

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
MARCELO PAIVA ROTTA

**VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS DIFUSORES EM TUBULAÇÕES
CURVILÍNEAS**

CASCADEL – PR
2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
MARCELO PAIVA ROTTA

**VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS DIFUSORES EM TUBULAÇÕES
CURVILÍNEAS**

Trabalho apresentado à disciplina TCC – Projeto como requisito parcial para obtenção da aprovação semestral no Curso de Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário Assis Gurgacz.

Professor Orientador: Eng. Mec. Me. Eliseu Avelino Zanella Junior

CASCADEL – PR

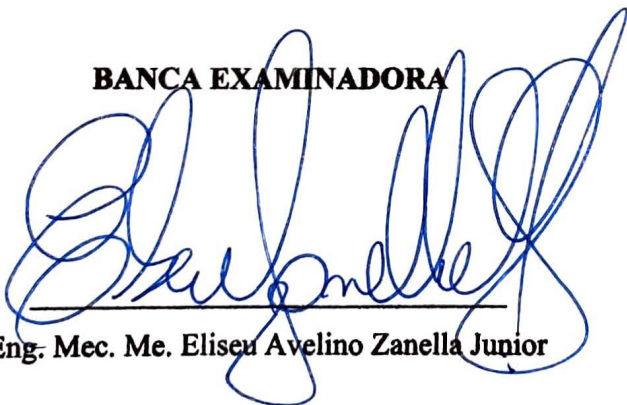
2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
MARCELO PAIVA ROTTA

VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS DIFUSORES EM TUBULAÇÕES
CURVILÍNEAS

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial para obtenção de aprovação semestral no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Assis Gurgacz

BANCA EXAMINADORA



Eng. Mec. Me. Eliseu Avelino Zanella Junior



Eng. Mec. Esp. Rogério Luiz Ludegero



Eng. Mec. Me. Sergio Henrique Rodrigues Mota

Cascavel, 26 de novembro de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os meus familiares e amigos,
que sempre torceram por mim e me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que iluminou meu caminho durante todos esses anos, me concedendo sabedoria e entendimento para superar obstáculos e nunca desistir.

Aos meus pais Jovenildo e Luzia bem como meu irmão Maylon, os quais sempre me incentivaram e acreditaram em mim, além de sempre me ajudarem nos momentos mais difíceis, sempre me dando apoio.

Ao meu orientador Eng. Mec. Me. Eliseu Avelino Zanella Junior pela orientação e também pelo apoio.

E também meus agradecimentos são para o professor Helder pela ajuda com os processos de impressão 3D e ao professor Sérgio pelos conselhos.

RESUMO

O transporte de fluidos em tubulações está sempre presente em nosso dia-a-dia, e se faz indispensável no setor industrial, seja para transporte de líquidos ou gases. Com o decorrer dos anos após estudos percebeu-se o fenômeno de perda de carga no escoamento dos fluidos, parte desta é relacionada com o material da tubulação e outra pela existência de curvas e conexões, onde é ainda mais acentuada. Nesse trabalho se realizou o dimensionamento de difusores (dispositivos que alteram o fluxo do fluido), construção da bancada e também o desenvolvimento dos protótipos das curvas por meio de impressão 3D onde foram colocados na bancada para testes, os difusores ficam no interior das curvas e promovem a diminuição de escoamentos secundários, que podem ser observados com a realização de testes. O objetivo foi o de realizar o estudo para desenvolver dispositivo que reduza a perda de carga nos protótipos desenvolvidos, e que poderão ser utilizadas também para sistemas industriais. Efetuou-se pesquisas bibliográficas referentes ao fluxo de fluidos em tubulações, perda de carga, influência das curvas na perda de carga, estabelecendo parâmetros para o dimensionamento dos difusores nas curvas. Todas as curvas foram instaladas em uma bancada construída para realização dos testes, de modo a verificar a influência dos difusores na perda de carga do sistema. Espera-se que ocorra a diminuição da perda de carga nas curvas com os difusores, e consequentemente a diminuição do consumo de energia.

Palavras-chave: Perda de carga. Difusores. Curvas.

ABSTRACT

Fluid transport in pipelines is always present in our daily lives, and becomes indispensable in the industrial sector, whether in the transport of gases or gases, over the years after perceived studies or in the history of pressure drop in the fluid flow, part of which is useful with piping material and another for the presence of bends and connections where it is even more pronounced. In this work, the design of the diffusers (devices that change the flow of fluid), the construction of the bench and also the development of the prototypes of curves for 3D printing in the medium where are used in the test bench, the diffusers that are used. are hidden inside and promote the reduction of secondary runoff, which can be observed by testing. The objective is to carry out a study to develop a device that reduces the pressure drop in the prototypes created and that can also be used for industrial systems. To perform bibliographic research related to fluid flow in pipes, pressure drop, influence of changes in pressure drop, determination of parameters for sizing diffusers in the curves. All curves were installed on a bench built for testing to verify the influence of the diffusers on the system's pressure drop. It is expected that the pressure drop occurs in curves with diffusers, and consequently the reduction of energy consumption.

Keywords: Loss of charge. Diffusers. Curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Campo de aplicação de ventiladores e compressores	19
Figura 02: Escoamentos em canal aberto	20
Figura 03: Escoamentos em tubo	21
Figura 04: Exemplificação dos escoamentos.....	29
Figura 05: Comportamento do escoamento de ar em um cotovelo	29
Figura 06: Manômetro de Bourdonl	31
Figura 07: Esquema de funcionamento do manômetro de Bourdon	32
Figura 08: Esquema em corte de uma válvula reguladora de pressão.....	33
Figura 09: Impressão de curva com difusores	38
Figura 10: Cotovelo de 90°	38
Figura 11: Cotovelo de 45°	39
Figura 12: Curva de 90°	39
Figura 13: Exemplificação das dimensões utilizadas	40
Figura 14: Válvula reguladora de pressão	41
Figura 15: Tubulação de PVC	42
Figura 16: Estrutura para a bancada	43
Figura 17: Sistema de tubulação.....	44
Figura 18: Sistema de acoplamento.....	44
Figura 19: Curva de 90° em corte com os difusores.....	45
Figura 20: Bancada de teste.....	46
Figura 21: Engate rápido	46
Figura 22: Esquema da bancada	47
Figura 23: Simulação no joelho de 90°	49
Figura 24: Simulação na curva de 90°	50
Figura 25: Simulação no joelho de 45°	51
Figura 26: Simulação no joelho de 90° com difusores	52
Figura 27: Simulação na curva de 90° com difusores.....	53
Figura 28: Simulação no joelho de 45° com difusores	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Rugosidade para alguns materiais	27
Tabela 02: Lista de materiais.....	37
Tabela 03: Parâmetros da simulação	48

LISTA DE EQUAÇÃO

Equação 1 – Número de Mach	22
Equação 2 – Comprimento total de uma rede.....	25
Equação 3 – Número de Reynolds	25
Equação 4 – Perda de carga linear unitária.....	26
Equação 5 – Coeficiente de fricção	26
Equação 6 – Perda de carga em um trecho	27
Equação 7 – Perda de carga em singularidades	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

PVC - Policloreto de vinila

STL - Standard Triangle Language

GCODE - Código G (linguagem de programação)

Ma - Número de Mach

V - Velocidade do escoamento [m/s]

c - Velocidade do som [m/s]

L_t - Comprimento total da rede [m]

L_1 - Comprimento retilíneo da rede [m]

L_2 - Comprimento equivalente [m]

Re - Número de Reynolds

V_{med} - Velocidade média do escoamento [m/s]

D - Diâmetro do tubo [m]

ν - Viscosidade cinemática do fluido [m²/s]

J - Perda de carga linear unitária [mca/m]

f - Coeficiente relacionado ao material da tubulação

g - Aceleração da gravidade [m/s²]

hf - Perda de carga em um trecho [mca]

L - Comprimento do trecho [m]

hl - Perda de carga em singularidade (mca)

KL - Coeficiente de perda referente a geometria do componente

FDM - Modelagem por fusão e deposição (fused deposition modeling)

PLA - Ácido polilático

CAD - Computer aided design (Desenho assistido por computador)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 MÁQUINAS DE FLUIDOS	18
2.1.1 Compressor alternativo.....	18
2.2 TRANSPORTE DE FLUIDOS	19
2.2.1 Condutos livres.....	20
2.2.2 Condutos forçados	20
2.2.3 Escoamento viscoso e não viscoso	21
2.2.4 Escoamento interno e externo.....	22
2.2.5 Escoamento compressível e incompressível.....	22
2.2.6 Escoamento laminar e turbulento	23
2.3 TUBULAÇÕES.....	23
2.4 PERDA DE CARGA.....	24
2.4.1 Determinação do regime de escoamento	25
2.4.2 Perda de carga linear	26
2.4.3 Perda de carga em singularidades.....	28
2.4.3.1 Pás direcionadoras	28
2.5 IMPRESSÃO 3D.....	30
2.6 PLACA ARDUINO.....	30
2.7 CÉLULAS DE CARGA.....	30
2.8 MANÔMETRO DE BOURDON	31
2.9 VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO	32
2.10 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	33

3 METODOLOGIA.....	35
3.1 PESQUISA DE COMPONENTES PARA BANCADA.....	36
3.2 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DOS DIFUSORES	37
3.3 EQUIPAMENTOS E CONSTRUÇÃO DA BANCADA.....	41
3.4 REALIZAÇÃO DE TESTES	46
3.5 ANALISAR OS RESULTADOS	47
3.6 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS	60

1 INTRODUÇÃO

O transporte de fluidos em tubulações está sempre presente em nosso dia-a-dia, e se faz indispensável no setor industrial, seja para transporte de fluidos líquidos, sólidos ou gasosos.

O assunto tratado no presente trabalho é sobre fluidodinâmica, comportamento do escoamento de ar em uma bancada de teste que possui curvas dispostas de pás direcionais.

No transporte de fluidos em tubulações curvilíneas ocorrem o fenômeno de perda de carga, com isso a delimitação do tema está relacionada em como construir difusores para curvas de tubulação de transporte de ar, visando um melhor aproveitamento energético no sistema.

De acordo com Godoi (2011), o termo eficiência energética está relacionado com a racionalização do consumo de energia, tendo medidas vinculadas a ações comportamentais, econômicas ou tecnológicas, que ao serem empregadas resultem na diminuição do consumo de energia mantendo os mesmos requisitos qualitativos e quantitativos pelo qual foram determinados.

Com o desenvolvimento dos difusores, estima-se que ocorrerá a diminuição da perda de carga no sistema devido a um melhor escoamento do ar nas curvas, e conseqüentemente uma possível diminuição do consumo de energia, de modo a ser verificado por meio da realização de testes. Os difusores conforme as definições de Godoi (2011), se enquadram nas medidas tecnológicas, e deverão passar por testes para verificar sua viabilidade devido a fração de perda de carga diminuída relacionada ao seu processo e custo de fabricação.

A diminuição do consumo de energia é essencial, então o objetivo deste trabalho está em construir um difusor para curvas de tubulação de transporte de ar, visando um melhor aproveitamento energético no sistema, com realização de pesquisa, projeto e instalação dos difusores nas curvas e para um futuro próximo o desenvolvimento de testes, análise de eficiência e a verificação dos resultados obtidos.

Um melhor escoamento de ar gera uma menor perda de carga e conseqüentemente menor consumo de energia, visto que o aumento da demanda energética cresce cada vez mais, o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes é indispensável, sendo os difusores uma opção de redução de perda de energia em tubulações curvilíneas.

Para realização deste trabalho utilizou-se de pesquisa bibliográfica com parte experimental devido ao projeto dos difusores para cada curva e também a construção da bancada para realização dos testes.

O trabalho é fracionado em revisão bibliográfica onde fornece o embasamento para a metodologia, sendo seguidos os objetivos específicos aponta-se os resultados esperados e com

a avaliação dos sistemas a conclusão. Estão evidenciados quais são os objetivos que vão direcionar o trabalho, também a justificativa da pesquisa, a caracterização do problema e a delimitação da pesquisa, na revisão bibliográfica é apresentado as máquinas de fluidos e sua classificação conforme a transformação de energia, na sequência tem-se a classificação do escoamento dos fluidos, apresenta alguns tipos de tubulações conforme a sua secção transversal. Na sequência apresenta-se o conceito de perda de carga, além da influência do regime de escoamento na perda de energia. A metodologia se inicia com a realização de pesquisa bibliográfica, coleta de informações dos equipamentos utilizados na bancada, construção dos difusores e da bancada, método de realização de testes comparativos nas curvas com e sem os difusores e o modo de verificação dos resultados.

O presente trabalho utilizou uma fração da grande gama das aplicações da mecânica dos fluidos, sendo que foram realizados o dimensionamento de difusores (dispositivos que direcionam o fluxo do fluido) e também a produção dos protótipos por uma impressora 3D, estes foram colocados em uma bancada para posteriormente efetuar-se os testes para observar o comportamento dos sistemas com relação a perda de carga.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Construir difusores para curvas de tubulação de transporte de ar, visando um melhor aproveitamento energético do sistema.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar componentes para bancada;
- Construir a bancada;
- Projetar os difusores para as curvas;
- Realização de testes em laboratório;
- Analisar os resultados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica pela necessidade de se reduzir o consumo de energia, tendo em vista que a demanda energética aumenta cada vez mais, porém os recursos para a transformação de energia podem não suprir essa demanda além de estarem se esgotando. Muito se fala em economia de energia, sempre visando a diminuição de custos e como disse o químico Lavoisier “nada se cria tudo se transforma”. Então, seguindo essa ideia, a energia utilizada em nossas casas, empresas, enfim no mundo inteiro passou por várias transformações, o que com isso ocasionou uma fração de perda a cada transformação. A perda de energia está presente em diversos sistemas sendo impossível aproveitá-la totalmente, um exemplo é o transporte de fluidos em condutos forçados, este está presente em vários mecanismos seja em equipamentos de refrigeração, transportes de grãos, o próprio transporte de água até nossas residências, em sistemas pneumáticos entre outros. E é justamente nesse intuito que existe a necessidade de aproveitar o máximo da energia, sempre realizando projetos de equipamentos mais eficientes. Com isso o desenvolvimento de um difusor para linhas de transporte de fluidos é uma boa opção no que se diz respeito a tentativa de redução no consumo de energia em curvas.

O desenvolvimento dessa pesquisa é muito importante para o meio industrial por proporcionar uma busca pela redução do consumo de energia, uma vez que empresas que utilizam sistemas de transporte de fluidos principalmente as que utilizam altas vazões e possuem grandes linhas consequentemente tem um grande gasto de energia nesses sistemas. As aplicações desta pesquisa são válidas para várias aplicações como no próprio transporte de ar, oxigênio, gás GLP, fluidos refrigerantes, vapor superaquecido, utilização no sistema de escapamentos de motores a combustão, etc.

A EPE (empresa de pesquisa energética), realizou a projeção de consumo de energia elétrica na rede para o Brasil, onde resultou na estimativa de aumento no consumo de energia elétrica. Sendo assim, prova-se que o Brasil deverá se deter de meios que possam contribuir para atender esta demanda, seja no desenvolvimento de novas alternativas de geração e/ou realização de medidas a fim de aumentar a eficiência energética dos sistemas atuais.

Tendo em vista aspectos observados com esta projeção, o desenvolvimento dos difusores (pás direcionadoras) está relacionado a ser uma alternativa para aumentar a eficiência energética de um sistema de transporte de fluidos. Uma vez que se reduz a resistência ao escoamento de um fluido sendo esta resistência a perda de carga do sistema de transporte, pode-se utilizar uma máquina de menor potência por exemplo, já que a perda de carga foi diminuída.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Como construir um difusor para curvas de tubulação de transporte de ar, visando um melhor aproveitamento energético no sistema?

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Transporte de fluidos em tubulações, a influência de um difusor para a redução da perda de carga em curvas para deslocamento de ar, estudo bibliográfico com o desenvolvimento experimental através da construção de uma bancada montada no laboratório do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÁQUINAS DE FLUIDOS

De acordo com Antônio (2006), um equipamento que realiza a transformação de energia de fluido em energia mecânica ou energia mecânica em energia de fluido é considerado máquina de fluido. Ainda determina que estes equipamentos podem ser considerados como máquinas de fluidos motora quando a energia do fluido gera energia mecânica ou máquinas de fluidos geradora quando a energia mecânica é fornecida ao fluido.

Antônio (2006), salienta que desde muito tempo até mesmo 3000 a.C. já se utilizavam máquinas de fluidos, mas somente tiveram um grande desenvolvimento a partir do século XIX com o surgimento de novos materiais, desenvolvimento do conhecimento em termodinâmica e aerodinâmica e também com a disposição de recursos computacionais, o conhecimento e o uso adequado economicamente destes equipamentos foram e são fundamentais para o desenvolvimento da humanidade.

Por sua vez Fox (2014), classifica amplamente as máquinas de fluxo como sendo de deslocamento positivo ou máquinas dinâmicas. Esta classificação se dá pelo modo em que se realiza a transferência de energia, considerando que as máquinas de deslocamento positivo realizam o confinamento do fluido para ligeiramente movimentá-lo, podendo ser mencionado como exemplo os compressores a pistão. Diferentemente máquinas dinâmicas não realizam nem um tipo de confinamento de fluido, tendo qualquer interação de trabalho causada por efeitos dinâmicos de um rotor fixo ao elemento rotativo.

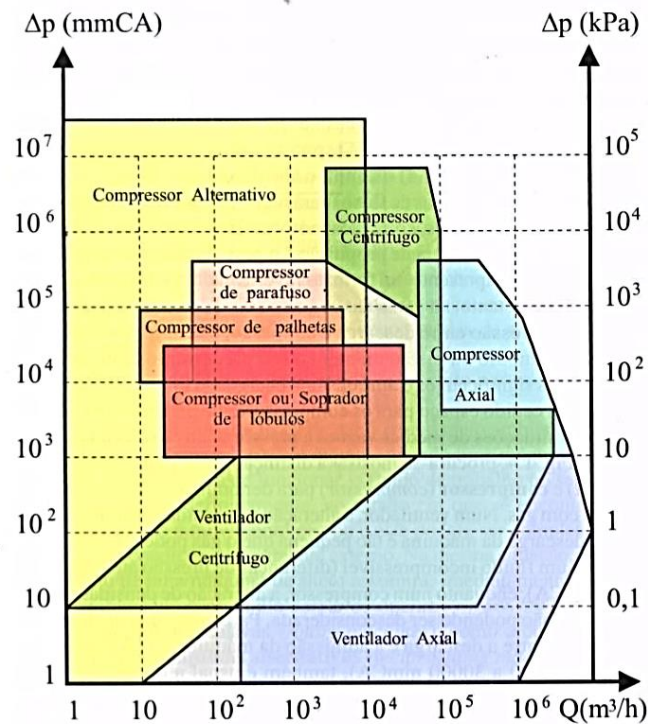
Çengel (2012), retrata a importância do conhecimento em mecânica dos fluidos, que por sua vez são usados desde atividades domésticas até grandes projetos como as aeronaves supersônicas. Além destas os processos que relacionam a mecânica dos fluidos no nosso corpo são funções vitais, a exemplo do coração que bombeia constantemente sangue para todas as partes do corpo e os pulmões que realizam a movimentação alternada do ar.

2.1.1 Compressor alternativo

Conforme FOX (2014), compressores são máquinas que realizam trabalhos sobre o fluido, ou seja, o fluido recebe energia do sistema, os compressores admitem somente gás ou vapor. Os compressores alternativos são considerados como máquinas de fluxo por realizar o confinamento do fluido entre o pistão e o cilindro, estes admitem fluidos compressíveis.

Antonio (2006), apresenta em um gráfico a gama de utilização dos compressores, nota-se que os compressores alternativos possuem alta capacidade de suportar pressão, porém possuem vazões relativamente baixas.

Figura 01: Campo de aplicação de ventiladores e compressores



(Fonte: Antônio, 2006)

Equipamentos que suportam alta vazão, possuem capacidade reduzida para suportar pressão, isso pode ser analisado na figura 01, o inverso também acontece. Em equipamentos que suportam altas pressões no caso dos compressores alternativos estes possuem uma menor vazão de trabalho.

2.2 TRANSPORTE DE FLUIDOS

De acordo com Çengel (2012), um dos grandes problemas de engenharia que os seres humanos enfrentaram foi o suprimento de água, seja para uso doméstico ou para irrigação, esses fatos ocorreram quando as cidades se desenvolviam tempos atrás. O ambiente urbano da época necessitava de grandes vazões de água todo dia, isso é fato, então através da arqueologia descobriu-se que os romanos a muito tempo já realizavam o transporte de fluidos, no caso deles

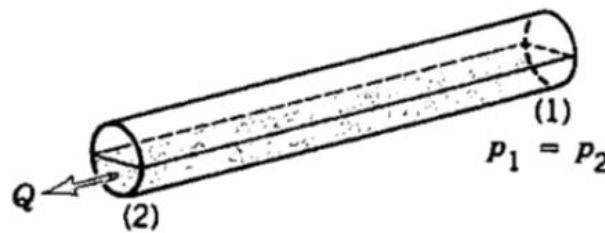
transportavam água em tubulações de chumbo e argila pressurizadas com comprimentos de até 45 km.

2.2.1 Condutos livres

Fox (2014), exemplifica este escoamento como sendo aquele em que a superfície livre está com a mesma pressão atmosférica, como exemplo os aquedutos, rios e também os canais de irrigação além de escoamentos em galerias ou calhas. Sendo que a força que promove o movimento deste escoamento é a gravidade.

Todavia Fox (2014), também relaciona a este escoamento como sendo raramente laminar devido ao alto número de Reynolds decorrente da grande escala física em que ocorrem estes escoamentos.

Figura 02: Escoamentos em canal aberto



(Fonte: Munson adaptado, 2004)

Na figura 02 pode-se notar a exemplificação de um escoamento que é considerado livre, neste exemplo a pressão do ponto (1) é constante durante o movimento do fluido até outro ponto determinado (2).

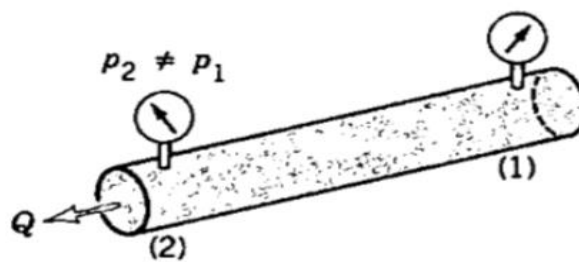
2.2.2 Condutos forçados

Para Çengel (2012), o escoamento em condutos forçados pode ocorrer de forma laminar ou turbulenta, sendo relacionadas com as condições de escoamento. Se existem baixas velocidades o escoamento pode ser considerado laminar, quando essa velocidade aumenta atingindo o ponto crítico o escoamento passa a ser turbulento, sendo que essa mudança não ocorre repentinamente. A grande maioria dos escoamentos se dão na forma turbulenta sendo

que os escoamentos laminares estão mais relacionados a fluidos altamente viscosos ou em transportes de fluidos por tubulações de pequeno diâmetro.

Por sua vez Fox (2014), determina que a turbulência é indesejável na maioria das vezes por causar maior resistência ao escoamento do fluido, mas salienta a sua importância no escoamento sanguíneo por exemplo em que o movimento turbulento permite o contato de todas as células do sangue para realização da troca de oxigênio e nutrientes, assim demonstra algumas das aplicações de cada tipo de escoamento.

Figura 03: Escoamentos em tubo



(Fonte: Munson adaptado, 2004)

Na figura 03 pode-se notar a exemplificação de um escoamento em condutos forçados, nos quais a pressão no ponto (1) e no ponto (2) são diferentes, nota-se também que o fluido preenche toda a seção circular, neste caso as pressões internas relacionadas a estes escoamentos são diferentes da pressão atmosférica.

2.2.3 Escoamento viscoso e não viscoso

Çengel (2012), explica que em um escoamento em que duas camadas de fluidos se movem uma em relação a outra ocorre o desenvolvimento de uma força de atrito entre ambas, fazendo com que a camada mais lenta tente frear a mais rápida. Tal resistência ao escoamento está relacionada com a viscosidade do fluido, sendo a medida de aderência interna do fluido.

Na visão de Çengel (2012), nenhum fluido possui viscosidade zero, porém ressalta que em alguns casos o efeito de atrito destes são insignificantes e desprezíveis facilitando a análise sendo determinados como escoamentos não viscosos, de outro modo onde o atrito é significativo este é chamado de escoamento viscoso.

2.2.4 Escoamento interno e externo

O escoamento interno e externo por Çengel (2012), pode ser definido com relação ao modo em que o fluido é forçado a escoar, sendo sobre uma superfície ou confinado em um canal. Para escoamento em superfícies de tubos e placas é definido como escoamento externo, já para escoamentos em dutos e tubos estes são considerados escoamentos internos.

2.2.5 Escoamento compressível e incompressível

Conforme Çengel (2012), este tipo de escoamento é classificado conforme a quantidade de variação da densidade do fluido ao longo do escoamento. Em escoamentos em que a densidade permanece quase constante ao longo do percurso este é considerado incompressível. Isso ocorre basicamente em líquidos, por isso geralmente os líquidos são determinados como fluidos incompressíveis. Já os gases de forma inversa são altamente compressíveis, sendo que uma pequena variação de pressão sua densidade muda drasticamente. Porém os gases podem ser considerados incompressíveis se sua densidade tiver uma variação menor que 5%, isso ocorre quando o número de Mach for inferior a 0,3.

$$M_a = \frac{V}{c} \quad (1)$$

onde:

M_a : número de Mach;

V : velocidade do escoamento (m/s);

c : velocidade do som (m/s).

Considerando a Equação (1), se a velocidade do som no nível do mar e temperatura ambiente para o ar for de 346 m/s para que o escoamento seja considerado incompressível a velocidade do ar não pode ser superior a cerca de 100 m/s.

2.2.6 Escoamento laminar e turbulento

No dizer de Fox (2014), o escoamento laminar é determinado como sendo aquele em que as partículas fluidas se movem em camadas lisas. Da mesma forma Çengel (2012), explica que o movimento de fluido ordenado caracterizado por camadas lisas é chamado de laminar. Sendo este escoamento característico a fluidos de alta viscosidade com baixa velocidade.

É descrito por Fox (2014), que o escoamento turbulento é aquele no qual as partículas fluídas se misturam rapidamente enquanto são movimentadas. Igualmente Çengel (2012) define que o movimento altamente desordenado dos fluidos com flutuações de velocidades, sendo estas normalmente altas é chamado de escoamento turbulento.

A propósito Munson (2004), afirma que os escoamentos turbulentos são complexos o bastante para não existir uma teoria que defina completamente este tipo de escoamento, sendo analisado principalmente por meios experimentais. Se tratando de água como fluido e fazendo uma analogia a isso que Munson (2004) se referiu tem-se a frase de Leonardo da Vinci “se tens que lidar com água, consulta primeiro a experiência, depois a razão”.

2.3 TUBULAÇÕES

Para Munson (2004), habitualmente é definido que condutos fechados de secção transversal circular são chamados de tubos já para secções não circulares de dutos. Sendo que na maioria dos casos se utilizam tubos, a exemplo do oleoduto que realiza o transporte de óleo cru através do Alasca por quase 1290 quilômetros, ele ainda compara o nosso sistema natural de transporte de sangue e ar como sistemas de “tubos” complexos, porém os princípios de mecânicas dos fluidos para estes sistemas são os mesmos.

Do mesmo modo Cengel (2012), em sua definição classifica os trechos de tubulações como tubo e duto, se referindo a trechos com secção transversal circular como tubos principalmente quando o fluido for líquido e dutos para trechos de secções não circulares principalmente quando transporta fluido em forma de gás.

Segundo Cengel (2012), tubos que possuem secção não circular suportam um menor diferencial de pressões entre a interna e externa, por este motivo a grande maioria dos fluidos são transportados em tubos circulares, este motivo também está relacionado com a menor perda de carga presente nestas tubulações.

Munson (2004), descreve alguns componentes básicos em tubulações sendo eles, os próprios tubos, as válvulas de controle de vazão, conexões para os tubos, as bombas, turbinas ou compressores que vão adicionam ou retirar energia do fluido.

Ainda segundo Munson (2004), explica que em condições teóricas um sistema de tubos é muito complexo de se descrever, pois, os efeitos de “mundo real” dificultam ou impossibilitam resultados concretos, sendo que uma combinação entre dados experimentais e considerações teóricas mais a análise dimensional fornecem resultados desejáveis.

Pela complexidade dos escoamentos em regime turbulento Munson (2004) afirma que não se tem uma teoria que defina completamente este escoamento, portanto os componentes de linhas de transporte de fluidos são expressos somente na forma adimensional.

2.4 PERDA DE CARGA

De acordo com Antônio (2006), as perdas de carga são processos irreversíveis, onde uma forma de energia nobre se transforma em outras mais inferiores como o calor.

Para Munson (2004), a perda de carga total de um sistema se dá pela soma das perdas, onde parte é relacionada a trechos lineares e outra a singularidades. Nos projetos para transporte de fluidos a perda de carga é indispensável e não deve ser desconsiderada, pois, equipamentos que realizaram o transporte do fluido devem vencer a diferença de altura manométrica entre um reservatório e outro e mais a perda de carga de todo o sistema.

Munson (2004), também explica que componentes adicionais em uma tubulação como curvas e válvulas também causam perda de carga, e são chamadas de perdas singulares.

A perda de carga de escoamentos de fluidos é mais acentuada em curvas do que em trechos retos afirma Munson (2004). Ele explica que essa maior perda de carga se dá pela separação do escoamento na parte interna da curva e por um desbalanceamento das forças centrípetas que acabam gerando um escoamento rotativo secundário.

Para Santos (2009), a queda de pressão que ocorre ao longo de uma tubulação está relacionada com a rugosidade da parte interna da tubulação, aos elementos estranguladores e o devido escoamento do fluido, sendo que a maior ou menor fração de perda é causada pelo modo de escoamento do fluido seja ele turbulento ou laminar bem como sua velocidade.

Santos (2009), explica que para a determinação do comprimento de uma rede de distribuição de ar comprimido deve-se levar em conta o comprimento linear mais os comprimentos equivalentes de cada ponto de estrangulamento correlacionando as perdas de

carga existentes neles. Na equação 2, nota-se a soma dos comprimentos da rede sendo L_2 relacionado a perda em singularidades:

$$L_t = L_1 + L_2 \quad (2)$$

onde:

L_t : comprimento total da rede (m);

L_1 : comprimento retilíneo da rede (m);

L_2 : comprimento equivalente (m).

De acordo com Santos (2009), os pontos de estrangulamento são causados por todos os componentes que são ligados na rede seja eles curvas, tês, registros entre outros. Estes dispositivos causam perda de carga e são convertidos a comprimentos equivalentes para meios de dimensionamento de uma rede, sendo que para cada tipo de componente instalado no sistema corresponde a um comprimento relacionado com a perda de carga que cada estrangulamento causa.

O anexo 03 representa a relação de cada componente com seu respectivo comprimento equivalente.

2.4.1 Determinação do regime de escoamento

Para a definição do tipo de escoamento se faz necessário realizar o cálculo do número de Reynolds equação 3. Para definição do escoamento em um tubo circular pode-se calcular o número de Reynolds pela seguinte equação:

$$Re = \frac{V_{med} \cdot D}{\nu} \quad (3)$$

onde:

Re : número de Reynolds;

V_{med} : velocidade média do escoamento (m/s);

D : diâmetro do tubo (m);

ν : viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

No dizer de Cengel (2012), valores referentes ao número de Reynolds inferiores a 2300 determinam que o escoamento é laminar e acima de 10000 completamente turbulento, a faixa entre estes valores representa o escoamento de transição. No escoamento de transição ocorre a alternância aleatória entre escoamento laminar e turbulento.

No entanto Fox (2014), considera que se o número de Reynolds for menor ou igual a 2300 o escoamento é considerado laminar sendo que para valores superiores a este o escoamento é turbulento. Menciona ainda que para uma tubulação circular de diâmetro constante o que determina o tipo de escoamento é a velocidade média do escoamento.

2.4.2 Perda de carga linear

Como tratado por Munson (2004), as perdas de carga são divididas entre perdas lineares e perda singulares. Uma das fórmulas que retratam o fenômeno de perda de carga em um trecho linear é a equação de Darcy-Weisbach ou Universal representada pela equação 4:

$$J = \frac{f \cdot V_{med}^2}{D \cdot 2g} \quad (4)$$

onde:

J : perda de carga linear unitária (mca/m);

f : coeficiente relacionado ao material da tubulação;

V_{med} : velocidade média do escoamento (m/s);

D : diâmetro do tubo (m);

g : aceleração da gravidade (m/s^2).

Para um regime de escoamento laminar f é função apenas do número de Reynolds, conforme equação 4:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

Se o regime de escoamento for turbulento o coeficiente f pode ser obtido com o número de Reynolds e com a rugosidade relativa que é a relação entre a rugosidade do material e seu diâmetro, com estes valores é possível consultar o diagrama de Moody e encontrar o correspondente coeficiente. Para valores de rugosidade média a tabela 01 pode ser consultada, o diagrama de Moody pode ser visto no anexo 01.

Tabela 01: Rugosidade para alguns materiais

Valores de rugosidade equivalente para tubos comerciais novos

Material	Rugosidade ε (mm)
Vidro, plástico	0 (liso)
Concreto	0,9-9
Madeira	0,5
Borracha alisada	0,01
Tubulação de cobre ou latão	0,0015
Ferro fundido	0,26
Ferro galvanizado	0,15
Ferro forjado	0,046
Aço inoxidável	0,002
Aço comercial	0,045

(Fonte: Çengel adaptado, 2012)

Com esta definição a perda de carga em um trecho de comprimento L pode ser encontrado com a multiplicação da correspondente perda unitária, equação 6:

$$h_f = J \cdot L \quad (6)$$

onde:

h_f : perda de carga em um trecho (mca);

J : perda de carga linear unitária (mca/m);

L : comprimento do trecho (m).

2.4.3 Perda de carga em singularidades

Munson (2004), explica que a grande maioria das tubulações além dos trechos retos, estas possuem outros componentes que também causam perda de carga, como válvulas, tês, curvas, cotovelos e outros. Consideradas normalmente como perdas singulares ou localizadas.

De acordo com Munson (2004), a perda de carga destes dispositivos é determinada por meios experimentais pelo fato de ainda não se ter uma teoria que defina as perdas provocadas por um determinado componente. Estes também são expressos na maioria das vezes em forma adimensional, sendo que o método mais comum para a determinação das perdas de pressão é baseado no coeficiente de perda K_L .

A equação 7 representa a perda de carga em uma singularidade, sendo que a perda está diretamente relacionada com o coeficiente K_L :

$$h_l = K_L \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

onde:

h_l : perda de carga em singularidade (mca);

K_L : coeficiente de perda referente a geometria do componente;

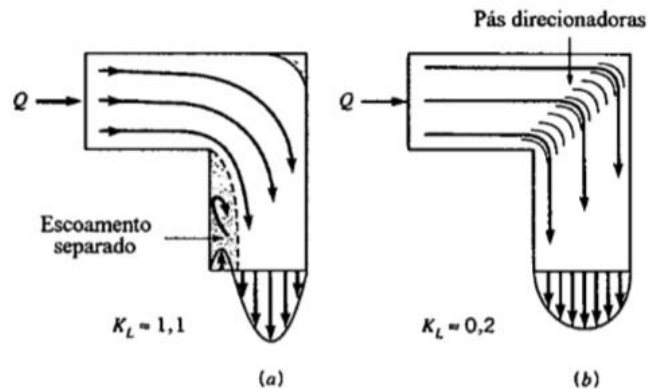
V : velocidade do escoamento (m/s);

g : aceleração da gravidade (m/s²).

2.4.3.1 Pás direcionadoras

Munson (2004) em sua análise representa resultados para a redução de perda de carga em singularidades, tendo como alternativa a adição de pás direcionadoras em uma curva de 90° representada na figura 04. Com tal verificação é possível notar a redução de K_L em aproximadamente 80% entre o escoamento sem e com as pás direcionadoras, sua explicação para esta redução se dá pela eliminação dos escoamentos rotativos secundários devido ao desbalanceamento das forças centrípetas, figura 04 (a), sem as pás o coeficiente de perda K_L é igual a 1,1 já com as pás figura 04 (b), este coeficiente cai para 0,2.

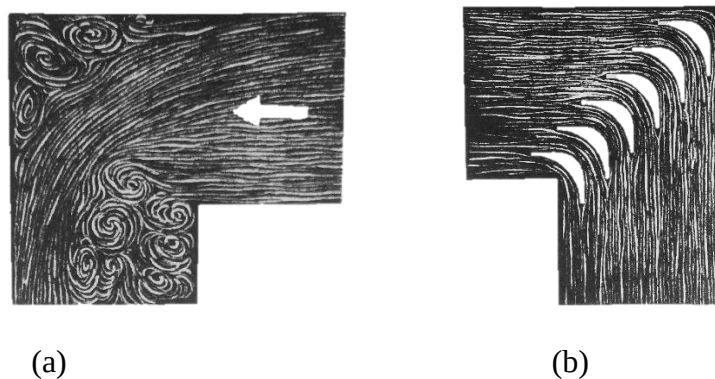
Figura 04: Exemplificação dos escoamentos



(Fonte: Munson, 2004)

Da mesma forma Miller (2017), explica que os joelhos quadrados são fontes inadequadas de distribuição de ar que geram alta perda de pressão. Na figura 05 (a) está representado o comportamento do ar ao passar por um cotovelo, nota-se a existência de movimentos secundários do fluido, já em (b) tem-se um escoamento mais linear, sem movimentos turbulentos desnecessários e prejudiciais, isso é conseguido pela colocação de pás direcionadoras.

Figura 05: Comportamento do escoamento de ar em um cotovelo



(Fonte: Miller adaptado, 2017)

Miller (2017), também afirma que as pás direcionadoras chegam a reduzir em 80% a perda de pressão em um joelho como relacionado nas condições apresentadas na figura 05. O direcionamento do ar impede a geração de turbulência, se ocorre uma menor turbulência o fluido escoar mais facilmente isso explica a grande redução de perda de pressão.

2.5 IMPRESSÃO 3D

Duarte (2016), define impressão 3D como sendo um processo de prototipagem rápida, onde os objetos são formados tridimensionalmente a partir de desenhos de referência construídos em CAD.

Conforme Duarte (2016), a impressão 3D diferentemente dos processos tradicionais que retiram material para criação de objetos ela trabalha com a adição de várias camadas de material, formando então os objetos ao final da deposição.

O método de impressão utilizado para as curvas foi o FDM (Modelagem por fusão e depósito), conforme Porto (2016), essa forma de impressão se assemelha ao processo de extrusão de termoplásticos devido as características da máquina. O equipamento de impressão possui um cabeçote onde se movimenta nos eixos x e y, e também uma plataforma onde o objeto é formado, possui também o bico injetor que é responsável pelo aquecimento e transporte do filamento sendo esses seus componentes básicos.

2.6 PLACA ARDUINO

O Arduino pode ser entendido segundo Souza (2011), como sendo uma plataforma de *hardware open source*, o que significa que seu código é aberto sendo possível adaptá-lo para vários fins.

Conforme McRoberts (2011), o Arduino pode ser considerado como um pequeno computador programável, onde executa o processamento dos dispositivos de entrada e saída que foram conectados a ele. Os principais sensores utilizados na entrada são o de temperatura, iluminação e pressão, já os de saída são os alto-falantes, LEDs e displays. Pode ser definido também como sendo uma plataforma de computação física embarcada que interage com o ambiente por meio de *software* e *hardware*.

A programação do Arduino é realizada no seu IDE (ambiente de desenvolvimento integrado) conforme menciona McRoberts (2011), sendo um *software* de código aberto que utiliza linguagens de programação C e C++.

2.7 CÉLULAS DE CARGA

Conforme Carer (*apud* LOPES, 2010), a célula de carga é um sensor eletromecânico, onde sua função é realizar a medição das deformações de um corpo que posteriormente podem

ser convertidas em força, pressão e tensões. Os sinais são obtidos a partir de um *Strain Gage* (extensômetro de resistência elétrica) que converte os resultados das deformações em tensões, ao ser associado a um circuito chamado de *Wheatstone* fornece um sinal em microvolts que se altera conforme a mudança na deformação.

Conforme Thomazini (2011), estes sensores possuem uma estrutura mecânica para receber esforços e se deformarem na faixa do regime elástico, de tal forma que por mais que seja pequena a deformação é possível gerar um sinal de saída com a informação da carga aplicada.

2.8 MANÔMETRO DE BOURDON

Conforme Munson (2004), um medidor de pressão comumente utilizado é o manômetro de Bourdon, este equipamento segue a lei de que qualquer tipo de estrutura elástica quando submetidas a diferenciais de pressão se deformam, então esta deformação é relacionada com a pressão, sendo exemplificado na figura 06.

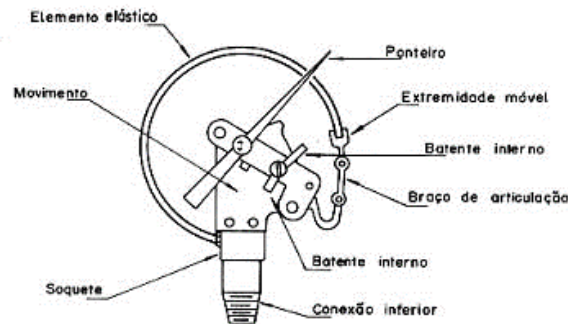
Figura 06: Manômetro de Bourdonl



(Fonte: Autor, 2019)

Ainda segundo Munson (2004), seu princípio de funcionamento está representado na figura 07 e consiste em um tubo elástico curvado conectado no sistema, se a pressão interna do tubo aumentar por exemplo este tende a ficar reto, e por mínima deformação que existir está se transforma no movimento do ponteiro indicando no mostrador a devida pressão correspondente, podendo medir pressões positivas e negativas.

Figura 07: Esquema de funcionamento do manômetro de Bourdon



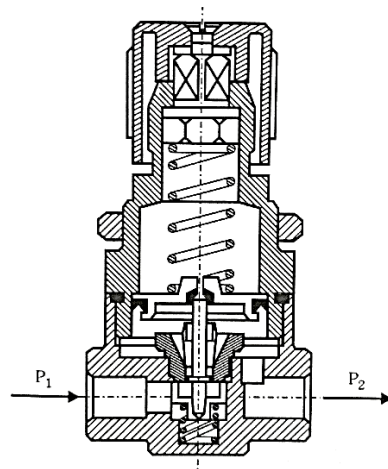
(Fonte: Tecni-ar)

Analisando a figura 07 onde está representado o mecanismo de funcionamento, se este for colocado a uma fonte de pressão ocorrerá a movimentação do sistema elástico, movimentando consequentemente um braço de articulação que fará a identificação da leitura com o deslocamento do ponteiro.

2.9 VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO

De acordo com Fialho (2003), este dispositivo é um elemento que está ligado na entrada de um equipamento e tem como função controlar a energia de pressão fornecida ao sistema. Seu funcionamento relaciona dois tipos de energia sendo elas a mecânica e a de pressão, estas são separadas por um diafragma e um conjunto obturador. Estes funcionam de forma a manter o equilíbrio destas energias, onde por exemplo se a pressão da rede diminuir haverá um desequilíbrio de energia, então o diafragma se movimenta impulsionado pela mola realizando a abertura do obturador permitindo a passagem de fluido para a equalização da pressão determinada para a rede. A representação deste tipo de válvula pode ser visualizada na figura 08.

Figura 08: Esquema em corte de uma válvula reguladora de pressão



(Fonte: Fialho adaptado, 2003)

Da mesma forma Santos (2009), explica que este tipo de válvula tem a função de manter a pressão de trabalho constante, garantindo então que a pressão determinada pelo manômetro estará sendo transmitida para a rede sem nenhuma variação.

2.10 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

Conforme definição de Munson (2004), um fluido é determinado como uma substância que se deforma com a aplicação de tensão de cisalhamento de qualquer valor.

Livi (2004), explica que os fluidos se comportam diferentemente dos sólidos quando submetidos a uma tensão cisalhante. Com a aplicação de tensões cisalhantes nos sólidos estes resistem a esta força externa desde que ela não ultrapasse o seu limite de escoamento, já os fluidos se deformam continua e indefinidamente enquanto a tensão existir.

Çengel (2012), define que qualquer característica de um sistema pode ser definida como propriedade. Dentre elas estão:

- Pressão;
- Temperatura;
- Volume;
- Massa;
- Viscosidade;
- Condutividade térmica;
- Módulo de elasticidade;

- Coeficiente de expansão térmico;
- Resistividade elétrica;
- Velocidade.

Ainda segundo Çengel (2012), o estado de um determinado sistema é definido conforme suas propriedades, no entanto não é necessário conhecer todas as suas propriedades para defini-lo, uma vez que se determina um certo número de propriedades suficientes as demais assumem certos valores. A densidade por exemplo é o inverso do volume específico e é definida como sendo a relação entre a massa por unidade de volume, esta é dependente da pressão e temperatura. Na grande maioria dos gases a densidade é proporcional a pressão e inversamente proporcional a temperatura, já os líquidos e sólidos por serem incompressíveis apresentam densidade usualmente desprezíveis com a variação de pressão.

Fialho (2003), determina algumas propriedades físicas do ar sendo elas a expansibilidade, compressibilidade a temperatura constante e a elasticidade. A expansibilidade do ar bem como de todos os gases está relacionada com a capacidade deste adquirir a forma do recipiente que o contém pelo fato de não possuir geometria definida. A compressibilidade a temperatura constante pode ser entendida como sendo a capacidade das moléculas de ar se aproximarem umas das outras de forma a ocuparem um menor espaço, e consequentemente a elevação da pressão. Sendo que a elasticidade está relacionada com a capacidade do ar retornar a seu volume inicial, uma vez que se elimina o esforço que o havia comprimido.

3 METODOLOGIA

O método desta pesquisa é de caráter bibliográfico e também experimental, devido à construção da bancada para realização de testes, de modo a observar os efeitos produzidos em cada curva.

Prodanov (2013), explica que a pesquisa bibliográfica é aquela elaborada a partir de conteúdos existentes e publicados, sendo principalmente de livros, jornais, dissertações, teses, revistas e outros, tendo como objetivo de envolver o pesquisador a todos estes materiais relacionados ao seu assunto da pesquisa.

Ainda segundo Prodanov (2013), o método experimental consiste na aplicação de certas variações em condições controláveis nos objetos estudados, analisando sua influência, sendo estas condições conhecidas pelo investigador.

Esta pesquisa é qualitativa na medida em que visa promover em curvas um melhor fluxo de ar, de forma que consequentemente proporcione uma menor perda de carga e energia, pois, melhorando o escoamento a perda de pressão tende a diminuir, sendo então também de caráter quantitativo, já que os valores de perda de carga podem mudar.

Para este trabalho foram realizadas pesquisas bibliográficas referentes ao fluxo de fluidos em tubulações, perda de carga, influência das curvas na perda de carga, estabelecendo parâmetros para a construção das curvas com os difusores. Os sistemas de tubos da bancada onde as curvas foram colocadas deveram possuir pontos para a medição de pressão antes e depois de cada curva sejam estes utilizando manômetros ou células de carga com Arduino, então com isso é possível analisar a perda de carga entre os pontos de cada sistema já que essa perda é a diferença de pressão entre eles, ou seja, a pressão antes da passagem pela curva e após a passagem, posteriormente pode-se realizar a comparação dos resultados de cada sistema.

A determinação dos resultados da perda de carga desta bancada é inteiramente experimental, sendo possível com a realização de medições de pressões nas referidas curvas instaladas na mesma desenvolvida para os ensaios, sendo que a realização dos testes entre os sistemas com e sem os difusores devem ser realizados em um mesmo horário para manter a mesma temperatura ambiente, com isso os resultados são confiáveis já que existe uma grande variação nas propriedades do ar com mudanças de temperatura.

Para a análise foram utilizados três modelos de curvas, a escolha destes modelos está relacionada ao fato de serem curvas que mais podem causar perda de carga e que também são bastantes utilizadas, sendo então os cotovelos de 90 e 45° (graus) e curva de 90° (graus).

Devido a impossibilidade de realização dos testes na bancada pela falta das células de carga e a placa Arduino, foram realizadas simulações com ajuda do *software solidworks* onde é possível verificar qualitativamente o escoamento do fluido pelas curvas.

3.1 PESQUISA DE COMPONENTES PARA BANCADA

Foram pesquisadas informações referentes aos equipamentos para serem utilizados na bancada para que fosse possível a sua construção, a exemplo das curvas, tubos, conexões, estrutura e fluido utilizado além das pesquisas relacionadas no referencial teórico e principalmente sobre perda de carga.

A grande maioria das informações relacionadas a escolha dos componentes foram obtidas na internet e em catálogos dos fabricantes, e são importantes porque determinam em que condições e quais equipamentos foram utilizados no processo de construção da bancada, além de estar relacionada a construção de uma bancada de baixo custo.

Os componentes adequados são necessários para se ter um perfeito acoplamento nas tubulações pelo fato de a saída do ar ser de $\frac{1}{4}$ de polegada no engate rápido e a linha principal possuir 50 mm de diâmetro, por isso é imprescindível a pesquisa para evitar erros.

A estrutura metálica foi pensada e buscada para atender à necessidade, de modo que deverá sustentar os dois sistemas de tubulações, o material da tubulação também é outro fator importante, visto que deverá suportar a pressão exercida pela passagem do ar comprimido, dentre outros elementos a exemplo das abraçadeiras para fixar as tubulações na estrutura metálica. A lista de materiais utilizados para a construção da bancada está representada na tabela 02.

Tabela 02: Lista de materiais

Descrição	Quantidade
Abraçadeira rosca sem fim 9mm 12-16	4un
Abraçadeira tipo D de 2" com parafuso	10un
Adesivo plástico cola cano PVC tigre frasco 175g	1un
Placa Arduino	1un
Bucha de PVC marrom de redução soldável longa 50x25 mm	2un
Célula de carga	12un
Cotovelo de 45 graus	1un
Cotovelo de 45 graus (com difusores)	1un
Cotovelo de 90 graus	1un
Cotovelo de 90 graus (com difusores)	1un
Curva de 90 graus	1un
Curva de 90 graus (com difusores)	1un
Eletrodo para aço carbono 6013 com Ø 2,5mm	5un
Espigão fixo macho 3/4" x 5/16"	2un
Fita veda rosca 18mm x 10m	1un
Luva de fixação	12un
Luva de PVC marrom soldável 50 mm	2un
Luva de PVC marrom soldável liso rosca 25mm x 3/4"	2un
Mangueira ar e água 5/16" bariflex 300 psi	1m
Pino engate 1/4" x escama 5/16"	2un
Tinta spray para metal preta 400ml	1un
Tubo de PVC marrom soldável Ø 25mm	20cm
Tubo de PVC marrom soldável Ø 50mm	10m
Tubo industrial de aço carbono quadrado 2mm de espessura x 20 x 20mm	10m

(Fonte: Autor, 2019)

3.2 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DOS DIFUSORES

Os desenhos das curvas foram baseados em curvas já existentes no mercado, todas foram projetadas com auxílio do *software Solidworks*, as curvas que possuem difusores foram derivadas do mesmo desenho das curvas sem difusores sendo então adicionados em seu interior as pás direcionais.

Com a realização dos desenhos concluída estes foram convertidos em formato (.STL) e em seguida para o (.GCODE) para realização do fatiamento tornando-os possíveis de leitura na impressora 3D. Para executar o desenvolvimento construtivo foram definidos alguns parâmetros com relação a qualidade da impressão que foi definida como alta, essa que implica diretamente na rugosidade superficial da curva, de modo que quanto menor for essa rugosidade melhor será o escoamento, estes parâmetros foram definidos de modo igual para todas as curvas.

O filamento escolhido para impressão foi o PLA com diâmetro de 1,75 mm, a temperatura da mesa para este material foi de 60°C e a temperatura de extrusão foi de 215°C.

As curvas com os difusores (pás direcionadoras), foram produzidas em um único componente pela impressora 3D conforme figura 09, facilitando muito a padronização e o processo de fabricação, uma vez que a colocação manual dos difusores no interior das curvas resultaria em uma tarefa bastante complicada, além de não poder garantir uma boa padronização.

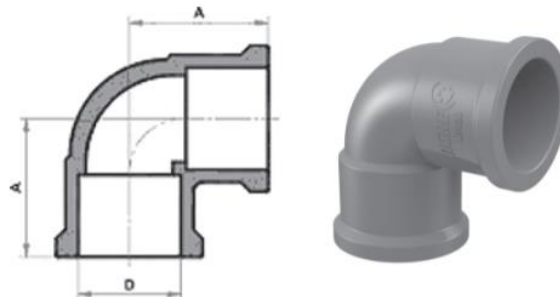
Figura 09: Impressão de curva com difusores



(Fonte: Autor, 2019)

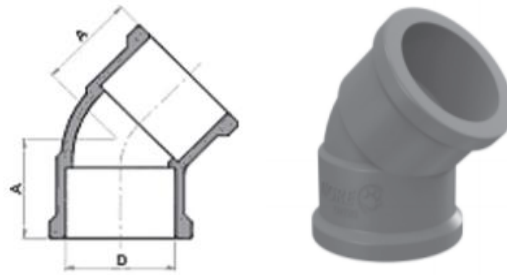
Por existir uma diferença entre autores ao se referirem a dispositivos curvados, será definido e considerado as nomenclaturas conforme as figuras 10, 11 e 12 para assim evitar erros no entendimento.

Figura 10: Cotovelo de 90°



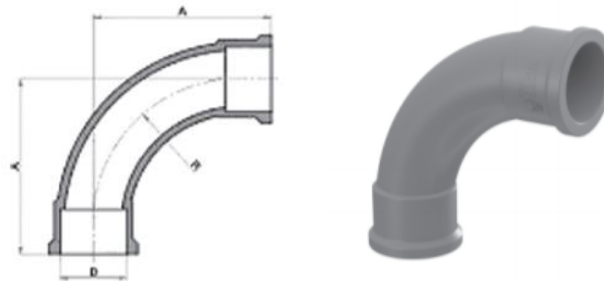
(Fonte: Tigre, 2013)

Figura 11: Cotovelo de 45°



(Fonte: Tigre, 2013)

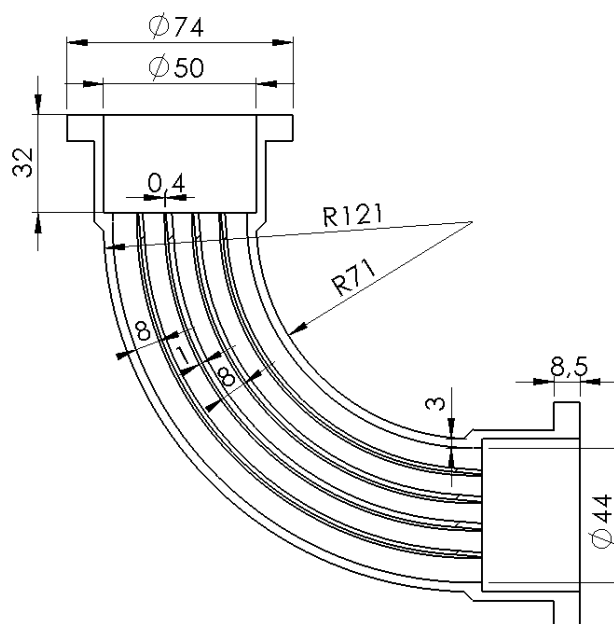
Figura 12: Curva de 90°



(Fonte: Tigre, 2013)

Os difusores seguiram um padrão de projeto, sendo que cada difusor possui espessura de 1 mm com curvatura que acompanha o raio da curva, além de na borda de ataque onde o ar ao fluir colidirá primeiramente possuir um chanfro com intuito de manter o escoamento mais constante possível, e também para dividir a corrente de ar entre os difusores, ver figura 13.

Figura 13: Exemplificação das dimensões utilizadas



(Fonte: Autor, 2019)

A determinação do padrão dos difusores não seguiu como base interpolações de análises experimentais para determinar a melhor relação de medidas para tal, pois, para este trabalho buscou-se identificar se com os difusores houve uma redução de perda de carga e não as melhores dimensões para que ocorra a redução, as pás direcionais foram dispostas como exemplificado na figura 13. Um critério seguido para essa determinação foi com relação ao diâmetro da tubulação uma vez que não faz sentido colocar muitos difusores a ponto de impedir a passagem do fluido, portanto foi utilizado para um diâmetro de 50 mm 4 (quatro) pás direcionais de espessura igual a 1mm com espaçamento entre uma e outra de 8mm.

No processo das impressões das curvas teve-se o devido cuidado para que os resultados não fossem alterados pelo fato de se ter uma forma construtiva diferente em cada curva, então foi seguido o mesmo padrão em todas. Tendo isso em vista cada curva foi impressa em duas partes, isso para tornar-se possível a visualização do seu interior e verificar qualquer possível erro de impressão.

Após as impressões as curvas passaram por um processo de retirada de rebarbas, onde havia necessidade foram lixadas e posteriormente unidas uma metade na outra por meio de abraçadeiras de náilon. As curvas tiveram de ser lixadas devido a contração do PLA para que fosse possível de serem encaixadas nos tubos, após a análise das impressões chegou-se a uma taxa de 1,88% de contração.

3.3 EQUIPAMENTOS E CONSTRUÇÃO DA BANCADA

A bancada tem como finalidade avaliar o fenômeno de perda de carga em curvas e foi construída para utilizar uma linha de ar comprimido nesse caso de um sistema pneumático de compressor a pistão com pressão na linha ajustável por uma válvula reguladora de pressão. A bancada foi modelada utilizando o *software solidworks*.

A bancada pode utilizar dois instrumentos de medição de pressão sendo eles os manômetros de Bourdon ou o conjunto de células de carga com Arduino, neste caso foi definido utilizar o segundo sistema, porem em consequência de não possuir tempo suficiente não foi possível monta-lo.

O Arduino seria utilizado para captar e converter os sinais emitidos pelas células de cargas instaladas no interior das tubulações, dessa forma os sinais de entrada estariam representando as pressões dos determinados pontos, e os dados de saída seriam mostrados em display, tendo com isso uma maior sensibilidade e precisão nas medições de pressão.

Foi necessário utilizar para o acoplamento da rede de ar comprimido no sistema da bancada uma válvula reguladora de pressão, pois, assim consegue-se controlar a pressão existente mantendo-a constante na tubulação sem que ocorram variações que implicariam em resultados errôneos no momento dos testes e até mesmo para regulagem da pressão na qual a bancada suporta. A figura 14 representa este tipo de válvula.

Figura 14: Válvula reguladora de pressão



(Fonte: Autor, 2019)

As tubulações que foram utilizadas na bancada são principalmente de PVC com exceção apenas das curvas, todas as emendas nas tubulações foram realizadas com cola para tubos conforme determinação do fabricante, uma vez que é fundamental ter uma boa vedação para não influenciar nas medições durante a realização dos testes.

Figura 15: Tubulação de PVC

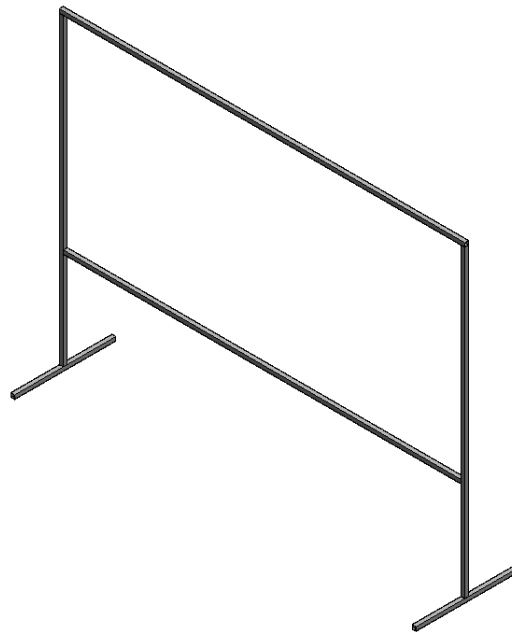


(Fonte: Amanco, 2019)

A figura 15 representa uma tubulação de PVC, estes principalmente são utilizados para transporte de água fria, porém é utilizado neste caso para o transporte de ar comprimido, já que a pressão do ar é ajustável e deverá ser mantida abaixo do limite de resistência a pressão deste tubo.

A bancada para a realização dos testes experimentais com os difusores, possui uma estrutura conforme figura 16 para que seja possível a instalação dos sistemas de tubulações, sendo um sistema conforme figura 17 em cada lado. Para sua construção foi necessário realizar os cortes e soldagem das barras de aço, onde se utilizou solda por eletrodo revestido com eletrodos 6013 de diâmetro de 2,5 mm. Após a soldagem foi realizado o processo de pintura onde se utilizou tinta spray na cor preta. Para a sustentação dos tubos foi necessário utilizar abraçadeiras do tipo “D”, onde foram parafusadas na própria estrutura de modo a manter os tubos paralelos.

Figura 16: Estrutura para a bancada



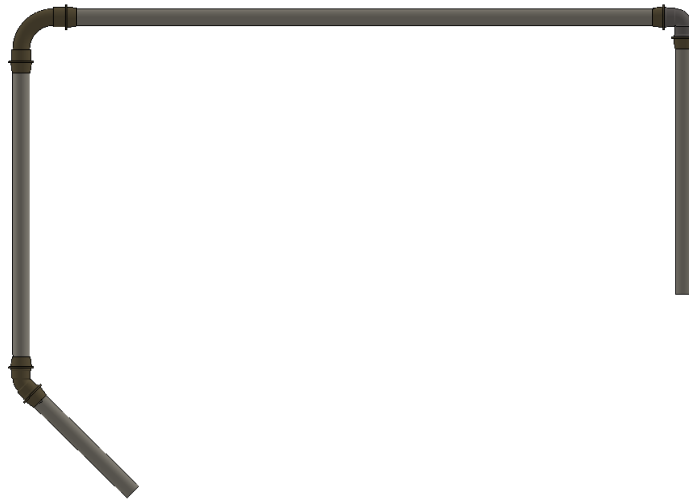
(Fonte: Autor, 2019)

A bancada como já descrito possui dois sistemas de tubos e o que explica isso está relacionado com o método comparativo, pois, em um sistema o ar fluirá durante o percurso e passará nas curvas sem os difusores, e no outro com eles podendo então com isso avaliar o comportamento do escoamento em ambos os sistemas.

As tubulações que foram utilizadas têm diâmetro de 50 mm e são de PVC, porém, todas as curvas foram produzidas em PLA por uma impressora 3D devido a uma melhor padronização nos difusores além da dificuldade encontrada em produzi-los manualmente.

Os dois sistemas foram instalados da seguinte maneira como está representando na figura 17, sendo respectivamente o cotovelo de 90° a curva de 90° e o cotovelo de 45°. Foram também impressos na impressora 3D luvas de fixação, onde foram coladas nas tubulações de forma que as curvas não precisassem ser coladas nos tubos de PVC, mas sim unidas nas luvas por meio de parafusos.

Figura 17: Sistema de tubulação



(Fonte: Autor, 2019)

O sistema de ligação do ar comprimido na bancada foi montado da seguinte maneira conforme figura 18, de modo que possui um engate rápido para fácil acoplamento e desacoplamento, uma mangueira flexível, abraçadeiras, pino de engate, espigão macho, dentre outros componentes como as luvas.

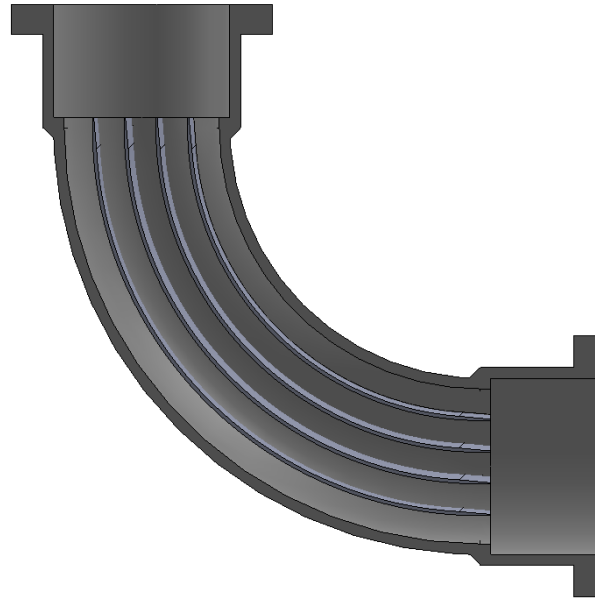
Figura 18: Sistema de acoplamento



(Fonte: Autor, 2019)

Como todos os três modelos de curvas com e sem os difusores foram feitos na impressora 3D tem-se uma melhor confiabilidade na utilização destes no método comparativo, a figura 19 representa uma curva em corte onde é possível notar os difusores (pás direcionais).

Figura 19: Curva de 90° em corte com os difusores



(Fonte: Autor, 2019)

O sistema de ligação entre a linha de ar e a bancada é realizada por meio de um engate rápido, pra que seja possível retirá-lo com facilidade no momento de realizar o teste no segundo sistema.

A bancada foi construída no laboratório do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR. A figura 20 representa como a bancada ficou, nota-se a ausência do sistema de medição de pressão, este não foi instalado devido ao pouco tempo disponível, a colocação dos sistemas pode ser continuada em um próximo TCC.

Para concluir a construção da bancada e realizar os testes é necessário instalar a placa Arduino e as células de carga, assim pode ser determinado se esses dispositivos são realmente viáveis ou não.

Figura 20: Bancada de teste



(Fonte: Autor, 2019)

3.4 REALIZAÇÃO DE TESTES

Para a realização dos testes entre os dois sistemas é necessário que se tenha padronização sendo realizados com a mesma pressão do ar de entrada, em um mesmo período de tempo e também a uma mesma temperatura ambiente, pois, a variação destas propriedades pode influenciar nos resultados dos testes.

Primeiramente deve-se acoplar um dos sistemas de tubulação pelo engate rápido conforme figura 21 e posteriormente abrir a válvula reguladora de pressão até chegar na pressão a qual foi determinada para a realização do teste.

Figura 21: Engate rápido

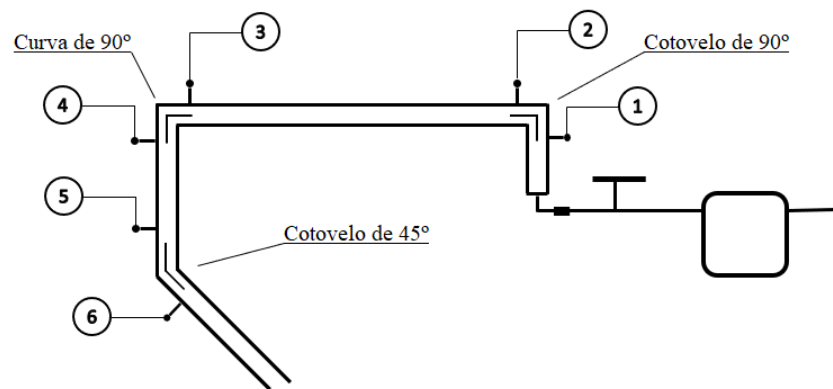


(Fonte: Autor, 2019)

A figura 21 representa o sistema de engate rápido onde é utilizado para fazer o acoplamento da bancada na rede de ar comprimido, facilitando assim a mudança de um sistema para outro.

Após todos os procedimentos mencionados concluídos e com o sistema já funcionando é realizado as aferições das pressões em todos os pontos realizando as marcações em uma planilha. Estes pontos de medição devem ser numerados em uma planilha conforme o fluxo de escoamento sendo do 1ª até o 6ª ponto facilitando assim a realização da verificação da pressão e listagem dos resultados. A figura 22 exemplifica os pontos onde devem ser realizadas as medições de pressão, sendo que o escoamento se inicia no ponto 1 e termina no ponto 6.

Figura 22: Esquema da bancada



(Fonte: Autor, 2019)

Após os testes e captação dos resultados do primeiro sistema deve-se iniciar as avaliações do segundo sistema, seguindo o mesmo padrão de pressão do ar na entrada, período de tempo e temperatura do ambiente. Da mesma forma com o sistema já estável deve-se realizar as aferições das pressões em cada ponto e inseri-las na planilha para posteriormente realizar a comparação dos resultados.

3.5 ANALISAR OS RESULTADOS

Para análise dos resultados deve-se utilizar o método comparativo relacionados com as indicações de todos os pontos, verificando se possuirá variação de pressão e conseqüentemente diminuição na perda de carga, a fim de ter uma melhor exemplificação

devem ser construídos gráficos demonstrando os resultados e as possíveis reduções na perda de carga.

Com as informações do escoamento com e sem as pás direcionais obtidos, poderão ser confrontadas e analisadas, sendo que a diferença de perda de carga entre os dois sistemas está diretamente relacionada com o consumo de energia. Se o sistema possui menor resistência (menor perda de carga), o fluido escoará melhor com isso a potência de um equipamento para movimentar esse fluido pode ser menor, sendo menor o consumo de energia elétrica também diminuirá.

Sabe-se que os resultados das medições de pressão em cada curva também podem levar a resultados que inviabilizam a utilização dos difusores apresentados na bancada. Se os difusores forem viáveis e realizarem uma redução na perda de carga é possível com os resultados encontrados definir quais cotovelos e curvas com pás direcionais tiveram uma melhor eficiência, sendo essa eficiência relacionada com a maior diminuição de perda de carga se comparado aos sistemas sem as pás direcionais. Apresentando então planilhas e gráficos com resultados referentes às análises feitas.

3.6 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO

As simulações foram realizadas utilizando o *Solidworks FloXpress*, onde foi possível avaliar qualitativamente o escoamento do fluido pelas curvas com e sem os difusores. Para iniciar as simulações foram definidos parâmetros como fluido utilizado, pressão de entrada e saída, vazão, temperatura bem como a direção do fluxo, sendo definidos de igual modo para as duas simulações. Os parâmetros podem ser vistos na tabela 03 abaixo:

Tabela 03: Parâmetros da simulação

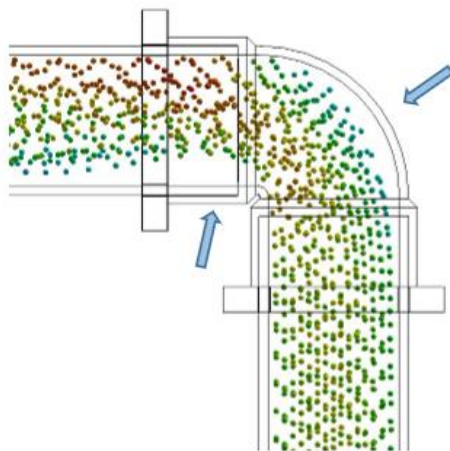
Propriedades	Valor
Temperatura	293,2 K
Pressão de entrada	301325 Pa
Pressão de saída	101325 Pa
Vazão mássica	0,036 Kg/s

(Fonte: Autor, 2019)

Primeiramente foi realizado a simulação no sistema que não possui difusores, então o fluxo segue inicialmente pelo joelho de 90° conforme figura 23 é possível verificar o escoamento neste ponto.

Com a simulação é possível perceber nos pontos indicados pelas flechas a descontinuidade do escoamento, onde o fluxo de ar se concentra mais no centro da curva não sendo distribuído uniformemente pela secção. Desta forma onde as esferas apresentam uma coloração mais avermelhada significa que houve um aumento da sua velocidade nessa região, isso é o mesmo que ocorre se houve-se uma redução no diâmetro da tubulação onde para que a vazão se mantenha constante o fluido tem um aumento de velocidade. Nos pontos mostrados pelas flechas podem ocorrer os escoamentos rotativos secundários conforme definição de Munson (2004), isso devido ao desbalanceamento das forças centrípetas. O deslocamento desordenado das esferas bem como seus movimentos helicoidais na passagem pela curva caracteriza uma turbulência nesta região, sendo esta prejudicial para o escoamento.

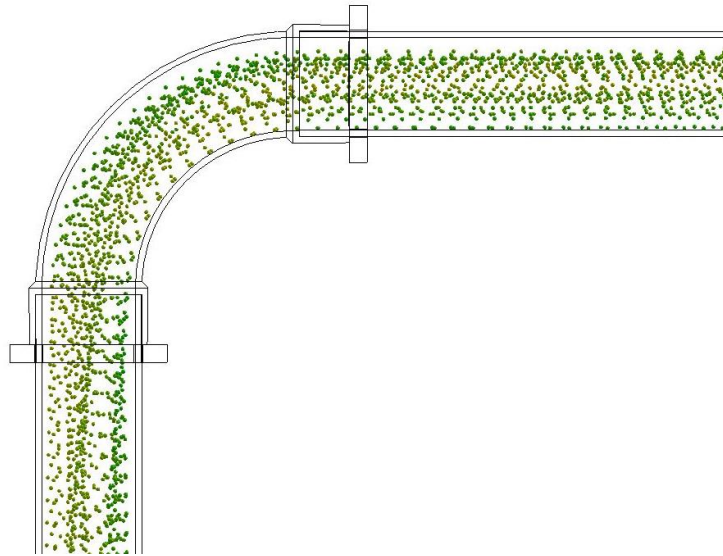
Figura 23: Simulação no joelho de 90°



(Fonte: Autor, 2019)

Seguindo o sistema de tubulação analisado a próxima singularidade em que ocorre o escoamento é a curva de 90°, a figura 24 representa o escoamento neste ponto.

Figura 24: Simulação na curva de 90°

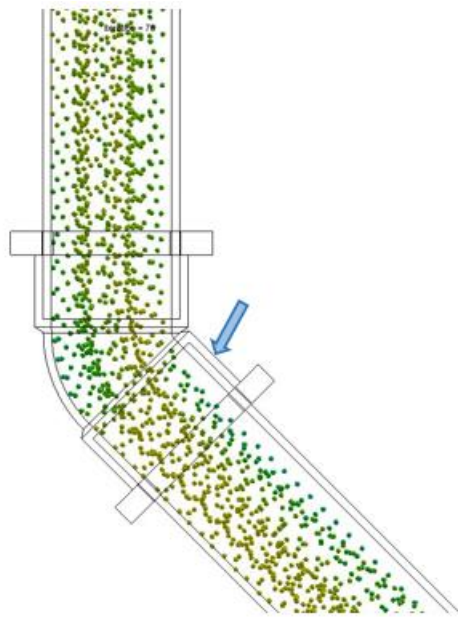


(Fonte: Autor, 2019)

Nesta curva acontece o mesmo que na anterior, porém com menor intensidade onde o fluxo de ar está presente mais no centro da tubulação do que nas extremidades, outro ponto a ser analisado também são os movimentos helicoidais das esferas em sua passagem pelo tubo, desse modo esse deslocamento nessa região pode ser considerado como turbulento.

O último ponto a ser analisado neste sistema de escoamento sem os difusores é o do joelho de 45°, este pode ser visualizado na figura 25.

Figura 25: Simulação no joelho de 45°



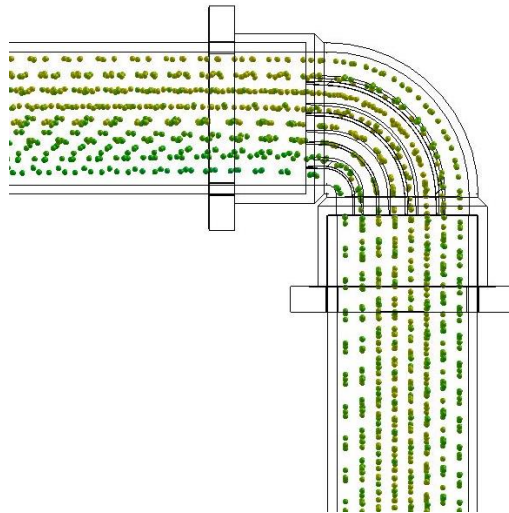
(Fonte: Autor, 2019)

Neste joelho é possível perceber uma melhor distribuição do escoamento se comparado com os anteriores, no qual somente onde é indicado com a flecha ocorre um pequeno desvio no escoamento devido a tendência de o fluido manter o mesmo sentido de escoamento. Também é possível perceber um leve movimento espiral das esferas na passagem pelo joelho.

Do mesmo modo com os mesmos parâmetros determinados na tabela 03 realizou-se as simulações no sistema que possui os difusores nas curvas.

Seguindo a mesma sequência o primeiro ponto em que o escoamento ocorre é pelo joelho de 90°, e pode ser visto na figura 26.

Figura 26: Simulação no joelho de 90° com difusores



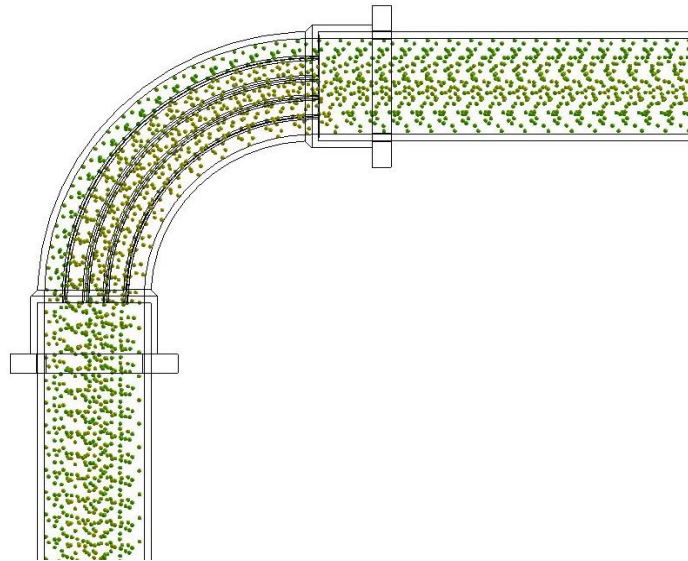
(Fonte: Autor, 2019)

Com a realização da simulação com os difusores é possível perceber uma melhor distribuição do fluido ao longo do fluxo, onde o escoamento se mantém laminar em sua passagem pelo joelho, sendo isso possível devido ao direcionamento do escoamento pelas pás direcionais. Pode-se perceber também que a velocidade do fluido se manter praticamente constante durante o escoamento, diferentemente do que acontece no joelho de 90° sem os difusores representado na figura 23. Com o melhor direcionamento do escoamento é possível perceber que não existem regiões que possam causar escoamentos rotativos secundários em consequência de um deslocamento mais uniforme do fluido, o que é bom, já que estes são prejudiciais ao escoamento.

Seguindo o sistema o próximo ponto a ser analisado é o que possui a curva de 90° com os difusores, este está representado na figura 27.

É possível notar nessa curva também uma melhora no escoamento, da mesma forma tem-se um escoamento mais distribuído ao longo da sua passagem pela curva mantendo-o laminar. No entanto devido esta curva possuir um raio mais suave a melhora no escoamento não foi tão significativa se comparado com o joelho anterior, isto porque com um raio mais suave o fluido apresenta uma menor dificuldade para ser direcionado para seu novo sentido.

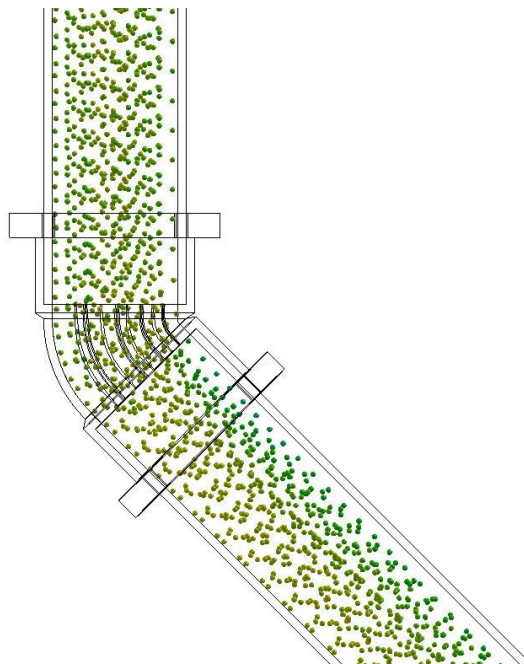
Figura 27: Simulação na curva de 90° com difusores



(Fonte: Autor, 2019)

Continuando a análise do sistema o último ponto simulado foi o joelho de 45° com difusores, conforme representado na figura 28.

Figura 28: Simulação no joelho de 45° com difusores



(Fonte: Autor, 2019)

Este joelho foi o que menos sofreu influência dos difusores o que já era esperado, isso ocorre devido a este possuir o raio mais suave dos três modelos simulados. Por outro lado, ainda mesmo que pequena pode-se notar que houve diferença possibilitando como nas curvas anteriores uma melhor distribuição do escoamento de forma que o mantém mais laminar durante sua passagem pelo tubo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Infelizmente devido a inconclusão da bancada pela falta dos equipamentos de medição de pressão (Placa Arduino e células de carga) não foi possível realizar os testes e avaliar a eficiência dos difusores, mas espera-se que estes apresentem bons resultados em relação a diminuição da perda de carga promovendo assim redução no consumo de energia.

Com a realização da pesquisa e construção da bancada bem como das curvas pode-se ter bons resultados na redução de perda de carga ou não, no entanto deve-se realizar os testes e avaliar os três tipos de curvas construídos, pode ser que para uma curva a redução da perda de carga poderá ser melhor que em outra, por isso é importante a análise sendo que os difusores podem funcionar para apenas alguns tipos de curvas. Os difusores tem o intuito de diminuir as turbulências do fluido na entrada e no decorrer das curvas, porém estes ocupam espaços no interior das curvas o que pode causar uma diminuição de vazão e consequentemente ao invés de reduzir a perda de carga, aumentá-la ainda mais.

Pode-se dizer de modo qualitativo que os difusores apresentaram resultados significativos no sentido de melhor distribuição do escoamento mantendo-o mais laminar durante as curvas. Sendo que no joelho de 90° essa melhora foi mais significativa, isso porque este joelho possui uma curva muito fechada com relação aos outros modelos simulados. As curvas que possuem um raio mais suave já foram idealizadas para melhorarem o escoamento dos fluidos, no entanto nem sempre é possível utiliza-las, então nesses casos as curvas com difusores poderão ser utilizadas como alternativa.

Dessa forma com a simulação do escoamento por essas curvas pode-se dizer que a qualidade do escoamento foi melhorada, por outro lado é necessário realizar os testes na bancada para se chegar a um resultado quantitativo, onde será possível avaliar se os difusores realmente diminuem as perdas de carga ou somente melhoram a forma do escoamento.

Quando se produz um novo equipamento este deve ser avaliado de vários pontos de vista, uma vez que cada ponto traz uma análise característica que implica diretamente na viabilidade de construção do mesmo. Os difusores neste caso foram impressos junto com as curvas por uma impressora 3D, o que levou várias horas para serem construídos, de modo que nessa condição se está avaliando protótipos mas vale lembrar que estes podem ser inviáveis quando se avalia em uma escala maior de produção, sendo necessário identificar processos de fabricação que atendam a necessidade e que não os tornem inviáveis pelo alto custo de construção, desse modo é muito importante a verificação da relação da possível diminuição da perda de carga e o processo de fabricação utilizado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a necessidade de avaliar o escoamento pelos difusores será desenvolvido por um próximo aluno a instalação dos equipamentos de medição de pressão para que seja possível realizar os testes e analisar a eficiência dessas aletas no interior dos tubos.

As equações utilizadas para as avaliações de escoamentos de fluidos surgiram na sua grande maioria após a realização de experimentos, então após a realização dos testes podem ser desenvolvidas equações e tabelas que relacionam uma possível redução de perda de carga para cada tipo de curva, sendo um grande progresso para a utilização de curvas com difusores nos diversos ambientes.

Estes difusores podem ser empregados em diversos sistemas de escoamento, sendo que uma vez onde tem escoamento é possível de existir perdas de carga e turbulências. Podem ser utilizados na busca de uma melhor eficiência no transporte de vários tipos de fluidos, tais como gases de combustão, gás oxigênio, água, fluidos refrigerantes, vapor superaquecido e outros.

Com a construção da bancada até aqui e posteriormente com sua finalização será possível realizar vários experimentos não somente com ar, e também com outros tipos de curvas e configurações geométricas dos difusores. A bancada poderá ser utilizada para fins didáticos, onde com ela poderão ser compreendidos os fenômenos de perda de carga, tipos de escoamentos e também a influência dos difusores no escoamento.

Em sistemas de transportes de fluidos as redes devem ser projetadas de modo que as singularidades utilizadas apresentem uma menor perda de carga, no entanto onde isso não é possível as curvas com os difusores podem ser importantes alternativas.

A busca para desenvolver sistemas que sejam mais eficientes não podem ser adiadas, cada vez mais como engenheiros devemos buscar soluções que promovam melhorias para o mundo em que vivemos. Somos capazes de realizar grandes atos, e com a nossa contribuição para a melhoria de equipamentos estamos deixando um legado para a vida toda.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Dar continuidade na construção da bancada a fim de conseguir realizar as medições de pressão com a utilização do sistema Arduino e células de carga.
- Avaliar e definir quantos difusores são ideais conforme a variação do diâmetro das curvas.
- Realizar experimentos para comprovar as definições apresentadas pela bibliografia referentes a utilização de difusores para redução da perda de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGNAKKE, Claus. SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica**. 8. ed. São Paulo. Blucher. 2013.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações**. Porto Alegre. AMGH. 2012

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4.ed. Porto Alegre. AMGH Editora LTDA. 2012.

DUARTE, Lucas, Costa. **Impressão 3D: uma alternativa para fabricação de dispositivos analíticos miniaturizados**. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/6890/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Lucas%20da%20Costa%20Duarte%20-%202016.pdf>>. Acessado em 05 de setembro de 2019.

EPE. **Projeção da demanda de energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245.pdf>>. Acessado em 06 de abril de 2019.

FESTO. **Reguladores de pressão**. Disponível em: < <https://www.festo.com>>. Acesso em 21 de abril de 2019.

FIALHO. **Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos**. 2.ed. São Paulo. Érica.2003.

FOX, R.; MCDONALD, A.; PRITCHARD, P.; LEYLEGIAN, J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro. LTC. 2014.

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4.ed. São Paulo. Atlas. 2002.

GODOI, J. M. A. **Eficiência energética industrial: um modelo de governança de energia para indústria sob requisito de sustentabilidade**. Disponível em: < https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10082011-002253/publico/GODOI_JMA.pdf >. Acesso em 30 de outubro de 2019.

HENN, Érico A. Lopes. **Máquinas de Fluido**. 2.ed. Santa Maria: Ufsm, 2006.

LIVI. **Fundamentos de fenômenos de transporte**. Rio de Janeiro. LTC.2004.

LOPES, Gustavo V. **Projeto e construção de células de carga de 100 kg e 500 kg**. Disponível em: <<https://maua.br/files/122014/projeto-e-construcao-de-celula-de-carga-instrumentada-com-extensometros.pdf>>. Acessado em 11 de setembro de 2019.

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. São Paulo. Novatec editora. 2011.

MILLER, Rex; MILLER, Mark. **Ar-Condicionado e Refrigeração**. 2. ed. Rio de Janeiro. LTC. 2017.

MUNSON, B.R.; YOUNG, D.F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4. ed. São Paulo. Edgard Blucher. 2004.

PORTO, Thomás, M., S. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3d e da sua aplicação na construção civil**. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10019793.pdf>>. Acessado em 05 de setembro de 2019.

PRODANOV, Cleber C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2.ed. Novo Hamburgo. Feevale. 2013.

SANTOS, Adriano A; SILVA, António F. **Automação pneumática: Produção, tratamento e distribuição de ar comprimido técnicas de comando de circuitos combinatórios e sequenciais**. 2.ed. Porto. Pubblindústria. 2009.

SOUZA, Anderson R. et al. **A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC**. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172011000100026&script=sci_arttext> Acessado em 5 de setembro de 2019.

TECNIAR. **Manômetro – Informações uteis**. Disponível em: <<http://www.tecniar.com.br/manometro/manometro-informacoes-uteis/>>. Acesso em 13 de abril de 2019.

TERMOTRORC. **Manômetro de Bourdon**. Disponível em: <<http://www.termotrorc.com.br/manometro-de-bourdon>>. Acesso em 13 de abril de 2019.
THOMAZINI, DANIEL; ALBUQUERQUE, PEDRO U. B. **Sensores Industriais: Fundamentos e aplicações**. 8.ed. São Paulo. Érika. 2011.

TIGRE. **Ficha técnica**. Disponível em: <https://www.tigre.com.br/sites/default/files/produtos/ficha-tecnica/linha_1_13.pdf>. Acesso em 20 de abril de 2019.

ANEXOS

ANEXO 01 - Diagrama de Moody.

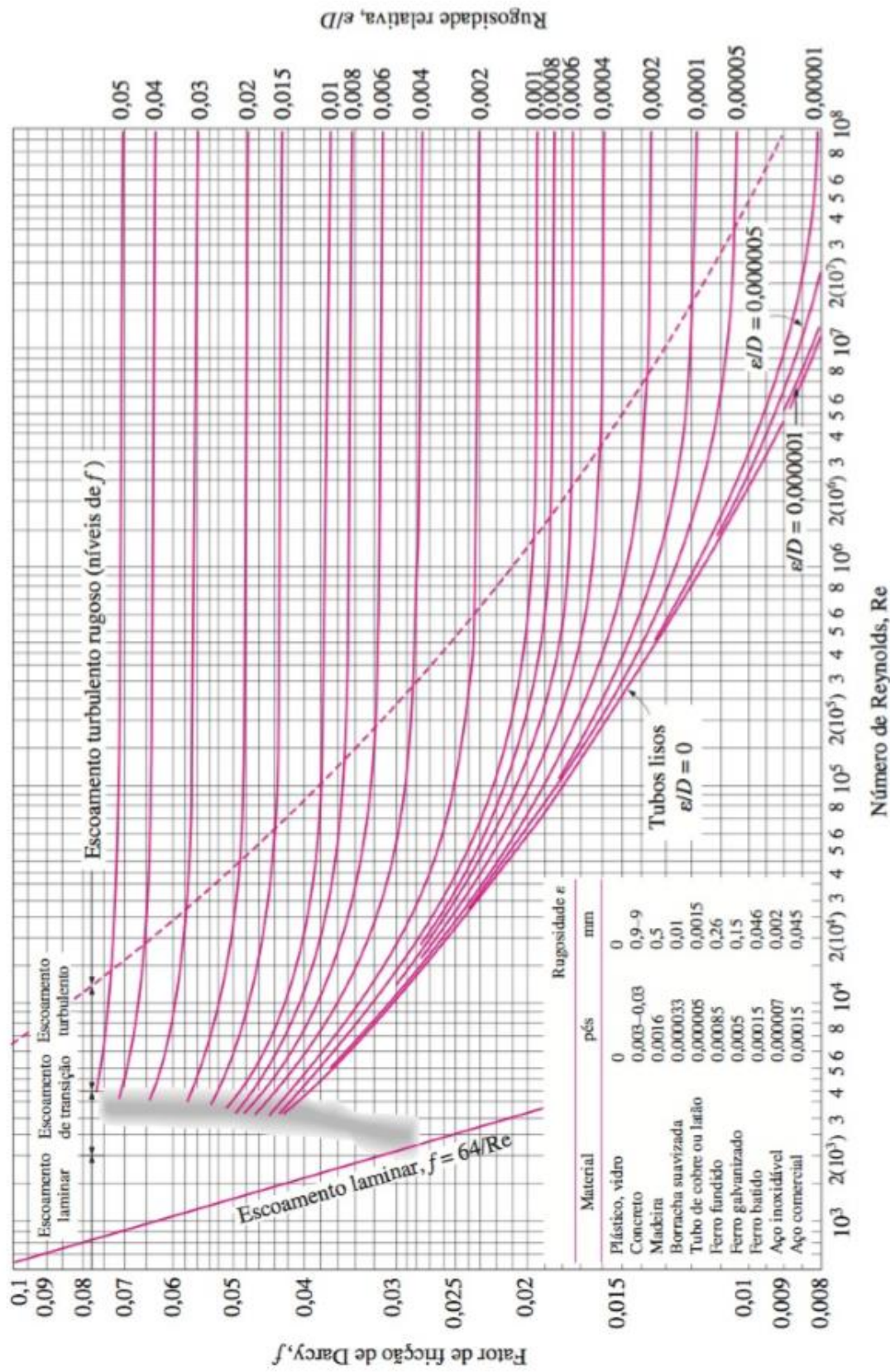


FIGURA A-12

O diagrama de Moody para o fator de atrito do escoamento completamente desenvolvido em tubos circulares para uso na relação de perda de carga $h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$. Os fatores de atrito do escoamento turbulento são avaliados com a equação de Colebrook $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$.

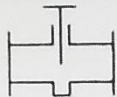
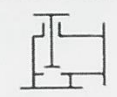
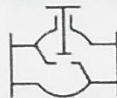
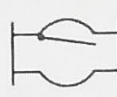
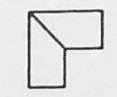
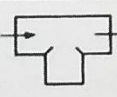
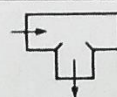
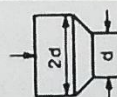
ANEXO 02 - Propriedades da atmosfera a grandes altitudes.

Propriedades da atmosfera a grandes altitudes

Altitude, m	Temperatura, °C	Pressão, kPa	Gravidade g, m/s ²	Velocidade do Som, m/s	Densidade, kg/m ³	Condutividade Viscosidade μ , kg/m · s	Térmica, W/m · K
0	15,00	101,33	9,807	340,3	1,225	$1,789 \times 10^{-5}$	0,0253
200	13,70	98,95	9,806	339,5	1,202	$1,783 \times 10^{-5}$	0,0252
400	12,40	96,61	9,805	338,8	1,179	$1,777 \times 10^{-5}$	0,0252
600	11,10	94,32	9,805	338,0	1,156	$1,771 \times 10^{-5}$	0,0251
800	9,80	92,08	9,804	337,2	1,134	$1,764 \times 10^{-5}$	0,0250
1000	8,50	89,88	9,804	336,4	1,112	$1,758 \times 10^{-5}$	0,0249
1200	7,20	87,72	9,803	335,7	1,090	$1,752 \times 10^{-5}$	0,0248
1400	5,90	85,60	9,802	334,9	1,069	$1,745 \times 10^{-5}$	0,0247
1600	4,60	83,53	9,802	334,1	1,048	$1,739 \times 10^{-5}$	0,0245
1800	3,30	81,49	9,801	333,3	1,027	$1,732 \times 10^{-5}$	0,0244
2000	2,00	79,50	9,800	332,5	1,007	$1,726 \times 10^{-5}$	0,0243
2200	0,70	77,55	9,800	331,7	0,987	$1,720 \times 10^{-5}$	0,0242
2400	-0,59	75,63	9,799	331,0	0,967	$1,713 \times 10^{-5}$	0,0241
2600	-1,89	73,76	9,799	330,2	0,947	$1,707 \times 10^{-5}$	0,0240
2800	-3,19	71,92	9,798	329,4	0,928	$1,700 \times 10^{-5}$	0,0239
3000	-4,49	70,12	9,797	328,6	0,909	$1,694 \times 10^{-5}$	0,0238
3200	-5,79	68,36	9,797	327,8	0,891	$1,687 \times 10^{-5}$	0,0237
3400	-7,09	66,63	9,796	327,0	0,872	$1,681 \times 10^{-5}$	0,0236
3600	-8,39	64,94	9,796	326,2	0,854	$1,674 \times 10^{-5}$	0,0235
3800	-9,69	63,28	9,795	325,4	0,837	$1,668 \times 10^{-5}$	0,0234
4000	-10,98	61,66	9,794	324,6	0,819	$1,661 \times 10^{-5}$	0,0233
4200	-12,3	60,07	9,794	323,8	0,802	$1,655 \times 10^{-5}$	0,0232
4400	-13,6	58,52	9,793	323,0	0,785	$1,648 \times 10^{-5}$	0,0231
4600	-14,9	57,00	9,793	322,2	0,769	$1,642 \times 10^{-5}$	0,0230
4800	-16,2	55,51	9,792	321,4	0,752	$1,635 \times 10^{-5}$	0,0229
5000	-17,5	54,05	9,791	320,5	0,736	$1,628 \times 10^{-5}$	0,0228
5200	-18,8	52,62	9,791	319,7	0,721	$1,622 \times 10^{-5}$	0,0227
5400	-20,1	51,23	9,790	318,9	0,705	$1,615 \times 10^{-5}$	0,0226
5600	-21,4	49,86	9,789	318,1	0,690	$1,608 \times 10^{-5}$	0,0224
5800	-22,7	48,52	9,785	317,3	0,675	$1,602 \times 10^{-5}$	0,0223
6000	-24,0	47,22	9,788	316,5	0,660	$1,595 \times 10^{-5}$	0,0222
6200	-25,3	45,94	9,788	315,6	0,646	$1,588 \times 10^{-5}$	0,0221
6400	-26,6	44,69	9,787	314,8	0,631	$1,582 \times 10^{-5}$	0,0220
6600	-27,9	43,47	9,786	314,0	0,617	$1,575 \times 10^{-5}$	0,0219
6800	-29,2	42,27	9,785	313,1	0,604	$1,568 \times 10^{-5}$	0,0218
7000	-30,5	41,11	9,785	312,3	0,590	$1,561 \times 10^{-5}$	0,0217
8000	-36,9	35,65	9,782	308,1	0,526	$1,527 \times 10^{-5}$	0,0212
9000	-43,4	30,80	9,779	303,8	0,467	$1,493 \times 10^{-5}$	0,0206
10,000	-49,9	26,50	9,776	299,5	0,414	$1,458 \times 10^{-5}$	0,0201
12,000	-56,5	19,40	9,770	295,1	0,312	$1,422 \times 10^{-5}$	0,0195
14,000	-56,5	14,17	9,764	295,1	0,228	$1,422 \times 10^{-5}$	0,0195
16,000	-56,5	10,53	9,758	295,1	0,166	$1,422 \times 10^{-5}$	0,0195
18,000	-56,5	7,57	9,751	295,1	0,122	$1,422 \times 10^{-5}$	0,0195

Fonte: U.S. Standard Atmosphere Supplements, U.S. Government Printing Office, 1966. Com base em condições de média anual a 45° de latitude e variações com a época do ano e os padrões meteorológicos. As condições no nível do mar ($z = 0$) foram assumidas como $P = 101,325$ kPa, $T = 15^\circ\text{C}$, $\rho = 1,2250$ kg/m³, $g = 9,80665$ m/s².

ANEXO 03 – Comprimentos equivalentes em metros.

Válvulas ou acessórios		Diâmetros internos nominais em mm										
		25	40	50	80	100	125	150	200	250	300	400
gaveta, aberta		0,3	0,5	0,6	1,0	1,3	1,6	1,9	2,6	3,2	3,9	5,2
quase fechada		5	8	10	16	20	25	30	40	50	60	80
diafragma		1,5	2,5	3,0	4,5	6	8	10	---	---	---	---
angular		4	6	7	12	15	18	22	30	36	---	---
globo (assento)		7,5	12	15	24	30	38	45	60	---	---	---
retenção (portinhola)		2,0	3,2	4,0	6,4	8,0	10	12	16	20	24	32
curva R=2d longa		0,3	0,5	0,6	1,0	1,2	1,5	1,8	2,4	3,0	3,6	4,8
curva R=d		0,4	0,6	0,8	1,3	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4
cotovelo		1,5	2,4	3,0	4,8	6,0	7,5	9	12	15	18	24
tê de passagem		0,5	0,8	1,0	1,6	2,0	2,5	3	4	5	6	8
tê de derivação		1,5	2,4	3,0	4,8	6,0	7,5	9	12	15	18	24
redução		0,5	0,7	1,0	2,0	2,5	3,1	3,6	4,8	6,0	7,2	9,6