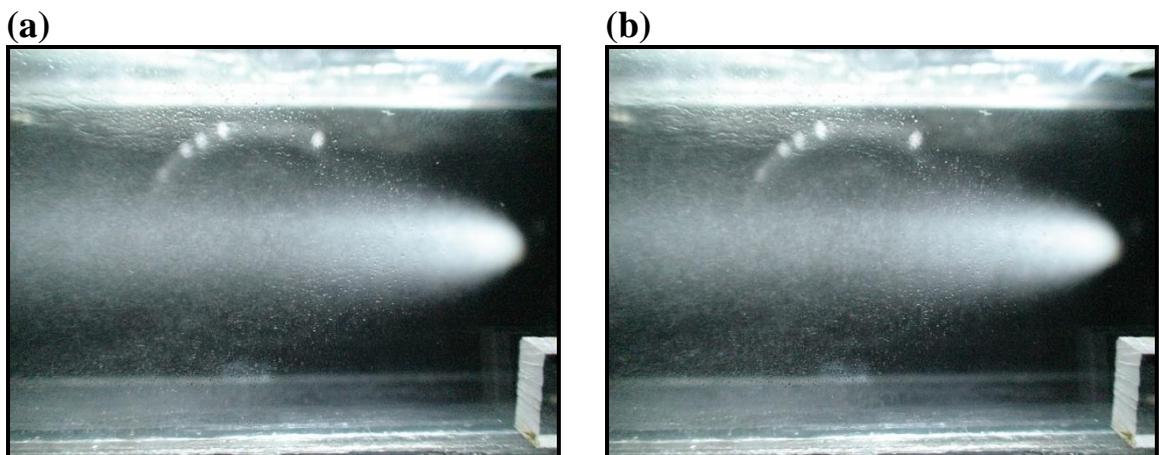


Figura A.11 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

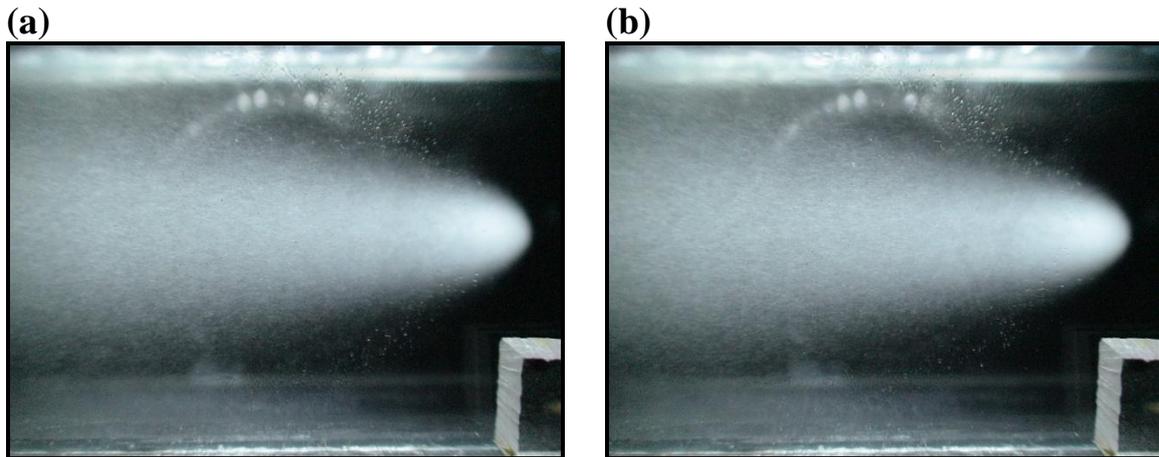


Figura A.12 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 2. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

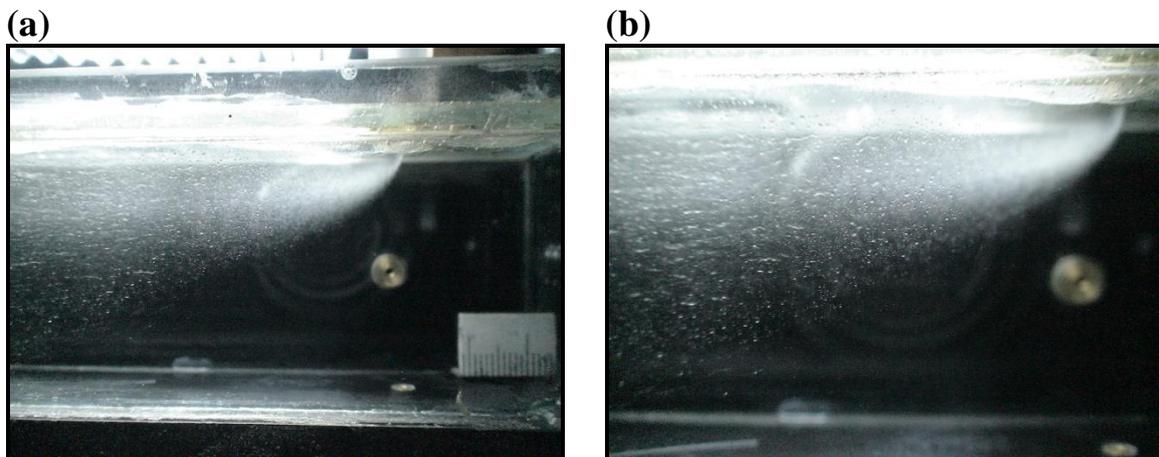


Figura A.13 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g=59\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

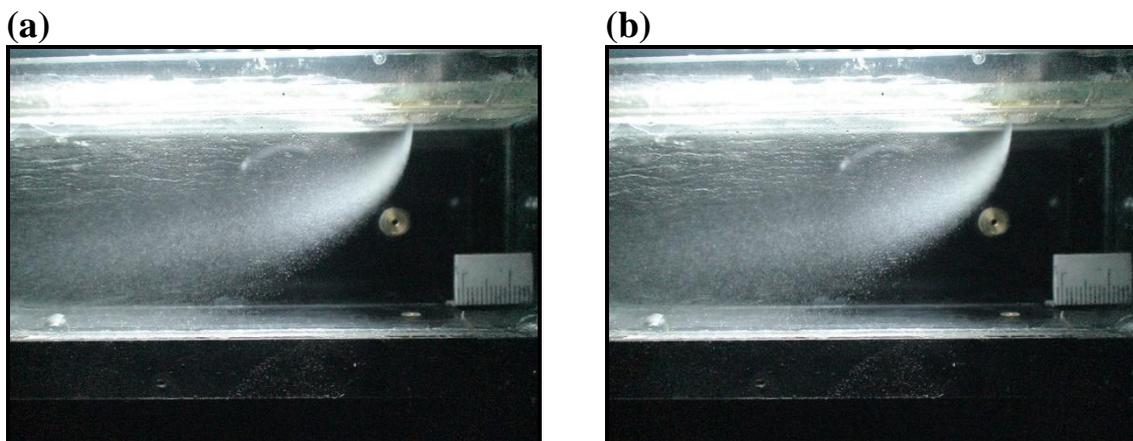


Figura A.14 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g=59\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

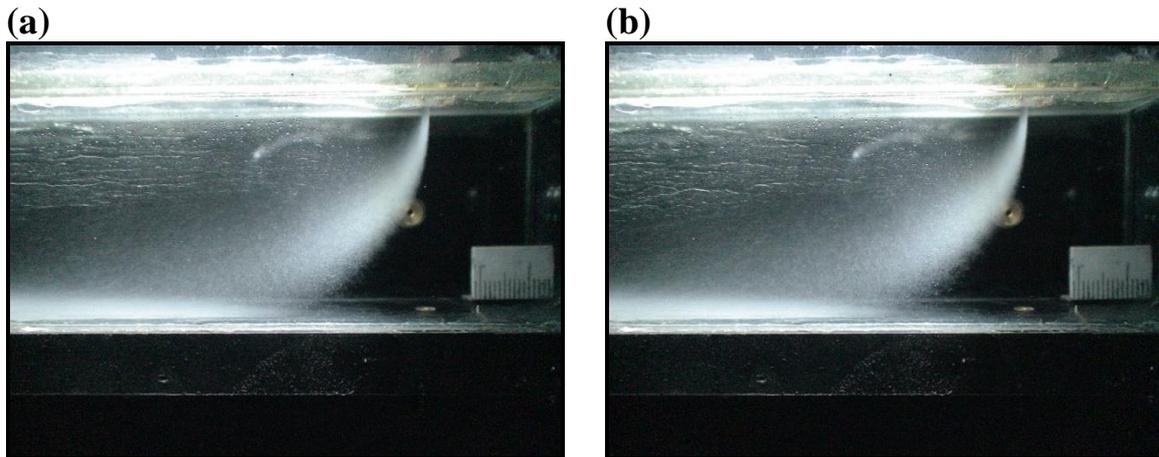


Figura A.15 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g= 59\text{m/s}$, $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

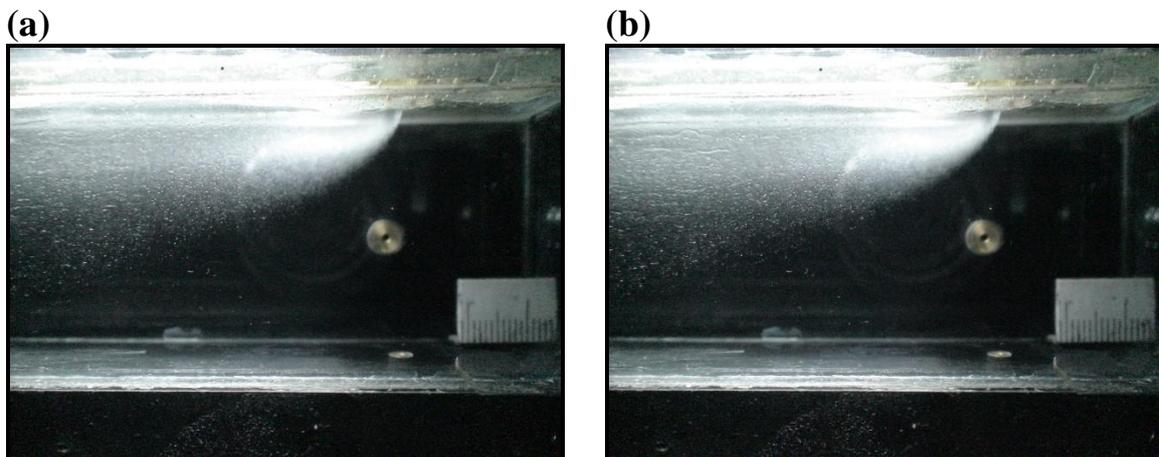


Figura A.16 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g= 64\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

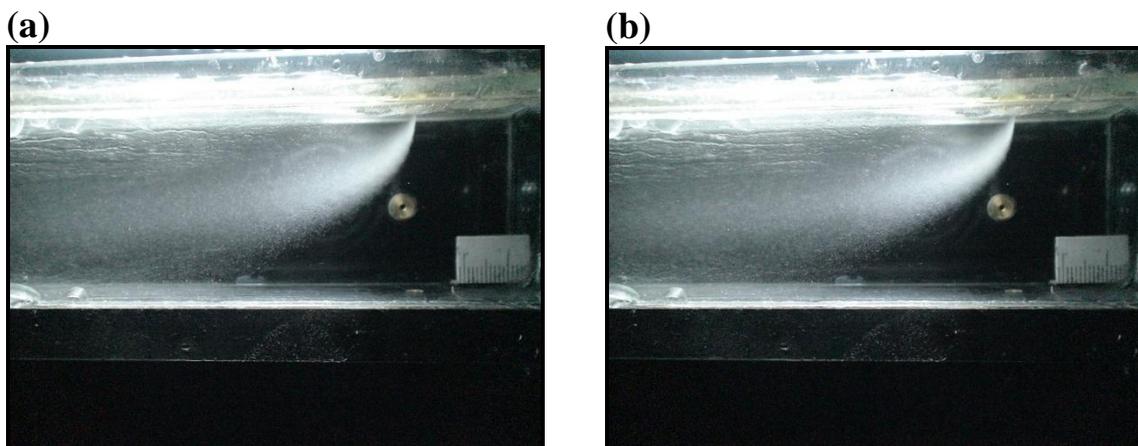


Figura A.17 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g= 64\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

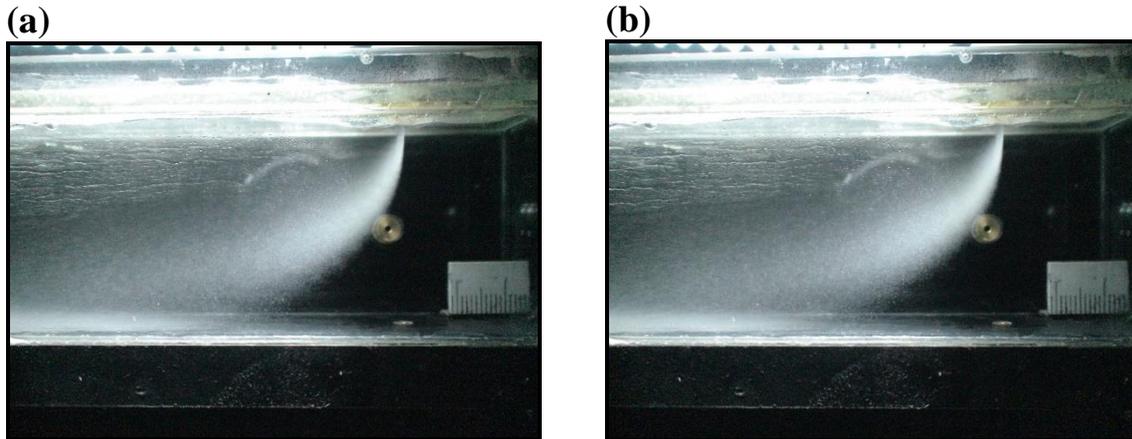


Figura A.18 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g = 64\text{m/s}$, $V_j = 19,10\text{m/s}$ ($Q_l = 900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

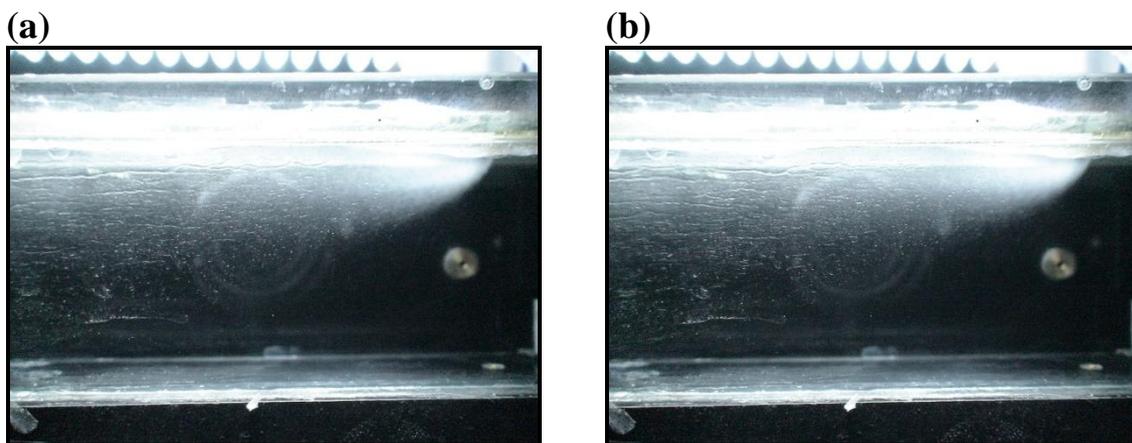


Figura A.19 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g = 69\text{m/s}$, $V_j = 6,37\text{m/s}$ ($Q_l = 300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

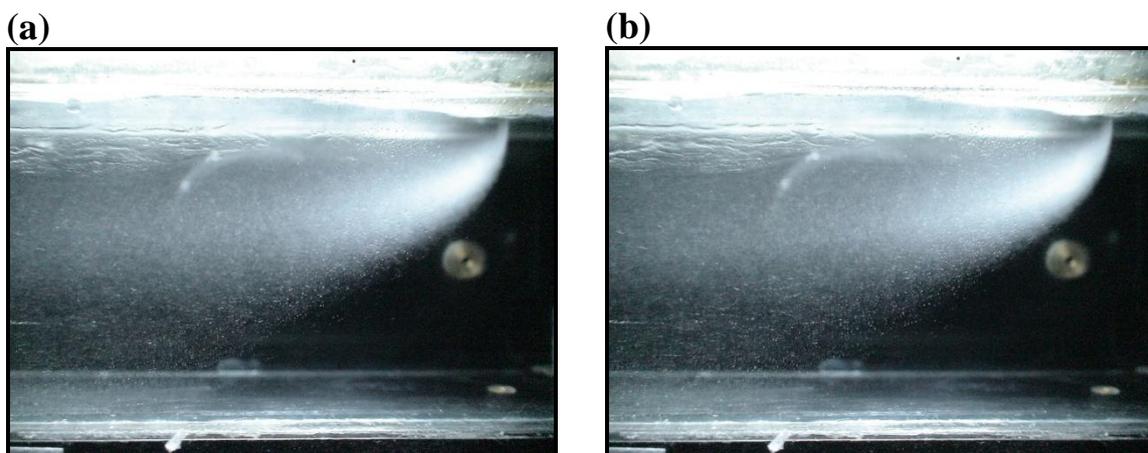


Figura A.20 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g = 69\text{m/s}$, $V_j = 12,73\text{m/s}$ ($Q_l = 600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

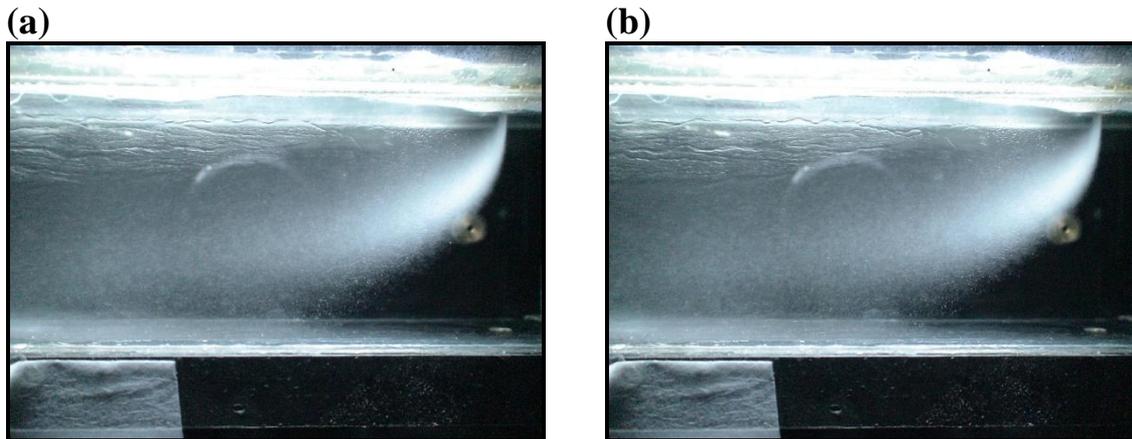


Figura A.21 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g=69\text{m/s}$, $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

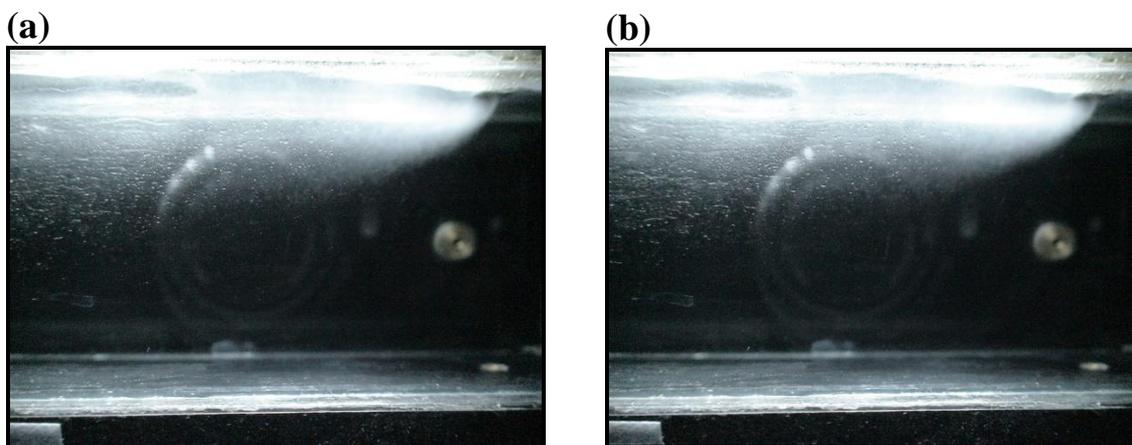


Figura A.22 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

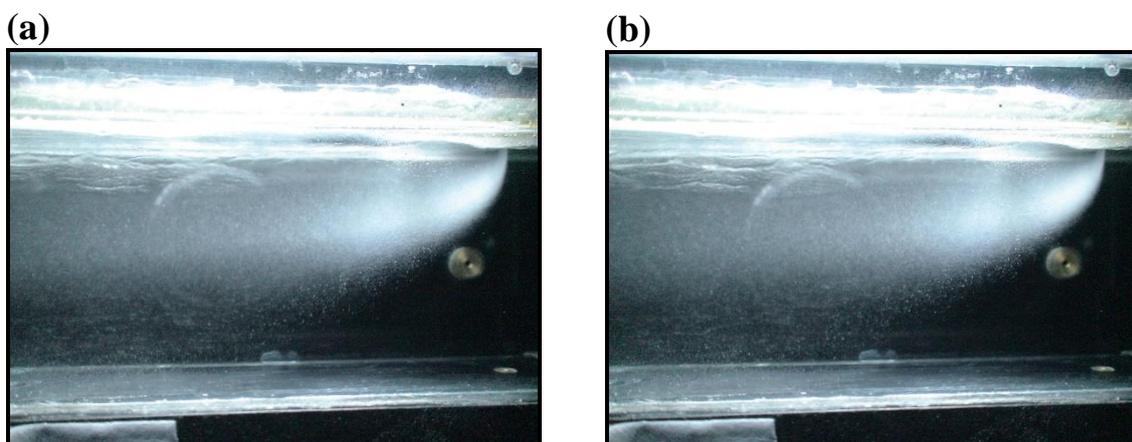


Figura A.23 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

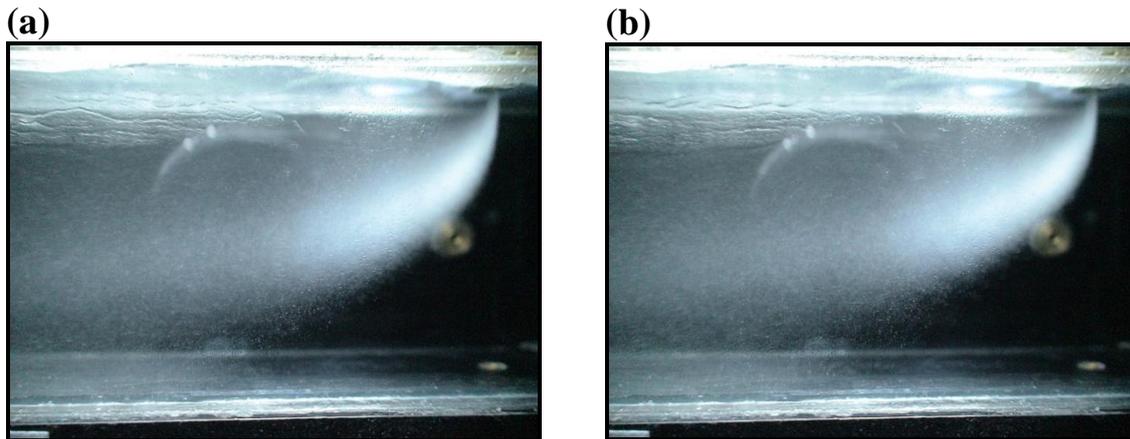


Figura A.24 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 1. $V_g = 74\text{m/s}$, $V_j = 19,10\text{m/s}$ ($Q_l = 900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

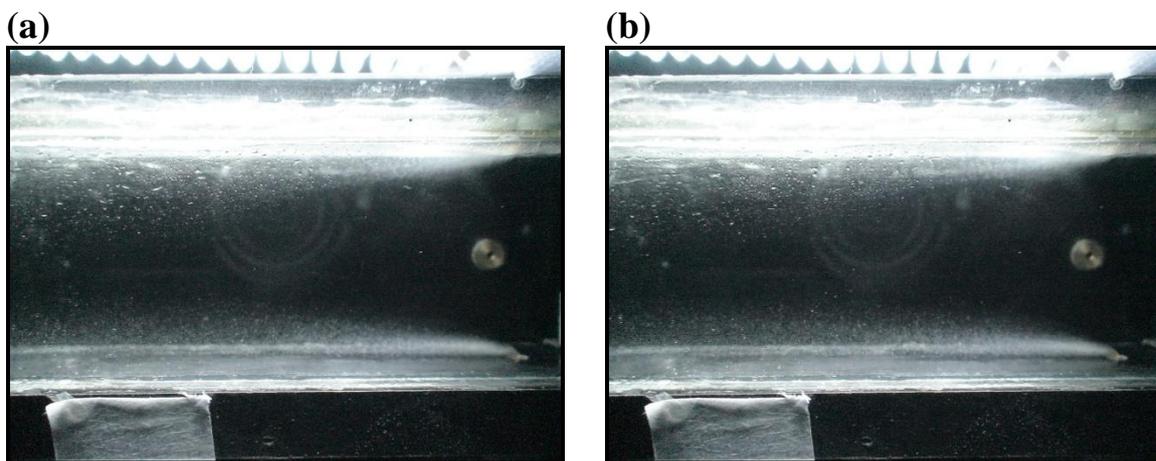


Figura A.25 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g = 59\text{m/s}$, $V_j = 3,18\text{m/s}$ ($Q_l = 300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

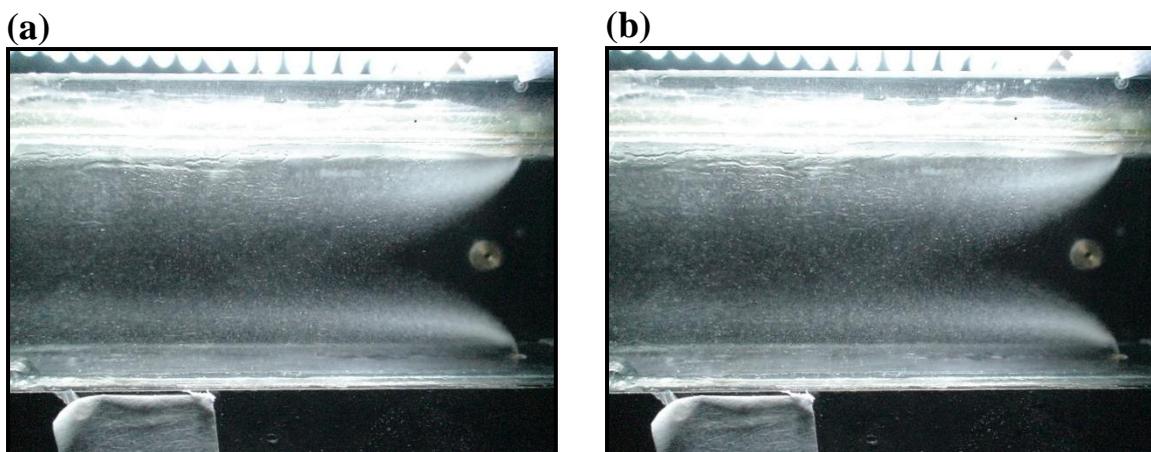


Figura A.26 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g = 59\text{m/s}$, $V_j = 6,37\text{m/s}$ ($Q_l = 600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

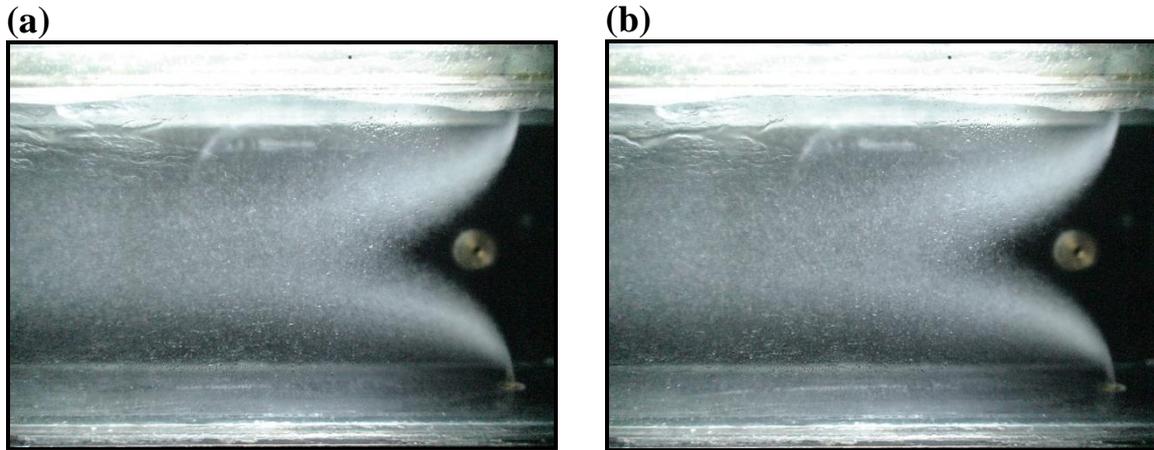


Figura A.27 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g = 59\text{m/s}$, $V_j = 9,55\text{m/s}$ ($Q_l = 900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

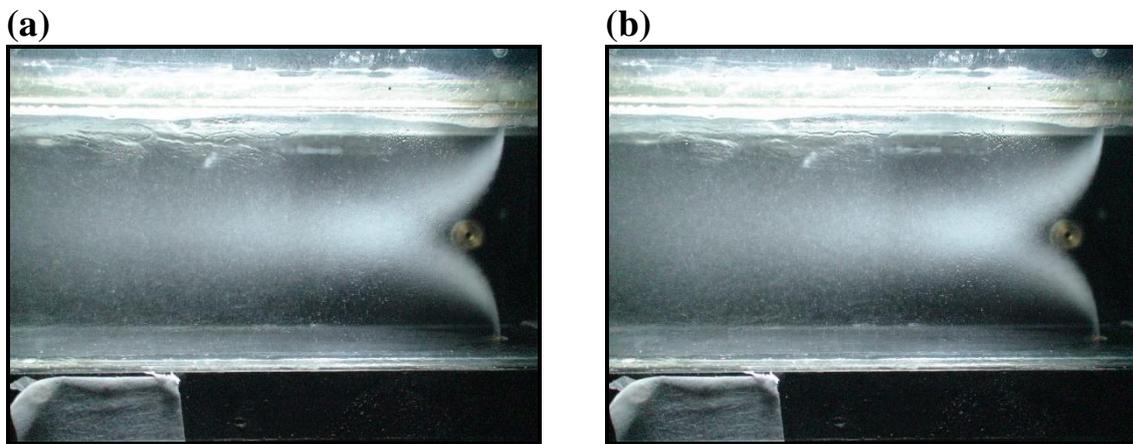


Figura A.28 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g = 59\text{m/s}$, $V_j = 12,73\text{m/s}$ ($Q_l = 1200\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

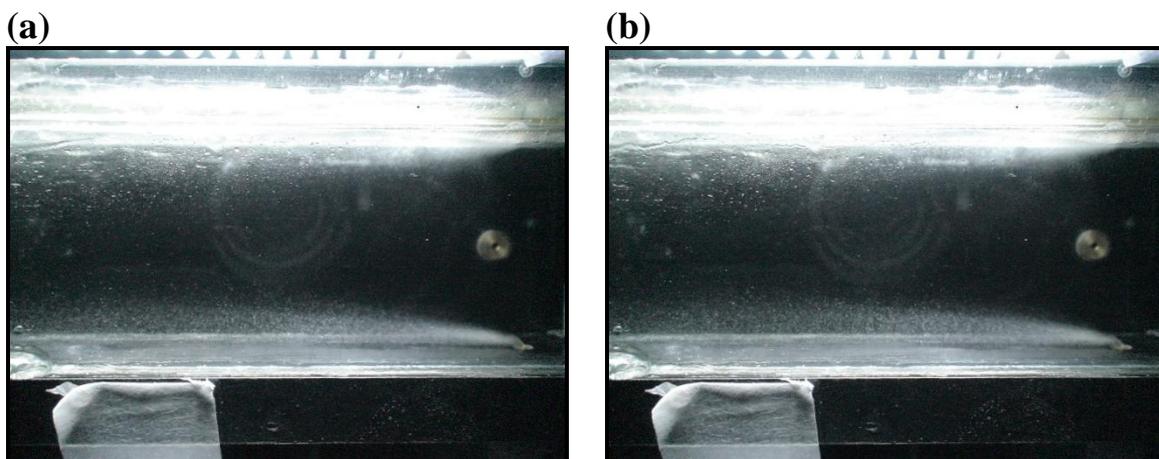


Figura A.29 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g = 64\text{m/s}$, $V_j = 3,18\text{m/s}$ ($Q_l = 300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

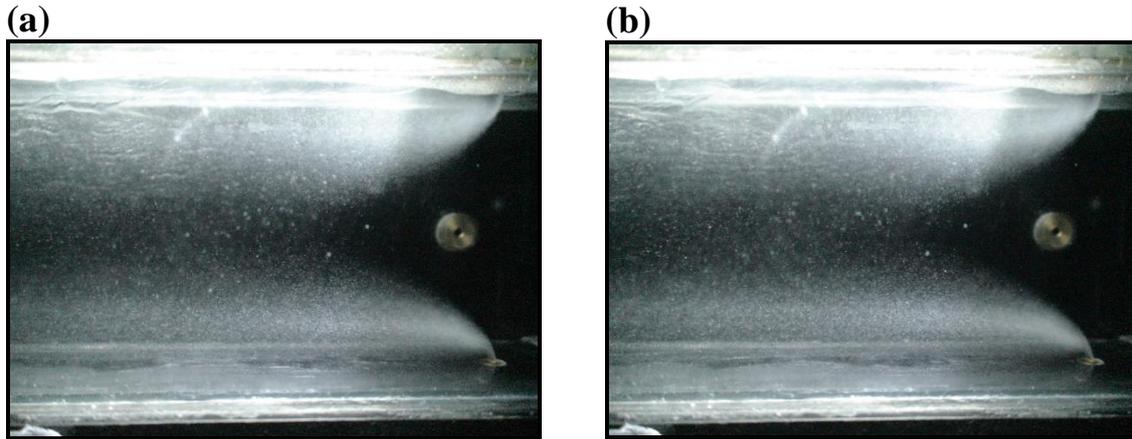


Figura A.30 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=64\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

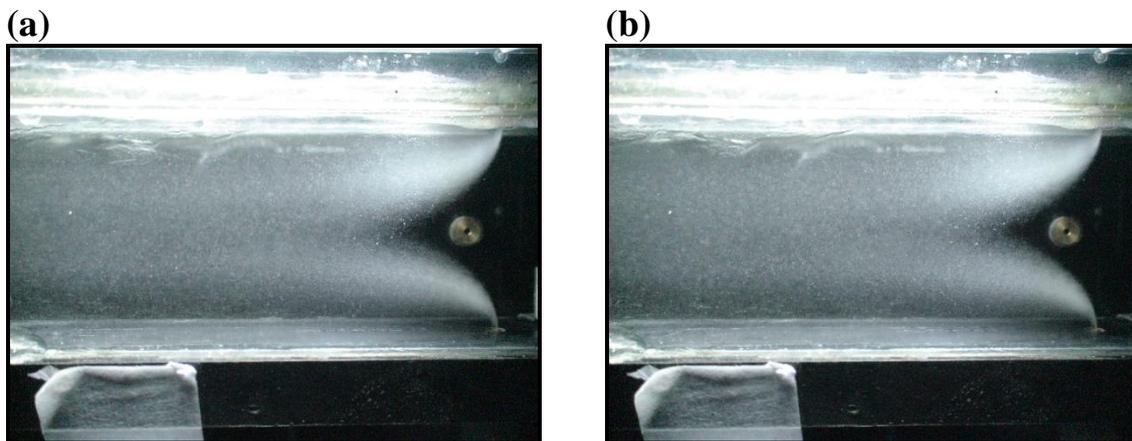


Figura A.31 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=64\text{m/s}$, $V_j=9,55\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

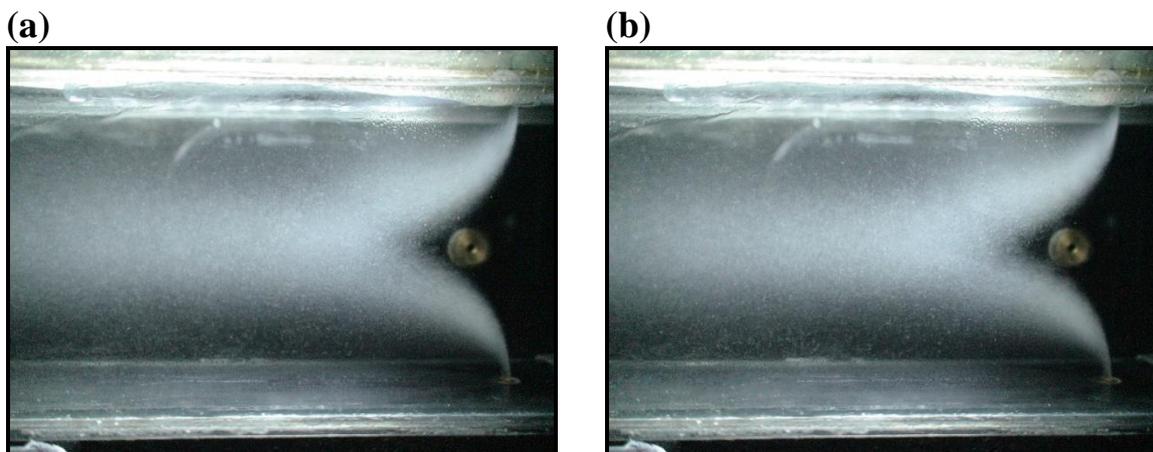


Figura A.32 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=64\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

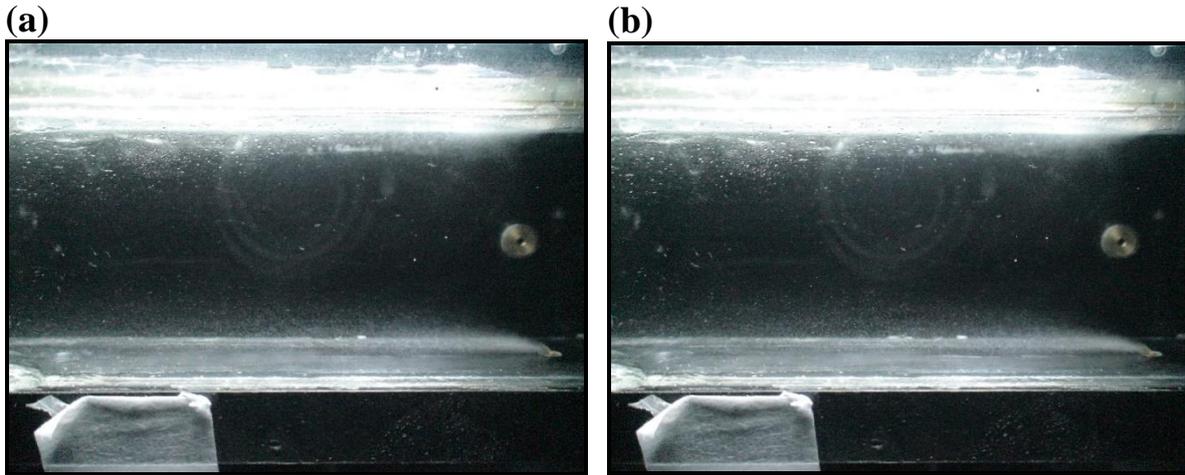


Figura A.33 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=69\text{m/s}$, $V_j=3,18\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

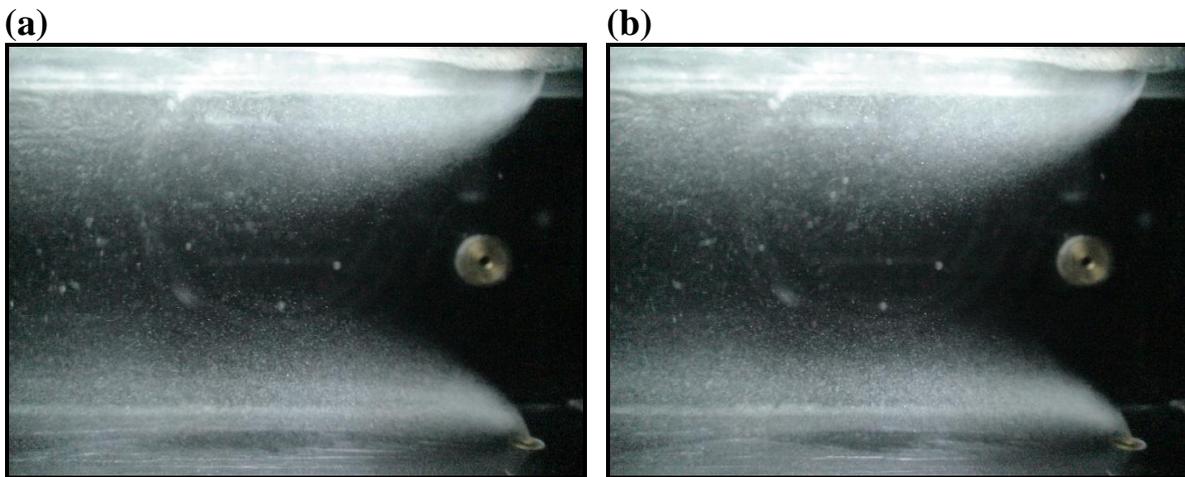


Figura A.34 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=69\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

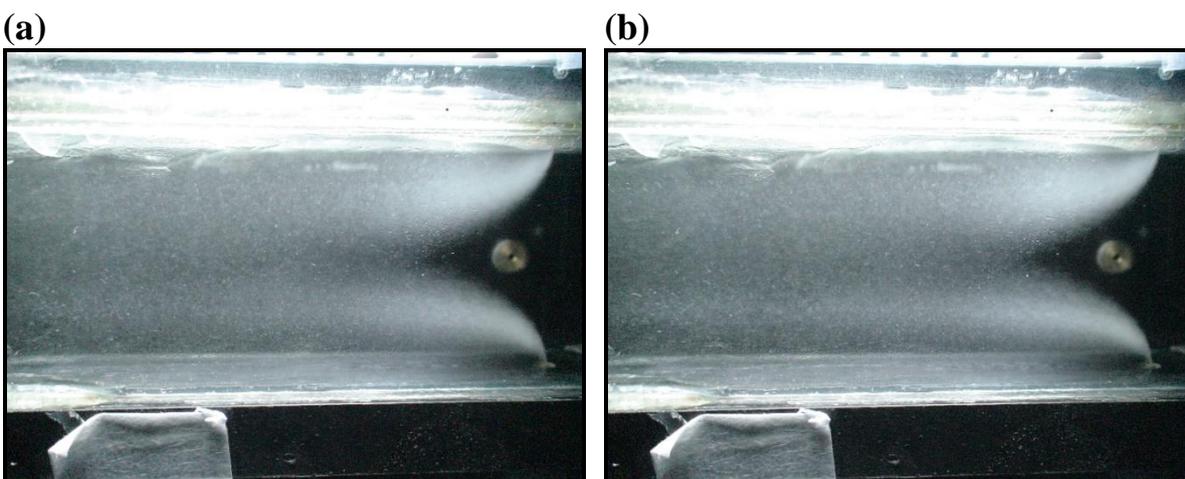


Figura A.35 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=69\text{m/s}$, $V_j=9,55\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

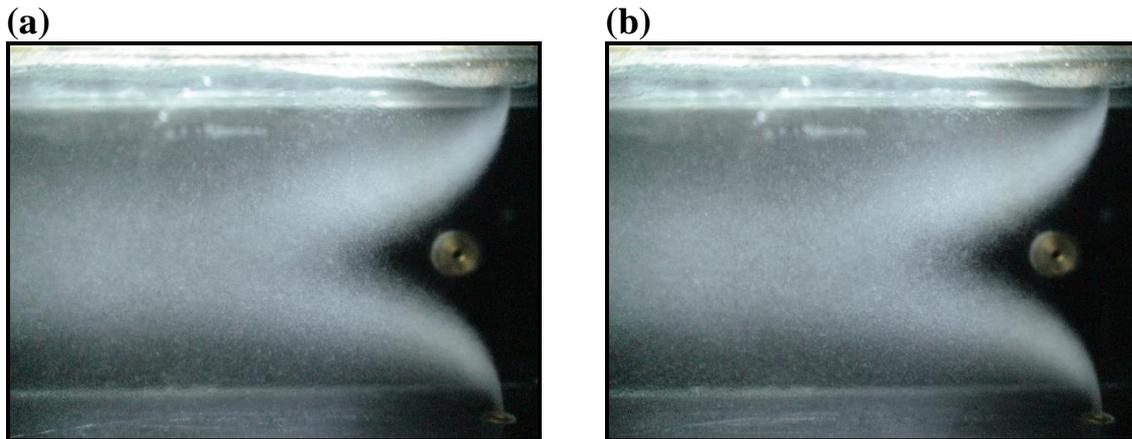


Figura A.36 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=69\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

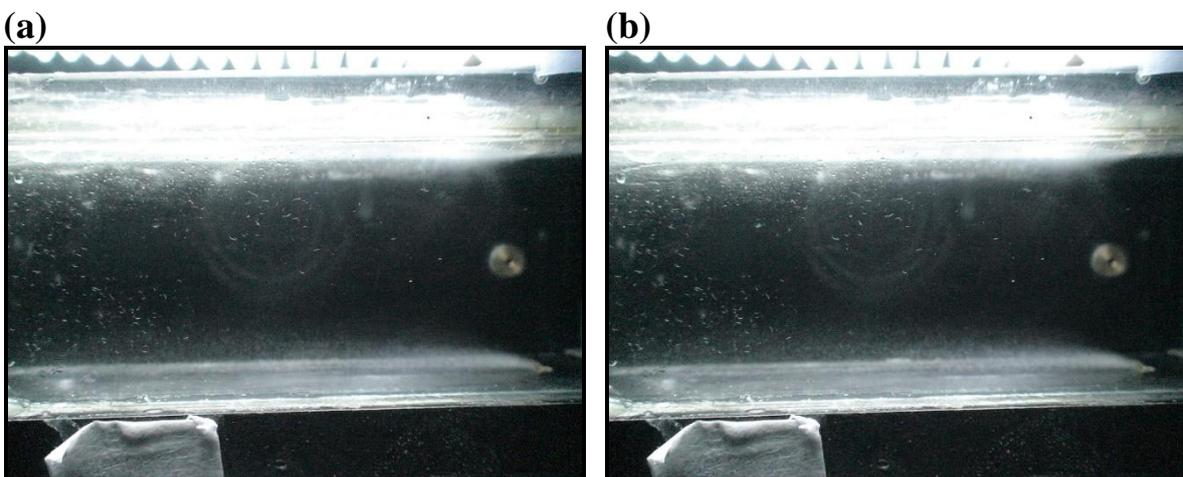


Figura A.37 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=3,18\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

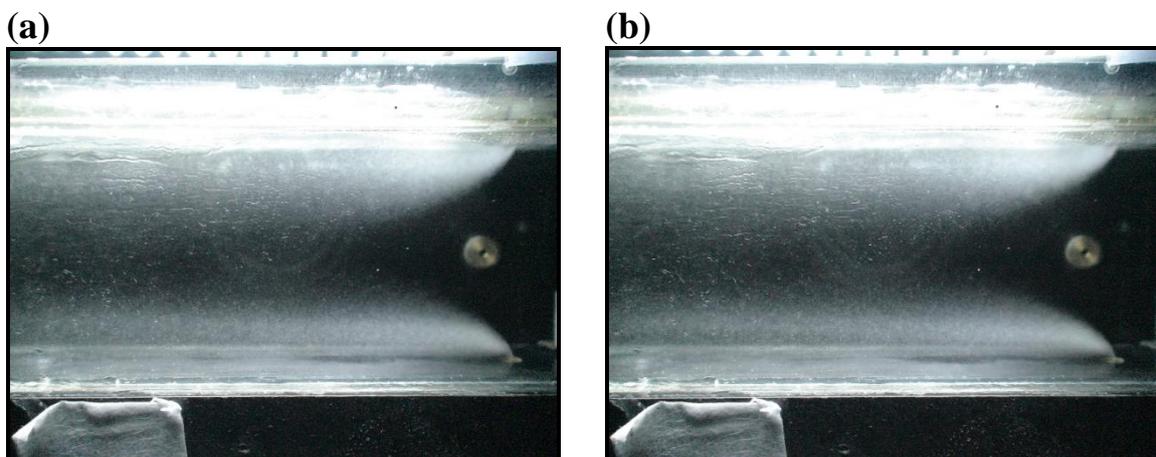


Figura A.38 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

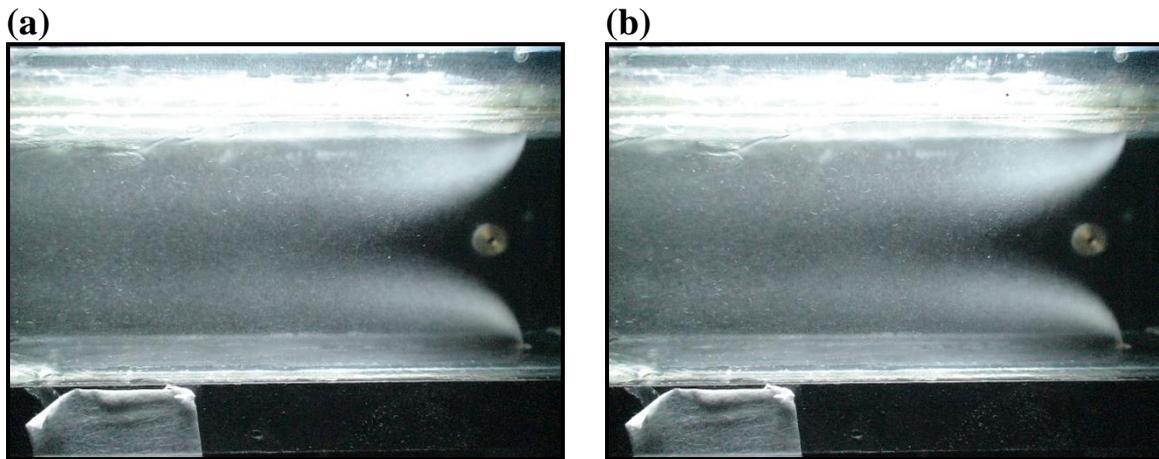


Figura A.39 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=9,55\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

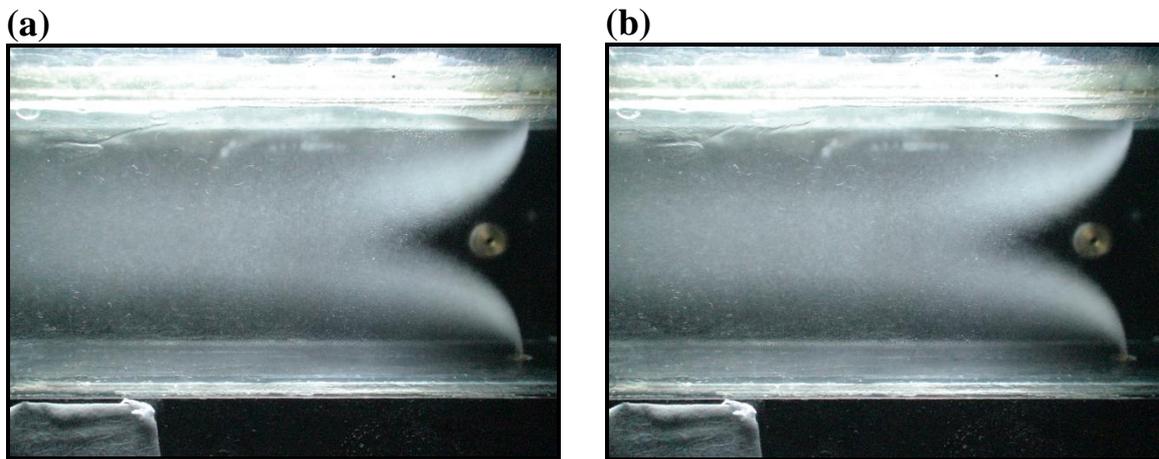


Figura A.40 – Imagem da atomização do jato líquido na configuração 3. $V_g=74\text{m/s}$, $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$). (a) Réplica I; (b) Réplica II.

APÊNDICE B

Ângulo de Espalhamento

Tabela B.1 – Medida do ângulo de espalhamento do jato líquido no interior da garganta na configuração 2

V _g (m/s)	Q _l (mL/min)	V _j (m/s)	θ Réplica I	θ Réplica II	θ Média
59	300	6,37	9	8	8,5
	600	12,73	29	30	29,5
	900	19,10	54	54	54
64	300	6,37	8	9	8,5
	600	12,73	28	30	29
	900	19,10	51	51	51
69	300	6,37	10	9	9,5
	600	12,73	30	32	31
	900	19,10	49	51	50
74	300	6,37	9	9	9
	600	12,73	31	31	31
	900	19,10	51	50	50,5

APÊNDICE C

Trajetória do Jato

Tabela C.1 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$).

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,136	0,727	0,055	1,091
0,181	0,909	0,164	1,555
0,317	1,182	0,273	2,018
0,499	1,364	0,328	2,209
0,863	1,954	0,71	2,891
1,272	2,499	1,446	4,009
2,181	3,499	1,801	4,309
2,817	4,318	2,1	4,582
3,453	4,864	2,318	4,799
4,044	5,318	2,563	5,073

Início da Atomização

Tabela C.2 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,161	1,667	0,055	0,829
0,215	2,581	0,221	1,547
0,323	3,279	0,387	2,431
0,538	4,569	0,884	5,469
1,882	9,355	1,657	8,232
2,312	10,161	2,044	9,503
2,796	11,18	2,265	10,166
2,957	11,667	2,486	10,773
3,172	12,15	2,817	11,547
3,387	12,58	4,032	13,481

Início da Atomização

Tabela C.3 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,109	1,087	0,109	1,53
0,218	1,739	0,273	2,459
0,327	3,315	0,382	3,77
0,436	6,25	0,546	7,759
0,708	8,913	0,819	9,563
1,143	11,522	1,256	12,022
1,741	13,478	1,475	13,279
2,61	16,033	1,748	14,372
3,153	18,098	2,567	16,066
3,751	19,239	2,95	17,432

Início da Atomização

Tabela C.4 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,091	0,818	0,089	0,356
0,136	1,091	0,222	0,889
0,272	1,773	0,4	1,244
0,454	2,227	0,533	1,867
0,681	2,773	0,889	2,311
1,272	3,773	1,422	3,289
1,727	4,273	1,822	3,867
2,272	4,909	2,133	4,444
2,863	5,727	2,666	5,111
4,772	7,318	3,688	6,267

Início da Atomização

Tabela C.5 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,116	0,636	0,175	1,053
0,232	1,329	0,233	1,754
0,348	2,139	0,291	2,456
0,753	4,451	0,583	4,094
1,1	5,954	0,992	5,673
1,562	7,225	1,46	7,485
1,967	8,555	1,869	8,421
2,661	9,884	2,98	10,643
3,297	11,214	3,857	11,696
3,817	11,908	4,968	13,041

Início da Atomização

Tabela C.6 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,052	0,365	0,053	0,737
0,156	1,771	0,158	1,737
0,208	2,656	0,263	2,631
0,364	6,094	0,474	6,053
0,624	7,708	0,737	8,053
1,041	9,948	1,053	9,579
1,666	11,927	1,685	11,684
2,135	13,489	2,264	13,474
2,5	14,375	2,632	14,526
3,021	15,521	3,211	15,684

Início da Atomização

Tabela C.7 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,042	0,38	0,085	0,338
0,127	0,761	0,17	0,676
0,169	0,929	0,255	0,972
0,254	1,225	0,424	1,479
0,423	1,563	0,635	1,859
0,634	2,155	0,931	2,282
0,845	2,535	1,311	2,746
1,183	2,915	1,587	3,296
1,394	3,127	1,883	3,592
1,817	3,634	2,221	3,929

Início da Atomização

Tabela C.8 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,104	0,451	0,103	0,686
0,173	1,838	0,172	2,126
0,242	2,324	0,206	2,503
0,381	3,503	0,309	3,257
0,45	4,543	0,48	4,251
0,623	5,41	0,617	4,8
0,831	6,173	0,857	5,589
1,039	6,763	1,097	6,137
1,282	7,283	1,474	7,063
1,49	7,838	1,783	7,577

Início da Atomização

Tabela C.9 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,083	0,579	0,124	0,538
0,124	2,069	0,165	2,152
0,165	3,062	0,176	3,393
0,289	4,386	0,217	5,007
0,455	6	0,465	6,289
0,579	6,869	0,754	8,11
0,745	7,862	1,168	8,979
1,034	8,938	1,375	10,138
1,282	9,972	1,913	11,421
1,985	11,503	2,285	12,207

Início da Atomização

Tabela C.10 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=300\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,067	0,708	0,067	0,64
0,115	0,843	0,134	1,045
0,182	1,079	0,201	1,247
0,351	1,449	0,37	1,483
0,452	1,719	0,539	1,787
0,519	1,888	0,842	2,258
0,755	2,157	1,111	2,831
0,957	2,427	1,515	3,236
1,294	2,899	1,784	3,573
1,8	3,337	2,02	3,843

Início da Atomização

Tabela C.11 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,079	0,75	0,117	0,468
0,118	1,421	0,195	1,636
0,157	2,132	0,234	2,299
0,315	3,868	0,312	2,805
0,473	4,657	0,468	4,091
0,789	5,724	0,741	5,259
1,105	6,671	0,897	5,766
1,539	7,303	1,053	6,117
1,855	7,934	1,209	6,506
2,408	8,645	2,066	8,182

Início da Atomização

Tabela C.12 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 1. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Réplica I		Trajetória do Jato Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,065	0,554	0,066	0,626
0,098	2,152	0,132	1,846
0,131	3,652	0,198	3,297
0,327	5,446	0,363	5,176
0,49	6,619	0,627	6,725
0,653	7,663	0,825	7,747
0,881	8,38	1,056	8,835
1,272	9,685	1,32	9,56
1,435	10,207	1,683	10,516
2,087	11,446	2,408	11,835

Início da Atomização

Tabela C.13 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,089	0,356	0,129	0,429	0,178	0,533	0,086	0,429
0,178	0,667	0,172	0,943	0,267	1,022	0,172	0,771
0,267	0,933	0,301	1,2	0,445	1,422	0,258	1,243
0,445	1,511	0,515	1,886	0,623	2,133	0,472	1,886
0,756	2,267	0,729	2,229	0,934	2,8	0,686	2,4
1,734	3,689	0,943	2,743	1,201	3,244	1,115	3,043
2,223	4,4	1,157	3,129	1,779	3,956	1,672	3,6
2,756	5,022	1,586	3,643	2,49	4,711	2,186	4,371
3,067	5,244	2,057	4,114	3,157	5,467	2,7	4,8
3,6	5,689	2,914	5,014	3,957	6,222	3,3	5,4

Início da Atomização

Tabela C.14 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=9,55\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,067	0,3	0,096	0,545	0,067	0,233	0,064	0,449
0,167	1,433	0,224	1,444	0,167	1,333	0,257	1,259
0,267	1,9	0,32	1,989	0,3	2,067	0,417	2,149
0,434	3,033	0,48	2,598	0,467	2,967	0,577	2,888
0,634	3,7	0,673	3,369	0,8	4,133	0,737	3,689
0,834	4,433	1,218	4,973	1,167	5,133	1,026	4,652
1,434	5,533	1,507	5,422	1,534	5,9	1,315	5,455
1,734	6,267	1,86	6,096	1,867	6,433	1,636	6,128
2,067	6,867	2,534	7,187	2,1	7,1	1,957	6,642
2,6	7,633	3,368	8,214	2,467	7,633	2,246	7,123

Início da Atomização

Tabela C.15 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,127	0,549	0,169	0,972	0,127	0,465	0,127	0,507
0,254	1,479	0,254	1,775	0,254	1,986	0,296	2,408
0,339	2,197	0,381	2,282	0,381	3,042	0,381	3,127
0,55	4,056	0,592	4,225	0,592	4,817	0,635	4,352
0,846	5,408	0,761	5,197	0,888	6,127	0,973	6,085
1,311	6,929	1,184	6,887	1,437	7,901	1,311	7,563
1,607	7,479	1,48	7,563	1,944	9,085	1,691	8,408
2,241	9	1,776	8,239	2,367	9,803	2,156	9,296
2,959	10,521	2,199	9,163	2,79	10,606	2,452	9,929
3,297	11,113	2,833	10,268	3,17	11,155	2,875	10,606

Início da Atomização

Tabela C.16 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,102	0,712	0,104	0,486	0,136	0,508	0,069	0,382
0,17	0,814	0,173	0,694	0,238	1,051	0,208	0,867
0,238	1,322	0,277	1,422	0,306	1,22	0,312	1,109
0,374	1,763	0,554	2,116	0,475	1,695	0,451	1,561
0,679	2,305	0,866	2,705	0,814	2,746	0,728	2,428
0,916	2,814	1,109	3,156	1,051	2,983	1,11	3,017
1,153	3,254	1,456	3,468	1,322	3,288	1,561	3,676
1,458	3,831	1,942	4,162	1,763	3,864	1,873	4,127
2,17	4,576	2,428	4,89	2,068	4,203	2,255	4,474
2,645	5,051	2,81	5,341	3,221	5,389	2,775	4,925

Início da Atomização

Tabela C.17 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=9,55\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,129	0,386	0,086	0,475	0,086	0,3	0,086	0,388
0,258	1,029	0,172	1,295	0,172	0,986	0,215	1,209
0,344	1,757	0,258	1,899	0,301	1,543	0,301	1,813
0,558	2,443	0,517	3,022	0,472	2,614	0,689	3,712
0,944	3,771	0,819	3,885	0,815	3,857	1,077	4,791
1,373	4,757	1,121	4,489	1,201	4,671	1,422	5,353
2,273	6,171	1,898	5,914	1,801	5,786	1,681	6
3,002	7,157	2,416	6,475	2,358	6,9	2,242	7,122
3,473	7,8	3,02	7,295	3,301	7,929	2,976	7,813
4,03	8,486	3,624	8,331	4,544	9	3,537	8,504

Início da Atomização

Tabela C.18 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,071	0,565	0,069	0,552	0,071	0,671	0,103	0,483
0,142	1,553	0,138	2,103	0,177	1,976	0,206	1,896
0,248	2,753	0,241	2,724	0,248	2,753	0,24	2,655
0,495	4,553	0,482	4,31	0,424	3,882	0,447	3,793
1,024	6,282	0,758	5,172	0,671	5,259	0,688	4,862
1,342	7,024	1,103	6,379	1,2	6,988	1,447	7,379
1,589	7,624	1,551	7,241	1,624	7,906	1,792	8,069
1,836	8,153	1,896	8,138	2,118	8,894	2,344	9,138
2,048	8,612	2,206	8,759	2,683	9,741	2,723	9,759
2,366	9,176	2,861	9,586	3,001	10,306	3,137	10,31

Início da Atomização

Tabela C.19 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,055	0,332	0,055	0,332	0,083	0,304	0,055	0,359
0,11	0,691	0,138	0,885	0,166	0,498	0,138	0,691
0,193	1,299	0,249	1,244	0,221	0,829	0,221	0,94
0,387	1,687	0,498	1,963	0,47	1,382	0,47	1,769
0,608	2,239	0,719	2,406	0,664	1,88	0,691	2,295
0,857	2,571	0,885	2,737	1,134	2,627	1,106	2,876
1,106	2,986	1,106	3,014	1,41	3,069	1,327	3,179
1,327	3,346	1,576	3,733	1,686	3,318	1,521	3,346
1,576	3,622	1,908	4,037	2,045	3,594	1,687	3,456
2,074	4,175	2,129	4,258	2,377	4,065	2,129	3,982

Início da Atomização

Tabela C.20 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=9,55\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,086	0,432	0,086	0,343	0,086	0,475	0,086	0,214
0,215	0,863	0,172	0,9	0,172	1,036	0,172	0,686
0,301	1,64	0,258	1,671	0,258	1,64	0,258	1,457
0,56	2,115	0,515	2,314	0,517	3,022	0,515	3
0,862	2,849	0,729	2,786	0,905	4,144	0,815	3,943
1,337	3,799	0,986	3,386	1,293	4,921	1,158	4,629
1,769	4,576	1,5	4,243	1,681	5,612	1,544	5,271
2,287	5,353	1,971	4,971	2,069	6,129	1,887	5,829
3,021	6,259	2,442	5,743	2,544	6,647	2,701	7,029
3,496	6,777	2,828	6,257	2,932	7,209	3,258	7,543

Início da Atomização

Tabela C.21 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,057	0,488	0,056	0,654	0,057	0,66	0,056	0,533
0,114	2,009	0,112	1,598	0,114	1,407	0,14	1,347
0,171	2,325	0,168	2,355	0,2	2,383	0,224	2,355
0,286	3,187	0,448	4,093	0,429	3,559	0,56	4,009
0,458	3,876	0,841	5,495	0,687	4,823	0,812	4,935
0,687	5,139	1,149	6,28	1,146	5,971	1,036	5,495
1,031	6,144	1,373	6,841	1,347	6,66	1,288	6,056
1,318	6,804	1,766	7,57	1,634	7,206	1,849	7,429
1,777	7,751	2,046	8,131	2,007	7,952	2,382	8,271
2,265	8,555	2,41	8,691	2,438	8,612	2,831	8,916

Início da Atomização

Tabela C.22 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,083	0,414	0,04	0,56	0,041	0,248	0,04	0,36
0,124	0,621	0,08	0,8	0,082	0,455	0,12	0,6
0,165	1,034	0,12	0,96	0,123	0,91	0,2	0,8
0,413	1,531	0,48	1,6	0,33	1,531	0,64	2
0,62	1,903	0,84	2,08	0,496	1,945	1,16	2,76
0,786	2,152	1,28	2,44	0,744	2,276	1,56	3,08
1,241	2,648	1,92	3,16	1,033	2,648	2,04	3,6
1,903	3,517	2,48	3,64	1,902	3,724	2,88	4,36
2,358	3,889	3,16	4,32	2,357	4,138	3,36	4,76
3,475	4,717	3,96	4,8	2,936	4,717	3,88	5,08

Início da Atomização

Tabela C.23 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=9,55\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,04	0,48	0,079	0,671	0,08	0,68	0,039	0,316
0,12	1,32	0,118	1,263	0,12	1,2	0,118	0,75
0,2	1,6	0,197	1,658	0,16	1,4	0,197	1,342
0,68	2,92	0,513	2,605	0,44	2,36	1,026	3,829
1,08	3,68	0,868	3,237	1,04	4,12	1,539	4,895
1,56	4,68	1,5	4,342	1,44	4,84	2,21	5,724
2,76	6,04	2,289	5,408	2,2	5,72	2,999	6,711
3,56	7,12	3	6,118	3,44	7,28	3,67	7,342
4,2	7,6	5,053	8,053	4,52	8,16	4,894	8,289
4,72	8,08	6,711	9,513	5,32	8,52	6,631	9,316

Início da Atomização

Tabela C.24 – Medidas da trajetória do jato líquido formada no interior da garganta do lavador Venturi para a configuração 3. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$)

Trajetória do Jato Superior Réplica I		Trajetória do Jato Superior Réplica II		Trajetória do Jato Inferior Réplica I		Trajetória do Jato Inferior Réplica II	
x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
0,076	0,722	0,075	0,792	0,076	0,342	0,075	0,566
0,114	1,291	0,113	1,547	0,152	1,177	0,113	1,434
0,199	1,899	0,151	1,962	0,19	2,089	0,188	2,075
0,503	3,494	0,528	3,472	0,684	4,443	0,679	4,415
0,921	4,861	1,132	5,207	1,368	6,189	1,773	7,169
1,529	6,266	2,679	7,774	2,355	7,861	2,565	8,189
2,175	7,139	3,321	8,679	3,077	8,81	3,546	9,434
3,162	8,278	4,189	9,434	4,558	10,481	4,942	10,604
3,997	9,418	4,981	10,226	5,925	11,506	6,263	11,547
5,212	10,557	6,83	11,358	7,254	12,456	7,32	12,453

Início da Atomização

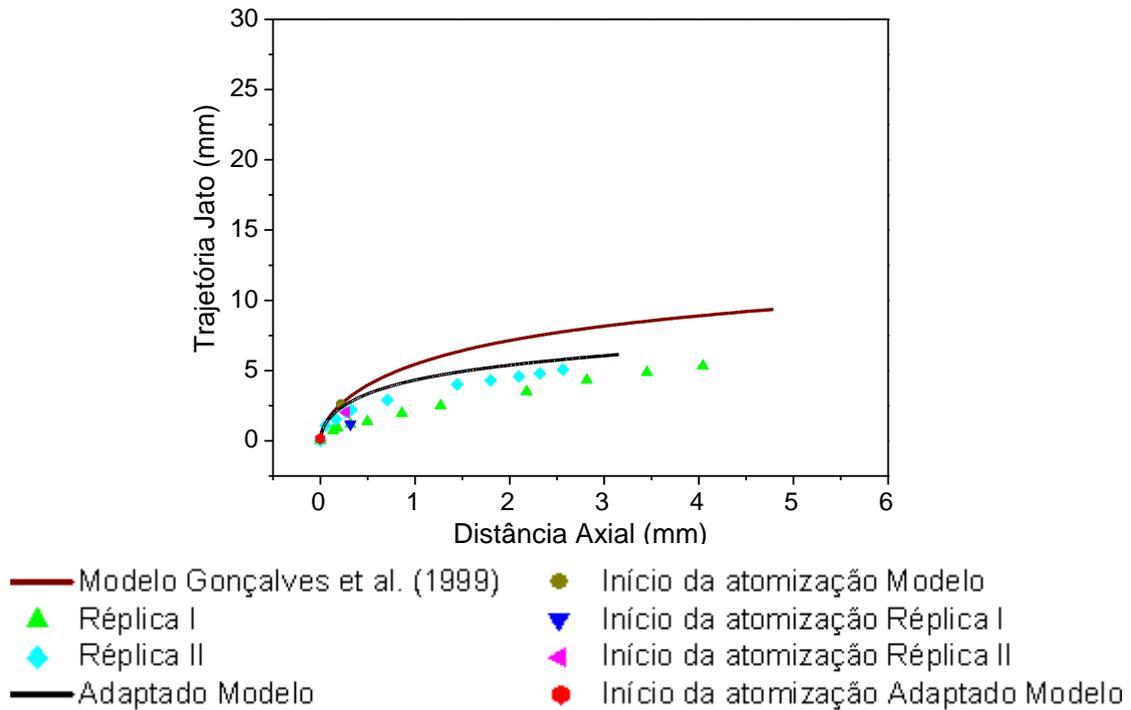


Figura C.1 – Resultados da trajetória do jato na configuração1. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$
 ($Q_l=300\text{mL/min}$)

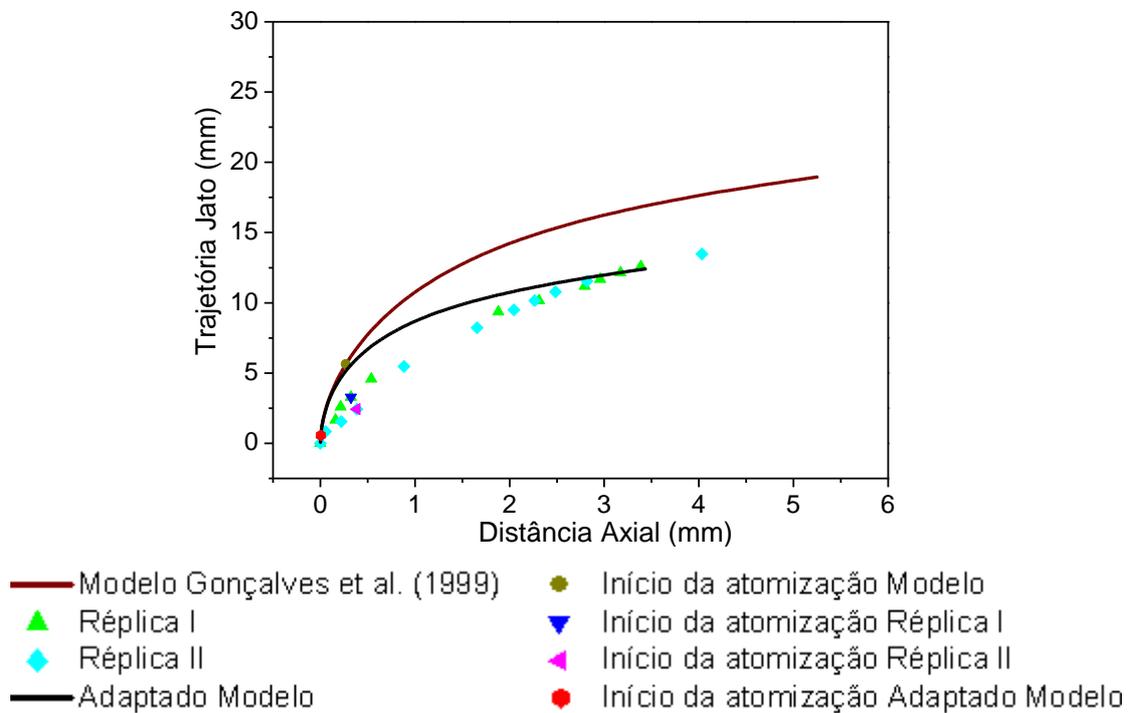


Figura C.2 – Resultados da trajetória do jato na configuração1. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$
 ($Q_l=600\text{mL/min}$)

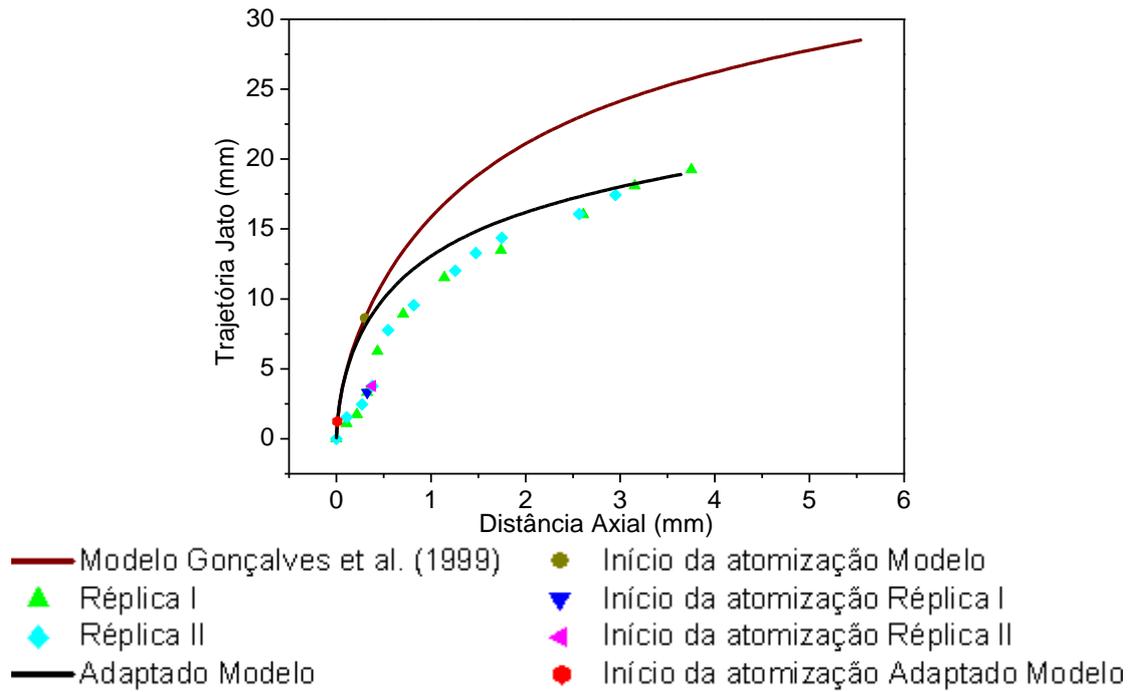


Figura C.3 – Resultados da trajetória do jato na configuração1. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=19,10\text{m/s}$
 ($Q_l=900\text{mL/min}$)

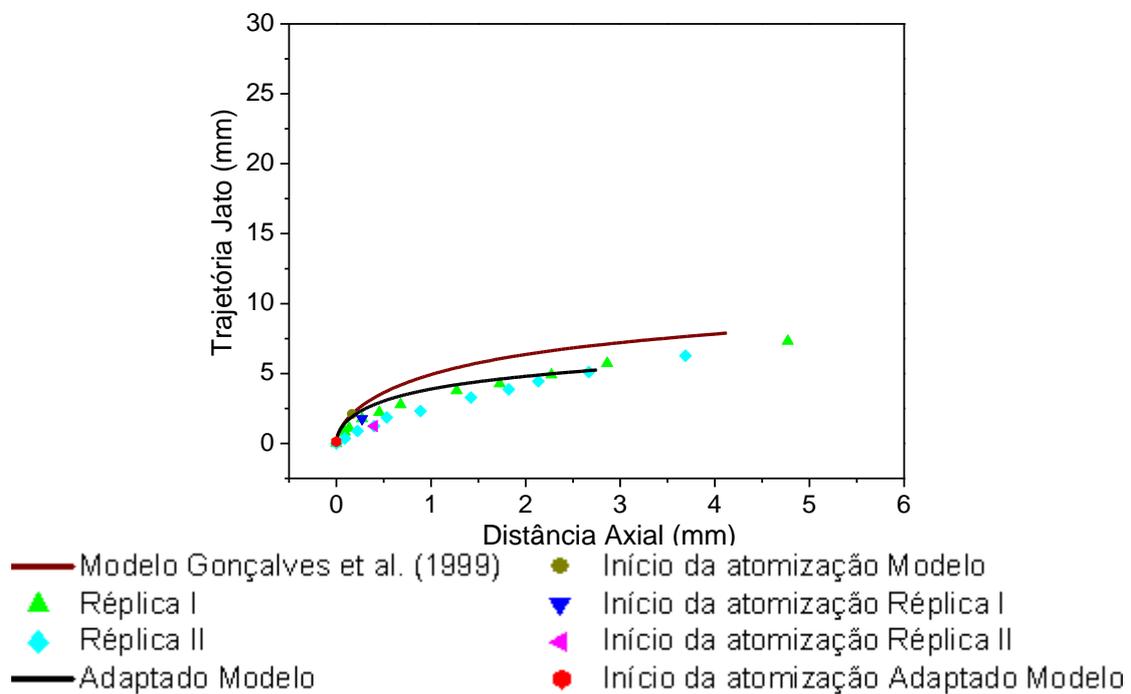


Figura C.4 – Resultados da trajetória do jato na configuração1. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$
 ($Q_l=300\text{mL/min}$)

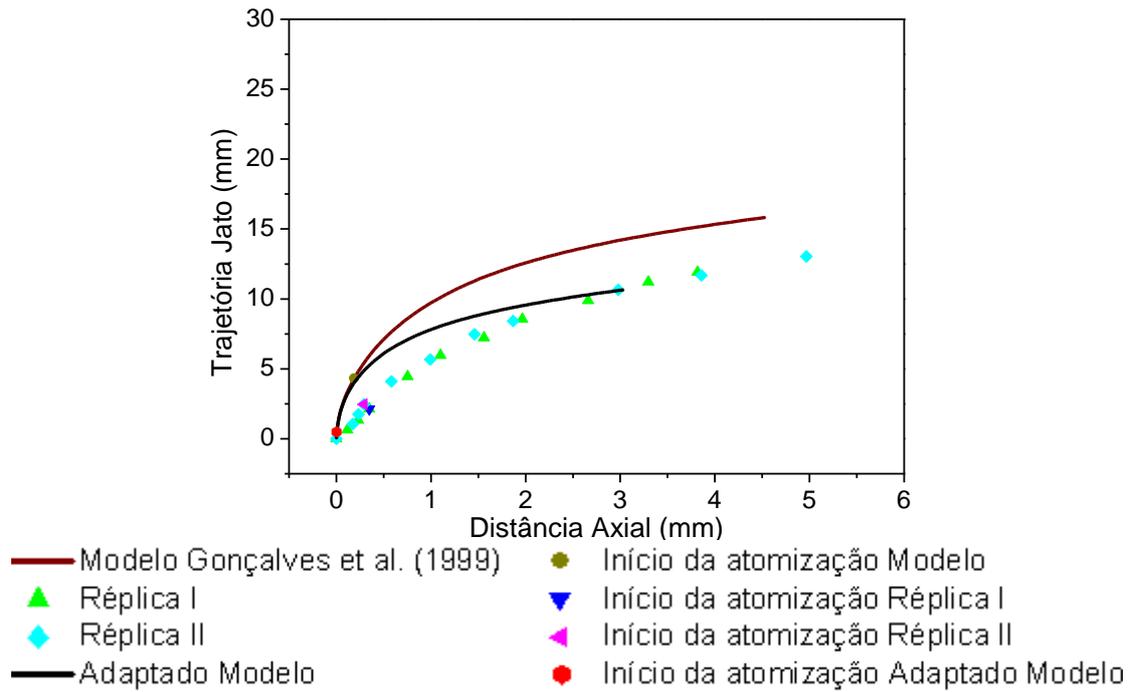


Figura C.5 – Resultados da trajetória do jato na configuração 1. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$
 ($Q_l=600\text{mL/min}$)

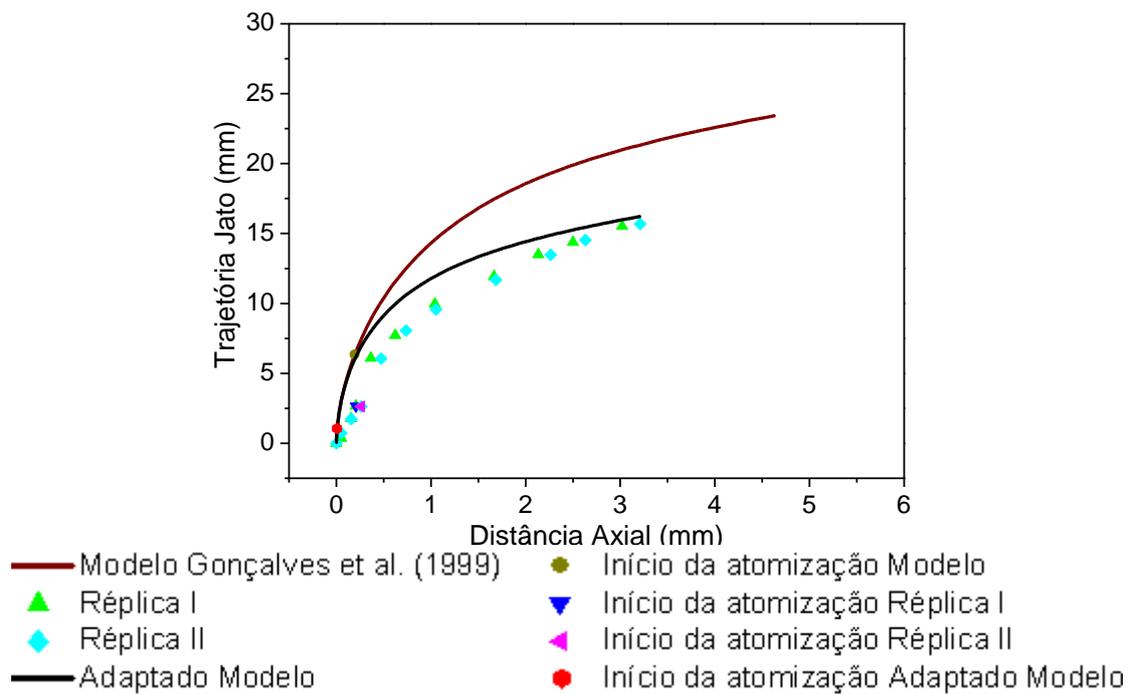


Figura C.6 – Resultados da trajetória do jato na configuração 1. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=19,10\text{m/s}$
 ($Q_l=900\text{mL/min}$)

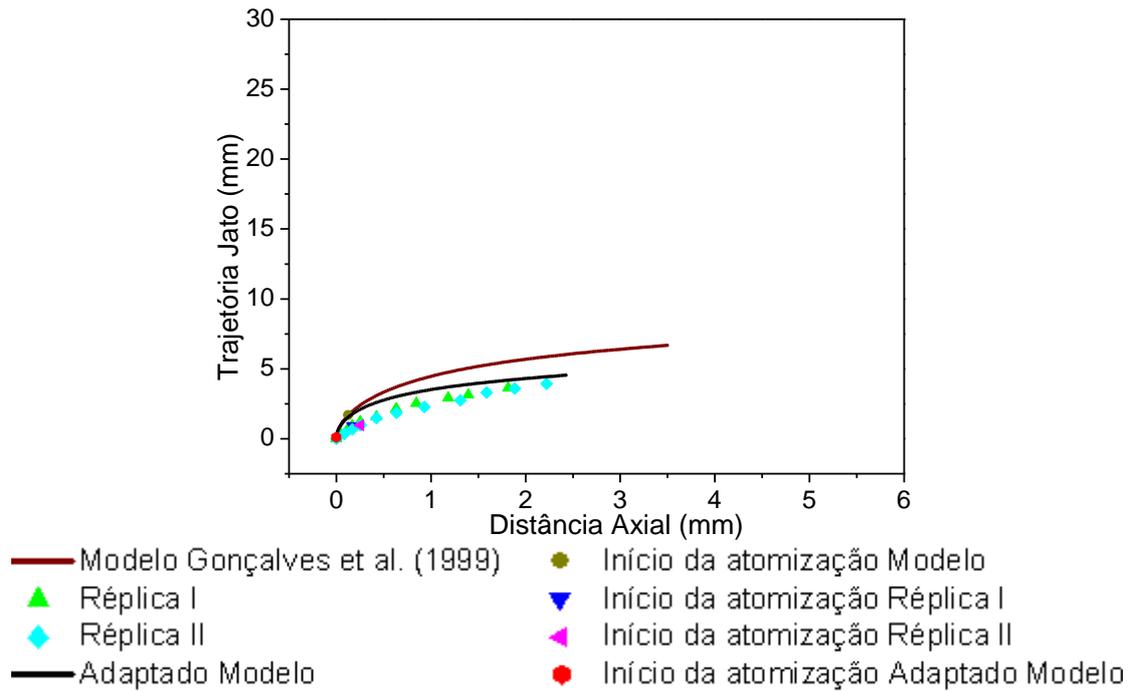


Figura C.7 – Resultados da trajetória do jato na configuração 1. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$
 ($Q_l=300\text{mL/min}$)

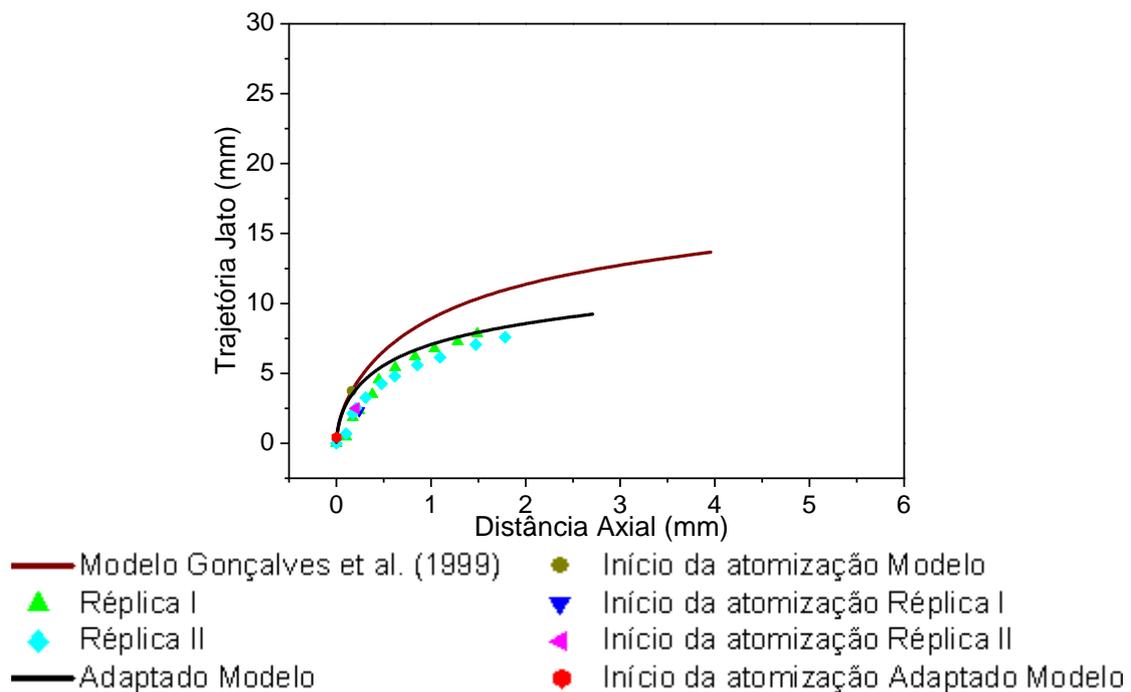


Figura C.8 – Resultados da trajetória do jato na configuração 1. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=12,73\text{m/s}$
 ($Q_l=600\text{mL/min}$)

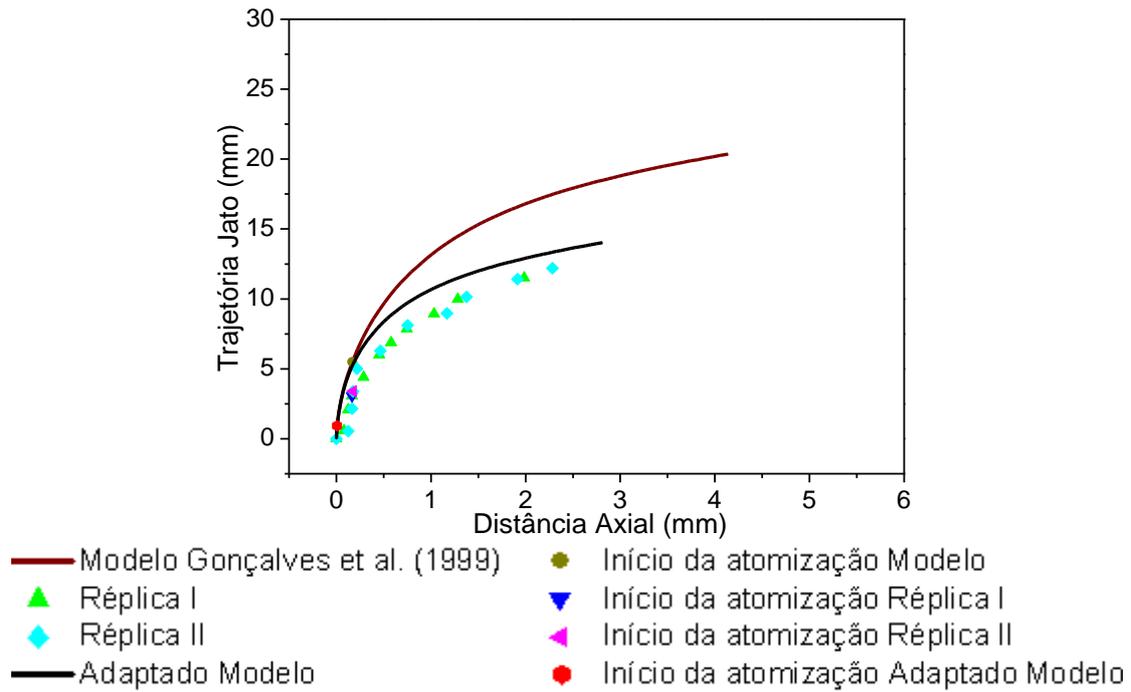


Figura C.9 – Resultados da trajetória do jato na configuração1. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=19,10\text{m/s}$
 ($Q_l=900\text{mL/min}$)

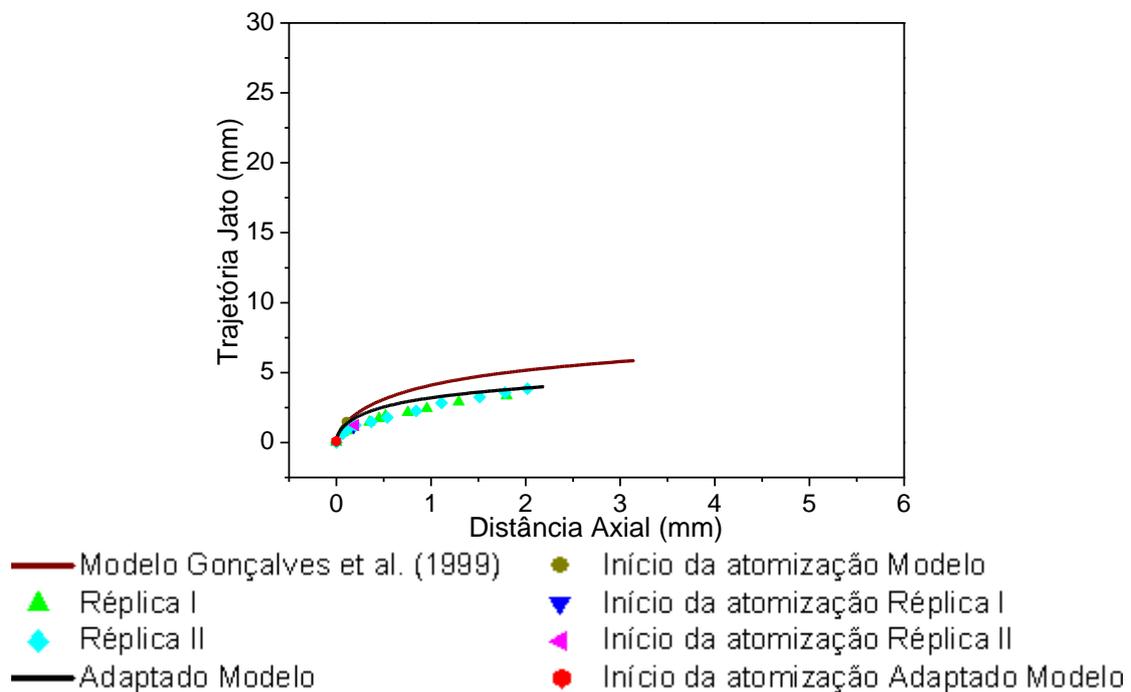


Figura C.10 – Resultados da trajetória do jato na configuração1. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$
 ($Q_l=300\text{mL/min}$)

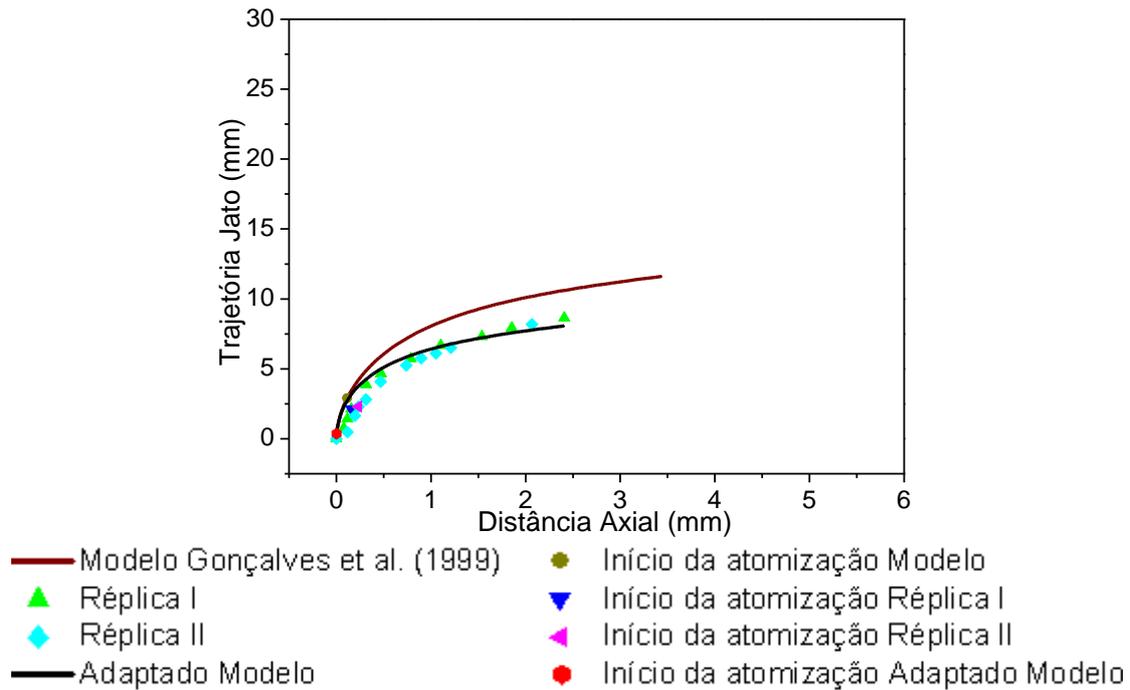


Figura C.11 – Resultados da trajetória do jato na configuração 1. $V_g=74\text{m/s}$;
 $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=600\text{mL/min}$)

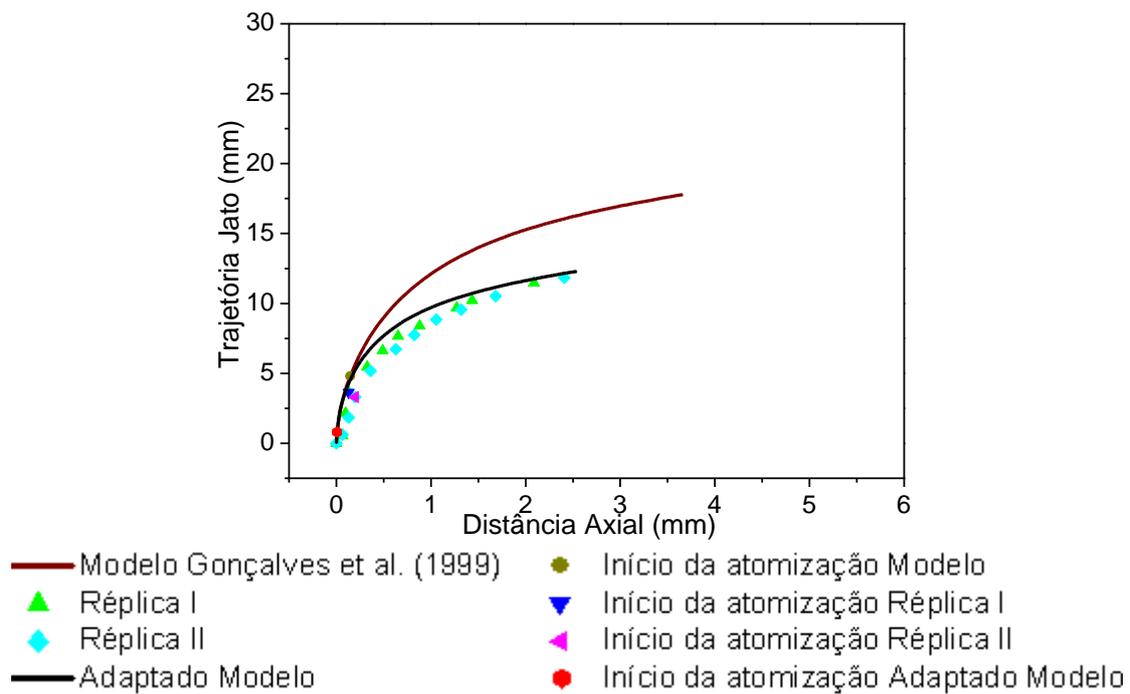


Figura C.12 – Resultados da trajetória do jato na configuração 1. $V_g=74\text{m/s}$;
 $V_j=19,10\text{m/s}$ ($Q_l=900\text{mL/min}$)

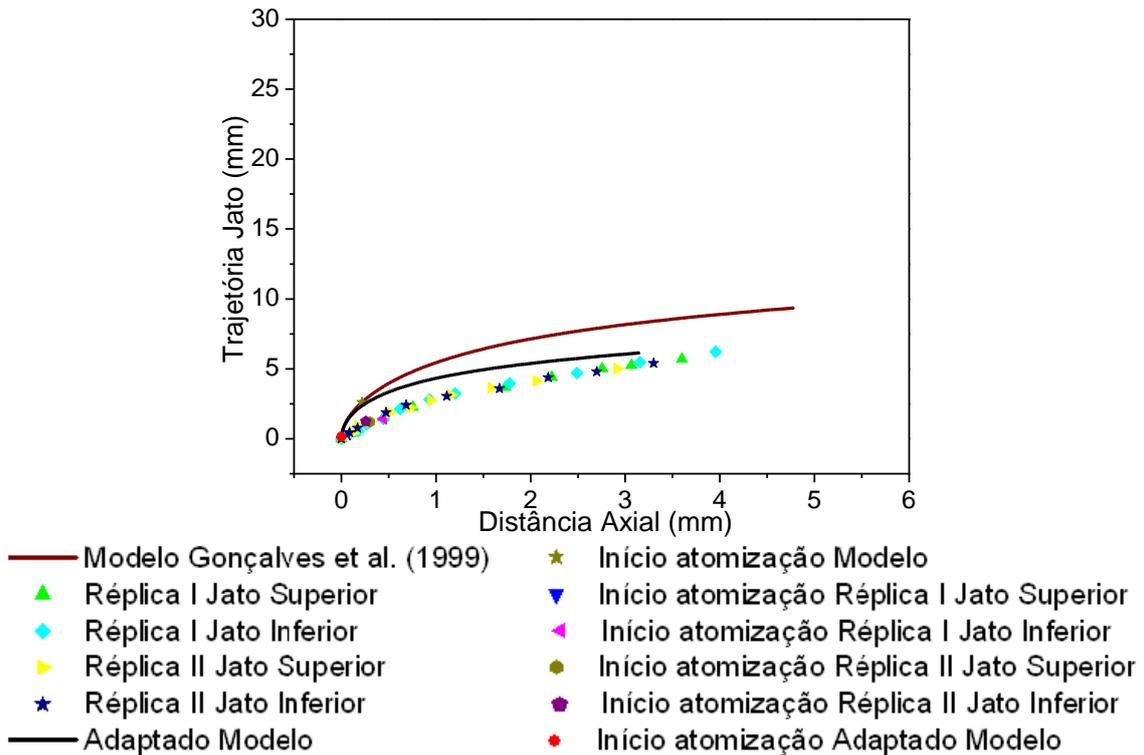


Figura C.13 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$
 ($Q_l=600\text{mL/min}$)

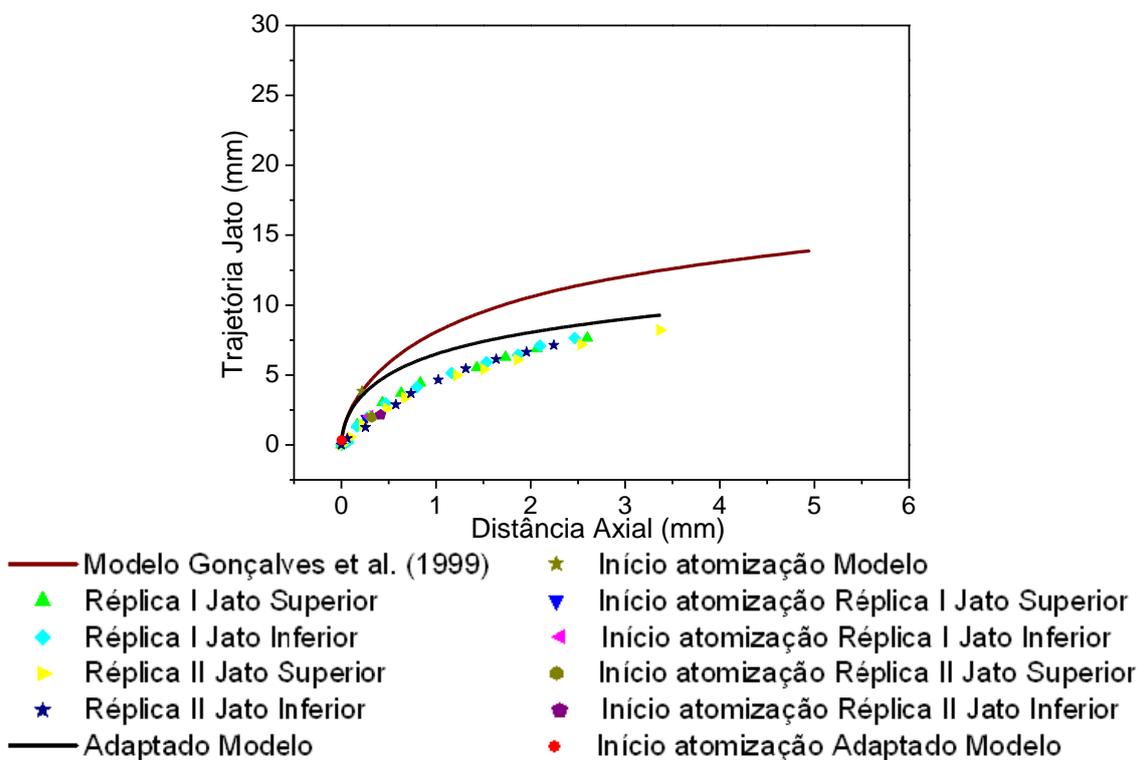


Figura C.14 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=59\text{m/s}$; $V_j=9,55\text{m/s}$
 ($Q_l=900\text{mL/min}$)

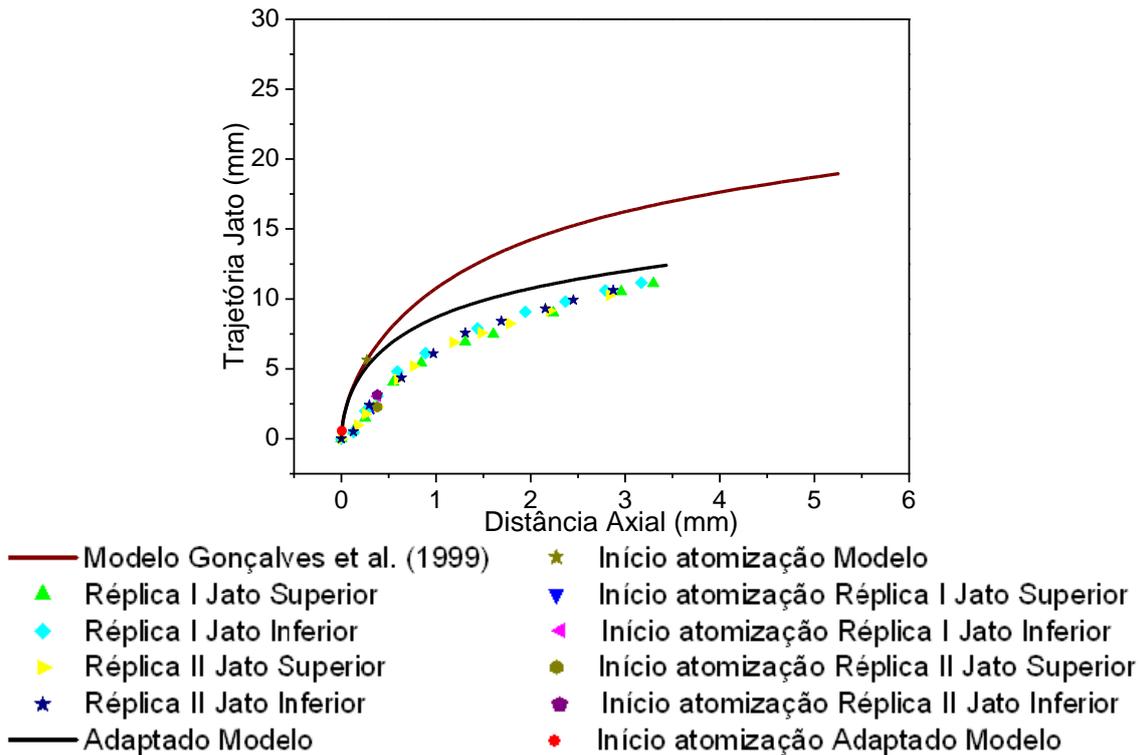


Figura C.15 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=59\text{m/s}$;
 $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$)

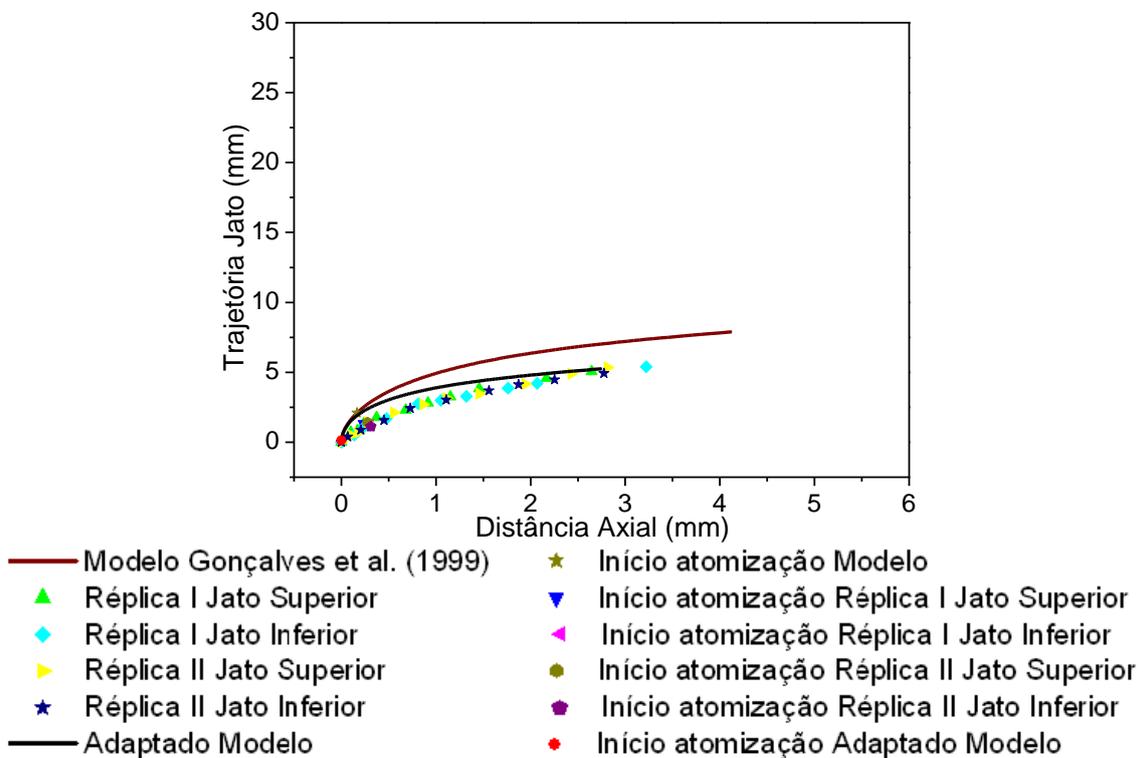


Figura C.16 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$
 ($Q_l=600\text{mL/min}$)

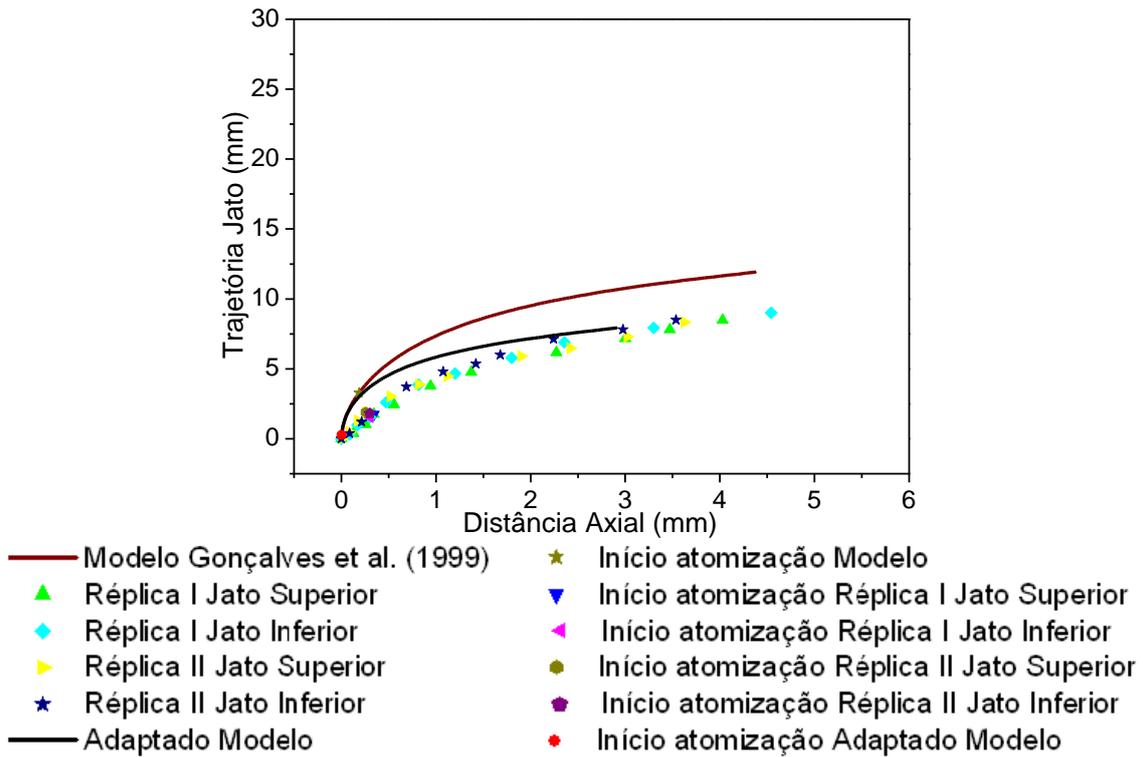


Figura C.17 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=64\text{m/s}$; $V_j=9,55\text{m/s}$
 ($Q_l=900\text{mL/min}$)

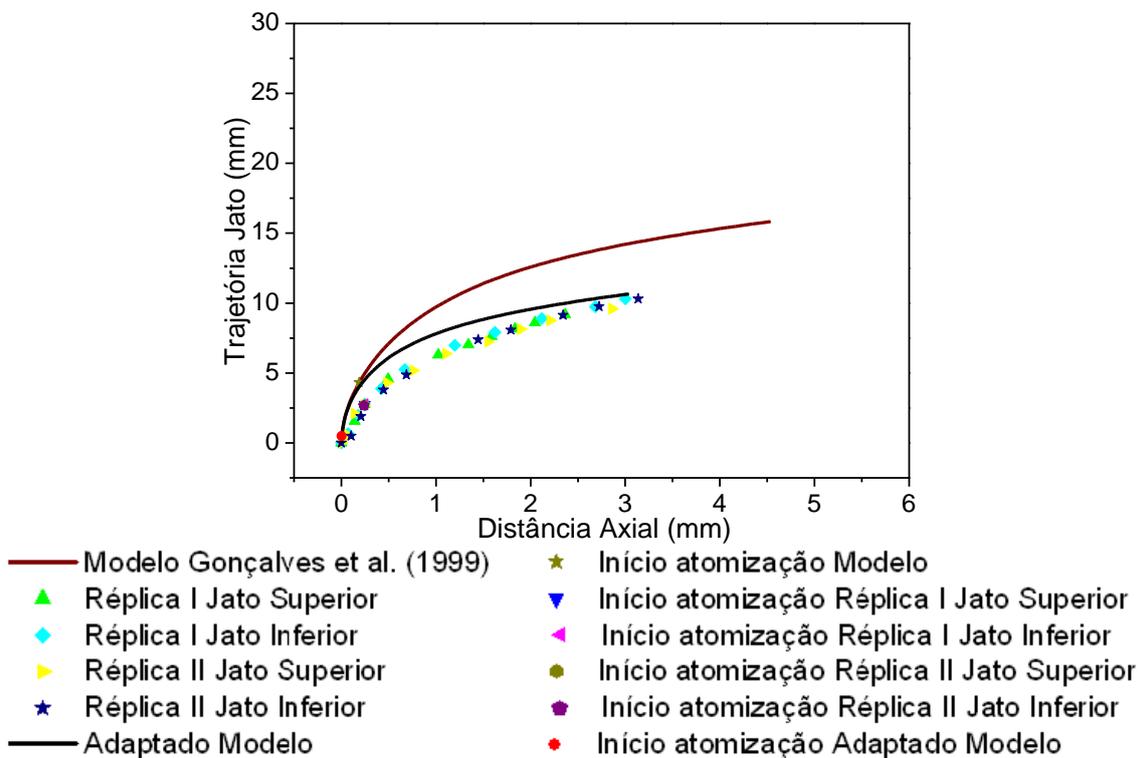


Figura C.18 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=64\text{m/s}$;
 $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$)

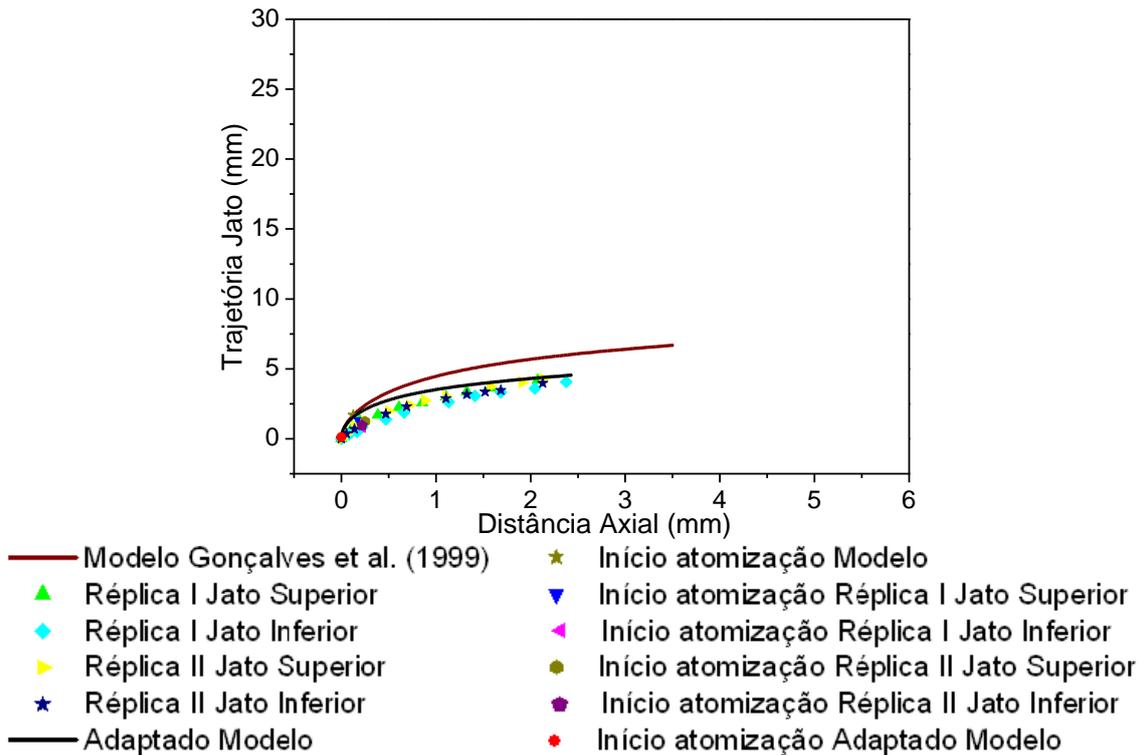


Figura C.19 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$
 ($Q_l=600\text{mL/min}$)

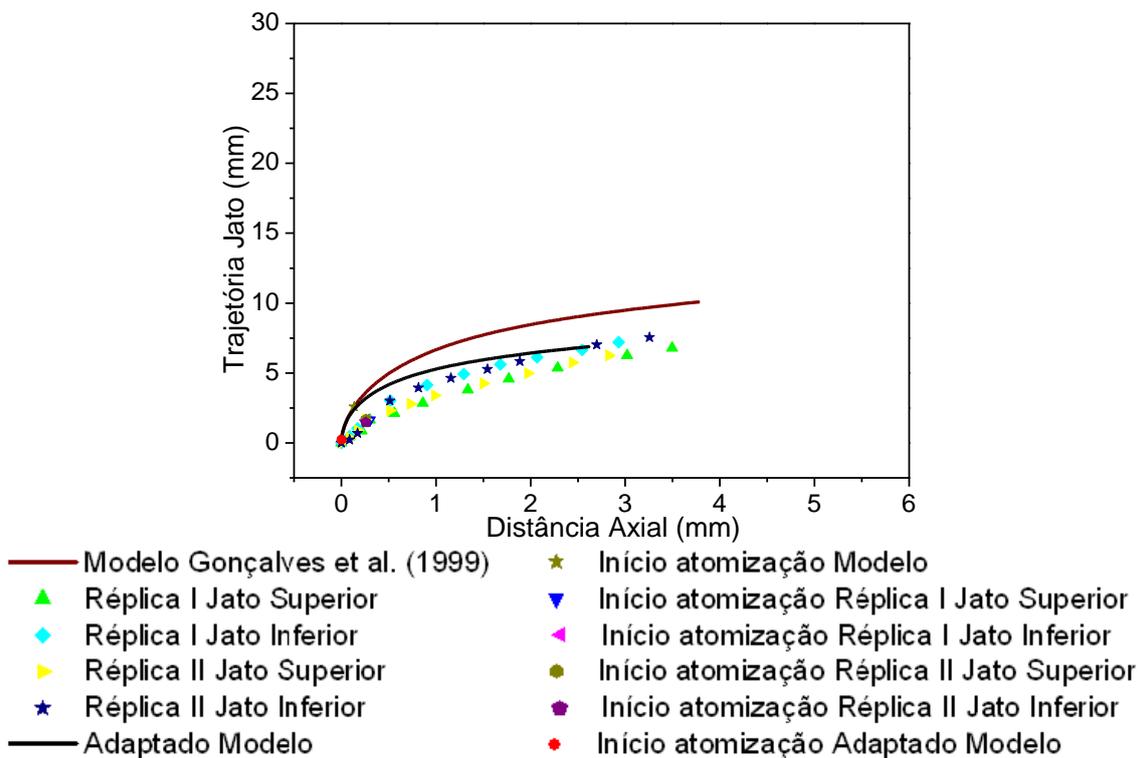


Figura C.20 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=69\text{m/s}$; $V_j=9,55\text{m/s}$
 ($Q_l=900\text{mL/min}$)

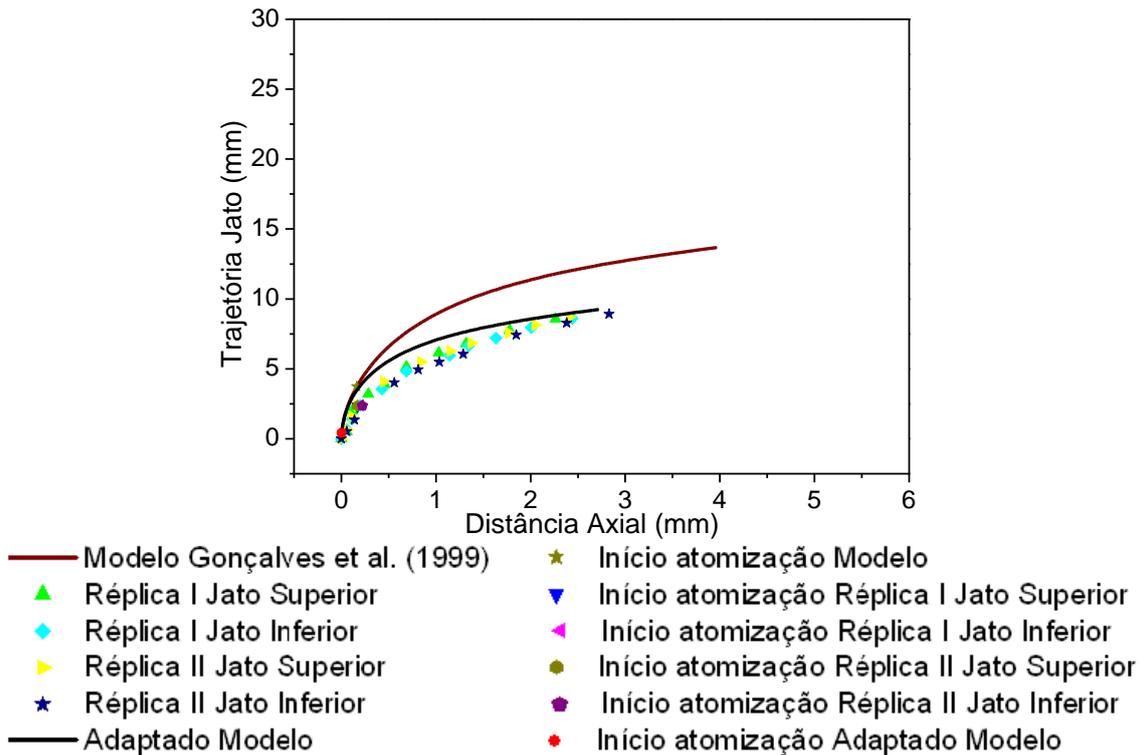


Figura C.21 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=69\text{m/s}$;
 $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$)

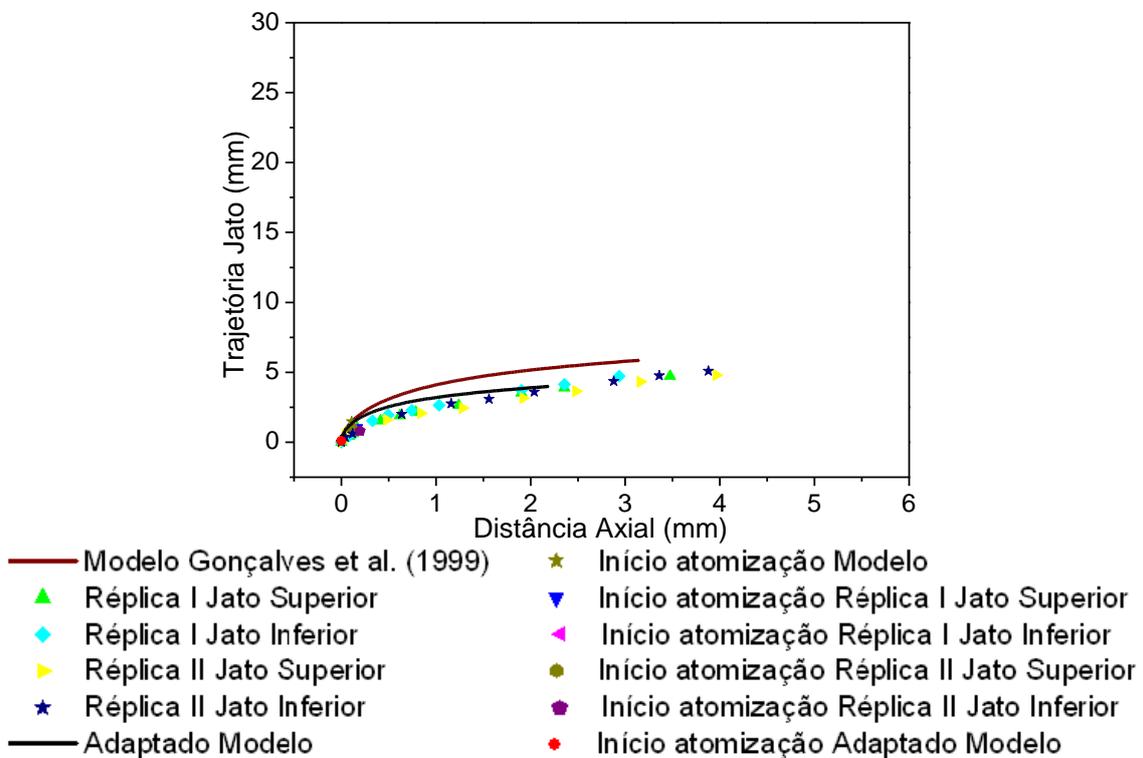


Figura C.22 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=6,37\text{m/s}$
 ($Q_l=600\text{mL/min}$)

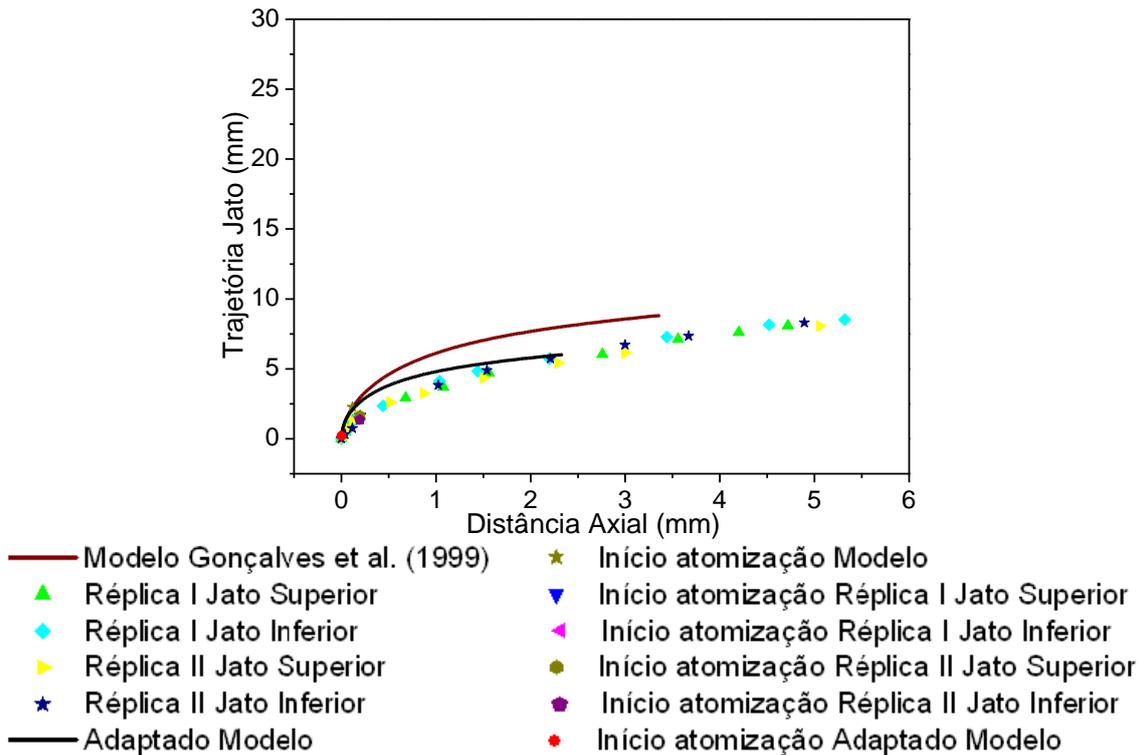


Figura C.23 – Resultados da trajetória do jato na configuração3. $V_g=74\text{m/s}$; $V_j=9,55\text{m/s}$
 ($Q_l=900\text{mL/min}$)

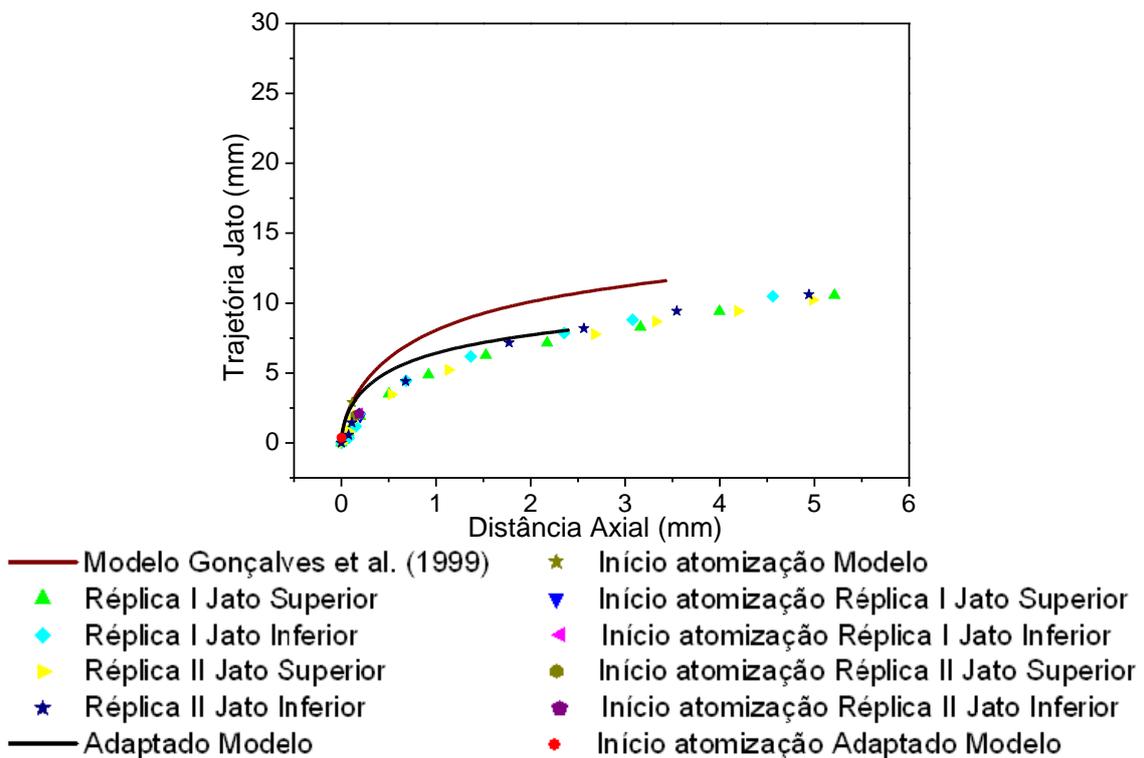


Figura C.24 – Resultados da trajetória do jato na configuração 3. $V_g=74\text{m/s}$;
 $V_j=12,73\text{m/s}$ ($Q_l=1200\text{mL/min}$)