

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS RICHARD RIBEIRO

**ESTUDO ANALÍTICO E COMPUTACIONAL DA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA
EM TUBO VENTURI PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA**

GUARAPUAVA

2023

MATHEUS RICHARD RIBEIRO

**ESTUDO ANALÍTICO E COMPUTACIONAL DA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA
EM TUBO VENTURI PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA**

**ANALYTICAL AND COMPUTATIONAL STUDY OF HYDRODYNAMIC
CAVITATION IN VENTURI TUBE FOR BEER PRODUCTION**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em engenharia mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Dalmás

Coorientador: Prof. Dr Christian Naaktgeboren

GUARAPUAVA

04/12/2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS RICHARD RIBEIRO

**ESTUDO ANALÍTICO E COMPUTACIONAL DA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA
EM TUBO VENTURI PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em engenharia mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 04/12/2023

Sérgio Dalmás
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Christian Naaktgeboren
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciano Ogiboski
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e para meu desenvolvimento acadêmico. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Em primeiro lugar agradeço a Deus e a minha família, meus pais: Clarismar Richard Ribeiro e Moacir Antônio Ribeiro e a minha irmã, Vanessa Richard Ribeiro, pelo amor incondicional, apoio constante e por acreditarem em meus sonhos.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Dalmás e ao meu coorientador Prof. Dr. Christian Naaktgeboren, pela dedicação e valiosas contribuições. Suas orientações foram essenciais para o direcionamento do meu estudo e para o aprimoramento das minhas habilidades de pesquisa.

Por fim gostaria de agradecer a todos os professores, colegas e funcionários da UTFPR de Guarapuava, que contribuíram diretamente e indiretamente para minha formação acadêmica.

A todos o meu profundo agradecimento pela presença, apoio e contribuição. Sem vocês esse trabalho não seria possível.

Muito Obrigado!

RESUMO

A cerveja é uma das bebidas mais consumida no mundo e também uma das mais antigas. Seu processo produtivo é bastante complexo e de custo relativamente alto, principalmente para os produtores caseiros, pois além de utilizar matéria prima e equipamentos de valor elevado, a forma tradicional de produção também é bastante complexa e onerosa, envolvendo os seguintes processos: moagem dos grãos, mosturação, fervura e fermentação, processos estes que consomem bastante tempo e energia elétrica. Uma possível alternativa para a redução do tempo e do consumo energético é a utilização da cavitação hidrodinâmica para a produção de cerveja, como alguns pesquisadores têm estudado recentemente. Estes estudos mostram que a cavitação tem o potencial de reduzir o tempo de produção e o consumo energético, além de simplificar o processo produtivo como um todo. No entanto essas pesquisas não apresentaram os dados e parâmetros utilizados nos experimentos. Com o objetivo de analisar o problema da cavitação hidrodinâmica em um tubo Venturi, um estudo analítico e numérico, este último feito utilizando o Ansys CFX, foram executados e comparados para que pudessem servir de ponto de partida de eventuais experimentos práticos na UTFPR de Guarapuava.

Palavras-chave: cerveja cavitante; cavitação hidrodinâmica; cavitação.

ABSTRACT

Beer is a global and ancient beverage, but its production process is complex and costly, especially for home brewers who need high-value raw materials and equipment. The traditional method involves several steps, such as grain milling, mashing, boiling, and fermentation, which take a lot of time and electricity. A possible alternative to save time and energy is to use hydrodynamic cavitation in beer production, a topic that some researchers have investigated. They claim that cavitation can reduce production time and energy use, while making the process simpler. However, these studies often do not provide enough details and parameters about their experiments. To address the issue of hydrodynamic cavitation in a Venturi tube, we conducted and compared an analytical and numerical study, using Ansys CFX for the latter. This research aims to be a basis for future practical experiments at UTFPR Guarapuava.

Keywords: beer cavitation; hidrodynamic cavitation; cavitation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 – Diagrama de Moody.....	16
Gráfico 2 – Coeficiente de perda pela expansão gradual.....	17
Gráfico 3 – Coeficiente de perda pela contração gradual	17
Gráfico 4 – Curva de desempenho da bomba.....	32
Tabela 1 – Rugosidade superficial de tubos comerciais	28
Tabela 2 – Propriedades da água	29
Tabela 3 – Iterações.....	32
Tabela 4 – Região próxima a parede do tubo Venturi	35
Tabela 5 – Método de qualidade ortogonal (A), método de assimetria (B).	36
Tabela 6 – Classificação dos valores de assimetria.....	36
Tabela 7 – Classificação dos valores de qualidade ortogonal.....	36
Tabela 8 – Dados obtidos analiticamente e numericamente.....	43
Figura 1 – Coeficiente de perda pelo tipo de aresta.....	18
Figura 2 – Coeficiente de perda dos componentes do escoamento.....	18
Figura 3 – Tubo de placa de orifício (A) e tubo Venturi (B)	19
Figura 4 – Esquema de equipamento utilizado nos experimentos	23
Figura 5 – Bagaço de malte após cada processo produtivo.....	25
Figura 6 – Esquema representativo do experimento de Albanese et al. (2016).....	27
Figura 7 – Variação de velocidade com relação a área do tubo Venturi	27
Figura 8 – Esboço do tubo do Venturi baseado em Albanese et al. (2016)	34
Figura 9 – Geração de malha no tubo Venturi.....	35
Figura 10 – Vista detalhada da malha no tubo Venturi.....	36
Figura 11 – Configurações básicas do domínio	38
Figura 12 – Modelo de Fluido.....	39
Figura 13 – Condições de Contorno na Entrada do Tubo Venturi.....	39
Figura 14 – Condições de Contorno na saída do Tubo Venturi.....	40
Figura 15 – Diferença de pressão no escoamento do tubo Venturi.....	41
Figura 16 – Detalhe da diferença de pressão no estrangulamento	41
Figura 17 – Diferença de velocidade no escoamento	42
Figura 18 – Detalhe da diferença de velocidade na região de estrangulamento.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	10
1.2	Problemática	10
1.3	Objetivos	11
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	12
2.1	Fundamentação teórica	12
2.1.1	Cavitação	12
2.1.2	Tubo Venturi.....	13
2.1.3	Escoamento Interno	13
<u>2.1.3.1</u>	<u>Número de Reynolds</u>	<u>14</u>
<u>2.1.3.2</u>	<u>Perda de carga</u>	<u>14</u>
2.1.4	Modelagem 3D	19
2.1.5	Simulação CFD	19
2.2	Estado da Arte	19
2.2.1	Análise do trabalho de ALBANESE et al. (2015)	20
2.2.2	Análise do trabalho de ALBANESE et al. (2016)	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Materiais	25
3.2	Métodos	25
3.2.1	Estudo Analítico.....	25
3.2.2	Estudo Computacional	33
<u>2.1.2.1</u>	<u>Modelagem do Tubo Venturi</u>	<u>34</u>
<u>2.1.2.2</u>	<u>Geração e Análise de Malha</u>	<u>35</u>
<u>2.1.2.3</u>	<u>Condições de Contorno</u>	<u>37</u>
<u>2.1.2.4</u>	<u>Análise Solução</u>	<u>40</u>
4	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A cerveja é uma das bebidas mais antigas do mundo e seu processo produtivo sofreu poucas alterações com o passar do tempo. Sua produção segue quatro etapas principais: moagem dos grãos, mosturação, fervura e fermentação. Na moagem, o grão é cisalhado mecanicamente em um moinho para que o amido, farinha esbranquiçada, seja separado da casca. Em seguida, na mosturação, ele é colocado em contato com água e exposto a temperaturas específicas, para que o amido seja quebrado em açúcares menores. Deste momento em diante essa mistura é chamada de mosto, que posteriormente é fervido juntamente com o lúpulo. Após ser resfriado, até uma temperatura adequada, ele é fermentado e transformado em cerveja pelas leveduras, microrganismos unicelulares do grupo dos fungos (KUNZE, 2004).

A cavitação é um fenômeno da mecânica dos fluidos que nas últimas décadas tem sido amplamente estudado, principalmente no que diz respeito a sua aplicação na indústria de alimentos e no tratamento de água residual. Um caso de grande sucesso em que a cavitação tem sido experimentada é na produção de cerveja, onde ela é utilizada para quebrar os grãos, esterilizar o mosto e até mesmo pasteurizar a cerveja, substituindo e simplificando processos. Isso foi observado por Albanese et al. (2016) através de experimentos realizados em um equipamento com capacidade de 230 litros e em condições ideais de produção de alimentos.

De modo a verificar se de fato a cavitação tem potencial para ser utilizada na produção de cerveja, realizei um estudo analítico e numérico dos dados apresentados por Albanese et al. (2016). Haja visto que, em pesquisas científicas, principalmente quando envolvem tecnologias inovadoras, nem todos os dados são revelados e também pode haver a tendência de não se mencionar pontos negativos, ou suas vulnerabilidades. Além disso, este estudo tem por finalidade pavimentar o conhecimento científico do método da cavitação para produção de cerveja, servindo como fonte de dados para eventuais experimentos práticos.

1.1 Justificativa

O mercado das cervejas artesanais está em alta e cada vez mais pessoas se interessam por produzir sua própria cerveja. Porém, esses iniciantes esbarram em inúmeras dificuldades, como por exemplo, a complexidade dos processos e o elevado custo dos equipamentos e tempo de produção. Com a utilização da cavitação esses problemas podem ser amenizados, ou até mesmo solucionados, pois este fenômeno tem a capacidade de eliminar o processo de moagem a seco e de reduzir o tempo total de produção, tornando a fabricação de cerveja mais simples e rápido.

Outro aspecto bastante importante a ser levado em conta é o de divulgação do método no mercado cervejeiro, principalmente por estarmos situados em uma região com grande número de cervejarias e cervejeiros. Eles normalmente não conhecem outra forma de fazer cerveja a não ser a forma tradicional, pois o método tradicional de produção de cerveja é completamente estigmatizado. Logo, trazer o estudo para nossa região, é uma maneira excelente de torná-lo mais conhecido e de despertar o interesse de outras pessoas em estudar o assunto.

1.2 Problemática

Apesar do Brasil ser um dos países em que mais se consome cerveja, ele não é um dos maiores produtores de seus insumos, fazendo com que esses insumos tenham, em grande maioria, que ser importados de outros países, o que encarece o produto final. Essa situação prejudica principalmente as cervejarias artesanais e os produtores caseiros, que produzem cervejas repletas de insumos estrangeiros, como lúpulos, maltes e leveduras. Além disso, os equipamentos utilizados para produção de cerveja são caros e consomem muita energia, tornando as cervejas artesanais bebidas bastante caras.

O uso da cavitação para a produção de cerveja, tem o potencial de reduzir os custos de produção da bebida, principalmente no que diz respeito ao consumo energético, pois ela acelera a produção e reduz a necessidade de processos com alto consumo de energia, como o aquecimento do mosto a altas temperaturas, tornando desnecessária a utilização de grandes resistências, e de trocadores de calor, o que reduziria drasticamente o preço dos equipamentos.

O processo de produção de cerveja também pode ser bastante complicado, principalmente o das cervejas artesanais, pois é necessário controlar meticulosamente a temperatura nas rampas de brassagem, etapas em que a cerveja tem que ficar em determinada temperatura, por determinado período de tempo. Além disso, é necessário fazer o mosto se movimentar para que não caramelize e controlar o tempo em que o lúpulo fica fervendo, tudo isso, é claro de acordo com a cerveja que está sendo produzida. A cavitação tende a facilitar esse processo, pois faz com que todos esses controles se resumam em um só: o controle de vazão da bomba.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é verificar de forma analítica e numérica (CFD), o trabalho de Lorenzo Albanese, Rosaria Ciriminna, Francesco Meneguzzo e Mario Pagliaro, no que diz respeito ao fenômeno da cavitação, em um tubo Venturi, para a produção de cerveja. Pavimentando o conhecimento e levantando dados, para que posteriormente seja possível realizar testes práticos nos laboratórios do campus Guarapuava da UTFPR.

Deste modo traremos o estudo científico de um método alternativo para produção de cervejas para nossa região, instigando a curiosidade e o interesse de produtores de cerveja e outros estudiosos no assunto.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo será mostrada a bibliografia necessária para o entendimento dos fenômenos físicos que fazem parte deste trabalho. Trata-se da cavitação hidrodinâmica e da perda de carga, além de outros conceitos relacionados.

Neste capítulo também será apresentado os estudos mais recentes sobre o tema em questão, o que os pesquisadores estão discutindo e quais os resultados que eles estão encontrando, para termos um apanhado geral do conhecimento científico envolvido.

2.1 Fundamentação teórica

Nesta seção trataremos da literatura acadêmica, tal qual descrita em livros pelos principais autores da área, como: Yunus A. Çengel, Robert W. Fox e Bruce R. Munson. A literatura acadêmica é a base comum para qualquer pesquisa, pois ela reúne tudo o que já se estudou sobre determinado assunto pelos maiores pesquisadores de cada época, mostrando a evolução do entendimento no decorrer do tempo. Além disso estes livros são fontes bastante confiáveis, pois são constantemente atualizados e exaustivamente colocado a prova por inúmeros cientistas e pesquisadores.

2.1.1 Cavitação

A cavitação é a formação de bolhas de vapor em um escoamento de fluido, geradas pela redução local da pressão a valores iguais ou inferiores a pressão de saturação do fluido. Quando nessas condições, o fluido pode passar abruptamente para a fase gasosa, até que ele recupere sua pressão e essas bolhas implodam no escoamento, podendo colapsar com superfícies sólidas adjacentes (FOX, 2010).

A cavitação é muito comum em sistemas de escoamento com bombas e turbinas hidráulicas e quase sempre é desejável que ela não aconteça, ou que seus efeitos sejam minimizados, por reduzir o desempenho dessas máquinas, além de gerar vibrações e avarias, essas últimas altamente destrutivas e capazes de erodir

qualquer equipamento. A cavitação pode ser percebida por seu ruído sibilante, provocado pela implosão das bolhas de vapor (ÇENGEL, 2007).

2.1.2 Tubo Venturi

O tubo Venturi é um dispositivo inventado por Giovanni Battista Venturi, em 1797, para medir e controlar a vazão de um fluido em escoamento. Este simples dispositivo, apesar de já ser relativamente antigo, é muito utilizado ainda nos dias de hoje e carrega o nome de seu inventor (ÇENGEL, 2007).

Embora o tubo Venturi seja muito conhecido por ser utilizado para controlar ou medir a vazão de fluidos em escoamento, ele também pode ser utilizado para a geração de cavitação sendo então chamado: reator de cavitação hidrodinâmica. Esse tipo de reator provou ser um dos mais eficientes em termos de geração de cavitação por consumo energético, além disso ele permite que a cavitação ocorra em uma área maior (GOGATE & PANDIT, 2005).

2.1.3 Escoamento Interno

Escoamento interno é o transporte de um fluido, através de um conduto fechado, independente de qual seja sua seção transversal. A única condição que caracteriza o escoamento como interno, é que o conduto ou tubo deve estar completamente preenchido por fluido, seja ele líquido ou gás. Os exemplos de utilização deste tipo de escoamento são vastos, desde oleodutos e gasodutos até veias e artérias do nosso corpo. Os sistemas de escoamento interno são bastante diversos, mas os parâmetros físicos relevantes para sua descrição são os mesmos, como por exemplo: diferença de pressão, viscosidade dinâmica, compressibilidade do fluido, etc (MUNSON, 2009).

No escoamento interno o fluido começa a se movimentar pela diferença de pressão ou pela gravidade e durante o escoamento acontecem as perdas de carga, tanto as “maiores”, provocadas pelo efeito da rugosidade superficial do tubo, como as “menores” devido a mudança de geometria. Este tipo de escoamento também é bastante influenciado pelos efeitos da viscosidade dinâmica, pois o fluido está cercado de paredes (ÇENGEL, 2007).

2.1.3.1 Número de Reynolds

O movimento de um fluido é composto pela soma de quatro forças: inerciais, gravitacionais, viscosas e de pressão. Essas forças são descritas por parâmetros, como por exemplo: velocidade de escoamento, rugosidade superficial da parede, temperatura do fluido, viscosidade dinâmica, entre outros.

No século XVIII Osborne Reynolds descobriu que a relação entre as forças inerciais e viscosas define o regime de escoamento e essa relação é chamada de número de Reynolds, um número adimensional que mostra qual destas duas forças é predominante no escoamento (ÇENGEL, 2007).

$$Re = \frac{\rho V_{méd} D}{\mu} \quad (1)$$

Quando o número de Reynolds é alto, os efeitos viscosos são desprezíveis, o regime de escoamento torna-se turbulento, completamente caótico. Já quando o número de Reynolds é baixo, os efeitos viscosos são dominantes e o regime de escoamento é laminar. Quando o número de Reynolds estiver em valores intermediários, o regime é o de transição (FOX, 2010).

2.1.3.2 Perda de carga

A perda de carga ou queda de pressão é um dos objetivos principais no estudo de qualquer tipo de escoamento interno e nada mais é do que a diferença de pressão por unidade de comprimento. Este fenômeno está diretamente ligado a capacidade necessária para que as máquinas de fluxo (bombas, no caso de líquidos) mantenham o escoamento com determinada vazão.

A perda de carga em um escoamento interno é causada pela resistência para o fluido escoar. A perda de carga é diretamente proporcional ao comprimento do tubo, tanto maior quanto for a velocidade média do escoamento e tanto menor quanto for o diâmetro interno do tubo, no caso de mesma vazão. A perda de carga também é afetada pela rugosidade interna do tubo e pelas mudanças na direção do escoamento. Partindo da equação da energia e isolando as pressões obtemos uma equação que é

bastante útil para verificar a perda de carga, ou a diferença de pressão no escoamento (ÇENGEL, 2007).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2 + h_l - h_{\text{bomba}} \quad (3)$$

onde $P_1 - P_2$ é a diferença de pressão, α_1 e α_2 são os fatores de correção do escoamento, V_1 e V_2 as velocidades e $z_2 - z_1$ a diferença de altura, tudo isso com relação a dois pontos do escoamento. Além disso a equação também considera as perdas de carga: $h_{\text{turbina},e}$ e h_l , na turbina e as perdas gerais do escoamento, respectivamente (MUNSON, 2009).

As perdas denominadas “maiores” ocorrem devido aos efeitos viscosos do fluido em escoamento, que geram forças de atrito entre as camadas do fluido, resultando em perda de energia. Essas perdas são diretamente proporcionais ao comprimento do tubo e a viscosidade do fluido. Já as perdas menores ocorrem devido a passagem do fluido pelos componentes do sistema, como válvulas, curvas, reduções, conexões, entre outros. As equações que tratam das perdas maiores e menores, respectivamente são: (MUNSON, 2009).

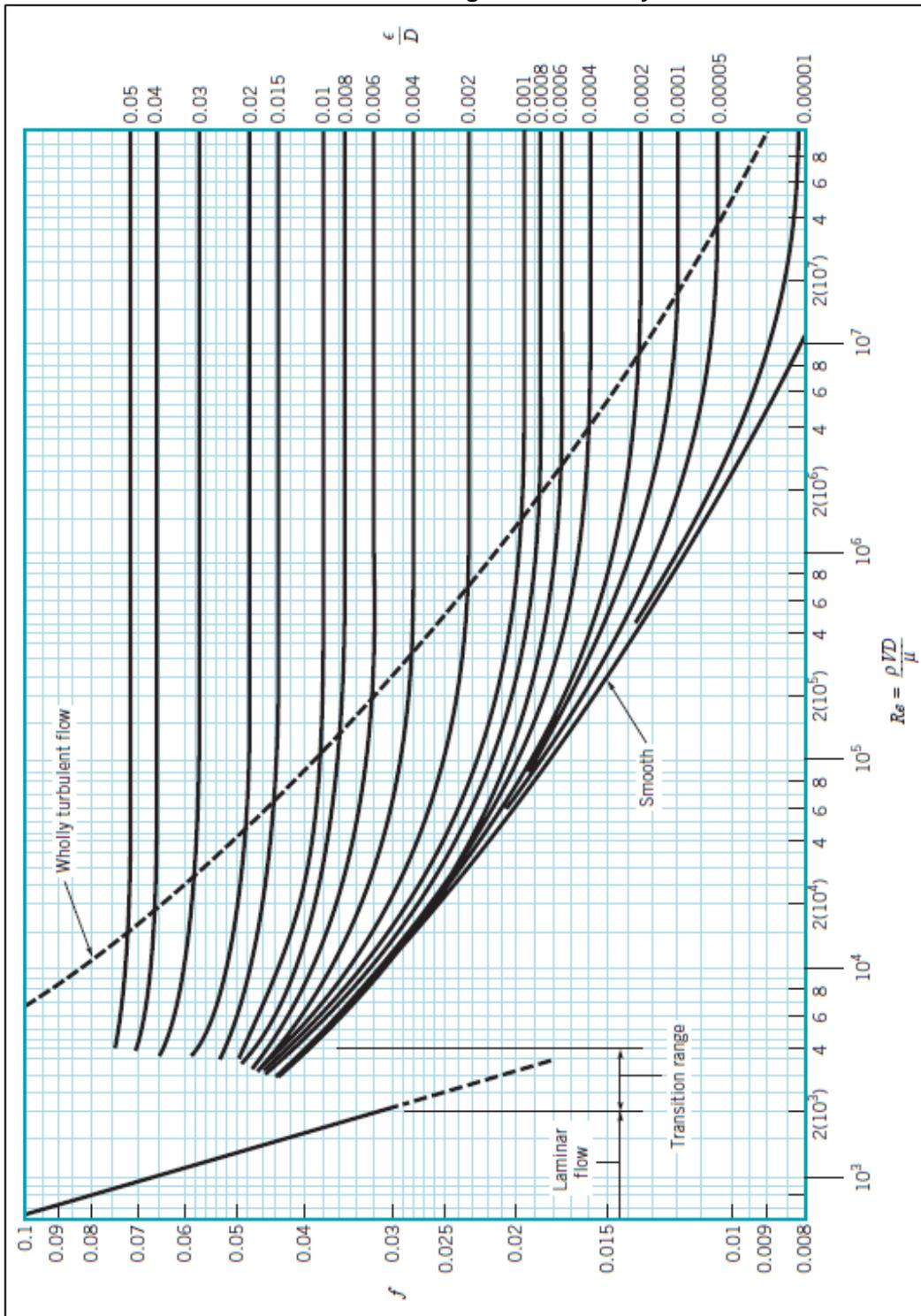
$$h_{L,\text{maior}} = f \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

e

$$h_{L,\text{menor}} = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

onde f é o fator que leva em conta os efeitos da rugosidade superficial, l é o comprimento e D é o diâmetro do tubo, g é a aceleração da gravidade e K_L o coeficiente de perda que depende da geometria. Para determinar o fator f de acordo com a rugosidade da parede interna do tubo, usa-se o diagrama de Moody, Gráfico 1 (MUNSON, 2009).

Gráfico 1: Diagrama de Moody



Fonte: MUNSON (2009)

Já o coeficiente K_L , para as situações de expansão e contração, são mostrados no Gráfico 2 e Tabela 1, respectivamente.

Gráfico 2: Coeficiente de perda pelo ângulo de expansão.

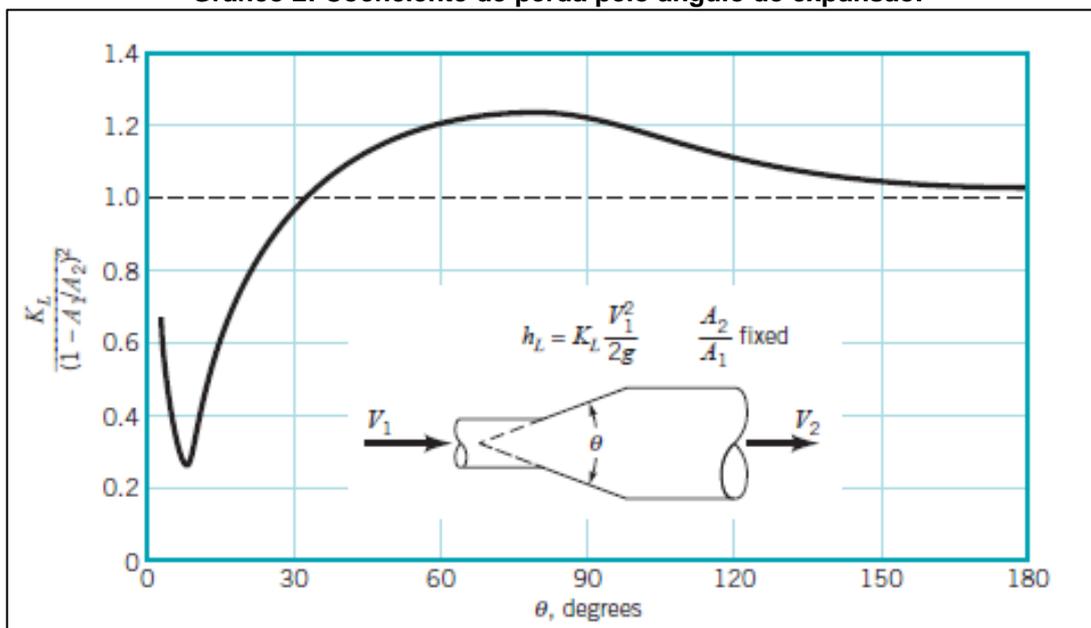
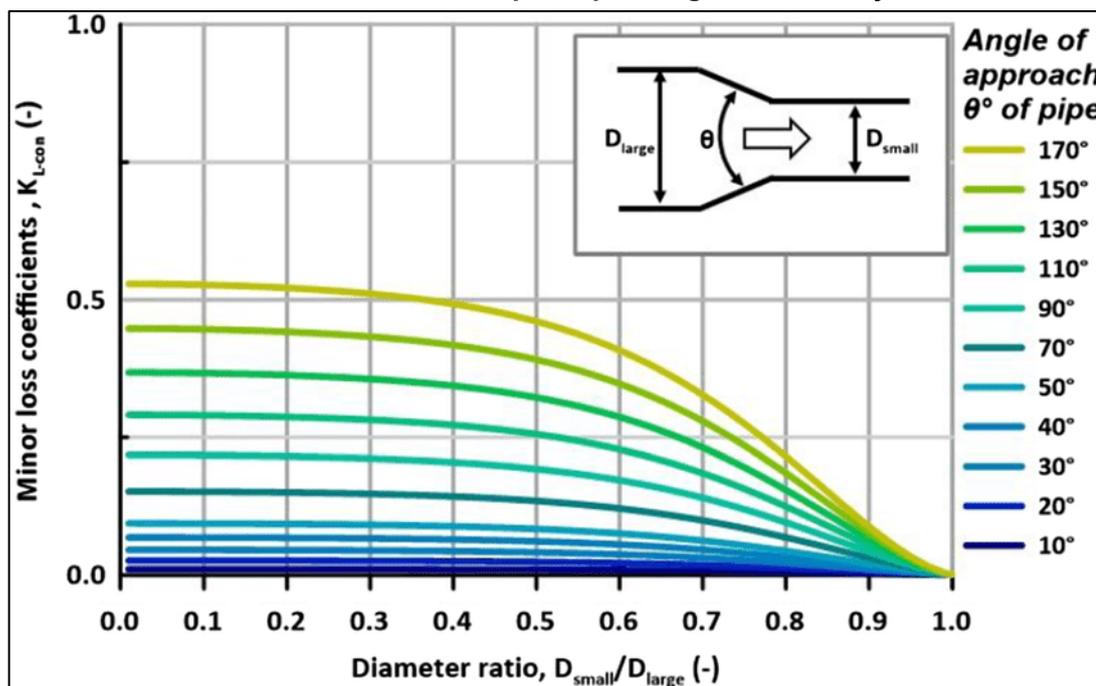
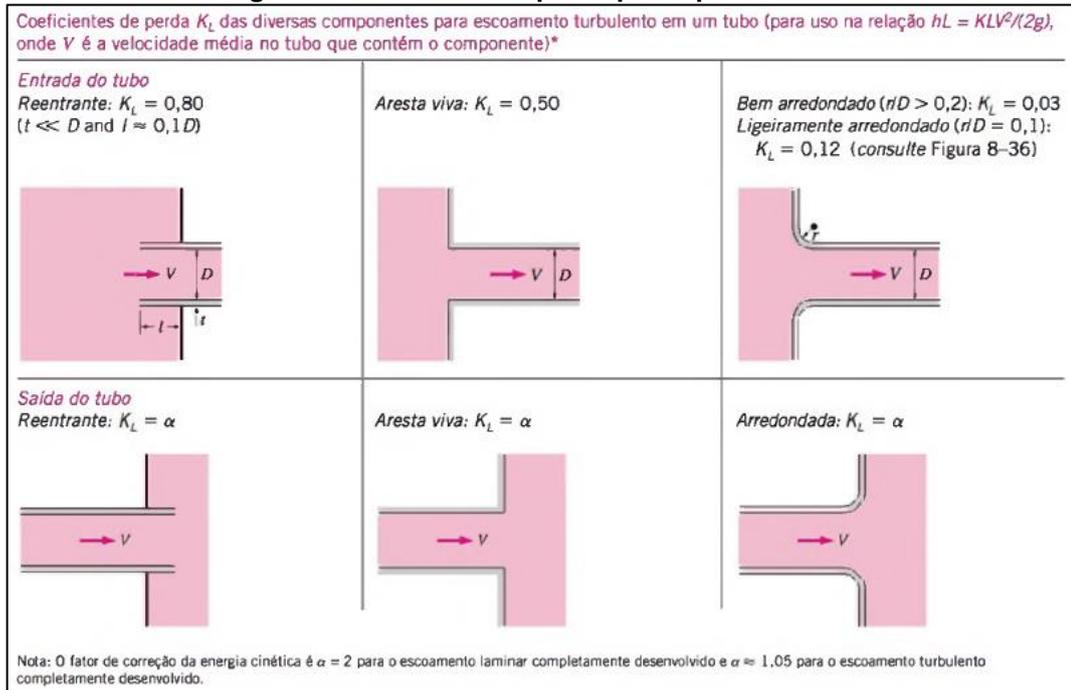


Gráfico 3: Coeficiente de perda pelo ângulo de contração.



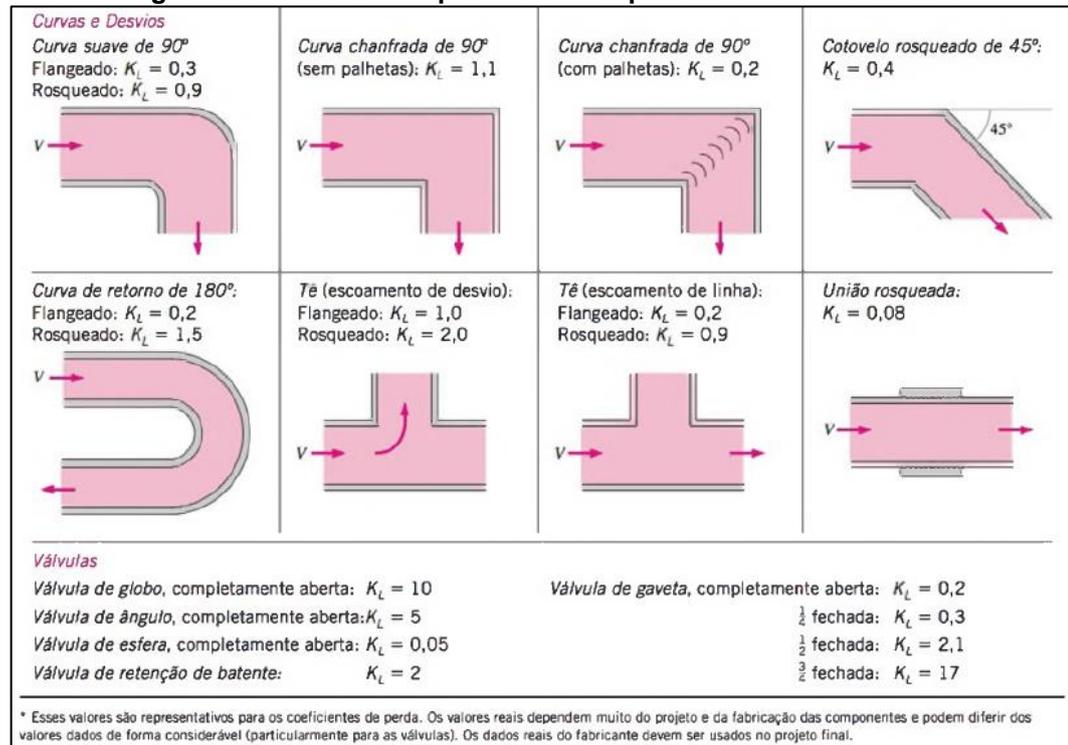
Outras perdas no escoamento se referem aos componentes utilizados no escoamento, como: curvas, reduções, adaptadores, entre outros, (Figura 2). Além disso, o tipo de aresta existente nesses componentes e no escoamento em geral, também influencia na perda de carga, (Figura 1).

Figura 1: Coeficiente de perda pelo tipo de aresta.



Fonte: ÇENDEL (2007).

Figura 2: Coeficiente de perda dos componentes do escoamento.



Fonte: ÇENDEL (2007).

A potência requerida por uma bomba, em um escoamento interno, depende diretamente da perda de carga existente neste sistema, pois a perda de carga

representa a dificuldade que a bomba terá no escoamento. Já a potência, é a energia necessária para superar essa dificuldade.

$$W_{\text{bomba}} = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot g \cdot h_L}{\eta_{\text{bomba}}} \quad (7)$$

2.1.4 Modelagem 3D

A modelagem 3D é um processo de criação de objetos tridimensionais usando software especializado, e é amplamente utilizada em áreas como: engenharia, arquitetura, design, etc. Os softwares mais utilizados atualmente são: Solidworks, Inventor, Solidedge, entre outros. Existem várias técnicas de modelagem 3D, incluindo modelagem poligonal, de superfícies NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline), de malha de sólidos. Cada técnica tem suas vantagens e desvantagens e cada uma é voltada para determinada aplicação. A modelagem 3D é uma ferramenta poderosa para a criação de objetos e ambientes virtuais, precisos e realistas com as mais diversas aplicações nas mais diferentes áreas (FOLEY, 2014).

2.1.5 Simulação CFD

A simulação CFD (computational fluid dynamics ou dinâmica dos fluidos computacional), é uma técnica que utiliza softwares especializados para simular o comportamento de fluidos em situações diversas. Trata-se da resolução numérica de diversas equações matemáticas, que descrevem o movimento físico, usando métodos computacionais avançados, permitindo a simulação do comportamento do fluido em uma ampla gama de situações. A simulação CFD é uma ferramenta poderosa para análise e otimização de projetos que envolvam a movimentação de fluidos, reduzindo em alguns casos a necessidade de experimentos físicos (VERSTEEG, 2007).

2.2 Estado da Arte

Nesta seção trataremos dos estudos acadêmicos mais recentes sobre o assunto, de modo a entender melhor o fenômeno da cavitação hidrodinâmica aplicada

ao processo de fabricação de cerveja. Analisaremos dois artigos científicos que estão diretamente ligados, pois usam o mesmo elemento gerador de cavitação, o tubo Venturi. O primeiro deles estuda a inativação de uma levedura usando cavitação hidrodinâmica. O segundo, por sua vez, trata de um experimento em escala real de produção, de uma micro cervejaria, utilizando a cavitação hidrodinâmica.

2.2.1 Análise do trabalho de ALBANESE et al. (2015)

Saccharomyces cerevisiae é uma das leveduras mais utilizadas no processo de fermentação industrial, que é essencial para a produção de alguns alimentos e bebidas. Em uma das etapas do processo produtivo destes alimentos, se faz necessário que a levedura seja inativada, para interromper o processo de fermentação. Para isso são usados processos como a pasteurização, que consistem em aquecer o alimento a temperaturas que a levedura não suporte, e aplicação de produtos químicos. No entanto esses processos podem afetar a qualidade dos componentes do alimento e além disso quase sempre são ineficientes energeticamente falando (ALBANESE et al., 2015).

A cavitação hidrodinâmica, por sua vez, é um processo com potencial de solucionar esses problemas, pois ela é capaz de inativar as leveduras sem afetar a qualidade dos componentes do alimento. As bolhas de vapor criadas dentro do líquido durante a cavitação, implodem gerando ondas de choque de alta intensidade que causam danos físicos as leveduras. O processo é gerado por um reator de HC (“hydrodynamic cavitation”, que significa: cavitação hidrodinâmica), nome comumente usado para descrever um elemento gerador de cavitação. No caso foram utilizados um tubo de Venturi e um tubo de placas de orifício (ALBANESE et al., 2015).

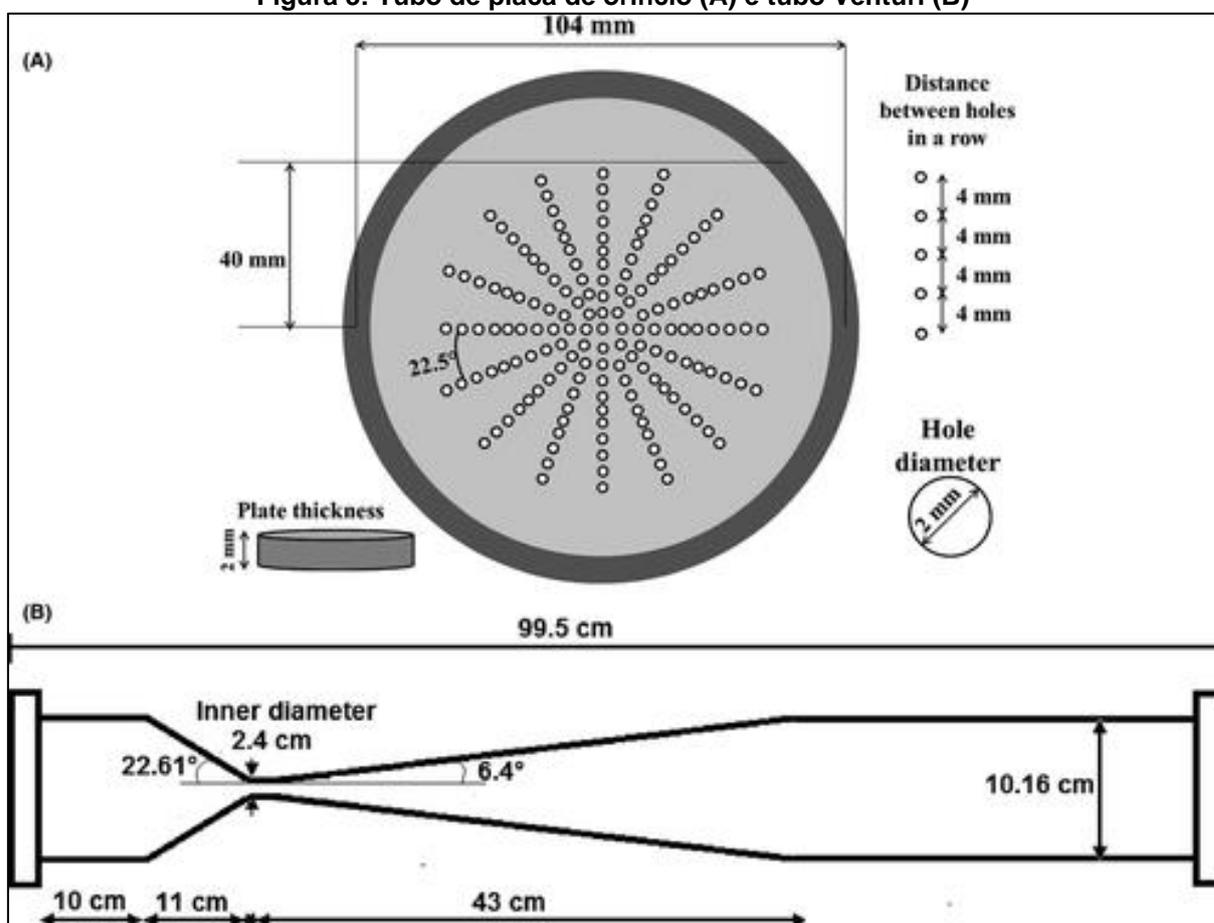
De acordo com Albanese et al. (2015), os estudos referentes a aplicação de cavitação nos processos de produção de alimentos têm se concentrado em duas principais fontes geradoras de cavitação: as acústicas e as mecânicas. O ponto central, que é o divisor de águas entre os dois métodos, é a eficiência energética, pois os métodos mecânicos conseguem alcançar até duas ordens de magnitude a mais de eficiência energética, tornando-se mais viáveis do que os métodos acústicos.

Os reatores de HC do tipo mecânico são de construção relativamente simples e funcionam causando alterações no escoamento de fluido que passa por eles. Estes

reatores são de dois tipos: tubo de placas de orifício e tubos de Venturi. O tubo de Venturi apresenta uma clara vantagem em comparação com o tubo de placas de orifícios, pois não correm o risco de entupir quando circulam partículas sólidas ou de viscosidade elevada. Já o tubo de placas de orifício melhora o efeito da cavitação por causarem mais turbulência a jusante dos vários jatos causados por cada um dos orifícios (ALBANESE et al., 2015).

Os reatores de cavitação que foram utilizados nos experimentos são, um tubo com placa de orifício composto por 156 furos, (Figura 3, A), cada um deles com 2 mm de diâmetro e um tubo de Venturi, (Figura 3, B) (ALBANESE et al., 2015).

Figura 3: Tubo de placa de orifício (A) e tubo Venturi (B)



Fonte: (ALBANESE et al., 2015)

Os resultados obtidos por Albanese et al. (2015) mostraram que a cavitação hidrodinâmica é um método eficiente para a inativação das leveduras, com uma taxa de inativação de aproximadamente 99%. Além disso o método se provou mais eficiente do ponto de vista energético, se comparado com os processos normalmente utilizados, tornando-o uma alternativa muito viável. Ele também foi capaz de inativar

as leveduras sem causar danos aos componentes do alimento, condição absolutamente desejável para fazer frente aos métodos utilizados atualmente.

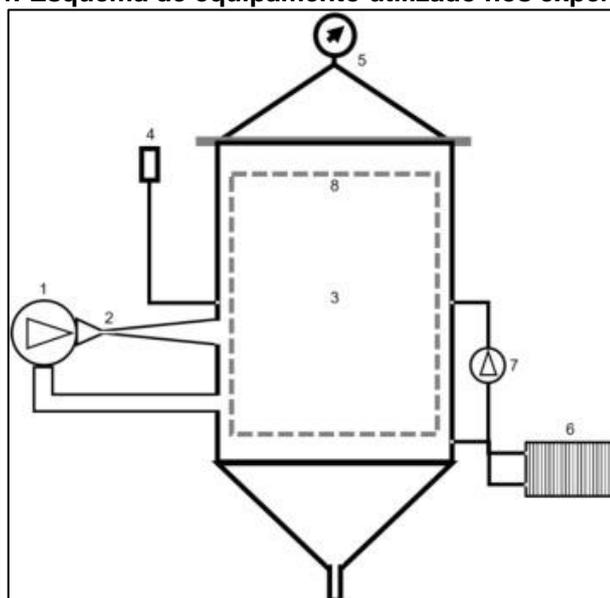
2.2.2 Análise do trabalho de ALBANESE et al. (2016)

Albanese et. al. (2016), inicia afirmando que as tecnologias utilizadas para a fabricação de cerveja quase não sofreram alterações com o passar do tempo, pois são tecnologias com bastante confiabilidade e aceitação do mercado produtivo. No entanto um método alternativo tem sido amplamente estudado na última década: o método que utiliza cavitação hidrodinâmica. Estes estudos tem mostrado que este método acelera o processo de extração, sanitização, além de melhorar a eficiência energética.

Ainda segundo Albanese et al. (2016), a cavitação hidrodinâmica acontece quando um fluido é forçado a aumentar de velocidade, o que por sua vez gera uma depressurização, que consiste na pressão do fluido cair abaixo de sua pressão de saturação e, conseqüentemente, evaporar, gerando bolhas de vapor que implodem quando o fluido recupera sua pressão. Existem diversas formas de fazer isso acontecer em um fluido escoando, as principais delas são através de tubos Venturi, placa de orifício, entre outros. O tubo Venturi se mostrou o mais adequado, por ser de simples construção e de custo baixo, além de sua produção ser facilmente escalável.

Com a finalidade de verificar as questões tratadas acima, desenvolveu-se um equipamento utilizando componentes comerciais e seguindo as normas sanitárias, Figura 4, de modo a representar uma brassagem em escala real de produção de uma cervejaria. O equipamento desenvolvido tem capacidade de produção de 230 litros e possui um reator de cavitação do tipo Venturi conforme descrição do mesmo autor em trabalhos anteriores (Figura 3, B). Para impulsionar o sistema, utilizou-se uma bomba sanitária de 7500 W (Lowara, modelo ESHE 50-160/75), com vazão volumétrica máxima de aproximadamente 1500 litros por minuto e a pressão variando entre 2 a 16 atmosferas. Alguns testes de produção foram realizados neste equipamento, e em equipamentos tradicionais, sendo que em seguida seus resultados foram comparados (ALBANESE et al., 2016).

Figura 4: Esquema de equipamento utilizado nos experimentos.



Fonte: (ALBANESE et al.,2016)

Na Figura 5 podemos ver como ficou o bagaço de malte após o processo de fabricação tradicional, lado esquerdo, e como ficou após o processo que utiliza a cavitação hidrodinâmica, lado direito. Neste último, a etapa inicial de moagem dos grãos não foi realizada, no entanto o grau de maceração foi maior, o que representa uma redução de tempo e uma simplificação de processo. Além disso, o percentual de açúcar no bagaço foi menor, apontando para sua maior eficiência (ALBANESE et al., 2016).

Figura 5: Bagaço de malte após cada processo produtivo.



Fonte: (ALBANESE et al.,2016)

Os resultados gerais dos testes de Albanese et al. (2016) mostraram uma redução significativa no tempo total de produção, muito devido a simplificação das etapas de moagem e fervura dos grãos. Além disso estima-se que a extração de amido foi até 30% mais eficiente do que a forma tradicional, resultando em um processo com uma perda menor de malte. A economia no consumo de energia também foi significativa: em torno de 30% a menos de energia foi gasta para realizar todo o processo. O processo também se tornou mais simples e prático de ser realizado evidenciando o potencial que este método possui em substituir os métodos tradicionais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será listado os materiais usados para fazer o estudo, bem como os métodos empregados para realizá-lo e corretamente compreendê-lo.

3.1 Materiais

Para a condução do estudo numérico, contamos com o desempenho do computador Acer Aspire 3, equipado com uma capacidade de 8 GB de memória RAM. Este sistema possui um processador Intel Core i5 operando a 2,5 GHz. A escolha desse hardware específico permitiu uma execução fluida e eficaz das análises numéricas, garantindo resultados confiáveis e consistentes ao longo do estudo.

3.2 Métodos

De modo a verificar os resultados obtidos por Albanese et al. (2016), desenvolveremos a resolução do problema da cavitação em um tubo Venturi de forma analítica e numérica, para assim poder comparar os resultados e verificar se de fato a cavitação pode ser utilizada para a produção de cerveja.

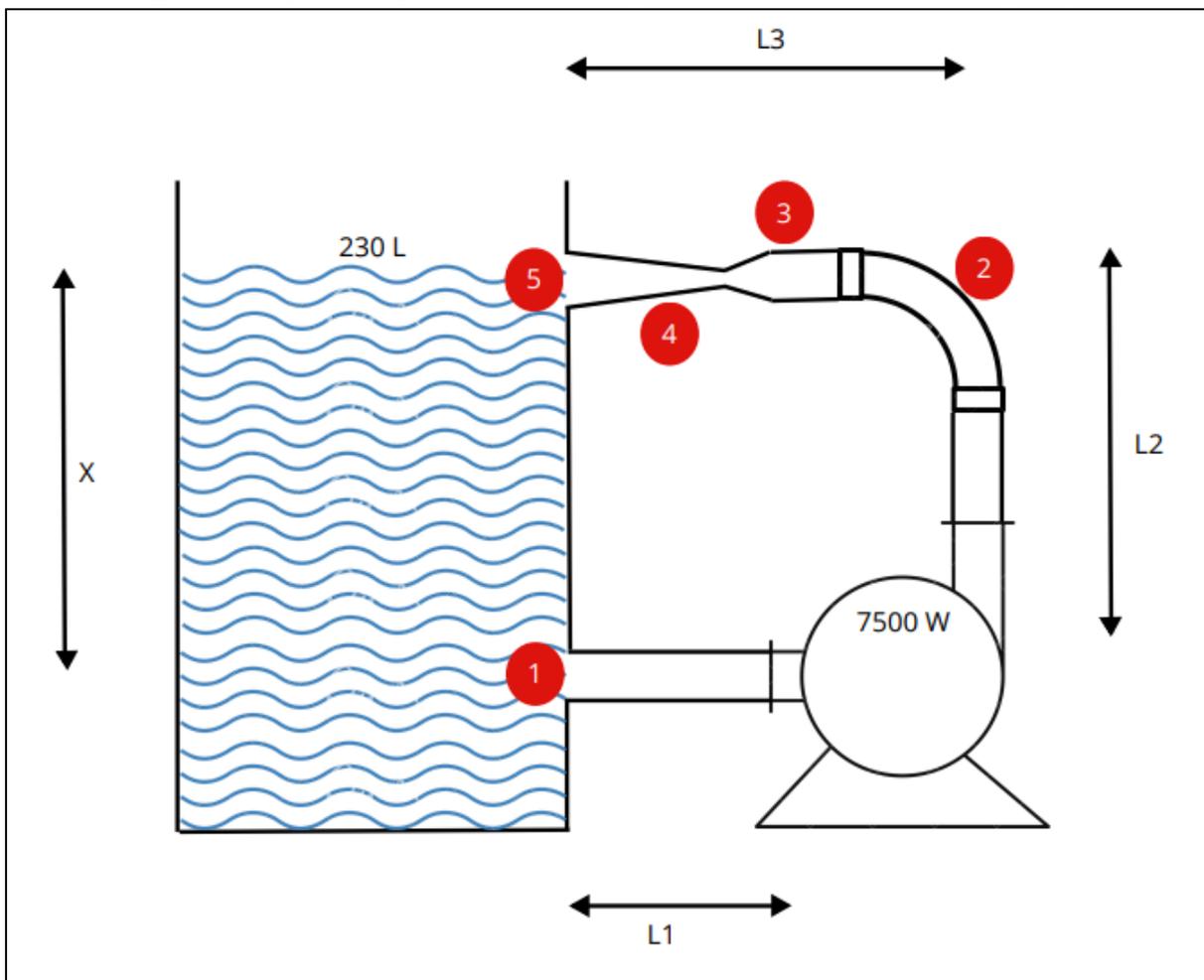
3.2.1 Estudo Analítico

Para a realização desse estudo, foi necessário a obtenção de dados que não estão contidos em Albanese et al. (2016). Trata-se da vazão volumétrica e da pressão real, em que o experimento foi realizado. Sem estes dados, não se poderia encontrar a diferença de pressão no tubo Venturi e, ainda, essa diferença de pressão deverá ser utilizada para se comparar os resultados analíticos com os do método numérico.

Para encontrar esses dados, utilizou-se os parâmetros da bomba, disponibilizados pelo fabricante. Utilizou-se a potência da bomba na equação de energia e considerou-se que toda essa energia seria utilizada para vencer as perdas de carga geradas pelo tubo Venturi e as outras perdas do escoamento (LENTECH, 2023).

Baseado no esquema apresentado anteriormente, Figura 4, um novo esquema foi feito, de modo que seja possível identificar com maior clareza cada uma das perdas de carga no escoamento. Identificou-se 5 perdas de carga provocadas pelas mudanças de geometria do escoamento. Elas foram enumeradas seguindo a direção do escoamento, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Esquema representativo do experimento de Albanese et al. (2016).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Começando pela perda de carga no ponto 1, nota-se que é uma perda provocada pela aresta viva que conecta o tanque ao tubo (8). O ponto 2, por sua vez, é a perda de carga provocada por uma curva de 90°, que foi considerada como sendo uma curva do tipo soldada (9). Já no ponto 5, temos um tubo de saída com aresta viva (10). Pela Figura 1 e Figura 2, temos que:

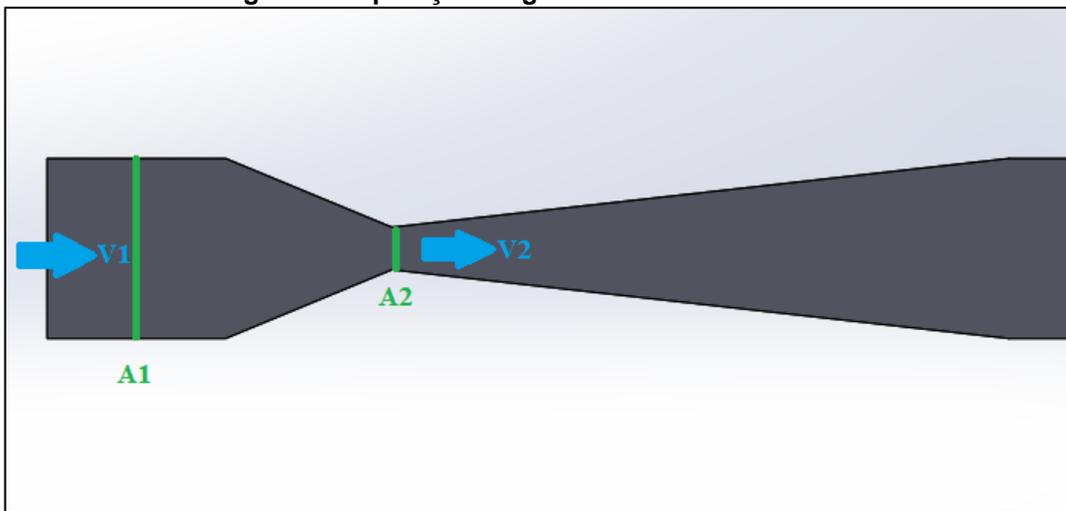
$$K_{L1} \cong 0,5 \quad (8)$$

$$K_{L2} \cong 0,3 \quad (9)$$

$$K_{L5} \cong 1,05 \quad (10)$$

Agora para encontrar a perda pela contração, ponto 3 e a perda pela expansão, ponto 4, é preciso primeiramente encontrar a razão de áreas, pois estes coeficientes são encontrados em função deste valor.

Figura 7: Separação da geometria do tubo Venturi.



Fonte: Autoria Própria.

Considerando A_1 área da seção transversal por onde o fluido está entrando e A_2 área da seção transversal onde o escoamento é estrangulado Figura 7, temos que:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{0,00045}{0,0081} = 0,055 \quad (11)$$

Agora, utilizando a razão de áreas e o ângulo de contração, podemos aproximar o valor de K_{LC} , Tabela 1, coeficiente de perda pela contração gradual, para o valor de razão de área mais próximo, ou seja:

$$K_{L3} \cong 0,08 \quad (12)$$

Da mesma forma, sabendo a razão de áreas e o ângulo de expansão, podemos encontrar o coeficiente de perda pela expansão gradual, Gráfico 1, que como pode ser observado, se aproxima do valor mais baixo da curva, a menor perda de carga possível em uma expansão gradual.

$$\frac{K_{L4}}{\left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2} \cong 0,28 \Rightarrow K_{L4} = 0,27 \quad (13)$$

Além disso, é de fundamental importância que seja encontrado o fator de atrito, pois a perda por atrito corresponde a uma parcela significativa da perda de carga em um escoamento interno, juntamente com o número de Reynolds (2). Para tanto, necessitamos da rugosidade superficial do material, que no caso, foi considerado um aço inoxidável, o mesmo material utilizado por Albanese et al. (2016).

Para encontrar o número de Reynolds, é necessário primeiramente ter em mãos o valor da rugosidade superficial do material, que pode ser obtido utilizando a Tabela 1.

Tabela 1: Rugosidade superficial de tubos comerciais.

Material	Rugosidade, ϵ	
	pés	mm
Vidro, plástico	0 (lisa)	
Concreto	0,003–0,03	0,9–9
Bastão de madeira	0,0016	0,5
Borracha, uniformizada	0,000033	0,01
Tubulação de cobre ou latão	0,000005	
0,0015		
Ferro fundido	0,00085	0,26
Ferro galvanizado	0,0005	0,15
Ferro forjado	0,00015	0,046
Aço inoxidável	0,000007	0,002
Aço comercial	0,00015	0,045

* A incerteza desses valores pode chegar a $\pm 60\%$.

Fonte: ÇENGEL (2007)

Assim, a rugosidade superficial deste material é:

$$\varepsilon = 0,002 \text{ mm} \quad (14)$$

Para encontrar o número de Reynolds ainda é preciso ter a densidade e a viscosidade do fluido. Com o objetivo de simplificar os cálculos, utilizou-se os valores da água.

Tabela 2: Propriedades da água.

<i>Água líquida a 20°C (68°F) e 1 atm</i>		
Calor específico ($c = c_p = c_v$)	$c = 4,182 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ $= 4182 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}$	$c = 0,9989 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$ $= 777,3 \text{ pés} \cdot \text{lb}/\text{lbm} \cdot \text{R}$ $= 25.009 \text{ pés}^2/\text{s}^2 \cdot \text{R}$
Densidade	$\rho = 998,0 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 62,30 \text{ lbm/pés}^3$
Viscosidade	$\mu = 1,002 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$	$\mu = 6,733 \times 10^{-4} \text{ lbm/pés} \cdot \text{s}$
Viscosidade cinemática	$\nu = 1,004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	$\nu = 1,081 \times 10^{-5} \text{ pés}^2/\text{s}$
*Independente da pressão ou temperatura		

Fonte: ÇENGEL (2007)

$$\rho = 998,0 \text{ kg/m}^3 \quad (15)$$

$$\mu \cong 0,001 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \quad (16)$$

A velocidade do fluido foi obtida através de uma estimativa inicial de vazão (14), dentro do intervalo em que a bomba é capaz de fornecer. Esta velocidade foi utilizada somente para encontrar o número de Reynolds na primeira iteração, até que o valor da vazão convirja ao valor real:

$$\dot{V}_{\text{inicial}} = 0,017 \text{ m}^3/\text{s} \quad (14)$$

$$V_{\text{inicial}} = \frac{\dot{V}}{A_2} = 37,77 \text{ m/s} \quad (15)$$

Tendo esses dados e utilizando a equação (2) podemos encontrar o número de Reynolds para cada região e aproxima-lo do inteiro mais próximo (16), para que seja mais facilmente encontrado no diagrama de Moody.

$$Re_1 = \frac{\rho V_{inicial} D_1}{\mu} = \frac{997.37,77 \cdot 0,1016}{0,001} = 3826707,55 \cong 4000000 \quad (16)$$

Agora, usando os números de Reynolds e a razão entre a rugosidade superficial e o diâmetro do tubo (17), pode ser encontrado o fator de atrito no diagrama de Moody (Gráfico 1):

$$\frac{\varepsilon}{D_1} = \frac{0,002}{0,1016} \cong 0,02 \quad (17)$$

Logo, cruzando os valores com a curva temos:

$$f_{inicial} \cong 0,05 \quad (18)$$

Desta forma, tendo todos os coeficientes de perda, a perda de carga total no escoamento é:

$$h_l = \left(\frac{K_1 \cdot V^2}{2g} + \frac{K_2 \cdot V^2}{2g} + \frac{K_3 \cdot V^2}{2g} + \frac{K_4 \cdot V^2}{2g} + \frac{K_5 \cdot V^2}{2g} + \frac{f \cdot L \cdot V^2}{2D \cdot g} \right) \quad (19)$$

$$h_l = \left(\frac{K_1 \cdot \dot{V}^2}{2g \cdot A_1^2} + \frac{K_2 \cdot \dot{V}^2}{2g \cdot A_1^2} + \frac{K_3 \cdot \dot{V}^2}{2g \cdot A_2^2} + \frac{K_4 \cdot \dot{V}^2}{2g \cdot A_2^2} + \frac{K_5 \cdot \dot{V}^2}{2g \cdot A_1^2} + \frac{f \cdot L \cdot \dot{V}^2}{2D \cdot g \cdot A_1^2} \right) \quad (20)$$

$$h_l = \frac{\dot{V}^2}{2g} \left(\frac{K_1 + K_2 + K_5}{A_1^2} + \frac{K_3 + K_4}{A_2^2} + \frac{f \cdot L}{D \cdot A_1^2} \right) \quad (21)$$

Na Figura 3, é possível observar a diferença de altura entre a região de sucção (ponto 1), e de descarga da bomba (ponto 5). O artigo não fornece nenhum dado com relação as dimensões do equipamento utilizado, mas para os cálculos, será considerado como sendo 1,0 m a distância entre esses pontos (22). Além disso, o comprimento total da tubulação, soma dos comprimentos L_1 , L_2 e L_3 , estimou-se como sendo 2,0 m (23):

$$X = (z_2 - z_1) = 1,0 \text{ m} \quad (22)$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = 0,25 + 0,85 + 0,85 \text{ m} = 2,0 \text{ m} \quad (23)$$

Agora, utilizando a equação da conservação de energia (3), pode-se encontrar a vazão que a bomba fornece ao sistema. Por se tratar de um sistema aberto, as pressões nos pontos 1 e 5 são iguais. Assim como as velocidades no ponto 1 e 5, que pelo princípio de conservação de massa, são iguais. Logo temos que:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2 + h_l - h_{\text{bomba}} \quad (24)$$

$$h_{\text{bomba}} = (z_2 - z_1) + h_l \quad (25)$$

A eficiência da bomba foi extraída do gráfico de desempenho, Gráfico 4, do fabricante, para a vazão da inicial (LENTECH, 2023).

$$\eta_{\text{bomba}} = 71,3 \% \quad (26)$$

$$\frac{W_{\text{bomba}} \cdot \eta_{\text{bomba}}}{\rho \cdot \dot{V} \cdot g} = (z_2 - z_1) + \frac{\dot{V}^2}{2g} \left(\frac{K_1 + K_2 + K_5}{A_1^2} + \frac{K_3 + K_4}{A_2^2} + \frac{f \cdot L}{D \cdot A_1^2} \right) \quad (27)$$

$$\left(\frac{K_1 + K_2 + K_5}{A_1^2} + \frac{K_3 + K_4}{A_2^2} + \frac{f \cdot L}{D \cdot A_1^2} \right) \frac{\dot{V}^3}{2g} + (z_2 - z_1) \dot{V} = \frac{W_{\text{bomba}} \cdot \eta_{\text{bomba}}}{\rho \cdot g} \quad (28)$$

Substituindo os valores na equação e resolvendo-a temos:

$$\left(\frac{1,85}{0,0081^2} + \frac{0,35}{0,00045^2} + \frac{0,05 \cdot 2}{0,1016 \cdot 0,0081^2} \right) \frac{\dot{V}^3}{2 \cdot 9,81} + 1 \dot{V} = \frac{7500 \cdot 0,713}{997 \cdot 9,81} \quad (29)$$

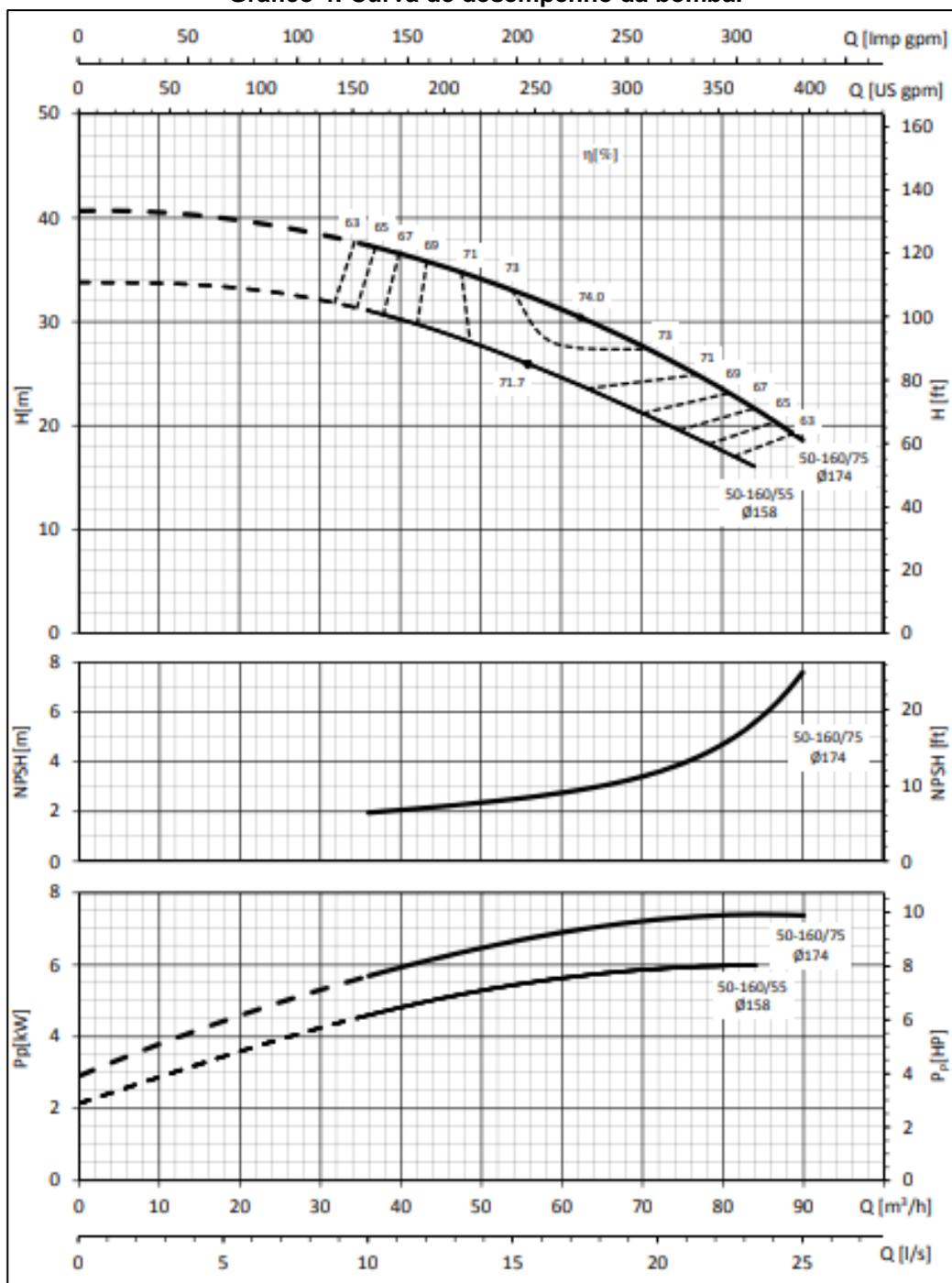
$$90295,287 \dot{V}^3 + 1 \dot{V} - 0,547 = 0 \quad (30)$$

$$\dot{V}_1 = 0,018; \dot{V}_2 = \dot{V}_3 = -0,009 \quad (31)$$

Logo, como a vazão não pode ser negativa, a única solução possível é:

$$\dot{V} = 0,018 \text{ m}^3/\text{s} \quad (32)$$

Gráfico 4: Curva de desempenho da bomba.



Fonte: LENTECH (2023).

Agora, com esta nova vazão, os cálculos foram refeitos até convergir ao valor real utilizado por ALBANESE et al. (2016), conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Iterações

Iteração	1ª	2ª	3ª
\dot{V}	0,017 m ³ /s	0,018 m ³ /s	0,018 m ³ /s
Re	3826707	4051808	4051808
f	0,05	0,05	0,05
η_{bomba}	71,3%	74,0%	74,0%

Fonte: Autoria Própria (2023).

Agora, utilizando esta vazão, encontrou-se a diferença de pressão no tubo Venturi, que será comparada posteriormente com a diferença de pressão encontrada pela simulação computacional.

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho\alpha_2 \dot{V}^2}{2A_2} - \frac{\rho\alpha_1 \dot{V}^2}{2A_1} + \rho g(h_1 - h_{\text{bomba}}) \quad (33)$$

onde:

$$h_1 = \frac{\dot{V}^2}{2g} \left(\frac{K_3 + K_4}{A_2^2} + \frac{f \cdot L_3}{D \cdot A_1^2} \right) = 28,64 \text{ m} \quad (34)$$

$$h_{\text{bomba}} = \frac{W_{\text{bomba}} \cdot \eta_{\text{bomba}}}{\rho \cdot g} = \frac{7500 \cdot 0,74}{997,981} = 0,567 \text{ m} \quad (35)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1,05 \quad (36)$$

Assim, substituindo os valores na equação, temos que a diferença de pressão no tubo Venturi é:

$$P_1 - P_2 = 274925,87 \text{ Pa} \quad (37)$$

3.2.2 Estudo Computacional

O método numérico que será utilizado para comparar com os resultados obtidos analiticamente, será o CFD e o software usado para isso será o Ansys CFX. A solução de problemas de fluidos computacionais utilizando esse software é constituída por cinco etapas: modelagem do escoamento, geração de malha, definição

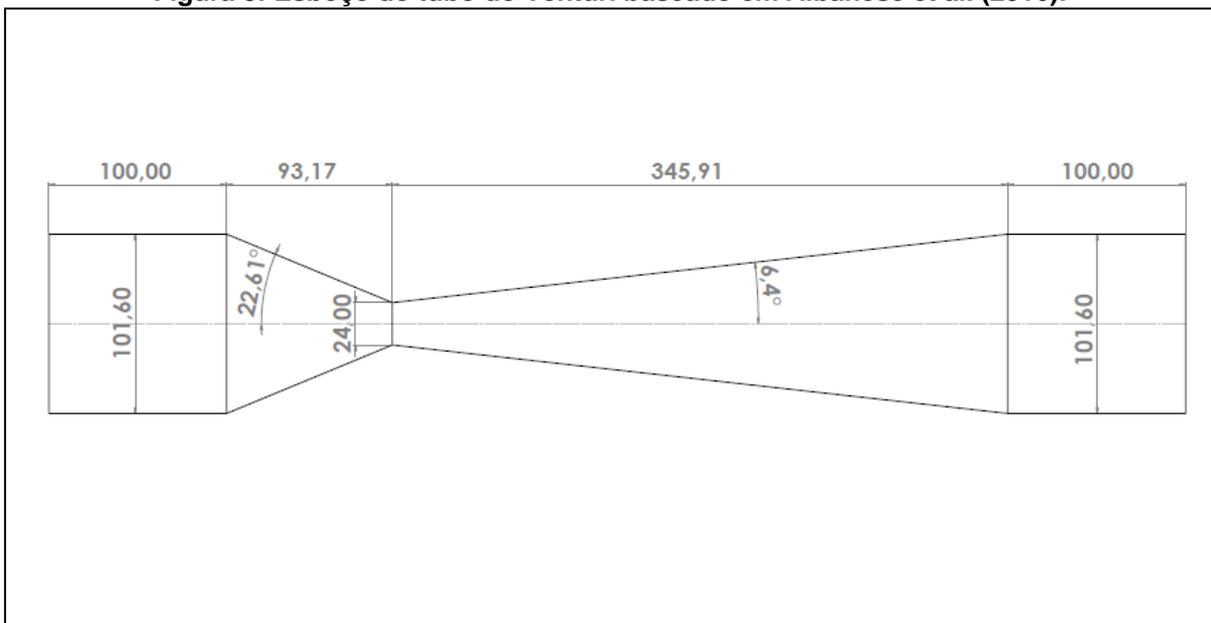
das condições de contorno, resolução e análise dos resultados. Seguindo essas etapas, será descrito a resolução do problema de escoamento em um tubo Venturi (Figura 1, B), nas mesmas condições apresentadas por ALBANESE et al. (2016). Com estes resultados servindo para comparar os métodos analíticos e numéricos com os resultados apresentados pelo artigo.

3.2.2.1 Modelagem do Tubo Venturi

O tubo Venturi foi modelado utilizando o software: Solidworks, seguindo a descrição apresentada no trabalho de Albanese et al. (2015). No entanto, a geometria apresentada na (Figura 1, B), apresenta algumas inconsistências: trata-se da incompatibilidade entre os comprimentos e os ângulos apresentados, que não correspondem com as relações de Pitágoras.

Para este estudo será considerado os ângulos como sendo corretos e os comprimentos ajustados de acordo com cada ângulo, como pode ser observado na Figura 8. Após o modelamento desta peça, o arquivo foi salvo em formato IGES, formato este utilizado pelo software de simulação computacional Ansys, e importado por ele.

Figura 8: Esboço do tubo do Venturi baseado em Albanese et al. (2016).



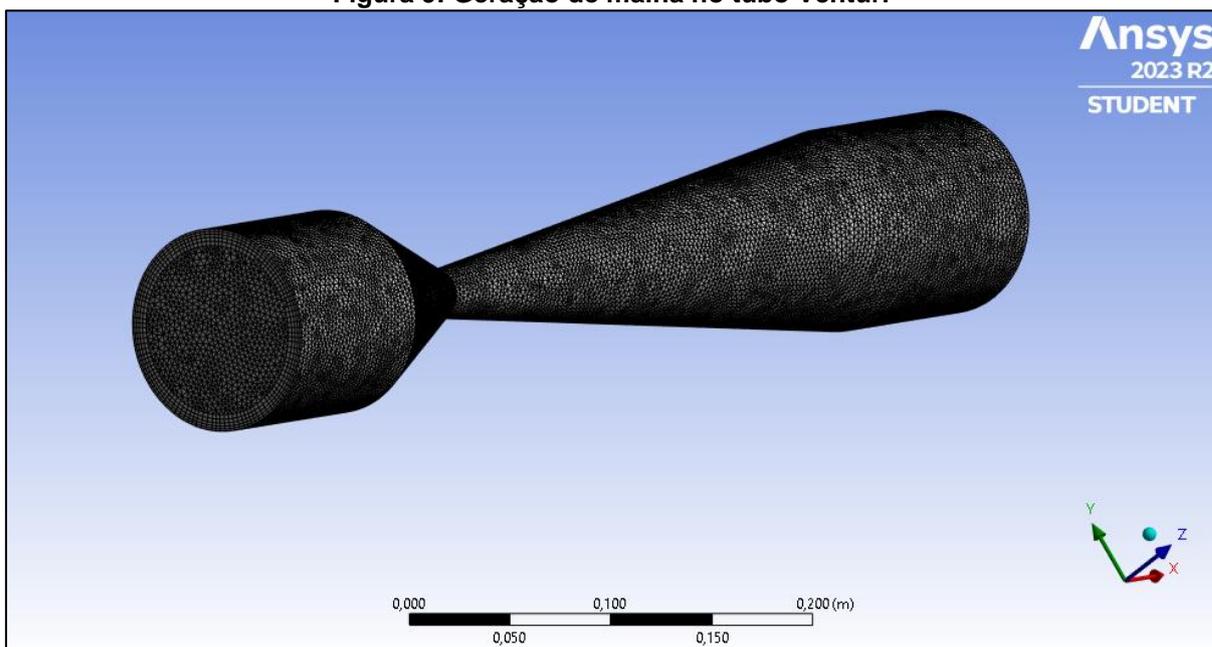
Fonte: Autoria Própria (2023).

3.2.2.2 Geração e Análise de Malha

Para que seja possível calcular numericamente o escoamento, é necessário primeiramente definir uma malha que se adeque a geometria do tubo Venturi com precisão e eficiência. A malha do tipo tetraédrica será utilizada na maior parte do escoamento, pois é a que melhor se adequa as variações de geometria contidas nele. Para minimizar as dificuldades de convergência, cada um dos triângulos que compõem as faces dos tetraedros precisa ser o mais semelhante possível de triângulos equiláteros.

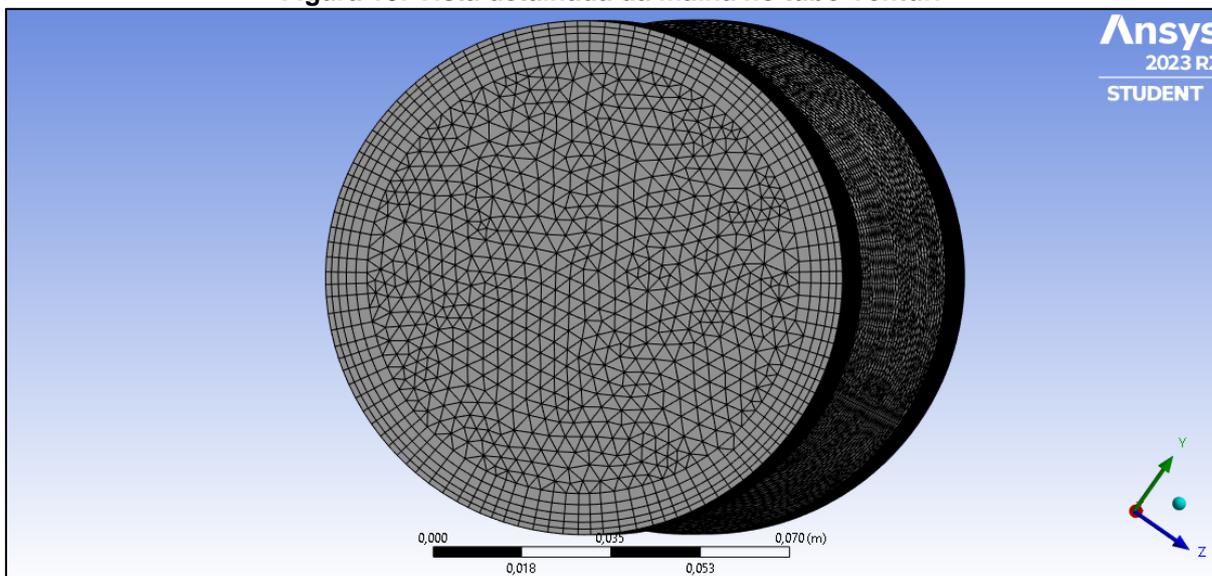
A qualidade da malha desempenha um papel crítico na obtenção de resultados confiáveis. O ANSYS CFX oferece uma variedade de ferramentas e recursos para a geração e análise de malha. Como destacado no "Manual de Geração de Malha ANSYS CFX", a geração de malha começa com a definição da geometria e a escolha do tipo de malha, seja estruturada ou não estruturada. É fundamental ajustar os parâmetros da malha, como densidade, refinamento local e tamanho do elemento, para atender às necessidades específicas do estudo. Além disso, o manual enfatiza a importância da verificação da qualidade da malha por meio de critérios como ortogonalidade e grau de deformação. Garantir uma malha de alta qualidade é um passo crítico para o sucesso da simulação numérica do escoamento no tubo Venturi.

Figura 9: Geração de malha no tubo Venturi



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 10: Vista detalhada da malha no tubo Venturi



Fonte: Autoria Própria (2023).

Como pode ser visto na Figura 10, as regiões próximas a parede do tubo são formadas por cinco camadas de prismas de alturas variáveis. Com o objetivo de captar com mais eficiência os fenômenos associados a camada limite, sendo a taxa de crescimento de 1,2 e taxa de transição de 0,77 (Tabela 4).

Tabela 4: Região próxima a parede do tubo Venturi.

Inflation	
Use Automatic In...	All Faces in Chosen Named ...
Named Selection	wall
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,77
<input type="checkbox"/> Maximum Lay...	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorit...	Pre
View Advanced ...	No

Fonte: Autoria Própria (2023).

Para verificar a qualidade da malha utilizou-se o método de qualidade ortogonal (do inglês, “Orthogonal Quality”) e assimetria (do inglês, “Skewness”). O método de qualidade ortogonal calcula a qualidade de cada um dos elementos avaliando o vetor normal de cada uma de suas faces, atribuindo o valor 1 para a maior qualidade ortogonal e 0 para a menor qualidade ortogonal, (Tabela 7). Já o método de assimetria, mede o quanto deformado cada elemento está, atribuindo 0 para a

menor assimetria e 1 para a maior assimetria possível, (Figura 9) (ANSYS CFX – Solver Theory Guide, 2011).

Tabela 5: Método de qualidade ortogonal (A), método de assimetria (B).

A)		B)	
Quality		Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors and ...	Check Mesh Qua...	Yes, Errors and ...
<input type="checkbox"/> Target Skewn...	Default (0,9)	<input type="checkbox"/> Target Skewn...	Default (0,9)
Smoothing	High	Smoothing	High
Mesh Metric	Orthogonal ...	Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	0,17706	<input type="checkbox"/> Min	3,9252e-004
<input type="checkbox"/> Max	0,99011	<input type="checkbox"/> Max	0,82294
<input type="checkbox"/> Average	0,74892	<input type="checkbox"/> Average	0,2503
<input type="checkbox"/> Standard Dev...	0,14303	<input type="checkbox"/> Standard Dev...	0,1439

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 6: Classificação dos valores de assimetria.

	Excelente	Muito Bom	Bom	Aceitável	Ruim	Inaceitavel
Assimetria	0 – 0,25	0,25 – 0,5	0,5 – 0,8	0,8 – 0,94	0,95 – 0,97	0,98 - 1

Fonte: (KURUDA, 2022)

Tabela 7: Classificação dos valores de qualidade ortogonal.

	Inaceitavel	Ruim	Aceitavel	Bom	Muito Bom	Excelente
Qualidade Ortogonal	0 – 0,001	0,001 – 0,14	0,15 – 0,2	0,2 – 0,69	0,7 – 0,95	0,95 - 1

Fonte: (KURUDA, 2022)

3.2.2.3 Condições de Contorno

As condições de contorno desempenham um papel crucial na definição do comportamento do escoamento, uma vez que governam o comportamento do sistema em suas interfaces e fronteiras. Este segmento é de extrema importância para entender como as simulações foram configuradas e como os resultados foram influenciados por essas condições. Para a resolução deste problema, é necessário primeiramente definir um domínio computacional, em seguida as condições de entrada, “inlet”, e por último as condições de saída, “outlet”.

O domínio computacional compreende a geometria do sistema em estudo, garantindo que as dimensões do domínio abranjam todas as áreas de interesse. Além disso, no domínio é definido o tipo de fluido que será utilizado, bem como quais as equações e comportamentos que a resolução deve se concentrar.

Figura 11: Configurações básicas do domínio.

Domain Type: Fluid Domain

Coordinate Frame: Coord 0

Fluid and Particle Definitions...

Fluid 1

Fluid 1

Option: Material Library

Material: Water

Morphology

Option: Continuous Fluid

Minimum Volume Fraction

Domain Models

Pressure

Reference Pressure: 1 [atm]

Buoyancy Model

Option: Non Buoyant

Domain Motion

Option: Stationary

Mesh Deformation

Option: None

Fonte: Autoria Própria (2023).

O domínio do escoamento foi considerado como sendo água a 25 °C, fluido contínuo, à pressão de referência de 1 atmosfera. Da mesma forma como no experimento de Albanese et al. (2016), consideramos o domínio isotérmico.

Como modelo de turbulência, utilizou-se o modelo k-epsilon, pois este é um dos modelos mais adequados para escoamentos altamente turbulentos. Este modelo é baseado na aproximação de duas equações de transporte, a de dissipação de energia turbulenta (epsilon) e a de energia cinética (k).

Figura 12: Modelo de Fluido.

Heat Transfer		☐
Option	Isothermal	▼
Fluid Temperature	25 [C]	
Turbulence		☐
Option	k-Epsilon	▼ ...
Wall Function	Scalable	▼
<input type="checkbox"/> Advanced Turbulence Control		☒
Combustion		☐
Option	None	▼
Thermal Radiation		☐
Option	None	▼
<input type="checkbox"/> Electromagnetic Model		☒

Fonte: Autoria Própria (2023).

Com o domínio do escoamento claramente delineado, chegou o momento de incorporar as condições de contorno, abrangendo tanto a entrada, com sua respectiva velocidade, quanto a saída, marcada pela pressão correspondente.

Figura 13: Condições de Contorno na Entrada do Tubo Venturi.

Flow Regime		☐
Option	Subsonic	▼
Mass And Momentum		☐
Option	Mass Flow Rate	▼
Mass Flow Rate	18 [kg s ⁻¹]	
Mass Flow Rate Area	As Specified	▼
Flow Direction		☐
Option	Normal to Boundary Condition	▼
Turbulence		☐
Option	Medium (Intensity = 5%)	▼

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 14: Condições de Contorno na saída do Tubo Venturi.

Flow Regime		⊞
Option	Subsonic	▼
Mass And Momentum		⊞
Option	Average Static Pressure	▼
Relative Pressure	1 [atm]	
Pres. Profile Blend	0.05	
Pressure Averaging		⊞
Option	Average Over Whole Outlet	▼

Fonte: Autoria Própria (2023).

Com as condições de contorno definidas, executou-se a resolução do escoamento. Foram feitas ao todo 47 iterações e a resolução levou aproximadamente 12 minutos.

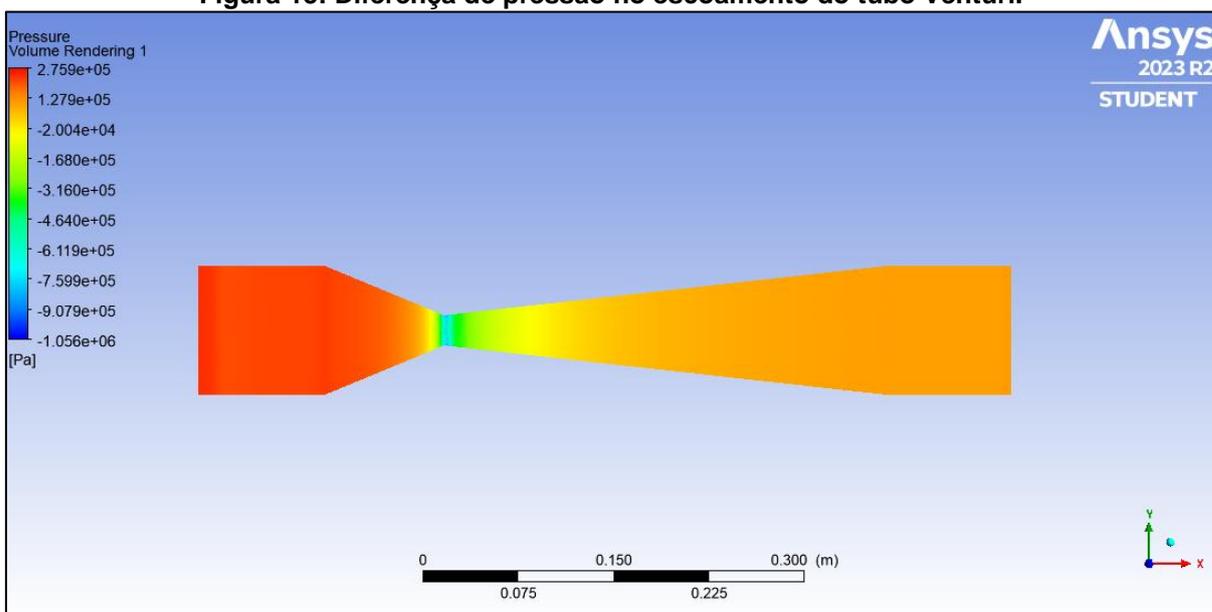
3.2.2.4 Análise de solução

Após a execução da simulação, os resultados foram processados graficamente pelo próprio Ansys. Extraiu-se do pós-processamento a variação de pressão e da velocidade do escoamento.

Em particular, ao examinar a queda de pressão ao longo do tubo Venturi Figura 15, observamos a mudança de geometria e como ela afeta o escoamento, fazendo com que a velocidade do fluido aumente significativamente, na região de estrangulamento, Figura 18.

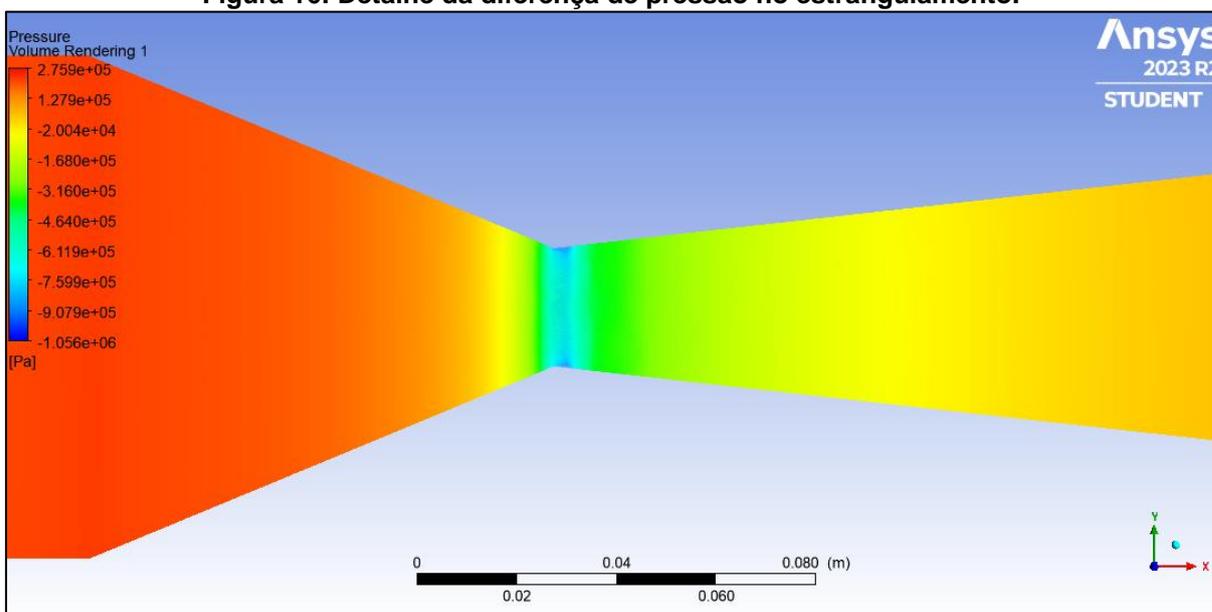
Na região de baixa pressão, região em azul escuro da Figura 16, temos a formação de uma zona de alta velocidade, característica do efeito Venturi. Essa queda de pressão acentuada e posterior recuperação, alguns centímetros a frente, indica a alta possibilidade para a formação de cavitação, mostrando que a simulação está bastante coerente com as expectativas teóricas.

Figura 15: Diferença de pressão no escoamento do tubo Venturi.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 16: Detalhe da diferença de pressão no estrangulamento.

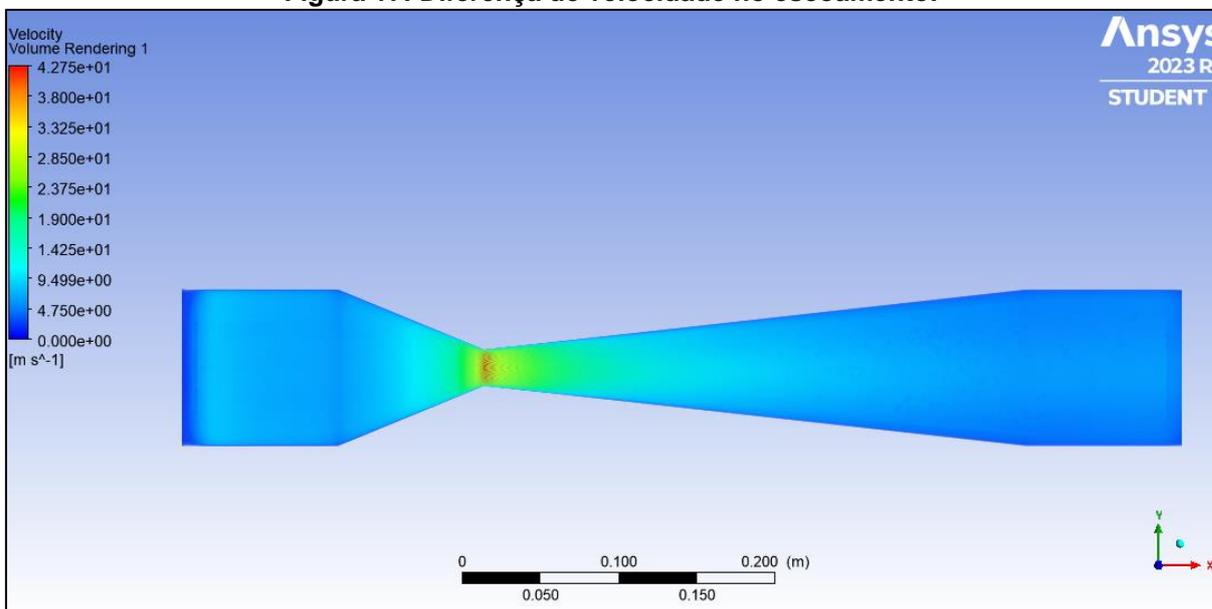


Fonte: Autoria Própria (2023).

Ao explorar o perfil de velocidade na camada limite, outro aspecto significativo da análise de solução, nota-se características distintas que contribuiram para uma compreensão mais refinada do comportamento do fluido. O gráfico revelou a presença de uma camada limite bem definida, destacando a transição gradual da velocidade próxima à parede até a velocidade do escoamento principal, isso pode ser visto com mais detalhes na Figura 18.

Essa análise detalhada permitiu uma apreciação mais precisa da distribuição de velocidade ao longo da superfície interna do tubo, proporcionando informações valiosas sobre a eficiência do transporte de massa e energia no sistema.

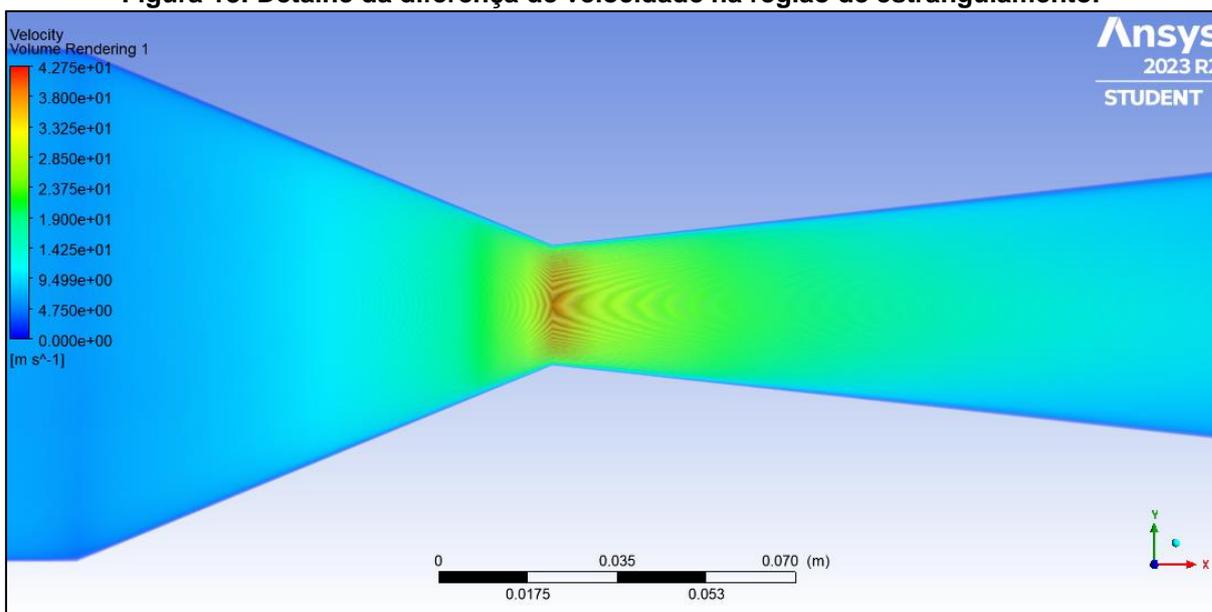
Figura 17: Diferença de velocidade no escoamento.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Essa análise detalhada permitiu uma visualização mais precisa da distribuição de velocidade ao longo da superfície interna do tubo, proporcionando informações valiosas sobre a eficiência do transporte de massa e energia no sistema.

Figura 18: Detalhe da diferença de velocidade na região de estrangulamento.



Fonte: Autoria Própria (2023).

4 CONCLUSÃO

Ao longo desta pesquisa, investigamos a diferença de pressão em um tubo Venturi, utilizando o método analítico e numérico (CFD). Os resultados obtidos por meio dessas abordagens revelaram *insights* significativos sobre o comportamento do escoamento nesse sistema.

Comparando diretamente os dados, de velocidade máxima e diferença de pressão, pode-se notar o quão próximo estes valores ficaram um dos outros (Tabela 5). A velocidade máxima (região de estrangulamento), variou apenas 6,88%, entre os dois métodos. A diferença de pressão, por sua vez, variou apenas 0,35%.

Tabela 8: Dados obtidos analiticamente e numericamente.

Método	Analítico	Numérico (CFD)
$V_{máxima}$	40,00 m/s	42,75 m/s
$P_1 - P_2$	274925,01 Pa	275900,00 Pa

Fonte: Autoria Própria (2023).

Os resultados revelaram uma concordância notável entre as diferenças de pressão calculadas analiticamente e as obtidas por meio das simulações no Ansys CFX. No entanto, ao compararmos os gráficos de velocidade, observamos discrepâncias que merecem atenção. Estas discrepâncias, embora pequenas, proporcionam valiosas lições sobre as limitações e complexidades do modelo analítico em relação ao método numérico computacional. Essas divergências podem ser atribuídas a simplificações feitas no decorrer do cálculo. Porém, os resultados reais, que serviriam como melhor critério de comparação, são possíveis de se encontrar apenas experimentalmente, ressaltando a importância da validação experimental, sempre que possível, em estudos de dinâmica de fluidos.

Este estudo contribui significativamente para o entendimento do comportamento do escoamento em tubos Venturi, fornecendo dados valiosos, que agora servem de ponto de partida para eventuais experimentos. Haja visto que os dados de experimento não foram disponibilizados por Albanese et al. (2016).

Entre o método analítico e numérico, as conclusões extraídas destacam a aplicabilidade e confiabilidade dessas abordagens em determinados contextos. Além disso, as discrepâncias identificadas oferecem oportunidades para refinamento futuro

dos modelos numéricos, lembrando, é claro, que a análise só será completa quando os dados experimentais forem obtidos.

Este trabalho sinaliza a importância da integração de múltiplas abordagens para uma compreensão abrangente de fenômenos complexos em dinâmica de fluidos, como a cavitação em tubo Venturi, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e experimentos práticos.

REFERÊNCIAS

- ALBANESE, Lorenzo; CIRIMINNA, Rosaria; MENEGUZZO, Francesco; PAGLIARO, Mario. Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: Theory and real-scale experiments. *Chemical Engineering Journal*, v. 142, p. 1457-1470, 2016.
- ALBANESE, Lorenzo; CIRIMINNA, Rosaria; MENEGUZZO, Francesco; PAGLIARO, Mario. Energy efficient inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* via controlled hydrodynamic cavitation. *Food and Bioproducts Processing*, v. 3, p. 221-238, fevereiro de 2015.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. *Mecânica dos Fluidos*. 3. Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.
- FOLEY, James D. et al. *Computer Graphics Principles and Practice*. 3rd edition. Reading, MA: Addison-Wesley, 2014.
- FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. *Mechanics of Fluids*. 8th edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- GJENGEDAL, Sondre. Convective Acceleration in Porous Media: An Analogy to Pipe Flow Equations. *Transport in Porous Media*, v. 142, 2022.
- GOGATE, M.G; PANDIT, A. B. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 12, n. 4, p. 21-27, 2005.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2852: Stainless steel clamp pipe couplings for the food industry. Geneva, Switzerland, 1993.
- KUNZE, Wolfgang. *Technology Brewing and Malting*. 4th ed. Berlin: VLB Berlin, 2004.
- KURODA, Rodrigo Kenji Rodrigues. *Análise fluidodinâmica computacional de winglets*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2022.
- LENTECH. Lowara ESHE 50-160/75 P25VSSA - Centrifugal End Suction Pump. Lenntech. Disponível em: <https://www.lenntech.com/products/Lowara-ESHE/101860450/50-160/75/P25VSSA---Centrifugal-end-suction-pump/index.html>. Acesso em: 12 de novembro de 2023.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H.; HUBSCH, W. W. *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*. 6. Ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2009.
- VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. *Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd edition. Harlow: Person Education Limited, 2007.