

Victor Hugo de Souza Amaral dos Santos

**Análise da Eficiência da Transferência de Energia em um Canal
Acústico em função da Vazão**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Arthur Braga
Coorientador: Sully Quintero

Rio de Janeiro
18 de Dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda a saúde, força e determinação para superar todos os desafios ao longo da minha graduação.

Aos meus pais, Mauro e Vilma, por todo o amor, preocupação e confiança. Por terem me proporcionado a oportunidade de estudar na PUC-Rio e também por todos os momentos felizes e tristes que estiveram ao meu lado.

A minha namorada Clarisse, que sempre esteve ao meu lado nas dificuldades, me ajudando e me motivando. Por todo seu carinho, amor e compreensão.

Ao meu orientador Arthur Braga, pelo seu profissionalismo e atenção durante a elaboração desse trabalho. A minha orientadora Sully Quintero por toda atenção, disponibilidade e por ter respondido as mesmas perguntas milhares de vezes sem perder a paciência. Todos esses fatores foram essenciais para a elaboração desse projeto. Por ser uma pessoa com uma capacidade incrível de encorajar e motivar as pessoas em sua volta.

A todos meus colegas do laboratório de sensores a fibra óptica(LSFO), dentre eles um agradecimento em especial para Hugo por toda companhia e ajuda durante os longos experimentos realizados e também para Savio que sempre esteve disponível, me ajudando e dando conselhos na utilização do programa SolidWorks.

Ao Leonardo e todas as pessoas do laboratório de engenharia de fluídos, pela boa vontade e por disponibilizarem o laboratório para realização desse projeto.

A todos meus amigos de faculdade, por toda ajuda e apoio durante esses anos.

Obrigado a todos que diretamente ou indiretamente ajudaram no decorrer desse projeto.

RESUMO

Análise da Eficiência de Transferência de Energia de um Canal Acústico em Função da Vazão

Na atualidade, materiais piezelétricos são amplamente utilizados em áreas de engenharia. Estes materiais são a base para muitos tipos de sensores e transdutores. Este projeto de conclusão de curso visa analisar o efeito da vazão na eficiência de transferência de energia em um canal acústico com a utilização de materiais piezoeletricos. O objetivo consiste em identificar se existem padrões nas curvas S21 que permitam ser correlacionados com a vazão. Para a realização do experimento, uma bancada experimental será montada, composta por um sistema de escoamento com vazões conhecidas na seção transversal de uma tubulação horizontal de 40mm de diâmetro interno. Além disso, foram modeladas e projetadas três luvas de acetal, com intuito de simular diferentes hipóteses no contato dos elementos piezoelétricos.

Palavras chaves: Transdutores piezoelétricos. Canal acústico. Transferência de energia.

ABSTRACT

An Analysis of Energy Transference Efficiency in an Acoustic Channel in Function of Flow Rate

Nowadays, piezoelectric materials are widely used in engineering areas. These materials are the basis for many types of sensors and transducers. It consists in identifying if there are patterns on the curves S_{21} allow to be correlated to the flow rate. When carrying out the experiment, there will be an experimental table composed by a drainage system with known flow rates in the transversal section of a horizontal pipe measuring 40mm of internal diameter. Besides that, three acetal gloves were molded and projected in order to simulate different hypothesis of contact in piezoelectric elements.

Key-words: Piezoelectric Transducer. Acoustic channel. Energy Transference.

Conteúdo

1	Introdução	7
1.1	Motivações	7
1.2	Objetivos	7
2	Revisão Bibliográfica	8
2.1	Efeito Piezoelétrico	8
2.2	Transdutor Utilizado	9
2.3	Tipos de escoamento	10
2.3.1	Escoamento Multifásico	10
2.3.2	Padrões de Escoamento	11
2.4	Canal acústico	12
3	Projeto das Peças e Bancada Experimental	13
3.1	Caso 1	13
3.2	Caso 2	14
3.3	Caso 3	15
3.4	Bancada Experimental	16
3.4.1	Reservatório do líquido	19
3.4.2	Bomba de água	20
3.4.3	VNA	21
4	Métodologia Experimental	22
4.1	Caso 1	22
4.2	Caso 2	25
4.3	Caso 3	26
4.4	Montagem final da peças	27
5	Procedimento Experimental	28
5.1	Estabilização do sistema	28
5.2	Aquisições de dados	28
6	Resultados	30
6.0.1	Caso 1	30
6.0.2	Caso 2	31
6.0.3	Caso 3	32
6.1	Comparativo entre os resultados de cada caso	33
6.1.1	Utilização das partículas	34
6.1.2	Foto das partículas no escoamento	35
7	Conclusão	36
7.1	Proposta para desenvolvimento do projeto	36
8	Bibliografia	37
9	Anexo	38

Lista de Figuras

1	Efeito Piezoelétrico Fonte SABBATINI, R. M. E.	9
2	Transdutor Piezoelétrico	9
3	Padrões de escoamento para mistura gás-líquido em escoamento horizontal. Fonte: Shoham, 2006.	11
4	Vista explodida montagem do caso 1	13
5	Vista explodida da montagem do caso 2	14
6	Vista explodida da montagem do caso 3	15
7	Desenho tridimensional da seção de testes. Adaptado de FERNANDES, Leonardo Soares 2017	16
8	Vista lateral da bancada	17
9	Bancada 2D	18
10	Reservatório utilizado no experimento	19
11	Bomba de água utilizada no experimento	20
12	Computador e VNA aquisitando dados durante um experimento	21
13	Conjunto de transdutores e adesivo	22
14	Características do adesivo	23
15	Respectivamente as figuras representam: a)conjunto de ímas; b)vista fron- tal da montagem; c)vista superior da montagem	24
16	Representação 2D das camadas do caso 1	25
17	Representação 2D das camadas do caso 2	25
18	Representação 2D das camadas do caso 3	26
19	Montagem final dos casos	27
20	Varição da vazão durante o experimento.	29
21	Gráficos do primeiro caso	30
22	Gráficos do segundo caso	31
23	Gráficos do terceiro caso	32
24	Coeficiente de transferência de energia(S21) em função da vazão para os três casos analisados.	33
25	Coeficiente de transferência de energia(S21) em função da vazão.	34
26	Imagem das partículas em uma seção transversal do tubo	35
27	Desenho 2D da primeira peça	38
28	Desenho 2D da segunda peça	39
29	Desenho 2D do apoio da segunda peça	40
30	Desenho 2D da terceira peça	41
31	Desenho 2D do apoio da terceira peça	42

Lista de Tabelas

1	Valores utilizados da calibração da bomba.	28
2	dB, Razão entre energia transferida e percentual dessa energia para os três casos analisados.	33

1 Introdução

Os avanços tecnológicos das décadas passadas na área de sensores foram fundamentais para o desenvolvimento de novas tecnologias nesse ramo, como o sensoriamento sem fio. Atualmente é comum encontrar problemas de alimentação e de comunicação entre sensores sem fio quando estão fechados e selados em materiais metálicos, vasos de pressão, câmaras à vácuo entre outros. Muitas pesquisas estão sendo realizadas para solucionar esses problemas.

Este projeto de final de curso está inserido dentro de um projeto de pesquisa do laboratório de sensores a fibra óptica, que visa desenvolver um sistema de monitoramento entre a coluna e o revestimento do poço.

1.1 Motivações

O projeto de pesquisa MEMS WELLBORE MONITORING SYSTEM, é um projeto em parceria com a Shell e é muito abrangente, por isso são necessárias realizações de inúmeras caracterizações. Alguns alunos do laboratório de fibra óptica estão trabalhando em função de algumas dessas caracterizações.

Existem análises do tipo de transdutor, do adesivo utilizado e esse trabalho de fim de curso está focado na análise da transferência da energia em função da vazão.

1.2 Objetivos

O objetivo desse projeto é quantificar a transferência de energia entre dois transdutores acústicos, em três casos de configurações distintas. Verificar se a variação da vazão afeta a transferência de energia entre os transdutores.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Efeito Piezoelétrico

Descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie na França em 1880, o efeito piezoelétrico é apresentado em cristais. Os irmãos Curie, no entanto, não previram o efeito piezoelétrico inverso. O mesmo foi deduzido matematicamente de princípios da termodinâmica por Gabriel Lippmann em 1881. Os Curie imediatamente confirmaram a existência do efeito inverso, o que evidenciou de forma quantitativa a reversibilidade completa de eletromecânico para deformações em cristais piezoelétricos.

Pode-se definir Efeito Piezoelétrico como a propriedade de alguns materiais se tornarem eletricamente polarizados através de pressões ou tensões mecânicas. Um exemplo de material onde ocorre esse efeito são cristais de Titanato Zirconato de Chumbo. Quando esses cristais sofrem deformação de ao menos 0.1% de sua estrutura, é gerado energia interna. Com o auxílio da termodinâmica foi possível comprovar que esse efeito pode ser reversível. Ao aplicar um campo elétrico externo faz com que o material se deforme. Tal deformação é proporcional a magnitude do campo elétrico aplicado. Todos os materiais que possuem esse efeito são chamados de Materiais piezoelétricos. Existem ainda materiais sintéticos que não possuem esse efeito em seu estado natural. Logo, se é desejado que o mesmo passe a ter o efeito, é preciso passar por um processo de polarização para assim adquirirem a característica piezoelétrica. Alguns exemplos desses materiais são: titanato de bário (BaTiO_3), titanato zirconato de chumbo (PZT) entre outros. É importante estar ciente que com o tempo e com o uso o efeito da polarização vai se esvaecendo, fazendo com que o material perca o efeito piezoelétrico.[1]

As seguintes equações que regem o efeito direto e inverso podem ser representadas por:

$$D = dT + \epsilon E \quad (1)$$

Nessa equação D representa o deslocamento elétrico, d é o coeficiente piezoelétrico, T é a tensão mecânica, ϵ é a permissividade dielétrica e E seria o campo elétrico.

$$S = sT + dE \quad (2)$$

A equação (2) demonstra o efeito piezoelétrico inverso, onde S representa a deformação, s é o coeficiente elástico.

As equações (1) e (2) representam respectivamente propriedades elétricas(E,D) e propriedades mecânicas(S,T).



Figura 1: Efeito Piezoelétrico
Fonte SABBATINI, R. M. E.

2.2 Transdutor Utilizado

Para o respectivo experimento serão utilizados dois transdutores acústicos piezoelétricos PZT(Titanato Zirconato de Chumbo) sob a forma de disco, este transdutor possui um diâmetro de uma polegada(25,4mm) e possui frequência de ressonância na faixa de 1MHz. A grandeza estudada nesse projeto será S21 que é o coeficiente de transferência entre dois transdutores.



Figura 2: Transdutor Piezoelétrico

2.3 Tipos de escoamento

Pode-se definir escoamentos internos ou em dutos quando o escoamento está completamente envolto por superfícies sólidas. Quando tem-se corpos imersos em fluidos não contidos denomina-se por escoamentos externos. Ambos escoamentos podem ser laminares ou turbulentos, compressíveis ou não compressíveis.

Uma das formas de determinar se o escoamento é laminar ou turbulento é encontrar o valor do número de Reynolds. Este coeficiente é um número adimensional utilizado no estudo da mecânica dos fluidos, que traz muita informação em relação ao escoamento, tanto externo quanto o interno. Uma dessas informações seria definir o respectivo regime do escoamento.

O número de Reynolds está relacionado pela razão entre forças de inércia com forças viscosas, pode-se definir Reynolds para o caso de duto circular como:

$$R_e = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (3)$$

Sendo:

- ρ - densidade específica do fluido
- U_m - Velocidade média do fluido
- D_i - diâmetro interno do duto
- μ - viscosidade do fluido

Escoamentos laminares geralmente ocorrem para $R_e \leq 2300$, para valores maiores tem-se escoamento turbulentos. No respectivo projeto nosso sistema escoará por dutos de diâmetro interno constante, logo o escoamento será inteiramente laminar ou turbulento, dependendo apenas do valor de U_m . [2]

2.3.1 Escoamento Multifásico

Para um escoamento ser multifásico é preciso que haja pelo menos mais de uma fase presente no sistema. Escoamentos multifásicos estão presentes em diversos ramos da indústria, muito utilizado na áreas de petróleo, química, alimentícia, entre outras.

2.3.2 Padrões de Escoamento

A combinação de fases em um escoamento esta diretamente relacionada pela interação interfacial entre os componentes. Fatores geometricos, orientação do escoamento(vertical,inclinado ou horizontal, as respectivas vazões de cada fluido e tambem fatores termodinâmicos como pressão e temperatura influenciam para essa interação. A partir desses componentes é possível encontrar alguns padrões distintos de escoamento, são eles:

Escoamento Estratificado Liso (Stratified Smooth Flow)

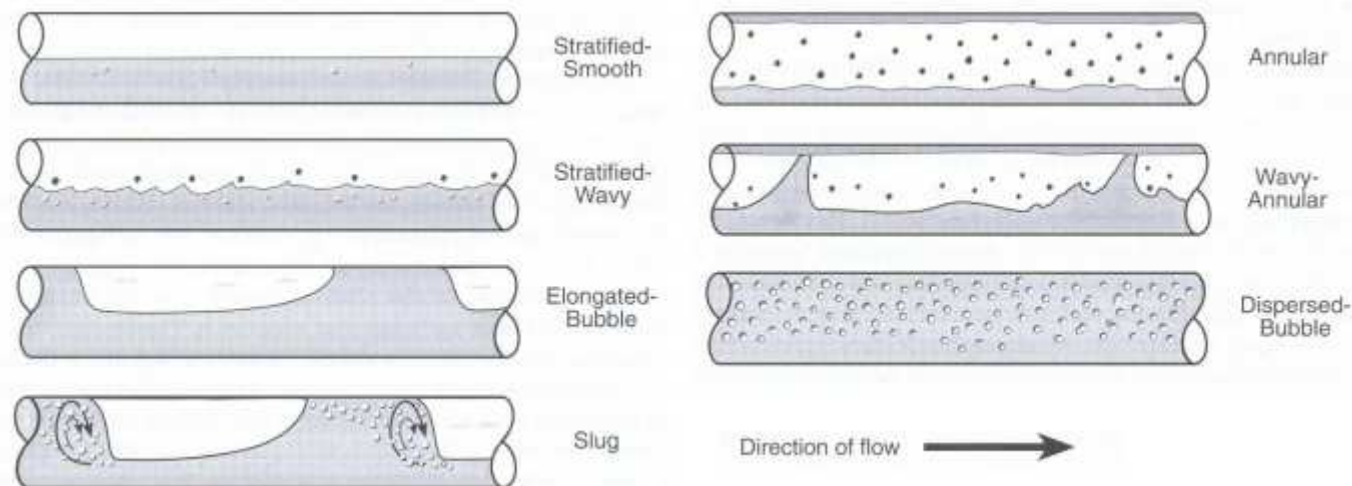


Figura 3: Padrões de escoamento para mistura gás-líquido em escoamento horizontal. Fonte: Shoham, 2006.

Comparado aos outros padrões de escoamento, este possui baixa velocidade, fazendo com que haja separação por meio de uma interface lisa entre a fase líquida da fase gasosa, o líquido por possuir densidade menor do que o ar fica na parte inferior, respectivamente o gás ocupa a parte superior.

Escoamento Estratificado Ondulado (Stratified Wavy Flow)

Ocorre quando temos um aumento da velocidade do gás no escoamento estratificado, fazendo com que ocorra oscilações na interface gerando assim pequenas ondas no escoamento, essas ondas não atingem a superfície do tubo.

Escoamento de Bolhas Alongadas (Elongated-Bubble)

Com o aumento da vazão do gás, formam-se bolhas maiores e alongadas. Pela diferença entre as velocidades da fase líquida e gasosa ocorre formação de pistões de líquido. As bolhas como o desenho ilustra tendem a ocorrer da metade para cima da tubulação.

Escoamento em Golfadas (Slug Flow)

Similar ao escoamento de bolhas alongadas, o escoamento em golfadas ocorre com o aumento simultâneo da vazão da fase líquida, fazendo com que periodicamente a parte superior do duto esteja em contato com o líquido e em seguida entre em contato com o gás, gerando assim um regime intermitente.

Escoamento Anular (Annular Flow)

Ocorre em altas velocidades da fase gasosa, havendo concentração do mesmo no centro do tubo e formando uma camada de líquido que estará totalmente em contato com as paredes do tubo. Devido a força gravitacional a camada inferior do tubo terá uma espessura de líquido maior. Frequentemente pode-se encontrar gotículas líquidas dispersas na fase gasosa.

Escoamento Anular Ondulado (Wavy-Annular Flow)

Diferentemente do escoamento anular, este apresenta ondulações capazes de atingir o topo do duto.

Escoamento em Bolhas Dispersas (Dispersed Bubble Flow)

Esse tipo de escoamento bolhas tendem a escoar na parte superior do tubo devido ao empuxo da fase líquida. Estas bolhas podem apresentar-se na forma esférica com pequenos diâmetros ou em tamanhos maiores com formas elípticas, quanto mais elevado for a vazão da fase líquida, mais homogênea será a distribuição das bolhas. Para que ocorra esse tipo de escoamento as duas fases devem escoar na mesma velocidade.[3]

2.4 Canal acústico

Pode-se definir um canal acústico como um meio de transmissão pelo qual sinais portadores de informação viajam entre um emissor e um receptor. No presente trabalho, emissores e receptores serão PZTs, que geram ondas acústicas que se propagarão na água no escoamento monofásico e água-ar no escoamento bifásico e em alguns casos estudados devem atravessar uma parede fina de 2,73mm de acetal. Serão utilizados dois PZTs que serão acoplados diametralmente em uma luva cujo material será acetal.

3 Projeto das Peças e Bancada Experimental

Neste capítulo, serão apresentadas as três configurações que serão utilizadas para realização do projeto e suas respectivas modelagens, juntamente com a apresentação da seção de testes e montagem geral da bancada experimental. Em todos os casos, serão utilizados dois PZTS, diametralmente alinhados. O local onde serão posicionados em cada caso possuem a mesma geometria. Para a realização do projeto, três luvas de acetal foram modeladas com intuito de simular diferentes hipóteses no contato dos elementos piezoelétricos. Todos os desenhos foram projetados com a utilização do programa computacional SolidWorks. Em anexo serão adicionadas todas as peças em 2D modeladas durante esse projeto.

3.1 Caso 1

A primeira luva foi modelada para que não houvesse contato direto entre o fluido e os transdutores acústicos. Para isso, uma espessura de 2,42 mm de parede da luva foi mantida na peça em ambos os lados. Nessa configuração, será aplicado um adesivo no local onde serão introduzidos os transdutores para garantir a estabilidade e posicionamento dos mesmos.

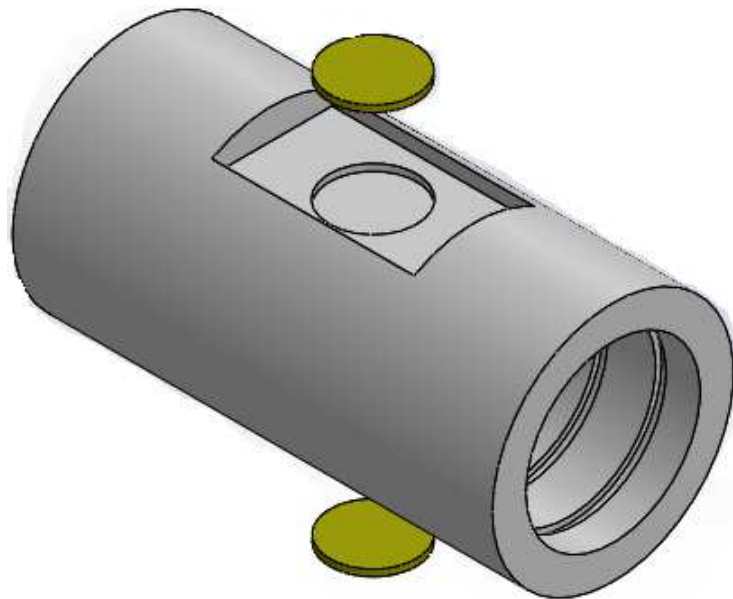


Figura 4: Vista explodida montagem do caso 1

3.2 Caso 2

Na segunda luva substituiremos o uso do adesivo utilizado no primeiro caso por um suporte que exercerá uma pequena pressão, pressionando os transdutores. Essa pressão será suficientemente baixa para que não afete os resultados, apenas sendo responsável para torna-los fixos e estáveis em relação a centralização e posicionamento.

Para isso, foi-se necessária a modelagem de um suporte que respeitasse a condição da pressão, logo a geometria circular realizada no suporte para entrar em contato com os transdutores demonstrou ser a mais adequada devido a duas condições, a primeira foi pela necessidade de um espaço onde os eletrodos pudessem passar, a segunda foi para distribuir igualmente a pressão entre toda superfície do transdutor.

Em relação a luva dessa segunda configuração, a espessura de 2,42 mm foi mantida e apenas pequenas modificações foram feitas em relação a primeira como pode-se observar na figura abaixo, de modo que fosse possível o acoplamento do suporte na luva.

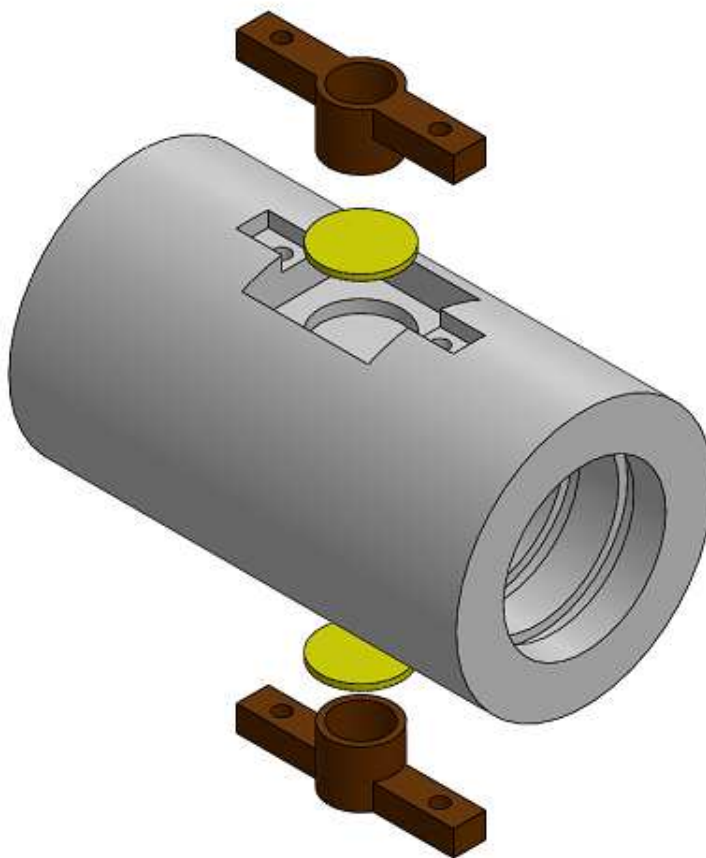


Figura 5: Vista explodida da montagem do caso 2

3.3 Caso 3

A terceira luva possui uma geometria um pouco mais complexa pois nesse caso nosso interesse é manter os PZTs em contato com o fluido. Portanto, foi-se necessário modelar uma peça vazada onde também será acoplado um apoio similar ao caso 2 pensando na força que a pressão do escoamento do fluido fará ao entrar em contato com os elementos piezoelétricos. A geometria circular do contato entre PZT e apoio será mantida e introduziremos uma interferência capaz de resistir a pressão do fluido e estabilizar estaticamente os transdutores. Para modelagem dessa peça foi preciso implementar um o-ring extra entre o transdutor e a peça, para impedir que houvesse vazamento.

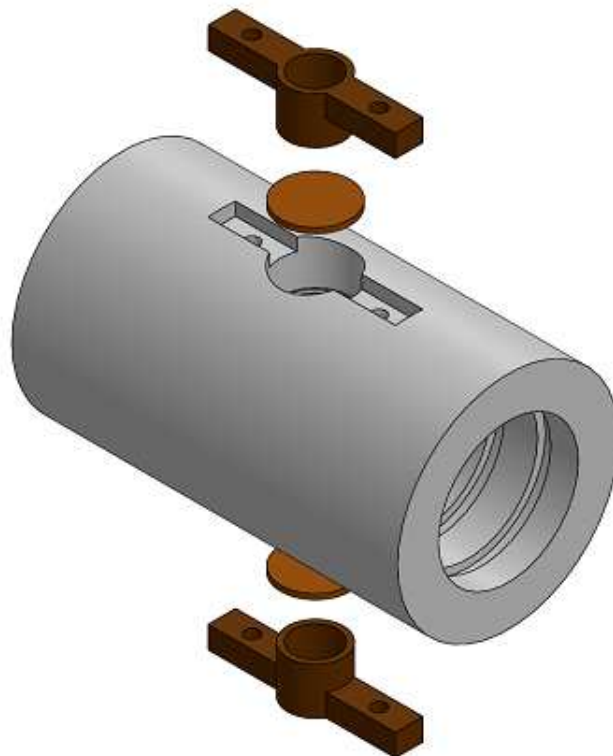


Figura 6: Vista explodida da montagem do caso 3

3.4 Bancada Experimental

Para realização do experimento foi utilizado uma bancada experimental já existente no Laboratório de Engenharia de Fluidos. Essa bancada experimental é utilizada para diversos experimentos, logo foram feitas pequenas modificações. A modelagem das peças apresentadas foi uma delas, a fim de adaptar a bancada ao respectivo projeto, possibilitando assim as medições de interesse. Os líquidos utilizados para realização do experimento foram: água em escoamento monofásico. O fluido escoava por uma tubulação de acrílico de diâmetro interno de 40mm, com 5mm de espessura de parede. A sessão possuía um comprimento total de aproximadamente 17,7m e era apoiada sobre uma estrutura montada com perfis de alumínio, a fim de garantir rigidez e alinhamento necessário para o experimento. Ao final da sessão a água retornava ao tanque. As figuras ilustram, respectivamente, um desenho 3D e uma foto da seção de testes, com intuito de uma visualização mais clara do experimento.

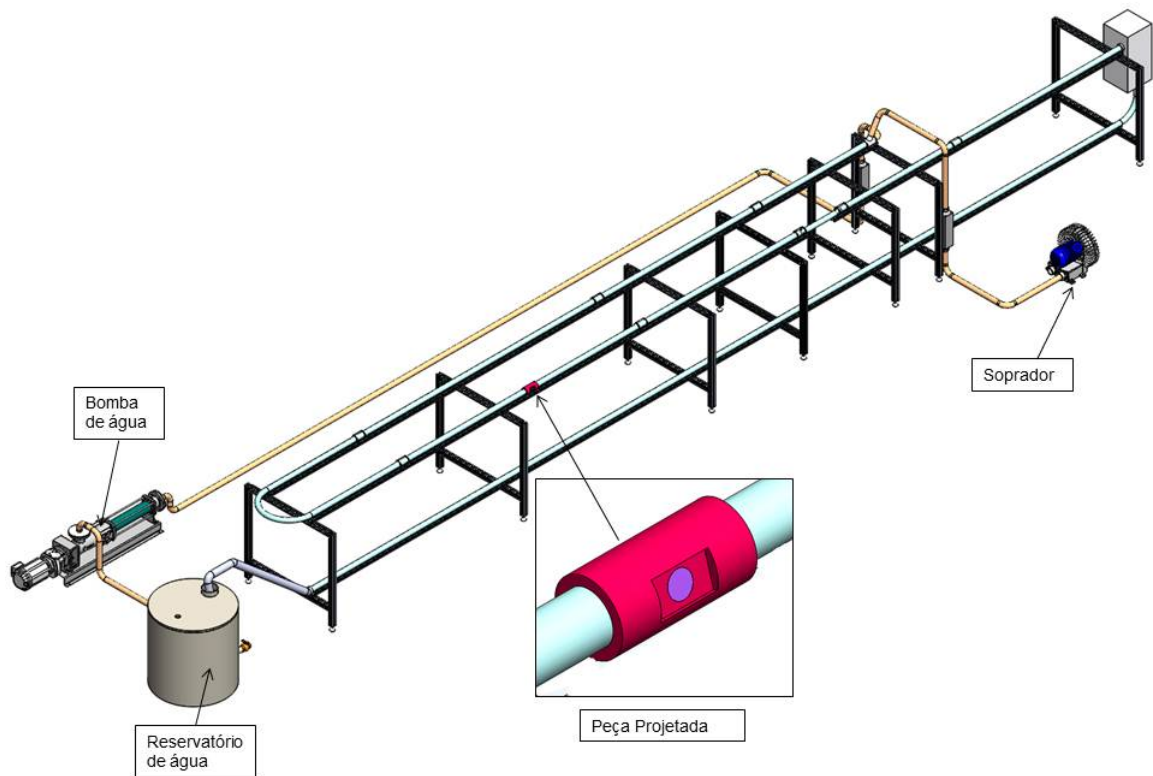


Figura 7: Desenho tridimensional da seção de testes. Adaptado de FERNANDES, Leonardo Soares 2017



Figura 8: Vista lateral da bancada

A figura 8 representa a bancada utilizada para os três tipos de casos estudados nesse projeto.

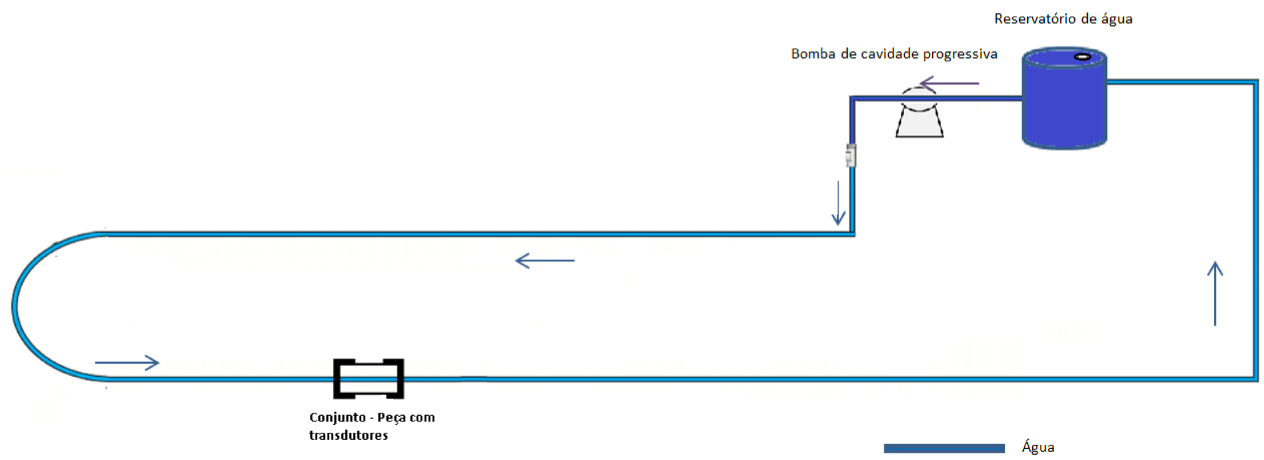


Figura 9: Bancada 2D

A figura 9 representa um desenho 2D da bancada experimental com os respectivos fluxos de escoamento.

3.4.1 Reservatório do líquido

Para garantir que houvesse o escoamento completo dos fluídos entre os dutos de acrílico foi-se necessário a utilização de um tanque de armazenamento de líquido, este reservatório possui capacidade máxima de 320L. Para realização de todos os casos que esse projeto visa estudar, 130L já era o suficiente.



Figura 10: Reservatório utilizado no experimento

3.4.2 Bomba de água

Uma bomba de água foi utilizada no experimento para garantir bombeio contínuo, com pressão estável, necessária para deslocar o fluido do reservatório para o sistema de dutos. Um inversor de frequência foi utilizado para regular a vazão desejada.

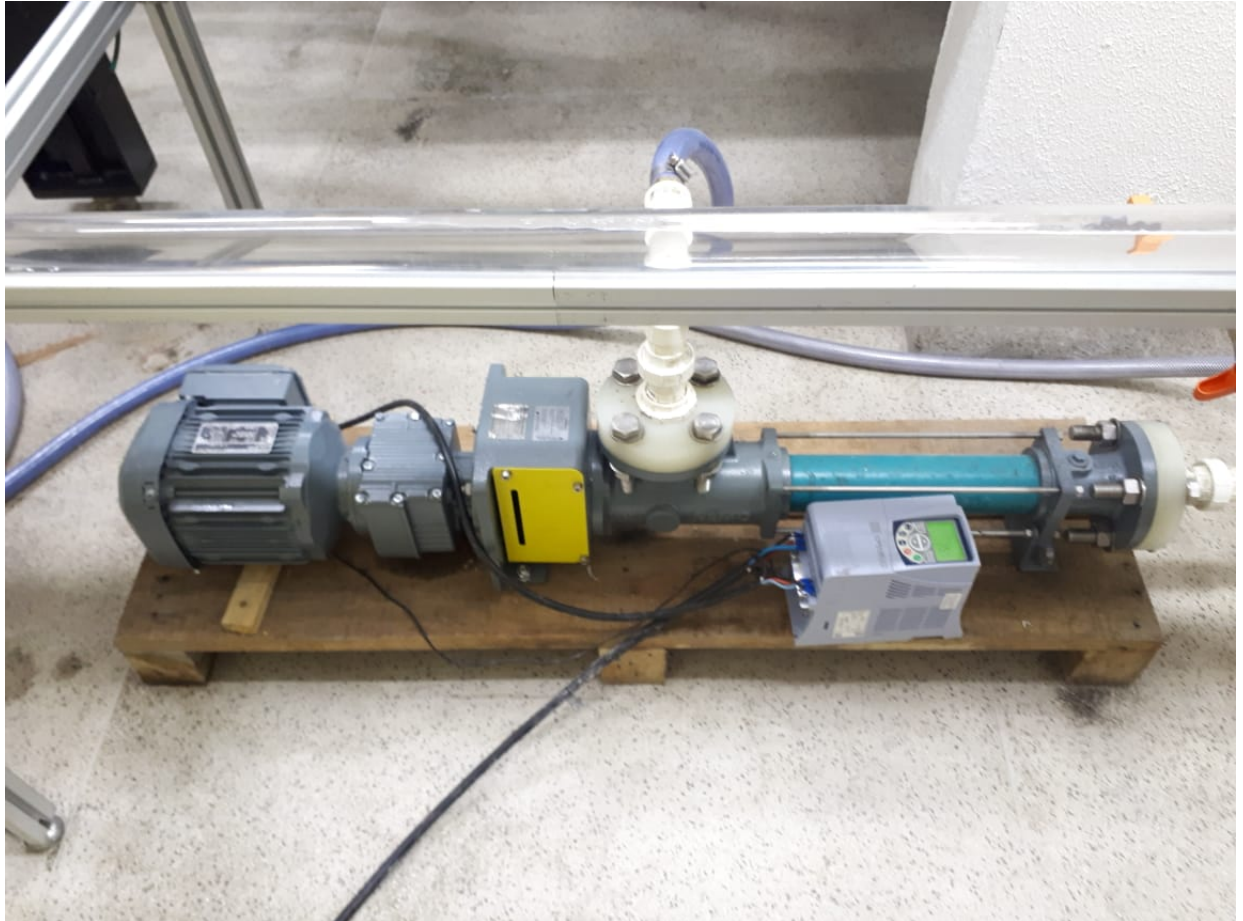


Figura 11: Bomba de água utilizada no experimento

3.4.3 VNA

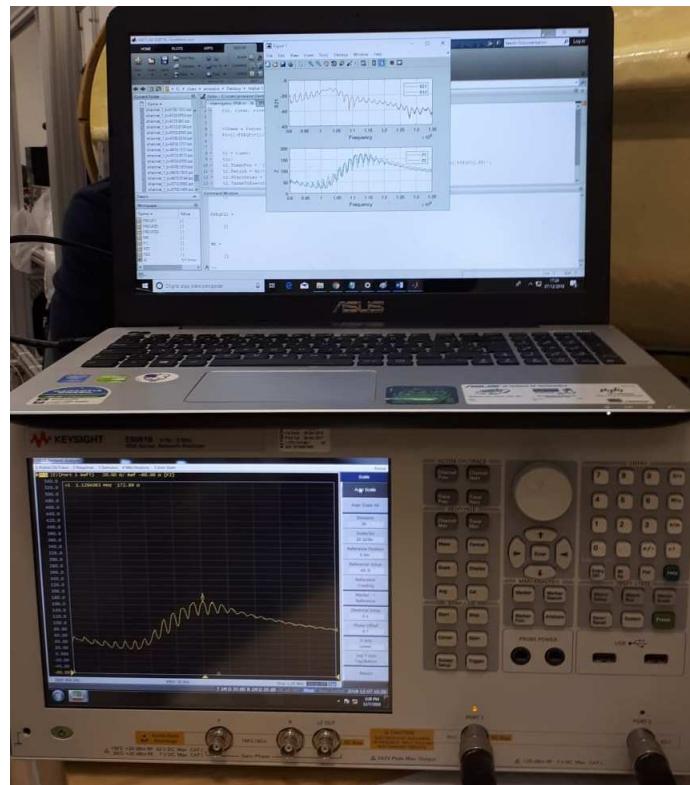


Figura 12: Computador e VNA aqisitando dados durante um experimento

Para medir a grandeza que foi monitorada durante o experimento, utilizou-se um VNA (Analisador vetorial de rede) que é capaz de medir o parâmetro de interesse S_{21} (Coeficiente de transferência de energia) em função de uma frequência. Considerando que a frequência de ressonância do transdutor é 1 MHz, foi selecionado uma faixa de operação entre 900 à 1350 kHz.

Um computador auxiliar, com uma rotina programada no MATLAB foi usado para importar os dados do VNA.

4 Metodologia Experimental

Neste capítulo, serão abordados as metodologias utilizadas para realização do projeto, sendo descritos todos os processos e métodos realizados, desde a montagem do experimento com escoamento monofásico da respectiva aquisição de dados.

4.1 Caso 1

Como citado no item **3.1** utilizou-se um adesivo para fixar os transdutores na peça da configuração 1. O adesivo utilizado foi uma resina EPOX que é desenvolvida para de aplicações acústicas. Suas principais características são: possuir vedação hermética, dissipar calor e alta fixação entre objetos.



Figura 13: Conjunto de transdutores e adesivo

Adhesive Parameters				A4
Data	Manufacturer's Model		code	
	Expected Performance		—	Thermally conductive
Curing	Temperature		°C	150
	Time	Minim.	min	5
		Recom.	hr	N/A
	Part A		ml	23.69
	Part B		ml	1.47
Physical Properties	Viscosity		cP s @23°C	45,000 - 65,000 (5 rpm)
	Glass Transition Temp. (Tg)		°C	≥ 100
	Coefficient of Thermal Expansion	Below Tg	μ10 ⁻⁶ in/in/°C	21
		Above Tg	μ10 ⁻⁶ in/in/°C	95
	Shore D Hardness		—	90
	Lap Shear Strenght		psi @23°C	> 1,656
	Die Shear Strenght		psi @23°C	> 5,100
	Degradation Temperature		°C	425
	Operating Temperature	Continuous	°C	- 55 to 250
Intermittent		°C	- 55 to 350	
Thermal Properties	Thermal Conductivity		W/mK	1.25
Electrical Properties	Dielectric Constant		1KHz	4.95
	Dissipation Factor		1KHz	0.007
	Volume Resistivity		Ohm-cm @23°C	≥ 4.0 x 10 ¹²
Optical Properties	Spectral Transmission	% @23°C		N/A
		% @23°C		N/A
		% @23°C		N/A
	Refractive Index		(uncured)	N/A

Figura 14: Características do adesivo

O adesivo da figura 13 é uma mistura entre dois componentes, para obtê-lo seguiu-se a proporção definida, como indicado na figura 14. Após a mistura, o recipiente foi colocado em uma câmara de vácuo para remoção de bolhas de ar. A fita inserida nos transdutores como mostra na figura 11 foram colados para não haver um possível contato entre o adesivo com a parte superior caso houvesse vazamento durante a colagem. Para garantir a fixação completa, foi preciso utilizar um mecanismo capaz de introduzir tensões compressivas uniformes e iguais para os dois transdutores. Durante esse processo, foram utilizados dois ímãs idênticos(fig 15a), colocados na parte externa da peça e um cilindro de ferro de 39,8mm de diâmetro que foi mantido no furo interno da peça fazendo com que a atração entre os ímãs e o material ferromagnético gerasse as forças necessárias para uma boa fixação.

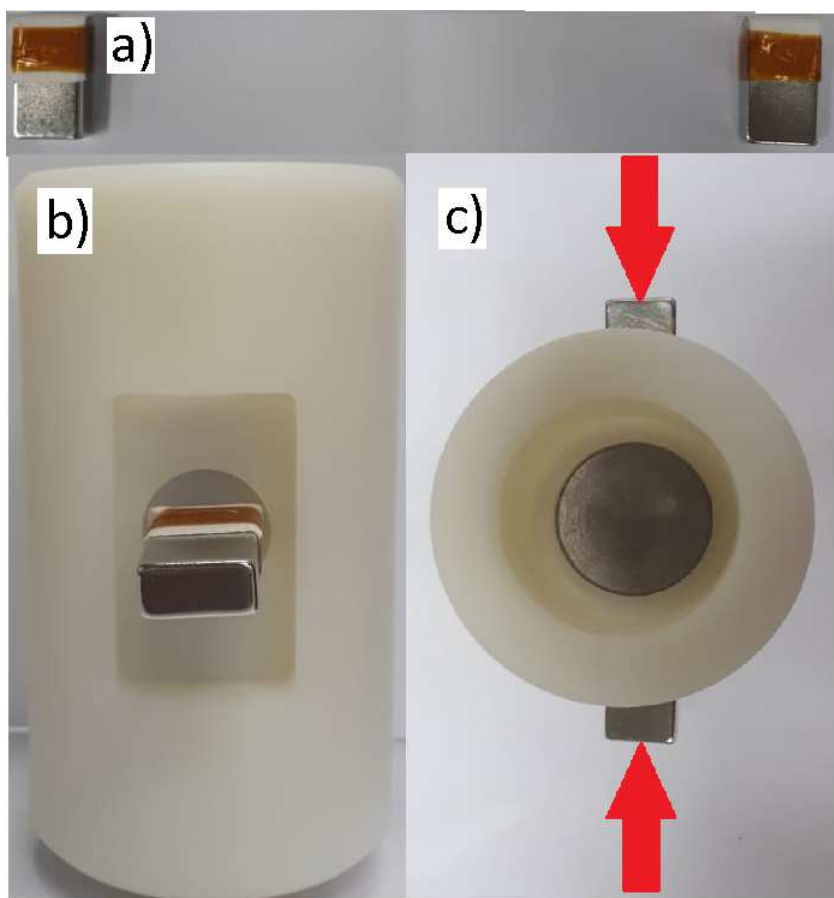


Figura 15: Respectivamente as figuras representam: a)conjunto de ímas; b)vista frontal da montagem; c)vista superior da montagem

A especificação do tempo de cura para o adesivo em polímeros sintéticos na temperatura ambiente é de um dia. Por questões de segurança, deixou-se por 3 dias na configuração apresentada nas fotos acima.

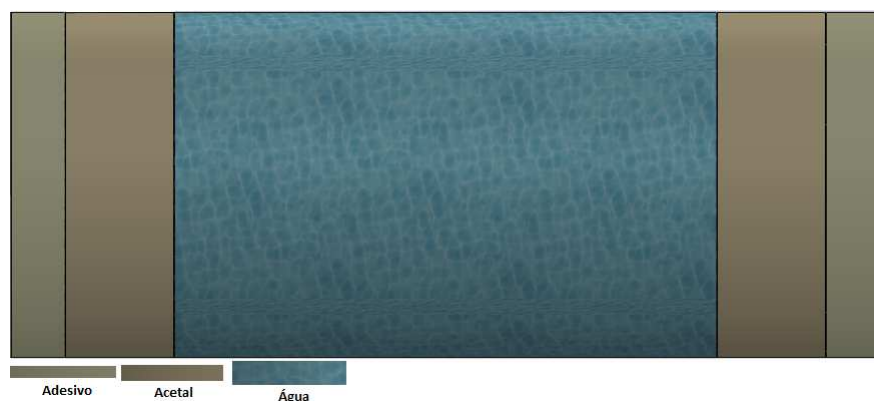


Figura 16: Representação 2D das camadas do caso 1

No primeiro caso, como apresentado na figura 13 tem-se um total de 3 camadas distintas, o adesivo, acetal e água.

4.2 Caso 2

Na segunda configuração, foi necessário a utilização de um gel caçador de impedância, pois a superfície onde os transdutores iriam ser introduzidos apresentaram pequenas rugosidades, ocasionando pequenas bolhas de ar, comprometendo assim os resultados do experimento.

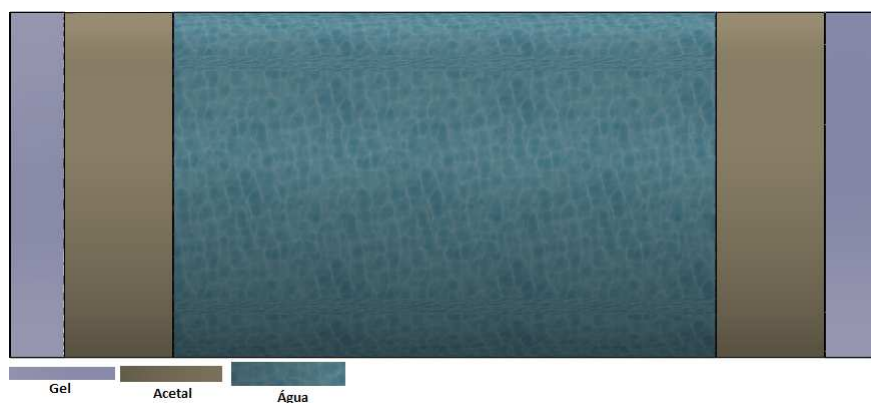


Figura 17: Representação 2D das camadas do caso 2

O segundo caso é semelhante ao primeiro em número de camadas distintas, porém com uma outra composição, sendo composta por gel, acetal e água.

4.3 Caso 3

O objetivo da terceira configuração é o contato direto entre o fluido e os transdutores. Para isso, apenas a utilização do suporte e a geometria vazada da peça são necessários para atender o objetivo dessa configuração.



Figura 18: Representação 2D das camadas do caso 3

O terceiro caso possui apenas uma camada entre os transdutores.

4.4 Montagem final da peças

A seguir serão apresentadas as três configurações em sua fase final de montagem. É importante observar que no primeiro e no segundo caso, tem-se área grande o suficiente para aplicação dos eletrodos nos transdutores. No terceiro caso, essa área é muito restrita, logo a projeção de um apoio dessa geometria permitiu que os eletrodos fossem facilmente conectados aos transdutores.



Figura 19: Montagem final dos casos

5 Procedimento Experimental

5.1 Estabilização do sistema

Para deixar o sistema estável, ligava-se a bomba com a frequência máxima definida para esse projeto e esperava-se cerca de 1 minuto até que os tubos estivessem completamente cheios de água. Á partir desse instante, o sistema já estava adequado ao começo das aquisições de dados.

5.2 Aquisições de dados

A tabela 1 mostra todas as vazões que foram analisadas durante o experimento. Como mencionado em 3.4.2, foi realizado uma calibração da bomba e a partir das frequências utilizada foi possível determinar tanto a vazão quanto a velocidade do escoamento. Foi desenvolvido uma rotina no programa computacional MATLAB para aquisitar os dados de interesse. A programação foi feita para a cada quarenta segundos extrair os dados de interesse, essa rotina durava 400 segundos totalizando 10 aquisições para cada vazão analisada.

	Rotação[Hz]	Vazão[m ³ /h]	Vsl[m/s]
1	0	0	0
2	15	1,34	0,30
3	19,4	1,74	0,38
4	23,8	2,13	0,47
5	28,3	2,53	0,56
6	32,7	2,93	0,65
7	37,1	3,32	0,73

Tabela 1: Valores utilizados da calibração da bomba.

A figura 20 representa um modelo do tipo escada, usado para analisar dados indo do mínimo para o máximo e voltado gradativamente neste caso para a primeira vazão, com isso mede-se duas vezes cada vazão gerando assim um menor desvio padrão. As vazões utilizadas na bomba de água foram as mesmas para todos os três casos. A vazão inicial era de $1,34 \text{ m}^3/\text{h}$ e crescimentos de $0,40 \text{ m}^3/\text{h}$ eram realizados a cada 6 minutos até atingir a vazão máxima de $3,32 \text{ m}^3/\text{h}$, após essa vazão havia uma redução de vazão de $0,40 \text{ m}^3/\text{h}$ até atingir a vazão inicial. Quando o sistema terminava de adquirir os dados da vazão inicial novamente era imposta a vazão máxima, com isso cada vazão era medida duas vezes durante o experimento. Como a mudança da vazão era feita manualmente, foram descartados a fim de reduzir erros, as duas primeiras aquisições de cada vazão.

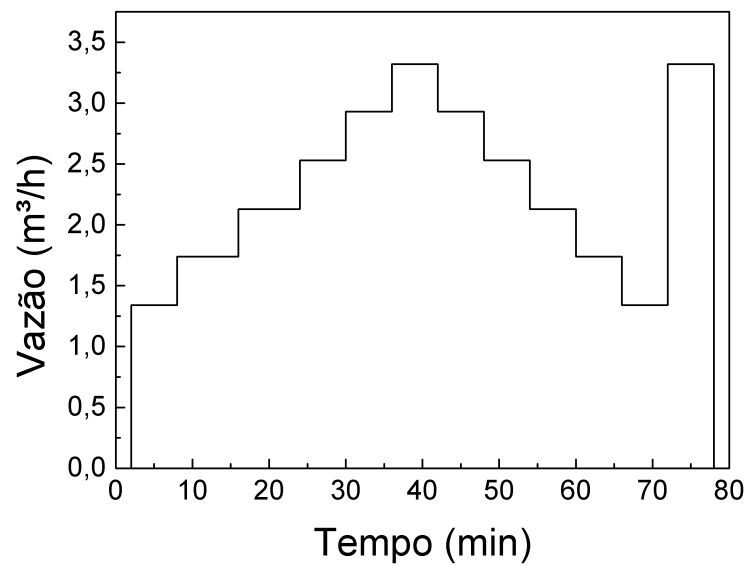
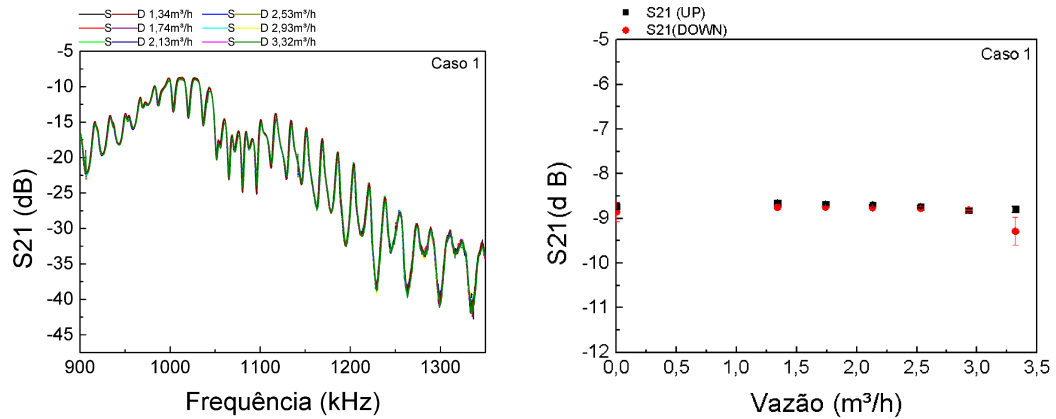


Figura 20: Variação da vazão durante o experimento.

6 Resultados

Nessa seção serão apresentados os resultados para cada uma das três configurações estudadas. Primeiramente, serão apresentados os resultados dos experimentos sem partículas no fluido, apenas água destilada. Em seguida, serão apresentados os resultados dos experimentos com a utilização de partículas adicionadas à água.

6.0.1 Caso 1



(a) Coeficiente de transferência de energia(S_{21}) em função da frequência.

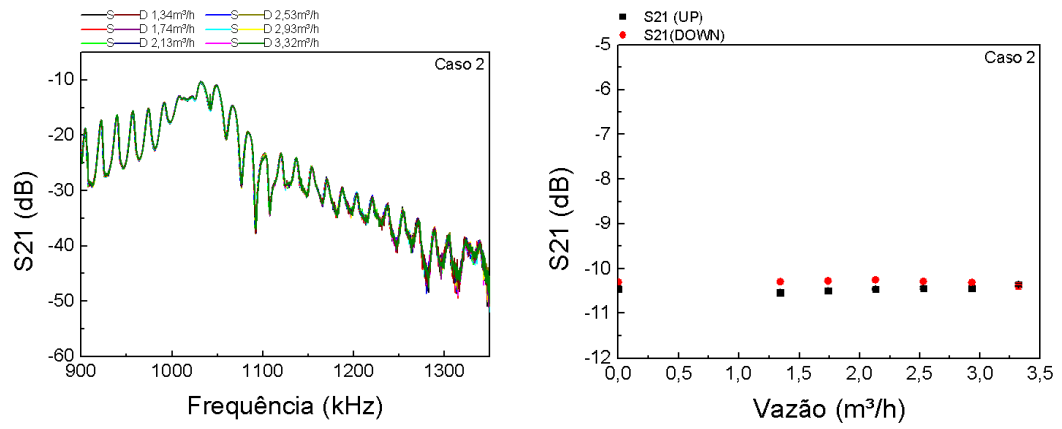
(b) Coeficiente de transferência de energia(S_{21}) em função da vazão.

Figura 21: Gráficos do primeiro caso

A figura 21(a) é um gráfico de S_{21} em função da frequência, essa faixa de frequência como citado em **3.4.3** é a faixa estabelecida para visualização no VNA. S_{21} máximo está aproximadamente em 1MHz, sendo esta a frequência de ressonância do transdutor utilizado. As análises serão na faixa estabelecida pelo VNA.

A figura 21(b) indica que S_{21} apresenta baixas variações com as vazões utilizadas, tendo um comportamento praticamente constante, na faixa de -8,6 dB.

6.0.2 Caso 2



(a) Coeficiente de transferência de energia(S_{21}) em função da frequência.

(b) Coeficiente de transferência de energia(S_{21}) em função da vazão.

Figura 22: Gráficos do segundo caso

A figura 22(a) indica que o máximo está aproximadamente na frequência de ressonância do transdutor (1MHz) e não apresenta mudanças na curva em relação as vazões.

A figura 22(b) indica que S_{21} apresenta baixas variações com as vazões utilizadas, tendo uma comportamento praticamente constante, na faixa de -10,6 dB.

6.0.3 Caso 3

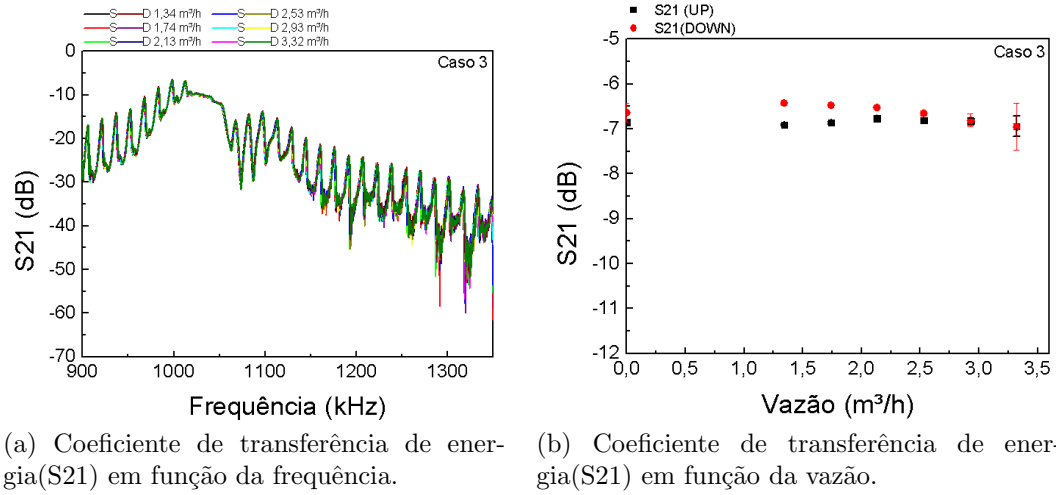


Figura 23: Gráficos do terceiro caso

A figura 23(a) indica que o máximo está aproximadamente na frequência de ressonância do transdutor (1MHz) e não apresenta mudanças na curva em relação as vazões.

A figura 23(b) indica que S_{21} apresenta baixas variações com as vazões utilizadas, tendo uma comportamento praticamente constante, na faixa de -6,7 dB.

6.1 Comparativo entre os resultados de cada caso

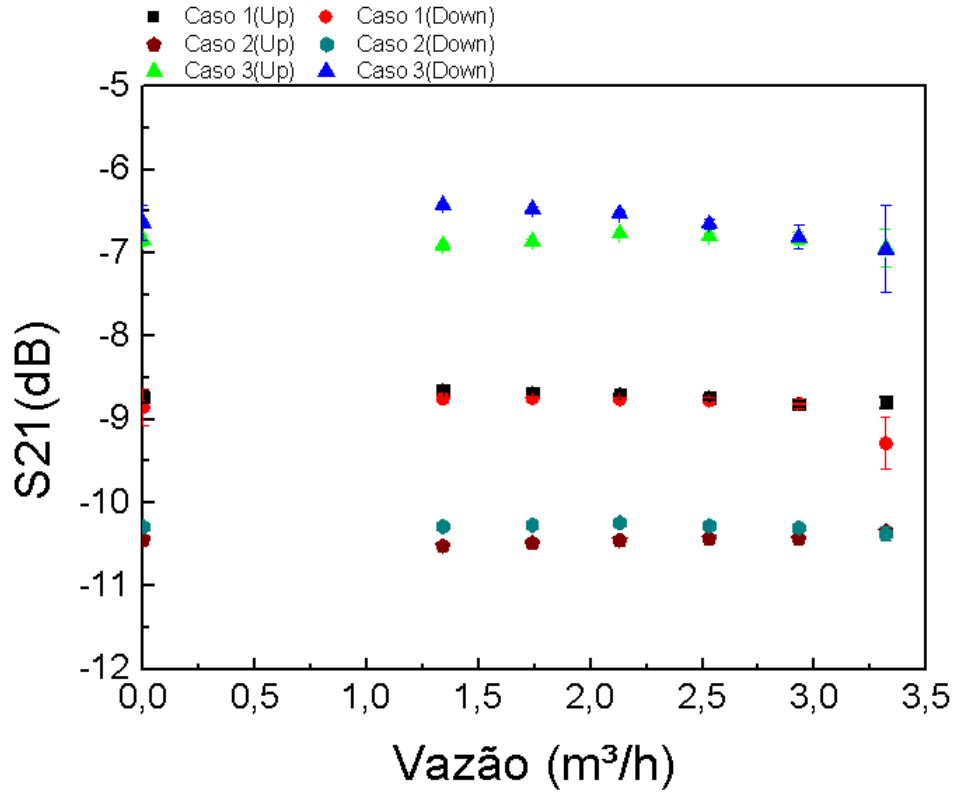


Figura 24: Coeficiente de transferência de energia(S_{21}) em função da vazão para os três casos analisados.

A partir da figura 24 foi possível identificar três curvas de S_{21} em função da vazão. A curva com maior transferência de energia é a do terceiro caso, 2,2 dB abaixo esta a curva do primeiro caso e a curva do caso 2 se encontra à 3,9 dB abaixo da curva de maior transferência de energia.

Para uma melhor análise uma tabela será adicionada convertendo dB para a razão de energia transferida entre os transdutores.

	dB[Hz]	Razão entre energia transferida	Percentual
Caso 1	-8,6	0.138038	13,8
Caso 2	-10,6	0.0870964	8,7
Caso 3	-6,7	0.213796	21.4

Tabela 2: dB, Razão entre energia transferida e percentual dessa energia para os três casos analisados.

6.1.1 Utilização das partículas

A fim de analisar a influência do uso de partículas no escoamento, para cada caso analisado, foram adicionadas apenas 2g de partículas de poliestireno dopada com rodamina ao escoamento. Por apresentar baixíssimas variações na transferência de energia no primeiro e no segundo caso, será apresentado apenas os resultados obtidos no terceiro caso.

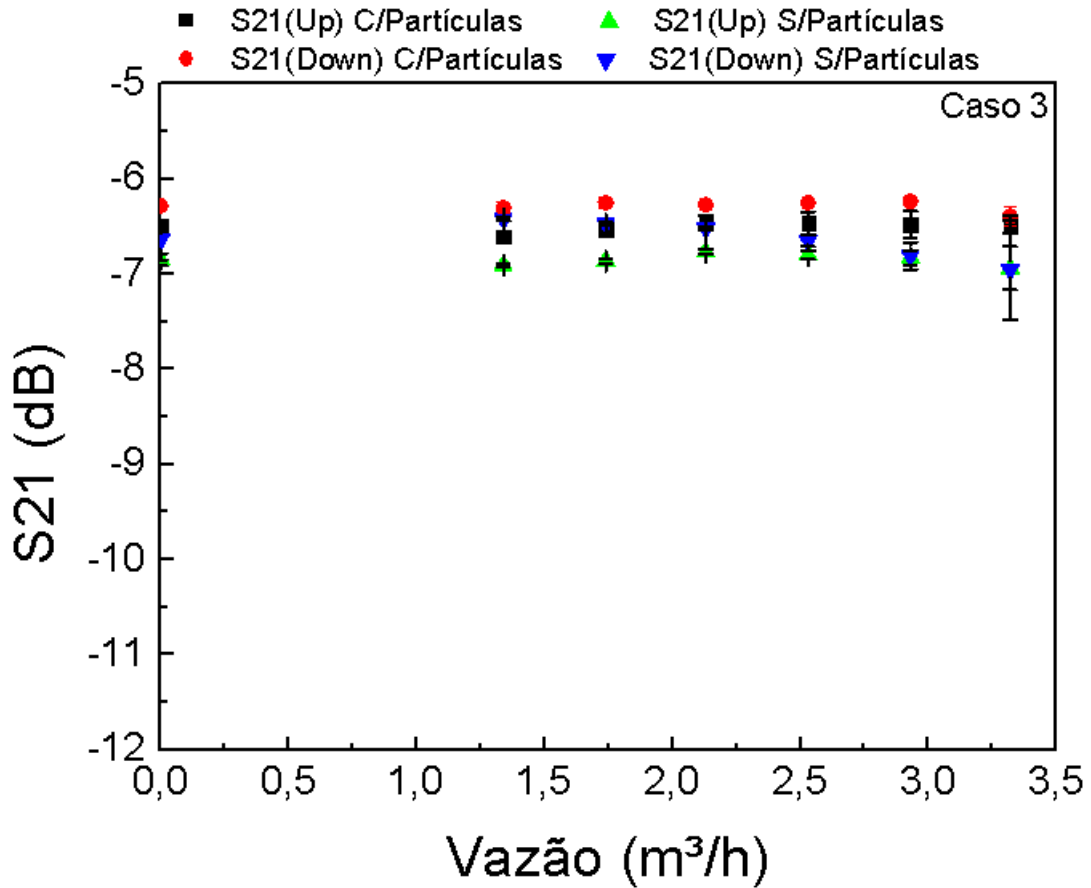


Figura 25: Coeficiente de transferência de energia(S21) em função da vazão.

A figura 24 mostra o efeito da adição de partículas no caso onde houve uma maior sensibilidade na transferência de energia. É possível notar uma leve tendência a uma maior curva S21 com a utilização das partículas.

6.1.2 Foto das partículas no escoamento



Figura 26: Imagem das partículas em uma seção transversal do tubo

A partir da técnica de Velocimetria por imagem de partículas(PIV) foi possível obter uma imagem que representassem as partículas no escoamento. Em 130 litros de água tinham em torno de 2g de partículas traçadoras.

7 Conclusão

Neste trabalho, a transferência de energia entre transdutores acústicos em um escoamento monofásico em função da vazão foi estudado. Verificou-se que em todos os casos analisados, na faixa de 0 à 3,32 m³/h, o coeficiente de transferência de energia não apresenta variação relevante.

Apesar do coeficiente de transferência de energia não apresentar sensibilidade às variações de vazões, foi possível identificar uma grande diferença entre os casos. A terceira configuração apresentou o maior valor de S21, correspondendo a um percentual de energia transferida de 21,4%. Isto indica que nas outras camadas houveram atenuações adicionais. O primeiro caso apresentou um percentual de energia transferida de 13,8% e o segundo caso obteve o menor percentual, com 8,7%.

Como o primeiro e o segundo caso possuem uma camada de acetal com mesmo comprimento, é possível afirmar que o gel utilizado no caso 2 possui maiores atenuações se comparado ao adesivo do caso 1.

7.1 Proposta para desenvolvimento do projeto

Uma possível proposta para continuação desse projeto seria trabalhar com maiores vazões e verificar como S21 se comporta com a nova faixa de vazões estabelecida. Outra possível proposta seria usar luvas com outros materiais e verificar como isso afeta a transferência de energia.

8 Bibliografia

Nessa seção serão apresentadas todas as referências bibliográficas utilizadas nesse projeto.

- [1] PEREIRA, Antônio Henrique Alves. Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades. São Carlos: ATCP Engenharia Física, 2010.
- [2] FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T. Introdução À Mecânica Dos Fluidos . Grupo Gen-LTC, 2000.
- [3] Cozin Cristiane. Padrões de escoamento no escoamento bifásico de líquido-gás
- [4] NADER, Gilder. Desenvolvimento de técnicas de caracterização de transdutores piezoelétricos. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [5] FERNANDES, Leonardo Soares. Medição do Campo de Velocidade do Líquido no Escoamento Bifásico, Intermitente, em Duto Horizontal, Utilizando Velocimetria Estereoscópica. 2017. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

9 Anexo

Em anexo serão apresentadas as peças em 2D dos casos analisados.

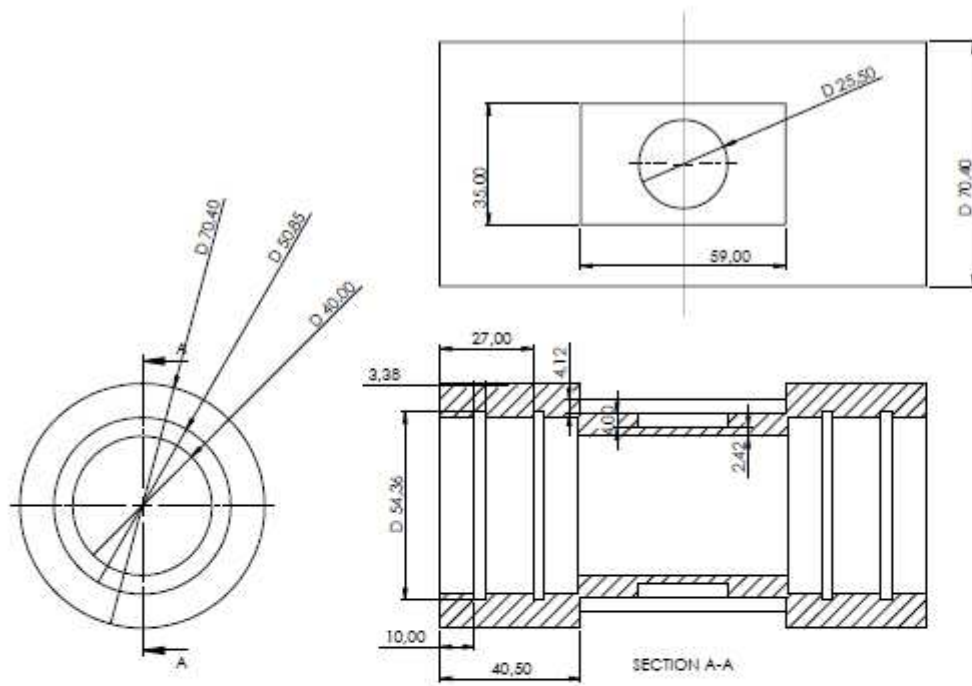


Figura 27: Desenho 2D da primeira peça

As três vistas da peça projetada para o primeiro caso, contendo a vista frontal, lateral e superior.

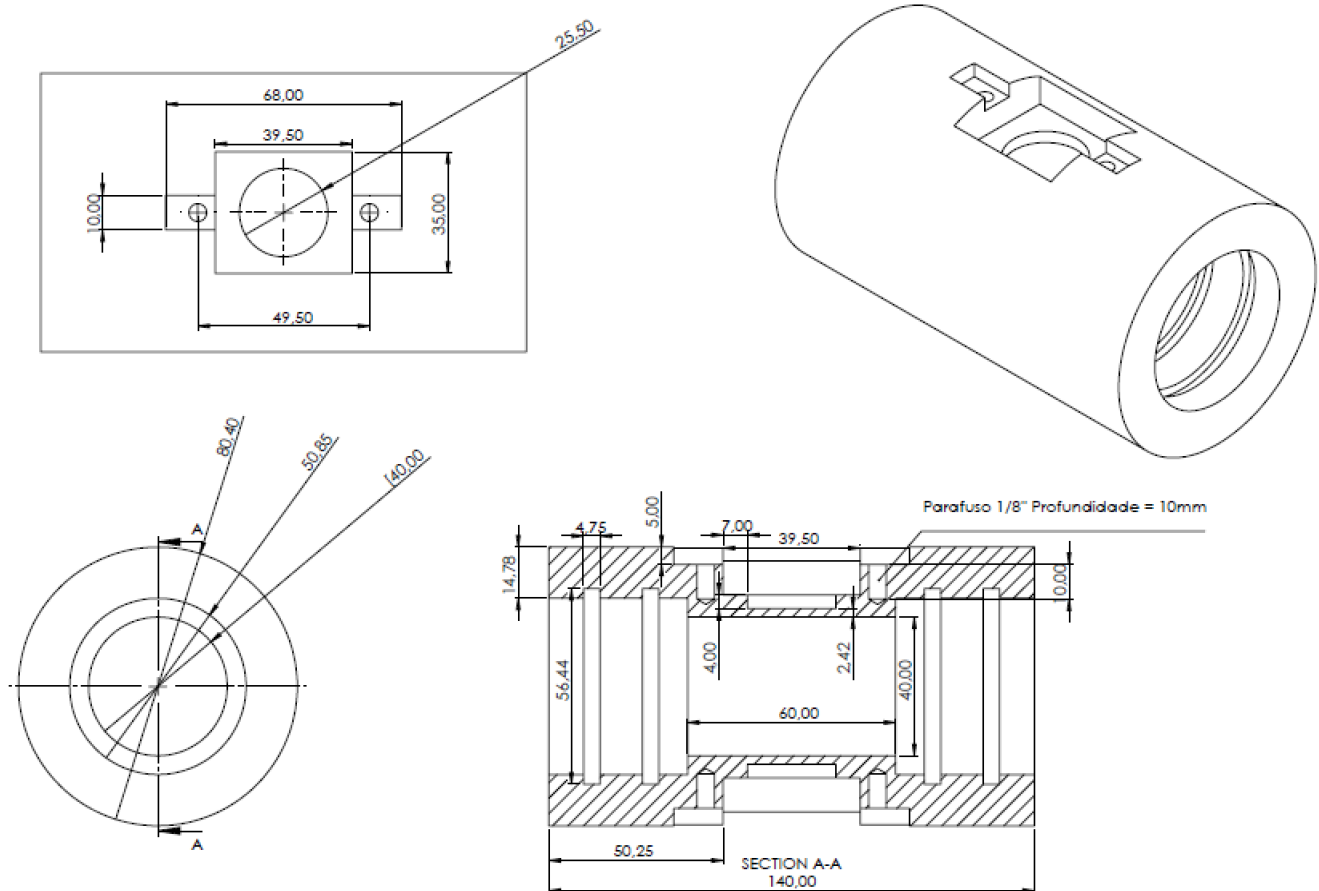


Figura 28: Desenho 2D da segunda peça

Para o segundo caso temos uma vista frontal, lateral e superior. Para uma melhor visualização foi adicionada uma vista isométrica.

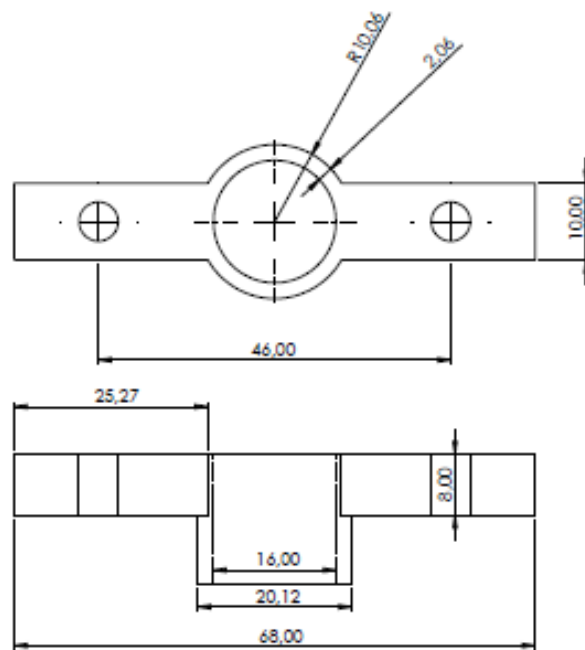


Figura 29: Desenho 2D do apoio da segunda peça

Apoio projetado para o segundo caso, com vista frontal e superior.

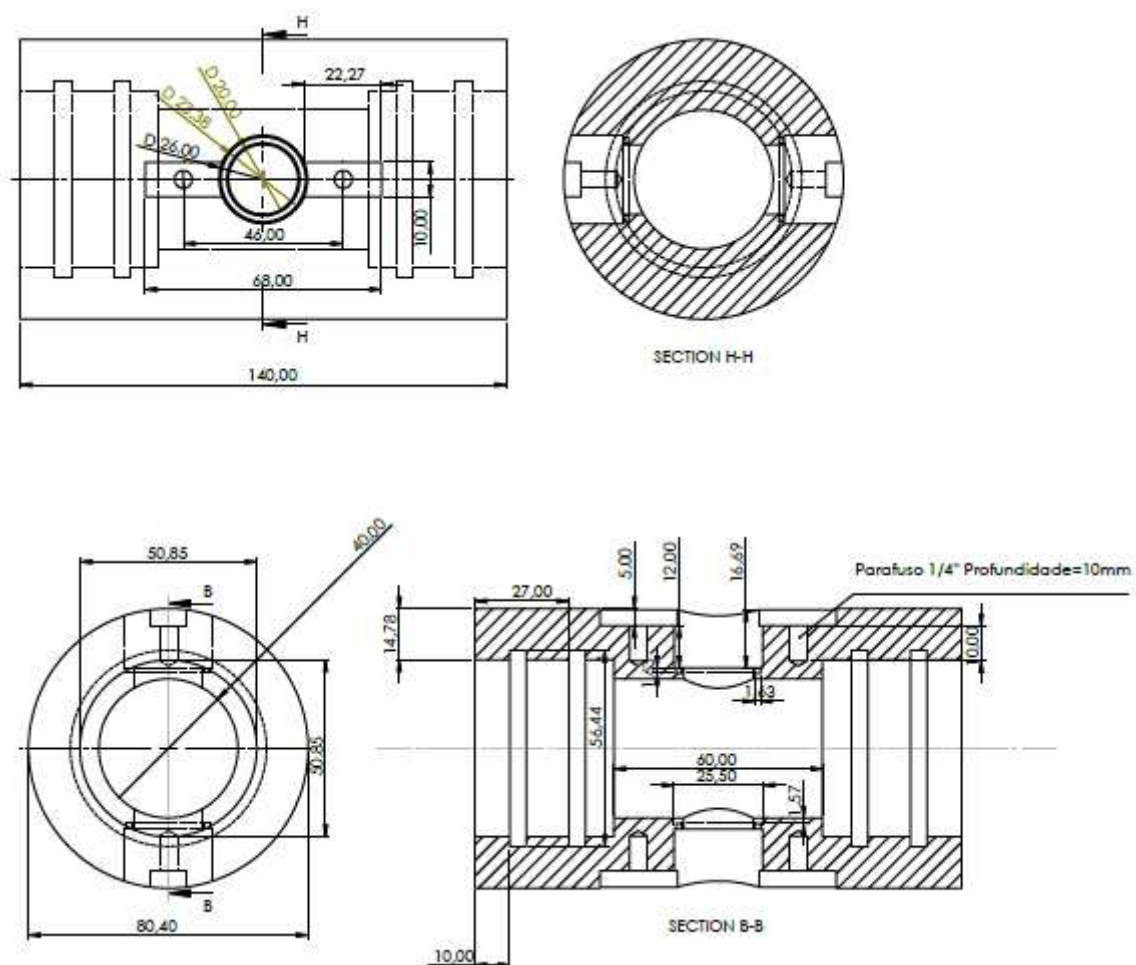


Figura 30: Desenho 2D da terceira peça

Foi inserido a vista frontal, lateral e superior da terceira luva projetada, para auxiliar foi adicionada uma vista de seção.

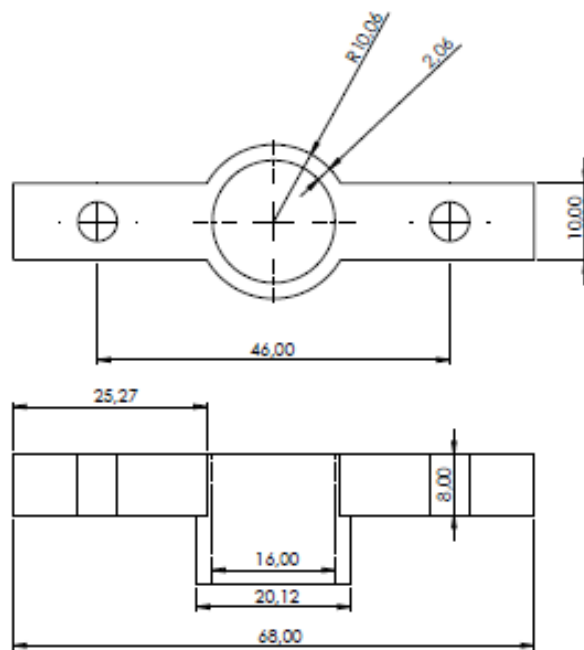


Figura 31: Desenho 2D do apoio da terceira peça

Apoio projetado para o terceiro caso, com vista frontal e superior