



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ESTUDO DO MÓDULO DISCRIMINADOR E SENSORES DE CORRENTES PARASITAS PARA UM PIG

Victor Hugo Cid Pereira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Fernando Castro Pinto

Gabriela Ribeiro Pereira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ



ESTUDO DO MÓDULO DISCRIMINADOR E SENSORES DE CORRENTES
PARASITAS PARA UM PIG

Victor Hugo Cid Pereira

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovada por:

Prof. Fernando Castro Pinto, Dr.Ing.

Prof. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

Prof. Fernando Pereira Duda, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

Cid Pereira, Victor Hugo

Estudo do módulo discriminador e sensores de correntes parasitas para um PIG/ Victor Hugo Cid Pereira. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2019.

XIII, 77 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Fernando Castro Pinto

Gabriela Ribeiro Pereira

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Mecânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 57 – 59.

1. PIG. 2. Correntes Parasitas. 3. Pigging. 4. Eddy Current. 5. Ensaios não destrutivos. I. Castro Pinto, Fernando *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia Mecânica. III. Estudo do módulo discriminador e sensores de correntes parasitas para um PIG.

Agradecimentos

Primeiramente a toda minha família que de longe ou de perto apoiou durante essa jornada.

Aos meus orientadores Gabriela e Fernando que toparam esse projeto que passou entre as duas áreas.

Aos meus chefes César e Vitor, que me deram a oportunidade de trabalhar nesse projeto.

E a toda equipe do END, que me ajudou demais em várias etapas desse projeto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

ESTUDO DO MÓDULO DISCRIMINADOR E SENSORES DE CORRENTES PARASITAS PARA UM PIG

Victor Hugo Cid Pereira

Fevereiro/2019

Orientadores: Fernando Castro Pinto

Gabriela Ribeiro Pereira

Programa: Engenharia Mecânica

A forma mais segura e eficiente de transportar um fluido é através de dutos e estes, após serem instalados precisam de verificação periódica para que não haja nenhum acidente e por consequência, uma pausa na produção. A forma mais utilizada para inspecionar dutos é a tecnologia de PIG.

O PIG é uma ferramenta que passa pelo interior de uma tubulação com objetivo de limpar suas paredes ou fazer algum tipo de inspeção, ele pode se locomover pela impulsão do fluido, tracionada ou por motor e pode usar diferentes técnicas de inspeção.

Dessa forma esse projeto faz o estudo para viabilizar a construção de um módulo para um PIG que usará como técnica de inspeção a técnica de correntes parasitas. E também a fabricação dos sensores que serão acoplados à esse módulo.

Para isso, na parte mecânica, foi feito um estudo dos esforços que esse módulo suportará com os cálculos e simulações relacionadas. No que se refere à técnica de inspeção utilizada, foram feitos os primeiros testes necessários para a escolha da melhor geometria da sonda, incluindo dimensões e número de voltas.

Como resultado, chegou-se as dimensões e materiais ideais. E os sensores tiveram sucesso na primeira fase de testes podendo ir para novos testes da geometria final.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer

STUDY OF THE DISCRIMINATOR MODULE AND EDDY CURRENTS
SENSORS FOR A PIG

Victor Hugo Cid Pereira

February/2019

Advisors: Fernando Castro Pinto

Gabriela Ribeiro Pereira

Department: Mechanical Engineering

The safest and most efficient way of transporting a fluid is through ducts, and these, after being installed, need to be checked periodically so that there is no accident and therefore a pause in production. The most used way to inspect pipelines is the pig technology.

In this way this project makes the study to make feasible the construction of a module for a PIG that will use as technique of inspection the technique of eddy currents. And also the fabrication of the sensors that will be coupled to this module.

For this, in the mechanical part, a study was made of the efforts that this module will support with the calculations and related simulations. With regard to the inspection technique used, the first tests necessary to choose the best geometry of the probe were made, including dimensions and number of turns.

For this, in the mechanical study, an analysis was made of the efforts that this module will support with the calculations and related simulations. With regard to the inspection technique used, the first tests necessary to choose the best geometry of the probe were made, including dimensions and number of turns.

As a result, we arrived at the dimensions and material ideas. And the sensors were successful in the first phase of testing and could go to new tests of the final geometry.

Sumário

Agradecimentos	v
Lista de Figuras	x
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Correntes Parasitas	3
2.1.1 Princípios do ensaio por correntes parasitas	3
2.1.2 Plano de impedância	4
2.1.3 <i>Lift-off</i> e profundidade de penetração	5
2.1.4 Tipos de sonda	7
2.1.5 Vantagens e limitações	10
2.2 PIG	11
2.2.1 PIGs de limpeza	12
2.2.2 PIGs instrumentados	14
2.2.3 PIGs especiais	18
2.2.4 Formatos de copo para PIGs	20
2.2.5 Operação com PIG	22
3 Metodologia	24
3.1 Análise dinamica	24
3.2 Seleção de materiais	25
3.2.1 Corpo, flanges e hastes	26
3.2.2 Disco guia e copo selante	26
3.2.3 Dimensionamento	27

3.2.3.1	Disco selante	27
3.2.4	Ilustração do módulo completo do PIG	30
3.2.4.1	Corpo	31
3.2.4.2	Haste	34
3.2.4.3	Módulo	36
3.3	Projeto da sonda de corrente parasita	37
3.3.1	Escolha das dimensões do sensor	38
3.3.2	Aparato experimental	42
4	Resultados	44
4.1	Análise do <i>Lift-off</i>	44
4.2	Análise da distância longitudinal	50
5	Conclusão	55
6	Trabalhos futuros	56
	Referências Bibliográficas	57
A	Estudo de <i>Lift-off</i> e distância longitudinal.	60
A.1	Resultados do Lift-off	60
A.2	Resultados do estudo da distância longitudinal	69
B	Desenhos de fabricação.	77

Lista de Figuras

2.1	Princípio da inspeção por correntes parasitas [3].	4
2.2	Plano de impedância [3].	4
2.3	Profundidade de penetração[3].	6
2.4	<i>Lift-off</i> [5].	6
2.5	Sondas absolutas[3].	7
2.6	Sinal de uma sonda diferencial[3].	8
2.7	Sonda de reflexão[3].	9
2.8	PIG espuma [9].	12
2.9	PIG raspador [10].	12
2.10	PIG de limpeza magnética [12].	13
2.11	PIG esfera [14].	13
2.12	PIG com placa calibradora [9].	15
2.13	PIG geométrico [16].	16
2.14	PIG ultrassônico [18].	16
2.15	Transdutores de ultrassom [18].	16
2.16	PIG MFL [19].	17
2.17	PIG palito [20].	18
2.18	PIG de bloqueio [21].	18
2.19	PIG bidirecional [9].	19
2.20	Smart ball [23].	20
2.21	Smart ball [24].	20
2.22	Copo disco.	21
2.23	Copo cônico.	21
2.24	Copo pistão.	22
2.25	Esquema do Lançador[27].	23

2.26	Esquema do Recebedor[27].	23
3.1	Análise das forças dinâmicas.	24
3.2	Inspetor.	30
3.3	Vista isométrica explodida.	30
3.4	Vista lateral explodida.	31
3.5	Corpo com flanges.	31
3.6	Face de aplicação dos esforços na vista isométrica.	32
3.7	Face de aplicação dos esforços na vista lateral.	32
3.8	Deslocamento do corpo na vista lateral.	33
3.9	Tensão equivalente de Von-Mises.	33
3.10	Corpo com as hastes.	34
3.11	Vista lateral do deslocamento total.	35
3.12	Vista lateral da deformação deslocamento total.	35
3.13	Vista isométrica da tensão equivalente de Von-Mises na haste com deslocamento de 1,5 mm.	36
3.14	Vista isométrica da tensão equivalente de Von-Mises na haste com deslocamento de 6,5 mm.	36
3.15	Módulo de suporte de sensores.	37
3.16	Desenho da sonda.	38
3.17	Imagem OmniScan.	39
3.18	Sonda 1.	40
3.19	Sonda 2.	40
3.20	Sonda 3.	41
3.21	OmniScan.	43
3.22	Osciloscópio.	43
4.1	<i>Lift-off</i> s 0,5 e 1,5mm.	45
4.2	<i>Lift-off</i> s 2,5 e 3,5mm.	45
4.3	<i>Lift-off</i> de 0,5mm sem filtro.	46
4.4	<i>Lift-off</i> de 3,5mm sem filtro.	46
4.5	<i>Lift-off</i> de 0,5mm com filtro 1.	47
4.6	<i>Lift-off</i> de 3,5mm com filtro 1.	47

4.7	<i>Lift-off</i> de 0,5mm com filtro 2.	48
4.8	<i>Lift-off</i> de 3,5mm com filtro 2.	48
4.9	<i>Lift-off</i> de 0,5mm com filtro 3.	49
4.10	<i>Lift-off</i> de 3,5mm com filtro 3.	49
4.11	<i>Lift-offs</i> 0,5 e 1,5mm.	50
4.12	<i>Lift-offs</i> 2,5 e 3,5mm.	50
4.13	Distância longitudinal igual a 0mm.	51
4.14	Distância longitudinal igual a 30mm.	51
4.15	Distância longitudinal igual a 0mm.	52
4.16	Distância longitudinal igual a 30mm.. . . .	52
4.17	Distância longitudinal igual a 0mm.	53
4.18	Distância longitudinal igual a 30mm.	53
4.19	Distância longitudinal igual a 0mm.	54
4.20	Distância longitudinal igual a 30mm.	54
A.1	<i>Lift-off</i> de 0,5mm sem filtro.	61
A.2	<i>Lift-off</i> de 3,5mm sem filtro.	61
A.3	<i>Lift-off</i> de 1,5mm sem filtro.	62
A.4	<i>Lift-off</i> de 2,5mm sem filtro.	62
A.5	<i>Lift-off</i> de 0,5mm com filtro 1.	63
A.6	<i>Lift-off</i> de 3,5mm com filtro 1.	63
A.7	<i>Lift-off</i> de 1,5mm com filtro 1.	64
A.8	<i>Lift-off</i> de 2,5mm com filtro 1.	64
A.9	<i>Lift-off</i> de 0,5mm com filtro 2.	65
A.10	<i>Lift-off</i> de 3,5mm com filtro 2.	65
A.11	<i>Lift-off</i> de 1,5mm com filtro 2.	66
A.12	<i>Lift-off</i> de 2,5mm com filtro 2.	66
A.13	<i>Lift-off</i> de 0,5mm com filtro 3.	67
A.14	<i>Lift-off</i> de 3,5mm com filtro 3.	67
A.15	<i>Lift-off</i> de 1,5mm com filtro 2.	68
A.16	<i>Lift-off</i> de 2,5mm com filtro 2.	68
A.17	Distância longitudinal igual a 0mm.	69
A.18	Distância longitudinal igual a 30mm.	69

A.19 Distância longitudinal igual a 0mm.	70
A.20 Distância longitudinal igual a 30mm.	70
A.21 Distância longitudinal igual a 0mm.	71
A.22 Distância longitudinal igual a 30mm.	71
A.23 Distância longitudinal igual a 0mm.	72
A.24 Distância longitudinal igual a 30mm.	72
A.25 Distância longitudinal igual a 0mm.	73
A.26 Distância longitudinal igual a 30mm.	73
A.27 Distância longitudinal igual a 0mm.	74
A.28 Distância longitudinal igual a 30mm.	74
A.29 Distância longitudinal igual a 0mm.	75
A.30 Distância longitudinal igual a 30mm.	75
A.31 Distância longitudinal igual a 0mm.	76
A.32 Distância longitudinal igual a 30mm.	76

Capítulo 1

Introdução

A forma mais segura e eficiente para o transporte de óleo e gás é através de dutos, que podem ser terrestres, marítimos e aéreos. Em todos os casos eles estão sujeitos a ações de agentes externos e também do próprio fluido que está sendo transportado que podem causar alguns tipos de avarias no tubo[1]. Os defeitos mais comuns encontrados são:

- Mossas ou amassados - Podem ocorrer durante a montagem da tubulação, por conta de um deslizamento de terra ou trânsito de maquinário pesado na região do duto. Esse tipo de defeito pode prejudicar o escoamento e fragilizar o duto, mas principalmente pode obstruir a passagem de um PIG instrumentado de maior valor.
- Trincas - ocorrem principalmente nos pontos de soldas, por essas serem concentradores de tensão. Pode ser um fator crítico, pois caso não seja detectada e a tubulação venha a romper teremos, além de pausa na produção e por consequência perdas financeiras, um forte impacto ambiental que também afetará a empresa no âmbito legal.
- Corrosão - Essa pode ser tanto interna quanto externa, devido agentes externos ou produto do próprio fluido. Essas regiões corroídas viram concentradores de tensões facilitando o surgimento de trincas e também prejudicam a integridade do fluido lançando produtos da corrosão no mesmo.

Por esses motivos é muito importante que exista uma forma eficiente para inspecionar a tubulação e que possa ser feita de maneira periódica. A tecnologia de PIG, na maioria dos casos, é a única forma de inspeção de tubulações. Principalmente naquelas mais longas.

Além dos defeitos citados anteriormente, são detectados também vazamentos no decorrer da linha, com furos de cerca de 10mm feitos com intuito de furto de fluido. E como a fiscalização visual é difícil de ser feita por serem dutos muito longos e muitas vezes de difícil acesso à todas suas regiões, por estarem enterrados ou submersos, essa tecnologia se mostrou a melhor solução. Os PIGs encontrados no mercado hoje, são ferramentas com sondas dimensionadas para detecção de defeitos pequenos, ordem de grandeza de micrômetros, e por conta disso não detectam defeitos da ordem de grandeza que está sendo estudado.

Esse projeto foi feito com intuito de estudar a viabilidade da fabricação de um módulo de detecção para um PIG que irá inspecionar furos de cerca de 10 mm de diâmetro feitos para furto de óleo em uma tubulação de 12 polegadas de diâmetro. Por esse motivo foi criado um sensor com dimensões maiores, para detectar defeitos de maior comprimento e adaptado à curvatura da tubulação. Dessa forma, para melhor clareza e entendimento do projeto, ele será dividido de maneira a explicar o que é o PIG, sua história e funcionalidades, explicação de como funciona e os materiais necessários para a técnica de inspeção com uso de correntes parasitas. Após essa introdução teórica sobre o projeto será apresentado o estudo para fabricação do módulo que sustentará os sensores e os sensores que foram desenvolvidos no decorrer do projeto.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Correntes Parasitas

2.1.1 Princípios do ensaio por correntes parasitas

O ensaio de correntes parasitas, também conhecido por corrente de Foucault ou, do inglês, *eddy current*, é uma técnica de ensaio não destrutivo que usa o princípio do eletromagnetismo com base para a inspeção.

Nesse ensaio uma corrente alternada é aplicada em uma bobina e de acordo com a lei de Maxwell-Ampère, por consequência é gerado um campo magnético primário, B_p . Ao aproximar a bobina do material a ser inspecionado, que deve ser um material condutor elétrico, esse campo induz uma corrente no material que por sua vez cria um outro campo magnético secundário, B_s , com sentido oposto em relação ao primário. A interação desses campos gera um campo magnético resultante, H_r , que será usado para a tomada de dados. O aumento do campo secundário provoca uma redução do fluxo de campo resultante na bobina [2].

O ensaio de correntes parasitas tem muitas aplicações, pois além de descontinuidade no material, como trincas e poros, também é capaz de diferenciar características mecânicas que influenciem nas propriedades eletromagnéticas. Assim esse ensaio é capaz de detectar mudança de fase no material, fazer identificação de materiais, detectar fadiga térmica ou um começo de trinca por fadiga onde o material está começando a sair da região elástica. A figura abaixo representa a bobina e a formação das correntes parasitas e campo secundário.

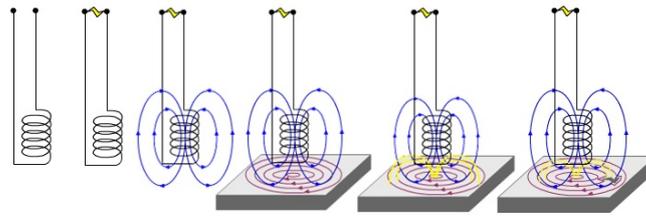


Figura 2.1: Princípio da inspeção por correntes parasitas [3].

2.1.2 Plano de impedância

Impedância (Z) caracteriza-se pela oposição total que um circuito oferece à passagem de corrente alternada. Ela é expressa como um número complexo em que sua parte real corresponde à resistência e a parte imaginária é dada pela reatância indutiva X_L e capacitiva X_C , esta última sendo desprezível para o ensaio de correntes parasitas.

A relação entre a impedância e seus componentes pode ser representada no plano de impedância por um vetor, onde a módulo do vetor corresponde ao seu valor e suas projeções aos seus componentes.

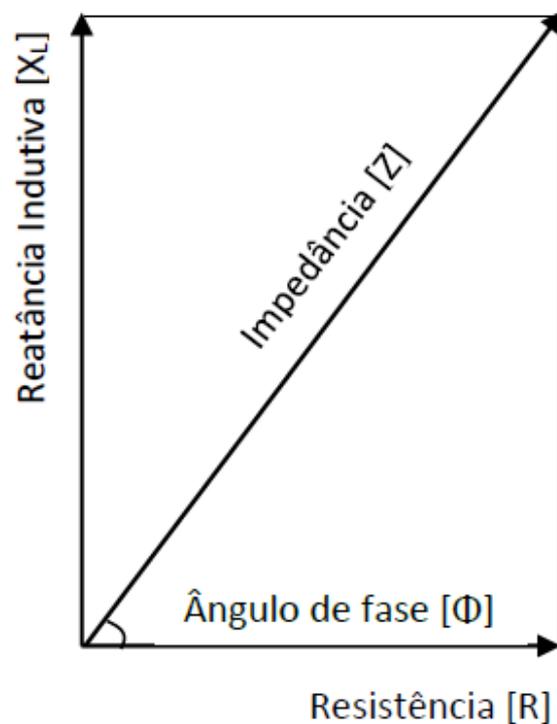


Figura 2.2: Plano de impedância [3].

Seu módulo pode ser calculado através da seguinte equação:

$$|Z| = \sqrt{(R^2) + (X_L^2)}, \quad (2.1)$$

onde $|Z|$ é o módulo da impedância, R é a resistência[Ohm] e X_L é a reatância indutiva.

2.1.3 *Lift-off* e profundidade de penetração

- **Profundidade de penetração**

Uma das maiores vantagens do ensaio de correntes parasitas é não necessitar de contato com a peça, porém uma limitação desse método é a capacidade de penetração na peça que está sendo inspecionada. Materiais espessos e/ou com alta permeabilidade magnética prejudicam ainda mais essa inspeção, uma vez que nesses casos só é possível a inspeção de camadas superficiais.

Nos ensaios de correntes parasitas, o campo magnético primário que penetra a peça que está sendo inspecionada decresce com a profundidade, isso afeta diretamente a densidade das correntes parasitas ao longo da profundidade fazendo com que ela diminua exponencialmente. Este fenômeno de decaimento é conhecido como efeito pelicular, ou do inglês, *skin depth*. É denominada profundidade de penetração padrão, a profundidade em que a intensidade das correntes foi reduzida a 36,8% ($1/e \approx 36,8\%$) do seu valor na superfície. Esse fator é representado por δ e seu valor é obtido da seguinte forma [4]:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}, \quad (2.2)$$

onde f é a frequência de excitação, μ permeabilidade magnética e o σ a condutividade elétrica.

Os fatores do ensaio que tem maior influencia sobre a profundidade de penetração são: frequência de operação, condutividade elétrica do material e permeabilidade magnética. Essas duas últimas são propriedades inerentes ao material, então não há possibilidade trabalhar esses fatores, isso faz com que o único fator que o operador possa controlar seja a frequência de operação. A dificuldade do ensaio está na calibração, muitas vezes aumentamos a frequência

de operação para termos uma melhor sensibilidade, porém fazendo isso temos uma menor profundidade de penetração. A figura abaixo mostra a distribuição da densidade de corrente ao longo da profundidade.

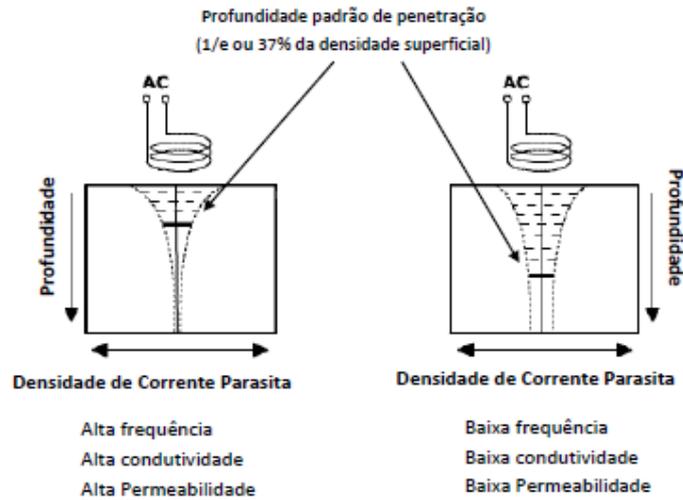


Figura 2.3: Profundidade de penetração[3].

- *Lift-off*

Um outro fator determinante no ensaio é o *lift-off*. Esse termo é usado para representar a distância entre a sonda e a peça que está sendo inspecionada. Uma aplicação muito utilizada do *lift-off* é para avaliação da espessura de uma camada de revestimento, desde que esta não seja condutora. Entretanto na maioria das vezes o *lift-off* é uma desvantagem para as inspeções, pois seu efeito pode mascarar defeitos pequenos, além de atenuar o sinal, que é o que mais preocupa no nosso estudo [5].

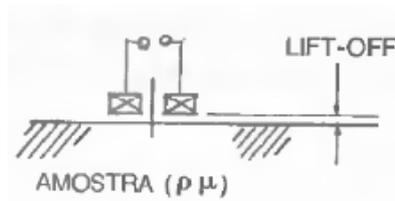


Figura 2.4: *Lift-off* [5].

2.1.4 Tipos de sonda

Uma das maiores vantagens do ensaio de correntes parasitas é que as sondas podem ser modeladas de acordo com a inspeção a ser feita. As classificações das sondas são de acordo com o modo de operação e a configuração da bobina e as principais são apresentadas a seguir [?].

- **Sondas absolutas**

Geralmente tem apenas uma bobina que é utilizada para gerar as correntes parasitas e detectar mudanças no campo gerado por essas correntes. Esse tipo de sonda pode ser usado em qualquer uma das aplicações de correntes parasitas e é o mais usado para caracterização de materiais devido sua sensibilidade à condutividade, permeabilidade e *lift-off*. Em contra partida caso essa não seja a aplicação deve-se tomar precauções redobradas com esses fatores. Comercialmente, é comum encontrar arranjos que usam uma outra bobina para compensar variações de temperatura no ambiente [?].

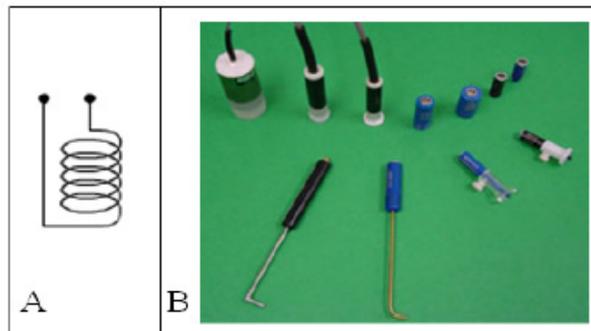


Figura 2.5: Sondas absolutas[3].

- **Sondas diferenciais**

São constituídas por duas bobinas e recebem esse nome pois a resposta do sinal é a diferença entre os sinais de cada uma das bobinas. Essas tem o mesmo número de espiras, porém com polaridade invertida, dessa forma, quando a sonda está em uma posição sem defeito a resposta é “zero”. Esse tipo de arranjo é muito utilizado para detecção de defeitos devido a sua grande sensibilidade. Porém no caso de defeitos muito grandes, onde o comprimento do defeito é maior que o sensor como um todo, a resposta no interior do defeito será

“zero”, já que as duas bobinas estarão com a mesma resposta. Dessa forma só as bordas do defeito serão detectadas, gerando uma sensação de dois defeitos pequenos ao invés de um defeito grande. A figura 2.6 mostra a resposta de uma sonda diferencial ao passar por um defeito [?]. O sinal que é visto corresponde à diferença entre os sinais adquiridos por cada uma das bobinas. Portanto, os dois laços do sinal do infinito correspondem ao momento ao qual uma das bobinas passa pela falha e a outra ainda está fazendo a leitura do material base e depois o inverso. Isso ocorre, pois as correntes parasitas contornam o defeito, passando pelo caminho de menor resistência, dessa forma alterando a resistência e reatância indutiva do sistema.

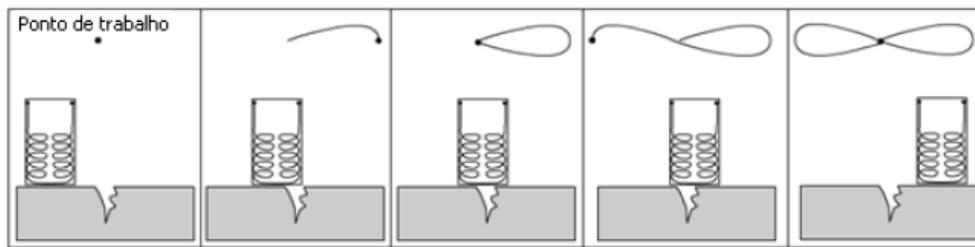


Figura 2.6: Sinal de uma sonda diferencial[3].

- **Sondas de reflexão**

Assim como as diferenciais, esta configuração possui duas bobinas, porém, neste caso, cada uma com uma função distinta. Um enrolamento é utilizado somente para excitação das correntes parasitas no material, enquanto o outro fica responsável por avaliar as mudanças no sinal após a interação com o material. Uma sonda com este tipo de arranjo é conhecida comercialmente como *driver/pick-up*. A figura 2.7 apresenta dois arranjos de sondas de reflexão, sendo o representado pela figura A, o mais clássico, enquanto o da figura B por apresentar duas bobinas de excitação, uma em cada face do material, é utilizado quando deseja-se detectar defeitos passantes [?].

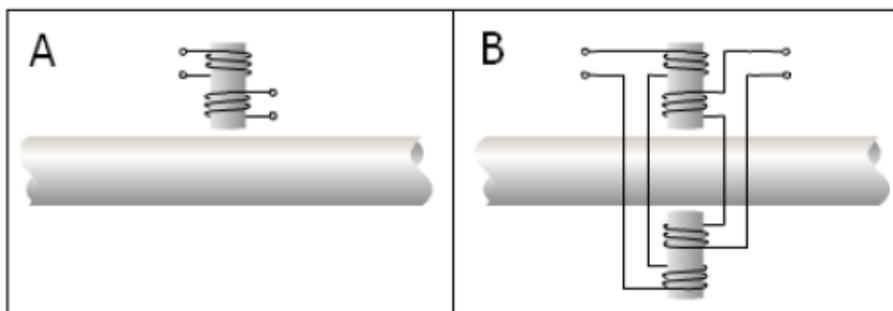


Figura 2.7: Sonda de reflexão[3].

2.1.5 Vantagens e limitações

Uma das principais vantagens do ensaio de corrente parasita é a liberdade para construção de uma sonda que seja mais sensível, para detecção de trincas, ou menos sensível para detecção de furos, que é o caso a ser estudado. Além disso ele permite a detecção de defeitos superficiais e subsuperficiais, oferece um resultado imediato, tem a possibilidade de ser portátil, pode ser usado para outros fins além da detecção de falhas como caracterização do material ou medição da espessura de uma camada de revestimento, não precisa ter contato direto com o material e também pode inspecionar superfícies complexas.

Porém esse ensaio também tem algumas limitações e como sua principal limitação temos o fato de poder inspecionar apenas materiais condutores. Além disso necessita de um técnico capacitado, tem um limite de profundidade de penetração o que prejudica ou impossibilita a inspeção em regiões mais internas. O tratamento superficial e a rugosidade interferem na inspeção e caso a falha seja paralela ao enrolamento da bobina, ela não será detectada.

2.2 PIG

O método mais eficiente, e atualmente, utilizado na limpeza e inspeção de dutos é a passagem de PIGs, que podem ser de diversos tipos e tamanhos.

PIGs são equipamentos que viajam por toda a extensão do duto empurrados pela própria vazão do fluido. Eles são classificados em duas categorias: “*Utility PIGs*”, que realizam a função de limpeza, separação de produtos e remoção de água, e “*In-line Inspection tools*”, também conhecidos como “PIGs” instrumentados, “*intelligent PIGs*” ou “*smart PIGs*”, que fornecem informações das condições da linha, bem como da extensão e localização de algum problema [6] [7].

Até hoje não existe um consenso sobre a origem do nome PIG. Uns dizem que são chamados assim, pois os primeiros PIGs de limpeza utilizados nos EUA, ao percorrer o duto, produziam sons semelhantes ao grunhido de um porco. Outros dizem que foi chamado dessa forma pois quando o PIG saía do duto ele estava completamente sujo. E existem também alguns que dizem que é chamado de PIG pelas iniciais de “Pipeline Inspection Gauge”.

A primeira operação com PIG ocorreu por volta de 1870. As empresas de transporte de carboneto depois de 1 ou 2 anos de operação, observaram que a vazão das linhas estava a diminuir e a pressão necessária para as bombas estava aumentando, indicando que estariam se formando depósitos de resíduos na parede do duto. Após algumas tentativas sem sucesso, surgiu a ideia de bombear algo dentro do duto que “raspasse”esses resíduos. A primeira tentativa foi com um feixe de trapos, obtendo um resultado positivo que posteriormente foi substituído por couro.

A primeira patente da área foi registrada em 1907 na oficina de patentes dos EUA, oferecendo um dispositivo de limpeza de dutos. Logo com a chegada a eletrônica e a instrumentação, dessa forma equipando os PIGs com sensores e sistemas eletrônicos para armazenamento dos dados adquiridos, chegaram ao mercado os primeiros PIGs instrumentados apresentados pela empresa Tuboscope em 1964, que hoje conhece-se como smart PIGs [8].

Existem basicamente dois grupos de PIGs. Os de limpeza que são voltados para remoção de resíduos que aderem na parede do duto. Esses PIGs podem ser espuma, raspadores, bidirecionais, de limpeza magnética e esfera. E os PIGs instrumentados são equipados com instrumentos que adquirem e armazenam dados do duto, como

por exemplo, trincas, furos, mudança de características metalúrgicas, temperatura, pressão, geometria do duto etc.

2.2.1 PIGs de limpeza

- PIG espuma

É o mais simples dos PIGs, fabricado com poliéster, um tipo de poliuretano, o PIG espuma tem a característica de deformar-se de acordo com as limitações do duto e fragmentar-se, no caso do obstáculo ser intransponível. Pode ter diferentes densidades de acordo com o tipo de trabalho necessário. E também podem ser revestidos com materiais plásticos de alta resistência, materiais abrasivos e até escovas de aço, para o caso de uma limpeza mais severa [9].



Figura 2.8: PIG espuma [9].

- Pig Raspador

Também chamado de PIG escova, é equipado com escovas de aço apoiadas em molas que fazem uma limpeza mais agressiva [10].



Figura 2.9: PIG raspador [10].

- PIG de limpeza magnética

Possuem ímãs que tem como finalidade atrair partículas ferrosas. São utilizados logo após a montagem, retirando partículas ferromagnéticas, como pontas de eletrodo. E também são usados em dutos que apresentam algum tipo de corrosão [11].

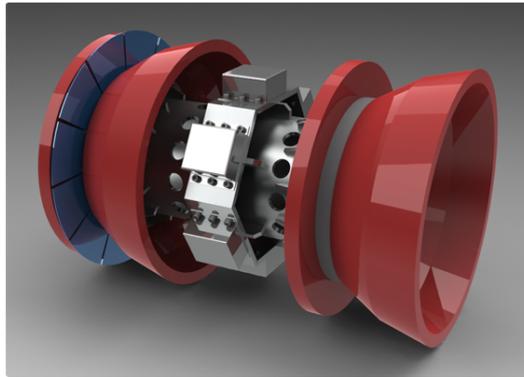


Figura 2.10: PIG de limpeza magnética [12].

- PIG esfera

Esses são muito usados na remoção de condensados em gasodutos, diminuindo a perda de carga. Como mostra a figura 4, são fabricadas em material plástico, normalmente poliuretano, podendo ser rígidas ou infláveis (nesse caso possuem uma válvula para injeção do fluido) [13].

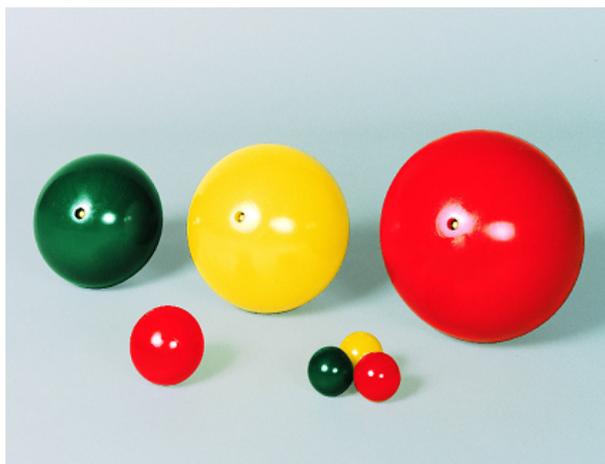


Figura 2.11: PIG esfera [14].

2.2.2 PIGs instrumentados

Os PIGs instrumentados são ferramentas amplamente utilizadas nas inspeções de dutos, esses equipamentos baseiam-se em diferentes tipos de técnicas de medição, seja para detecção de perda de espessura por corrosão interna e/ou externa, amassamentos, trincas ou mudança de característica metalúrgica. As técnicas de inspeção utilizadas podem ser variadas também dependendo do objetivo final, por exemplo: correntes parasitas, MFL (*Magnetic Flux Leakage*) e Ultrassom. A técnica de inspeção de dutos por PIGs é uma das técnicas mais utilizadas para avaliação da integridade dos dutos. A grande vantagem é a inspeção ao longo de toda tubulação, o que seria inviável usando outras técnicas, por exemplos, em dutos enterrados. São constituídos em geral por módulos com vasos de pressão sustentados por copos de poliuretano, dentro dos quais está instalada uma eletrônica embarcada de aquisição de dados e bateria, contando ainda com hodômetros para registro da distância ou posição. Atualmente a inspeção interna de dutos através da passagem de PIGs instrumentados permite a obtenção de muitas informações sobre as condições do duto. O grande avanço dessas ferramentas deve-se ao fato que a rede de dutos está envelhecendo, e desta forma precisam ser cuidadosamente inspecionadas a fim de prevenir acidentes [7].

- PIG com placa calibradora

Esse PIG é utilizado para detectar amassamentos no duto. A placa em geral é de alumínio e tem um diâmetro menor do que o diâmetro do duto, quanto mais próximo esses valores mais precisa será a detecção. Essa detecção é feita apenas na retirada do PIG com a verificação de algum amassado na placa calibradora. É essencial a passagem desse PIG antes de outros para não correr o risco de prender outra ferramenta no duto [15].

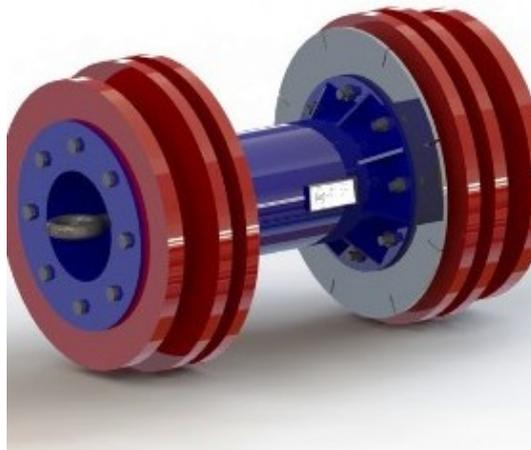


Figura 2.12: PIG com placa calibradora [9].

- PIG geométrico

Os PIG's geométricos possuem um conjunto de calibradores ou braços mecânicos destinados a inspeção da geometria da tubulação, analisando possíveis variações de diâmetro ou alguma avaria, como por exemplo: ovalizações e mo-sas causadas por algum impacto interno ou externo. Opcionalmente estes PIG são com a tecnologia inercial. Esta combinação de sensores fornece dados sobre a geometria do duto, incluindo a forma e curvatura da linha de centro da tubulação, além de referenciamento em três eixos (xyz) o que proporciona dados o posicionamento do duto. Esse PIG tem uma grande importância, pois detecta defeitos que poderiam causar o aprisionamento de outro PIG de inspeção. O PIG geométrico é utilizado em dois momentos: 1) Como dito anteriormente na inspeção de dutos em operação, para identificar qualquer variação de diâmetro ou qualquer outro tipo de avaria geométrica que possa ter ocorrido durante a vida útil da linha; 2) durante a construção do duto, especialmente nas últimas etapas da montagem e condicionamento, para levantar as características geométricas da linha, em especial a existência de mo-sas e ovalizações [16].



Figura 2.13: PIG geométrico [16].

- PIG ultrassônico

Ele usa sensores acústicos que medem a diferença do tempo de propagação dos ecos refletidos nas superfícies das paredes interna e externa do duto. Normalmente essas ferramentas possuem três ou mais coroas, onde os sensores ultrassônicos ficam distribuídos ao longo do corpo do PIG. A eletrônica embarcada do PIG US é geralmente mais complexa que outros PIGs instrumentados convencionais, pois precisa provocar e detectar o sinal ultrassônico numa taxa de aquisição elevada [17].

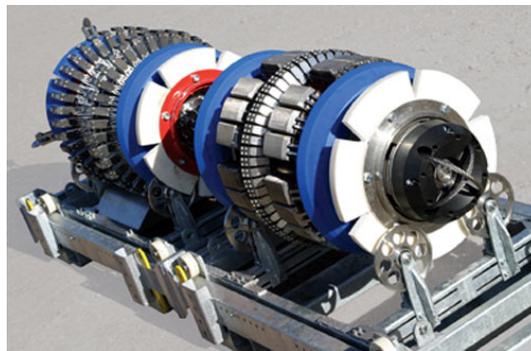


Figura 2.14: PIG ultrassônico [18].



Figura 2.15: Transdutores de ultrassom [18].

- **PIG MFL**

Esse PIG usa a tecnologia MFL que é capaz de detectar defeitos de perda de espessura, interna ou externa, em dutos metálicos, causados normalmente pela corrosão de suas paredes. Geralmente esses equipamentos possuem dois ou mais módulos, usando magnetos ou ímãs potentes para magnetização da parede do duto e sensores para detecção da perda de espessura. O vazamento de fluxo magnético (Magnetic Flux Leakage – MFL) é o método mais antigo e mais comum utilizado em dutos para encontrar regiões com perda de metal em dutos de transmissão de petróleo e gás [19].

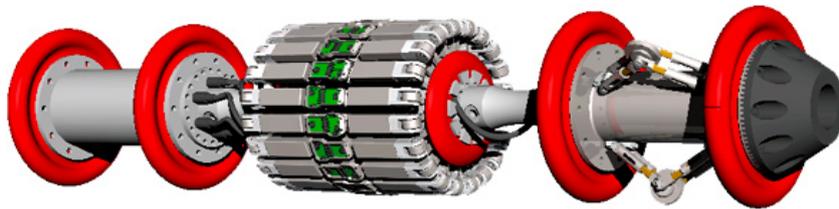


Figura 2.16: PIG MFL [19].

- **PIG palito**

Esse tipo de PIG utiliza um sensor geométrico (sensor palito) para fazer a inspeção interna de dutos de tamanhos variados. A técnica consiste na medição direta da superfície por contato dos sensores palito ou apalpadores instrumentados, que são precisamente distribuídos ao longo do corpo da ferramenta. Estas estruturas mecânicas são basicamente compostas de um palito de contato fixo dentro de uma haste articulada, um eixo de rotação desta haste, que está fixa à base do sensor, e o transdutor de efeito Hall dentro deste eixo. A simplicidade desta técnica de medição e o baixo custo de produção deste PIG em relação aos demais são vantagens que tornam essa nova tecnologia uma alternativa em inspeções de detecção e dimensionamento de corrosão interna em dutos [20].

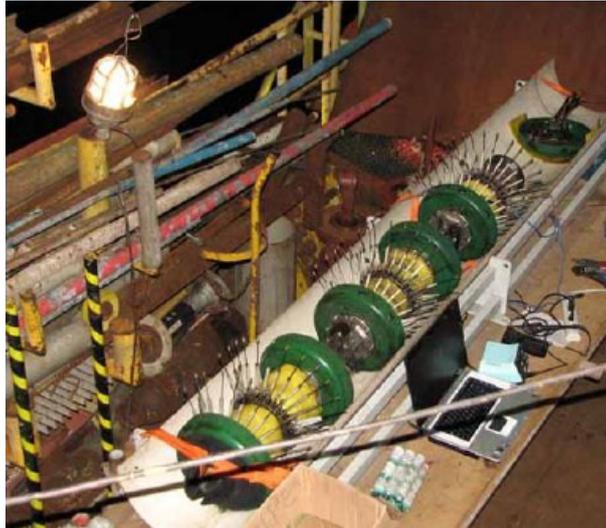


Figura 2.17: PIG palito [20].

2.2.3 PIGs especiais

Existem alguns PIGs com funções que não são nem limpeza nem inspeção.

- PIG de bloqueio

É utilizado quando existe a necessidade de vedar por completo uma parte do duto para que haja um reparo. O posicionamento do PIG é feito por antenas, semelhante a uma geo localização e a vedação é através de um sistema mecânico [21].

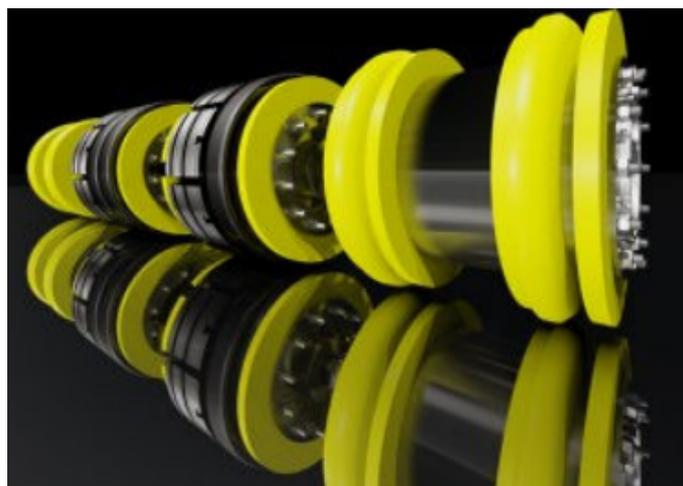


Figura 2.18: PIG de bloqueio [21].

- PIG bidirecional

Esse PIG não é na verdade uma configuração geométrica relativa ao formato do copo selante. No caso é feita a escolha do copo disco (que será falado no capítulo 4). Nesses PIGs, são usados discos de vedação que permitem que o PIG possa ser movido para os dois sentidos do duto, apenas mudando o sentido do fluxo. Isso possibilita que esse PIG seja usado mesmo que exista uma obstrução ou alguma conexão que impeça a passagem do PIG [7] [6].

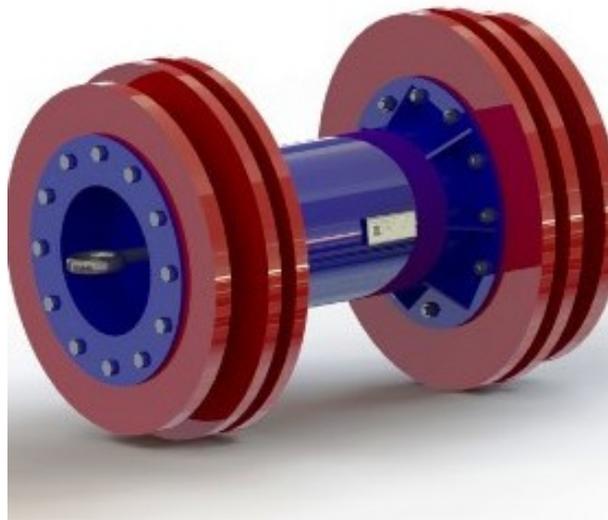


Figura 2.19: PIG bidirecional [9].

- Smart ball

Esse tipo de PIG é utilizado para detecção de vazamentos em dutos. O smart ball possui sensores de temperatura, de pressão, acústico, além de acelerômetro e 14 magnetrômetro (figura 14). São utilizados em dutos de diâmetro superior ou igual a 4” e possuem autonomia de até 170 horas. Diferem dos outros tipos de PIG pelo fato de seu diâmetro ser bem menor que o do duto a ser inspecionado. Por esse motivo, PIGs do tipo Smart Ball são lançados dentro de uma espécie de capa de espuma, como podemos ver na figura 15, para que o diâmetro do duto seja alcançado e o PIG possa trafegar dentro desse sem problemas [22].



Figura 2.20: Smart ball [23].

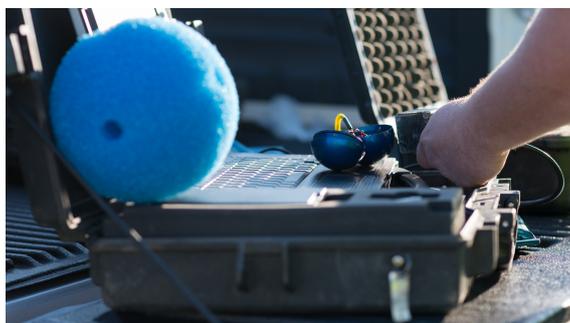


Figura 2.21: Smart ball [24].

2.2.4 Formatos de copo para PIGs

Como dito no início do capítulo o PIG é uma ferramenta que se desloca sendo empurrado pela vazão do fluido. Esse deslocamento se dá pela diferença de pressão antes e depois do PIG que vence a força de atrito. Para que haja essa diferença de pressão é necessária uma vedação que é feita por uma peça chamada de copo ou disco selador. Existem basicamente três geometrias para esse copo: copo disco, copo cônico e copo pistão. Essa geometria tem grande influência sobre as forças de contato do PIG com a parede do duto. Quanto maior for essa força, melhor será a vedação, conseqüentemente, maior deverá ser o diferencial de pressão para que o PIG possa se deslocar e maior será o desgaste [25].

- Copo disco

Seladores desse tipo foram criados com a necessidade de PIGs bidirecionais, são os únicos seladores possíveis nesse caso. A pressão não tem influência sobre esse copo e sua vedação é feita pela interferência entre o disco e a parede do

duto. Comparado com os outros dois tipos ele é o que tem menor capacidade de absorver ovalizações.



Figura 2.22: Copo disco.

- Copo cônico

Esse selador, dos três, é o que possui melhor capacidade de absorver ovalização. Seu formato permite que a diferença de pressão ajude para uma melhor vedação, porém por conta da ótima vedação feita por esse copo, dos três é o que propicia maior desgaste.

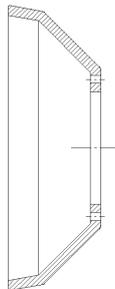


Figura 2.23: Copo cônico.

- Copo pistão

Esse tipo de selador tem origem com os sistemas de vedação de bombas de pistão de água. Ele é um estágio intermediário tanto na capacidade de absorver ovalizações quanto na capacidade de vedação.



Figura 2.24: Copo pistão.

2.2.5 Operação com PIG

Para passagem dos PIGs sem que seja necessário interromper o fluxo, foram desenvolvidos equipamentos especiais chamados de lançadores e recebedores de PIG. Devido ao risco da operação, esses equipamentos só podem ser operados por pessoal especializados [26].

- Operação de Lançamento

Cada equipamento tem sua peculiaridade e existirão variações para duto com diferentes processos e objetivos. Porém uma operação de pigging deve seguir as seguintes fases: Despressurização do lançador, carregamento do PIG, lançamento do PIG, despressurização do lançador e inspeção [26].

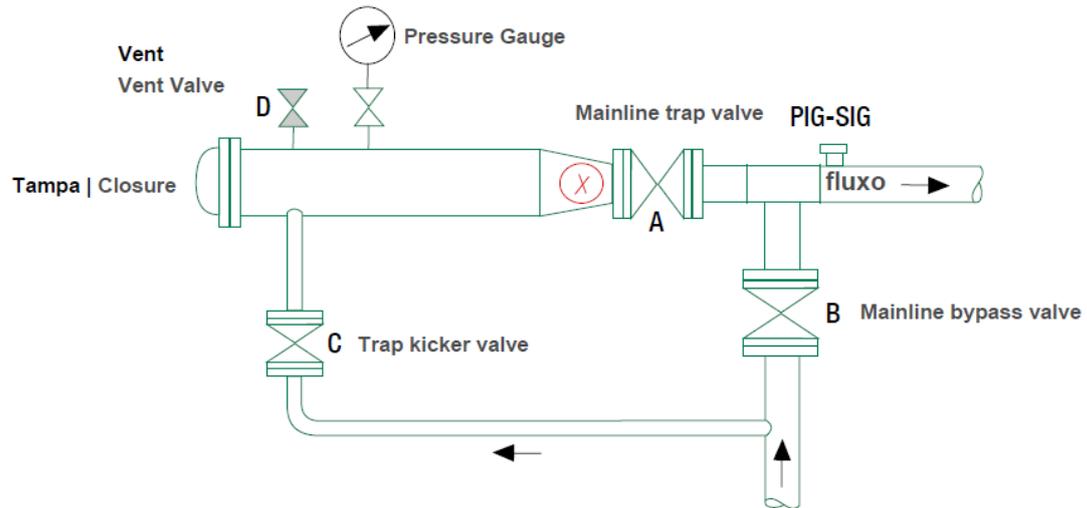


Figura 2.25: Esquema do Lançador[27].

- Operação de recebimento

Da mesma forma que a operação de lançamento, cada equipamento terá sua peculiaridade, porém a operação de recebimento deve ter as seguintes fases: Pressurização do receptor, recebimento do PIG, depressurização e remoção do PIG, teste e liberação do receptor [26]. Figura 2.26

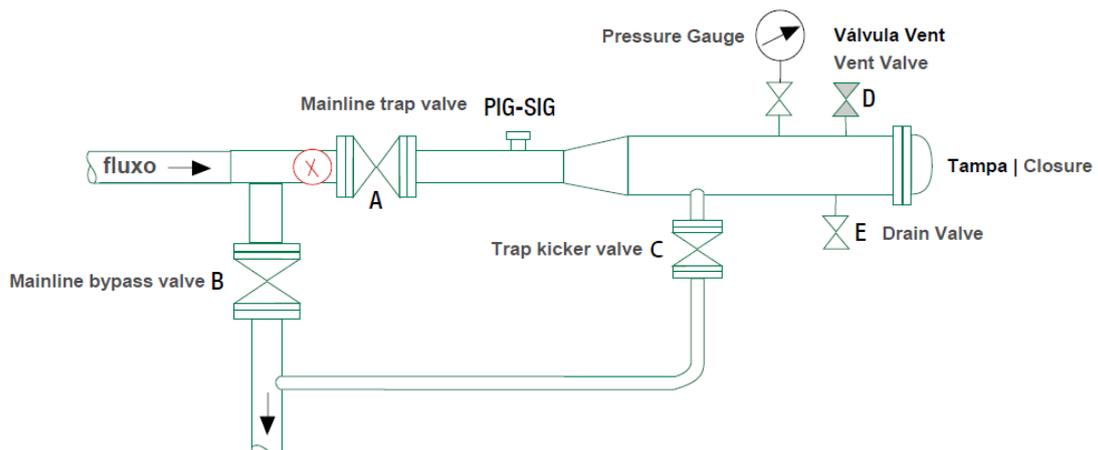


Figura 2.26: Esquema do Receptor[27].

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Análise dinâmica

O movimento do PIG utilizado será feito através do diferencial de pressão antes e depois do mesmo, dessa forma, na figura abaixo vemos a representação das forças q atuam no PIG.

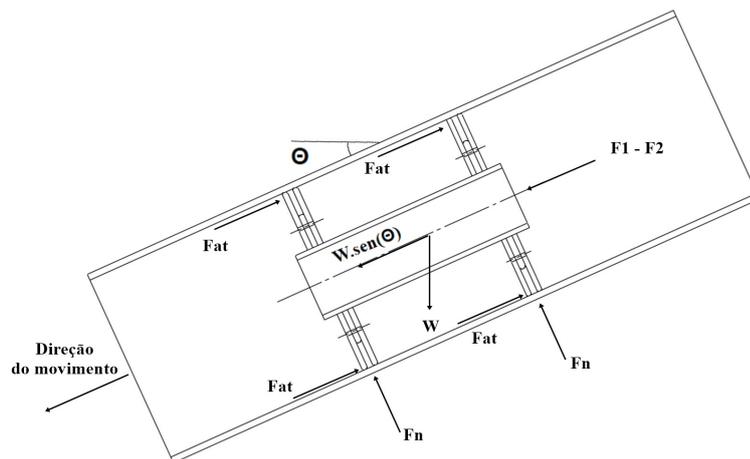


Figura 3.1: Análise das forças dinâmicas.

Onde F_1 e F_2 são as forças decorrentes das pressões, P_1 e P_2 , respectivamente, pressões da parte dianteira e traseira do PIG, F_{at} representa a força de atrito, F_n a força normal, W o peso do PIG, \ddot{x} a aceleração, θ o ângulo do duto em relação ao solo.

Equação do movimento

$$(F_1 - F_2) - 4 \times F_{at} + W \times \sin(\theta) = m \times \ddot{x} \quad (3.1)$$

Considerando a iminência do movimento, portanto, a aceleração igual a zero, temos:

$$(F_1 - F_2) + W \times \sin(\theta) = 4 \times F_{at} \quad (3.2)$$

Durante a maior parte do percurso da tubulação, ela estará na horizontal, porém também existem trechos com aclives e declives e para isso é importante na modelagem do problema o uso do ângulo θ . Nas regiões de lançamento e recebimento o duto estará na horizontal, portanto teremos $\theta = 0^\circ$ e dessa forma, o equilíbrio da equação fica:

$$F_1 - F_2 = 4 \times F_{at} \quad (3.3)$$

Para o PIG se encontrar na iminência do movimento, a força decorrente da diferença pressão deve ser igual a força de atrito dos discos selantes com a tubulação. Essa força de atrito é proporcional ao coeficiente de atrito μ e a força normal, que é resultado da pressão que os discos fazem na parede do duto.

$$4 \times F_{at} = \mu \times F_n \quad (3.4)$$

3.2 Seleção de materiais

A seleção de materiais será feita em duas partes, uma dedicada aos materiais metálicos que são as hastes, os flanges e o corpo do PIG e uma dedicada aos discos seladores que são de polímero.

3.2.1 Corpo, flanges e hastes

Cada módulo do PIG funciona basicamente como um vaso de pressão, onde pode ser armazenada a eletrônica e a bateria, muitas vezes o módulo que carrega os sensores é um módulo separado do que leva a eletrônica. O que irá determinar isso são as variações do projeto, como diâmetro do duto, tamanho e geometria dos sensores. Por conta do ambiente ser um ambiente corrosivo e pressurizado é necessário que se use um material que resista tanto a possível corrosão quanto aos esforços devido a pressão e atrito, porém ao mesmo tempo deve-se tentar deixar o módulo o mais leve possível para diminuir o atrito com a parede do duto e necessitar de um diferencial de pressão menor.

Um material muito utilizado é o alumínio naval AL 5052f que possui uma boa resistência mecânica e também à corrosão.

3.2.2 Disco guia e copo selante

Serão utilizados dois tipos de disco neste módulo um deles é o disco selante, responsável pela vedação do módulo para que se tenha um diferencial de pressão que irá movimentar o PIG. O segundo é responsável pela sustentação do PIG e também da sua centralização, em relação ao eixo do duto, esse último, chamado de disco guia.

O formato escolhido para o copo selante foi o de disco, pela simplicidade de fabricação e por consequência, barateando o projeto e também pelo fato de ser o único formato de copo que permite que o PIG seja bidirecional. O diâmetro do disco deve ser maior do que o diâmetro interno da tubulação para que tenhamos a vedação, dessa forma, ele deve ser feito de um material maleável. Além disso, por conta de ser o responsável pela vedação, ele estará em contato com a parede do duto durante toda a passagem, com isso, faz-se necessário um material que seja resistente a abrasão e também ao cisalhamento para que não haja falha durante a inspeção.

O material comumente usado para esse tipo de serviço é o poliuretano, ele apresenta todas essas características que o copo precisa ter. O poliuretano tem uma excelente capacidade de vedação e para isso deve-se escolher o copo com uma dureza na faixa de 60 a 80 shore A. No caso do disco guia, como há necessidade de um disco mais rígido, deve-se escolher um poliuretano com dureza próxima a 95 shore A.

3.2.3 Dimensionamento

Tendo analisado as forças dinâmicas que irão movimentar o PIG, deve-se analisar que tipo de material será empregado em cada parte do módulo. Para isso precisa-se assumir algumas premissas.

As premissas serão utilizadas para dimensionamento do módulo que suportará os sensores, mas deve ser ressaltado que após o acoplamento dos outros módulos, a força de atrito irá aumentar.

Algumas informações essenciais para o estudo, como diâmetro do duto e raio de curvatura mínimo são características da tubulação, dessa forma precisa-se saber agora o diferencial de pressão que será aplicado para o movimento do PIG. Usualmente para tubulações com 12" de diâmetro usa-se um diferencial de pressão de 3 bar a 5 bar para o deslocamento do PIG, para termos uma segurança, os esforços serão calculados para um diferencial de 5 bar. Nesse projeto não será abordado o comportamento do fluido relacionado a esse diferencial de pressão e tbm a passagem do PIG.

Premissas para os cálculos:

- Diâmetro interno: 304,8 mm
- Diâmetro externo: 325 mm
- Diferencial de pressão: $0,5 \text{ N/mm}^2$

3.2.3.1 Disco selante

Um fator importante para o cálculo dos esforços no disco é a força de atrito causada pelo contato do disco com a parede interna do duto. Essa força pode ser calculada através do diferencial de pressão que é $0,5 \text{ N/mm}^2$.

Para o cálculo da força de atrito deve-se levar em consideração o coeficiente de atrito estático do poliuretano com a parede da tubulação e a força normal que atua sobre o PIG. Dessa forma temos:

$$F_{at} = \mu \times F_n \quad (3.5)$$

Para o PIG ser retirado da inércia, a força resultante do diferencial de pressão deve ser maior ou igual o atrito provocado pelo contato dos discos selantes com a

parede da tubulação. Como esse módulo comporta 4 discos selantes, deve-se levar em consideração a força de atrito causada pelos 4 discos, dessa forma, o balanço de força do PIG fica o seguinte:

$$\Delta P \times A = 4 \times F_{at} \quad (3.6)$$

A força normal que se encontra na equação da força de atrito, se origina pelo contato da parede da tubulação com o disco, já que o mesmo está super dimensionado para que tenha uma vedação total. Apesar do super dimensionamento e assim o disco tendo um diâmetro maior do que a tubulação, ele é muito menos rígido que a tubulação e assim, no acoplamento entre eles, o disco se comprime e tem como diâmetro final igual ao diâmetro da tubulação. Para o coeficiente de atrito estático μ , será utilizado o valor normalmente utilizado para o contato entre aço carbono e poliuretano. $\mu = 0.4$. Dessa forma temos

$$0,5 \times \pi \times \frac{304,8^2}{4} = 4 \times 0,4 \times F_n \quad (3.7)$$

$$F_n = 22,8N \quad (3.8)$$

Sabendo a força normal, podemos calcular a pressão que a parede da tubulação faz sobre o disco de poliuretano. Projetos de PIG, mostram que um PIG nessas condições de pressão e com essa faixa de diâmetro usando disco selantes com sua espessura na faixa de 10 a 15 mm. A escolha para largura do disco foi de 10 mm. Assim temos como equação que explicita a pressão:

$$P \times \pi \times D \times L = 22,8 \quad (3.9)$$

Onde L é a largura do disco selante.

$$P \times \pi \times 304,8 \times 1,0 = 22,8 \quad (3.10)$$

$$P = 2,38 \times 10^4 N/m^2 \quad (3.11)$$

Como dito anteriormente, o disco selante será superdimensionado, para que tenha uma vedação total, dessa forma temos um acoplamento com interferência. Consi-

derando que o poliuretano seja um material elástico linear e isotrópico, ele terá coeficiente de poisson e pode-se calcular o diâmetro do disco usando a equação de acoplamento por interferência em que o diâmetro do eixo é maior que o diâmetro do furo.

$$\frac{I}{P} = \frac{D}{E_t}(x_t + \nu_t) + \frac{D}{E_p}(1 + \nu_p) \quad (3.12)$$

Onde I é a interferência causada pelo diâmetro do PIG ser maior que o diâmetro interno D da tubulação, E_t é o módulo de elasticidade do duto, E_p é o módulo de elasticidade do poliuretano, ν_t o coeficiente de poisson do duto e ν_p o coeficiente de poisson do poliuretano. A interferência I e x_t podem ser escritos da seguinte forma:

$$I = D_p - D_t \quad (3.13)$$

$$x_t = \frac{\alpha^2 + 1}{\alpha^2 - 1} \quad (3.14)$$

Sendo D_p o diâmetro do PIG antes de entrar na tubulação e α a razão entre o diâmetro externo do duto e o diâmetro interno. Para resolução do problema, temos $E_t = 200GPa$, $E_p = 10MPa$, $\nu_t = 0,3$ e $\nu_p = 0,2$. Com isso encontramos um valor para o diâmetro do disco de poliuretano equivalente a $316,2mm + -0,1mm$.

Além desses discos selantes, o PIG terá também discos guia de poliuretano, que tem duas funções. A primeira é separar os discos selantes para que eles possam fletir sem ter contato com o próximo selante, para que seja feita uma boa vedação. A segunda alinhar o PIG com o eixo do duto, servindo de guia para o mesmo. Usualmente seu diâmetro é cerca de 1% menor do que diâmetro interno da tubulação, não havendo atrito entre ele e a parede interna da mesma no início do movimento. Os discos guia são projetados com uma dureza e espessura maior que os discos selantes, para que eles sejam mais resistentes à flexão.

3.2.4 Ilustração do módulo completo do PIG

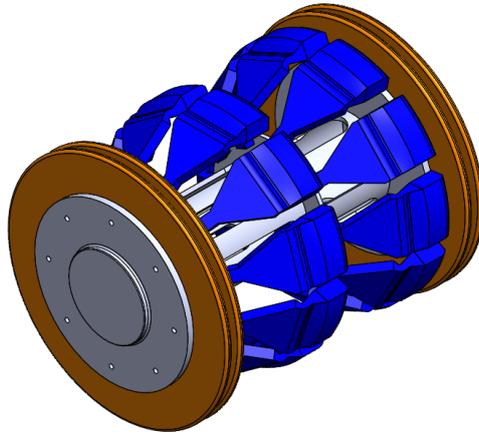


Figura 3.2: Inspetor.

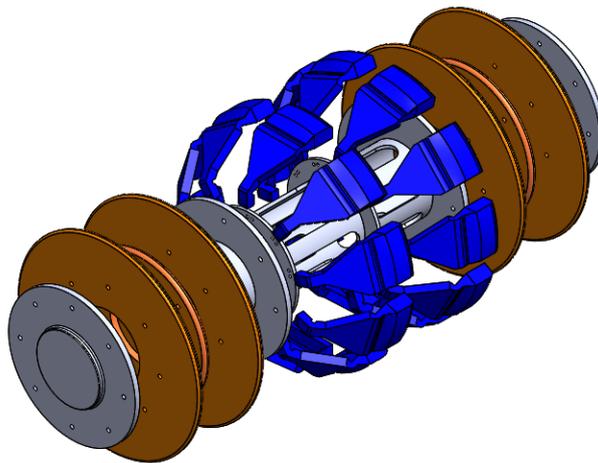


Figura 3.3: Vista isométrica explodida.

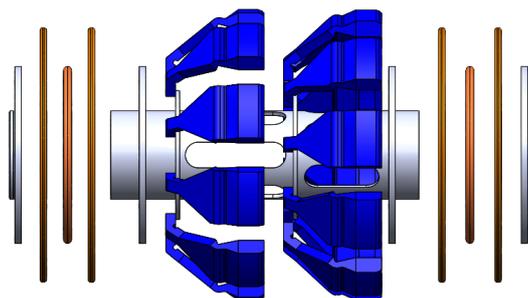


Figura 3.4: Vista lateral explodida.

3.2.4.1 Corpo

O corpo do módulo discriminador deve ter um formato necessário para fixação das haste na distância correta, desenvolvida pelo projetista, para que o sensor esteja na distância correta em relação a parede do duto. Para esse projeto o corpo, já com os flanges que serão soldados nele, foi desenhado da seguinte forma:

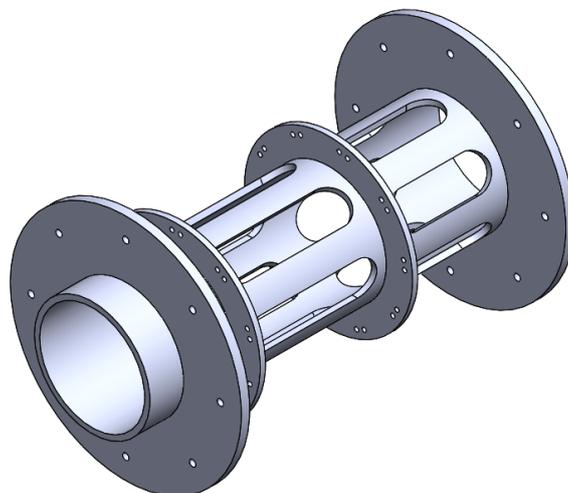


Figura 3.5: Corpo com flanges.

Como dito no capítulo dois o comprimento do corpo do PIG deve estar entre certas dimensões, pois no caso do dele ser muito curto, pode perder a vedação em uma curva ou até mesmo capotar, o que quer dizer que girou no eixo transversal ao eixo do duto. O raio mínimo da curvatura em uma tubulação é de 1,5 vezes o

valor do diâmetro e para essas condições o comprimento do PIG não deve exceder esse valor. Por outro lado o PIG não pode ser menor do que o diâmetro da menor derivação, como nessa fase do projeto, por motivos de contrato, essa informação não pode ser revelada, vamos considerar o diâmetro do duto que é 12”.

$$304,8\text{mm} < L < 457,2\text{mm} \quad (3.15)$$

Para deixar o PIG mais leve, no lugar de usar o aço, o material escolhido foi uma liga de alumínio naval AL 5052f, que tem módulo de elasticidade de 71 GPa e limite de escoamento de 180 MPa. Para analisar onde estão os maiores esforços e deformação que o diferencial de pressão imposto causa no corpo, foi feita uma simulação com a utilização do software ANSYS e nas figuras abaixo será apresentado a face onde foi aplicada o diferencial de pressão e os resultados das simulações.

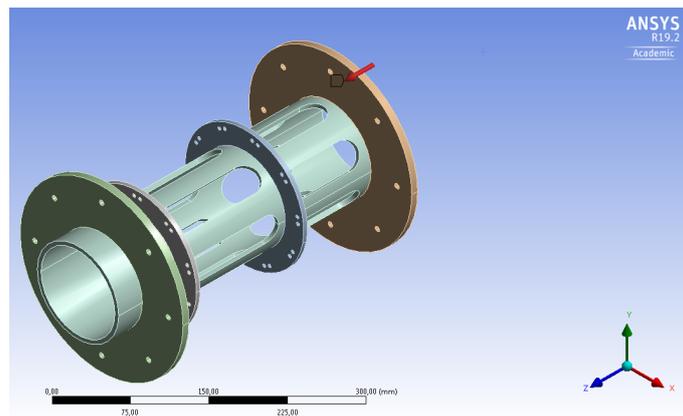


Figura 3.6: Face de aplicação dos esforços na vista isométrica.

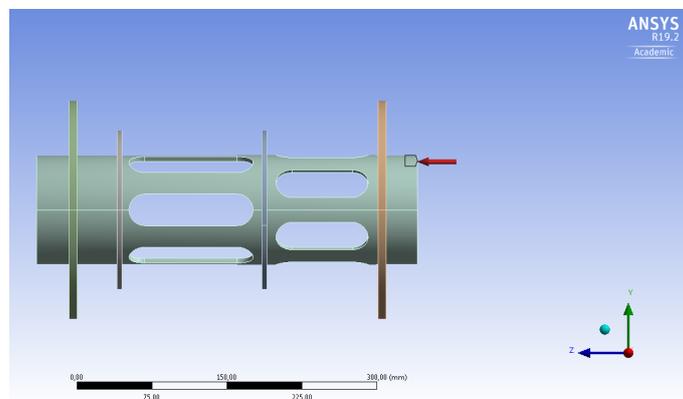


Figura 3.7: Face de aplicação dos esforços na vista lateral.

Para maior simplicidade computacional, foi considerado que com a inclusão de todos os discos selantes e o flange traseiro, a região traseira do PIG seria uma região rígida, e por conta disso, a pressão foi aplicada na sessão especificada no desenho, fazendo as devidas conversões por conta da diminuição da área.

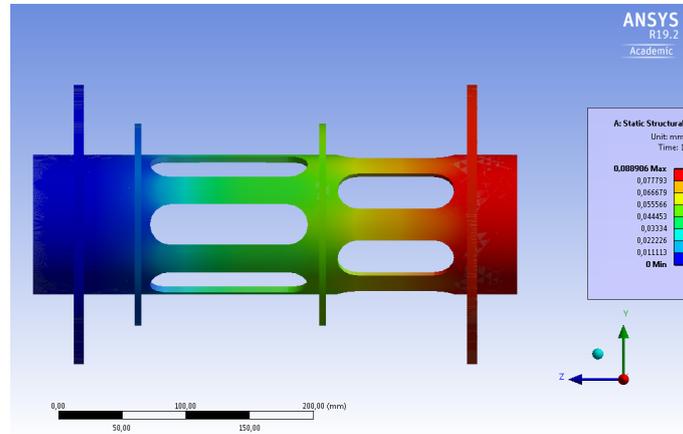


Figura 3.8: Deslocamento do corpo na vista lateral.

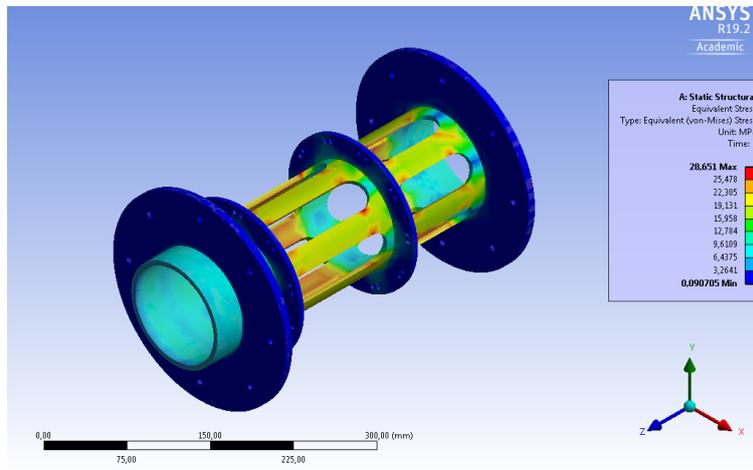


Figura 3.9: Tensão equivalente de Von-Mises.

Como pode ser visto na simulação o corpo teve um deslocamento que podemos considerar como desprezível, mostrando que a escolha da liga de alumínio naval AL 5052f foi uma escolha satisfatória. E a simulação dos esforços também mostra que em nenhum ponto, o limite de escoamento é excedido.

3.2.4.2 Haste

As hastes são projetadas para manter o sensor em contato com a parede da tubulação e também mantê-lo paralelo a parede. Como explicitado no capítulo anterior, o foco é que o PIG tenha o mínimo de sensores que for possível e como o sensor escolhido foi o sensor de 60 mm, foi construído o PIG de forma que ele tenha duas coroas de sensores, cada uma com 10 sensores, essas coroas estão defasadas em 23 graus para que possa inspecionar todo diâmetro do duto.

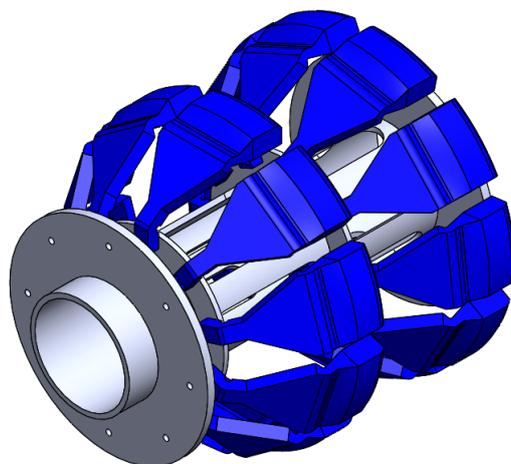


Figura 3.10: Corpo com as hastes.

Para que o sensor se mantenha em contato com o duto a posição original da haste está com o sensor colocado a 1,5 mm acima da parede, dessa forma quando o PIG estiver dentro do duto, o sensor estará deformado 1,5 mm abaixo da sua posição relaxada. A figura 3.11 e 3.12, mostram esse deslocamento e como a haste deforma por conta deste. Para o sensor se adaptar aos contornos do duto o material escolhido foi o PU shore D 80, que tem uma boa resistência, porém é flexível o suficiente para esse serviço. Devido a geometria complexa da haste foi feito uma simulação computacional para analisar os esforços causados por esse deslocamento vertical. As propriedades mecânicas desse material, relevantes para o estudo, são $E = 560MPa$, limite de escoamento de 65 MPa e $\nu = 0,2$. Na figura 3.11 é apresentado a face que foi aplicado o deslocamento.

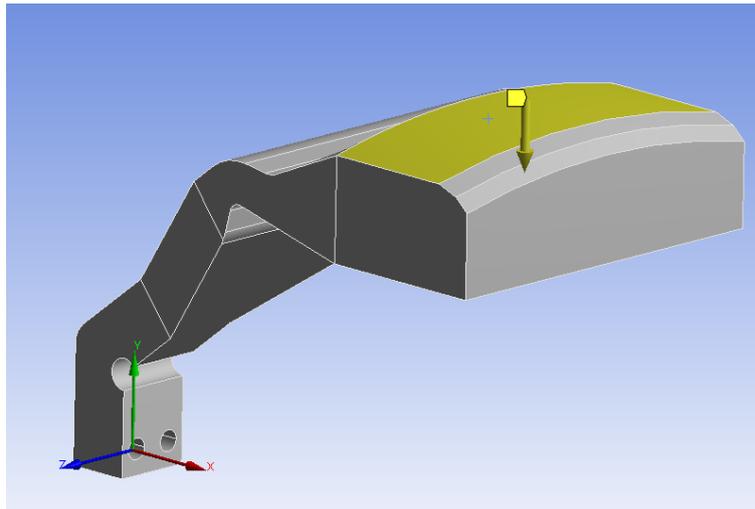


Figura 3.11: Vista lateral do deslocamento total.

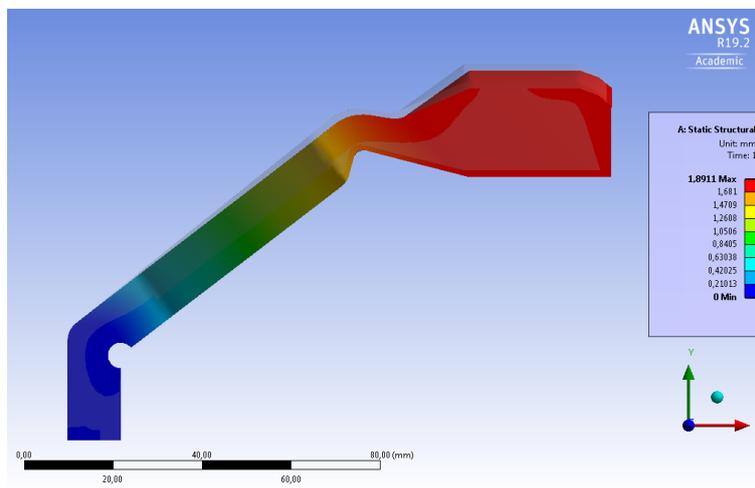


Figura 3.12: Vista lateral da deformação deslocamento total.

Para garantia de possíveis imprevistos na fabricação e montagem do duto, foi feita uma simulação em que a haste ficou deslocada 6,5 mm da posição original, ou seja, um erro de 5 mm na dimensão do duto. Que poderia ter sido causado por uma solda, na própria fabricação do duto ou por deposição de material. Esse último, não deve ser problema, pois, como apresentado no capítulo 2, antes da passagem de um PIG instrumentado, deve ocorrer a passagem dos PIGs de limpeza e de averiguação de dimensões.

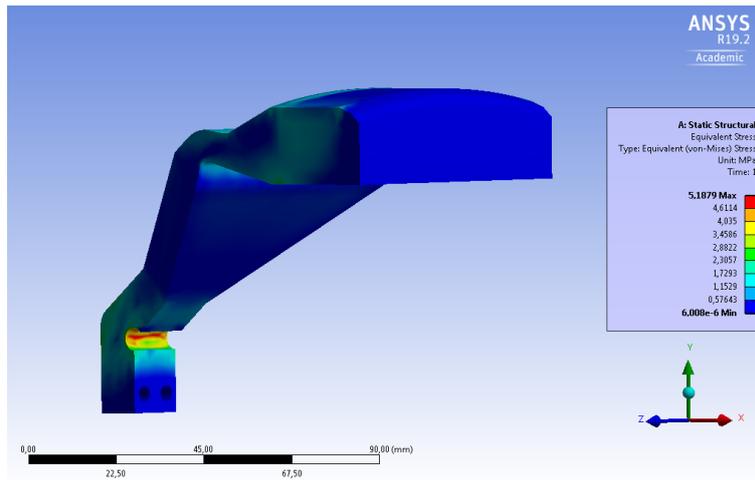


Figura 3.13: Vista isométrica da tensão equivalente de Von-Mises na haste com deslocamento de 1,5 mm.

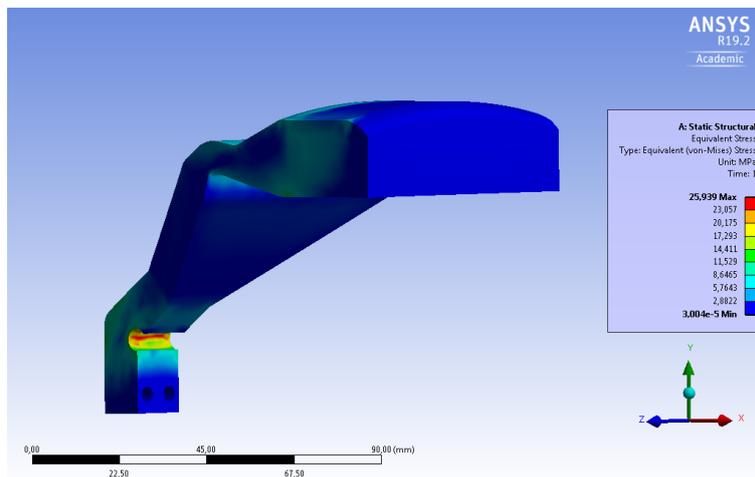


Figura 3.14: Vista isométrica da tensão equivalente de Von-Mises na haste com deslocamento de 6,5 mm.

Como pode ser visto nas simulações que são apresentadas nas figuras 3.13, 3.14, as tensões provocadas pelo deslocamento não atingem o limite de escoamento do material. O que confirma o poliuretano shore D 80 como uma boa escolha para a aplicação. Para a diminuição do desgaste da sonda ela será resinada diretamente na haste com uma camada de cerâmica.

3.2.4.3 Módulo

Com a montagem do o corpo, flanges discos selantes e haste, o módulo de sensores fica completo, como pode ser visto na figura 3.15. A dimensão da haste juntamente

com o flange que as suporta, são responsáveis por manter o sensor constantemente em contato com o duto, porém sem causar uma força de atrito significativa para o deslocamento do FIG.

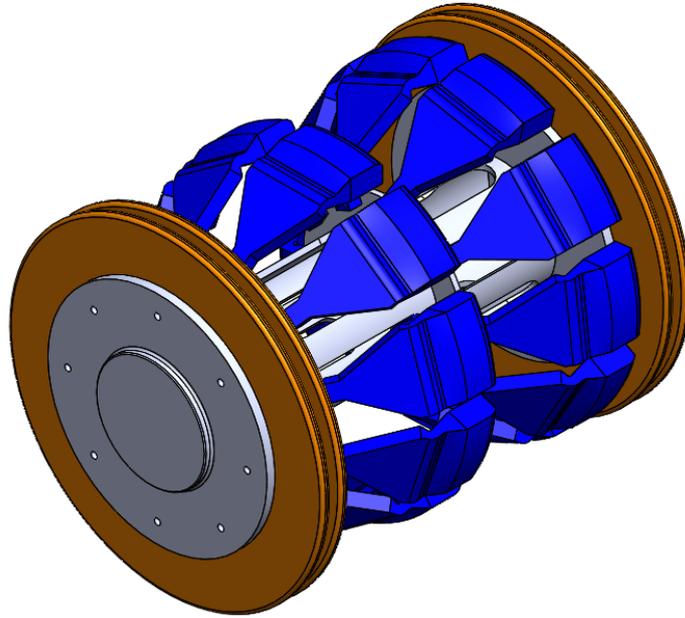


Figura 3.15: Módulo de suporte de sensores.

3.3 Projeto da sonda de corrente parasita

A técnica de correntes parasitas foi escolhida, por ser uma técnica muito barata em termos fabris e ter boa sensibilidade para detecção de defeitos. Além dessas vantagens outras técnicas não seriam eficientes para o caso, por exemplo, a técnica de ultra som não teria um bom resultado pela falta de um bom acoplante. Radiografia, precisaria de uma placa na parte externa do tubo. Inspeção visual seria prejudicada pelo fluido. Além disso, dentro da técnica de correntes parasitas, foi escolhida uma sonda diferencial, pois esta, como dito no capítulo 2, diminui o ruído do sinal. Esses sensores foram projetados de forma a serem os maiores possíveis para essa falha (furo passante de 10 mm de diâmetro), pois simplifica a montagem, a fabricação e a eletrônica.

3.3.1 Escolha das dimensões do sensor

Sabe-se da literatura [28] que o sensor deve ter aproximadamente o tamanho do defeito. Em contrapartida, uma das premissas do projeto dos sensores, é a necessidade de ter a menor quantidade de sensores possível. Então para isso foram testadas algumas configurações de sensores visando o maior comprimento possível. Deve-se ser ressaltado que devido a questões de sigilo contratual, detalhes sobre a geometria e configurações da fabricação do sensor não poderão ser expostas nesse trabalho.

Para o começo dos teste foi usada como referência a sonda do projeto do Camerine[5] e a partir dela desenhadas sondas com geometrias variadas. Essas sondas foram testadas com objetivo de encontrar o maior tamanho de sonda que tivesse uma relação sinal ruído aceitável para o experimento. A figura a seguir mostra a sonda com a placa que foi usada para os primeiros ensaios. Na placa estão desenhadas as linhas que representam as distancias longitudinais utilizadas.

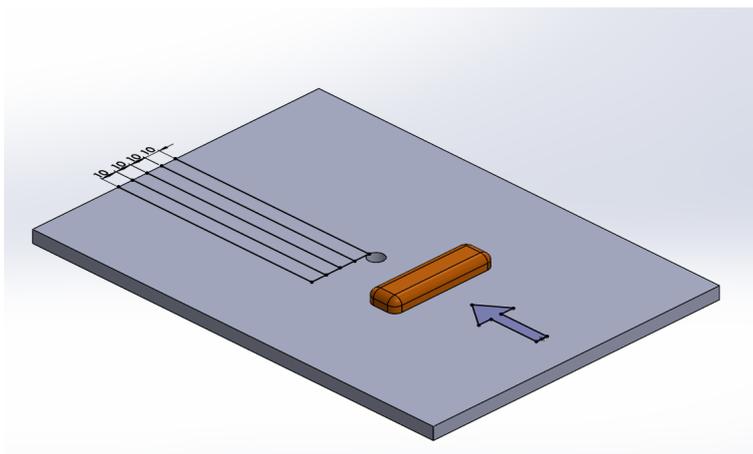


Figura 3.16: Desenho da sonda.

Para a seleção das sondas foi usado um equipamento chamado Omniscan. A técnica de correntes parasitas feita com uma sonda diferencial e esse equipamento faz a leitura da diferença dos campos resultantes das bobinas. Como explicado no capítulo 2, nessa técnica as correntes parasitas formam um campo secundário que interage com o primário de cada uma das bobinas, dessa forma quando uma das bobinas está passando pelo defeito e a outra ainda está no material base temos uma diferença de módulo dos campos resultantes de cada uma. Esse sinal é processado pelo equipamento que nos apresenta a figura mostrada a seguir 3.17.

Na primeira região pode-se ver o plano de impedância. Nele é visto um sinal

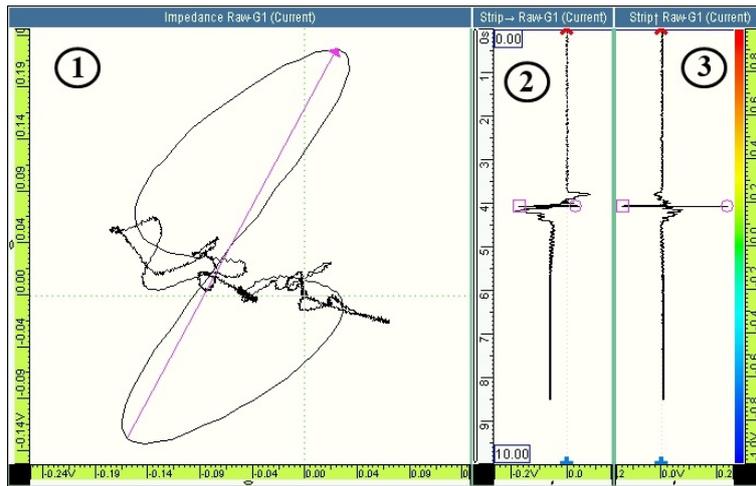


Figura 3.17: Imagem OmniScan.

semelhante a curva de Lissajous de razão ∞ , que lembra o símbolo do infinito. Qualquer outro sinal além deste, pode ser considerado ruído. Já nos gráficos 2 e 3, ao lado do plano de impedância, é colocada, respectivamente, a resistência e a reatância indutiva em função do tempo. Em ambos, o sinal é apresentado em forma de pico.

A realização do teste foi da seguinte forma: passou-se a sonda manualmente pelo defeito, mantendo o defeito sempre no centro da sonda e essa sempre em contato com a placa. Os dados foram comparados visualmente através do OmniScan. Após ter sido encontrada uma geometria que fornecia um bom sinal, foram testados diferentes tamanhos de sonda com essa geometria até que se encontrasse dimensões que atendessem à relação entre o maior tamanho possível com uma relação sinal/ruído aceitável, foram encontradas 3 e a comparação entre seus sinais será apresentado logo abaixo.

Comparação entre as primeira sondas fabricadas:

- Sonda 1:



Figura 3.18: Sonda 1.

- Sonda 2:



Figura 3.19: Sonda 2.

- Sonda 3:



Figura 3.20: Sonda 3.

Pôde ser observado que, como sabe-se da literatura, o sensor 1, sensor que possui com menor comprimento, obteve o melhor resultado tanto em termos de maior amplitude de sinal quanto com menor quantidade de ruído. O sensor 3, que era o maior deles, se tratando da amplitude do sinal, teve um resultado satisfatório, porém com muito ruído, já o sensor 2, comprimento intermediário, teve um resultado satisfatório com ruído menor que o sensor 3 e por esse motivo, ele foi o escolhido como ponto de partida para os testes que serão apresentados no capítulo de resultados.

3.3.2 Aparato experimental

Como já informado, os detalhes de dimensões do sensor não puderam ser fornecidos. Sendo um sensor de diferencial de correntes parasitas, ele é composto por duas bobinas, fabricadas com o auxílio de uma bobinadeira e um núcleo, fabricado por impressão 3D. E por fim, a sonda foi resinada com material epóxi.

Para a aquisição de dados foi utilizado o Omniscan junto com o osciloscópio. Como para versão final desse projeto a inspeção será feita de maneira remota e o Omniscan não tem capacidade de armazenamento, o osciloscópio foi utilizado para essa função. Além disso, o sinal será analisado posteriormente por um técnico, então esse sinal deve ter a menor quantidade de ruído possível. É importante ressaltar que no osciloscópio foi utilizada uma frequência de 300 Hz, que está abaixo da frequência de 2000 Hz do OmniScan, pois era necessário capturar todo o percurso do sensor. E o osciloscópio utilizado tem a limitação de salvar apenas os dados do sinal que se encontra na tela.

Após a escolha da melhor geometria para a bobina, foram feitos os testes para diferentes *lift-off* e distâncias longitudinais, esses testes serão apresentados no capítulo de resultados. E por fim foi utilizado um braço mecânico para que a movimentação da sonda fosse a mais constante possível.

A configuração utilizada no Omniscan para excitação da sonda foi:

- Frequência 25kHz
- Probe drive: 4 V
- Ganho: 50 dB
- Rotação: 0
- Ganho vertical: 0



Figura 3.21: OmniScan.

E para o osciloscópio foi usada a seguinte configuração:

- 200 mv nos eixos X e Y
- 500 ms

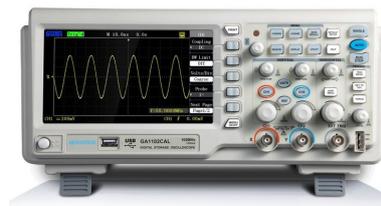


Figura 3.22: Osciloscópio.

Capítulo 4

Resultados

Como dito no capítulo anterior para os teste iniciais foi escolhido o sensor 2. Os dados adquiridos no OmniScan são enviados para o osciloscópio com o intuito de obter os pontos e posteriormente tratá-los no MatLab. No MatLab foram usados 3 filtros de média móvel, que funcionam como passa baixa, com objetivo de deixar o sinal mais claro para o inspetor irá avaliar a inspeção e mostra uma apresentação de resultado semelhante à tela do OmniScan, que foi detalhada no capítulo anterior.

4.1 Análise do *Lift-off*

Primeiro será apresentado a comparação do estudo do *lift-off*, evidenciando os resultados do melhor e do pior caso, sendo comparados. Nessa primeira apresentação a distância longitudinal se mantém constante, igual a zero, enquanto é alterado apenas o *lift-off*. Os valores utilizados foram 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5mm. É importante atentar-se que o valor de 0,5 é devido à proteção do sensor, que é a resina e uma fita anti aderente. Nesse capítulo será mostrado os extremos e os gráficos com resultados intermediários estarão no Anexo 1.

- Imagens da tela do OmniScan

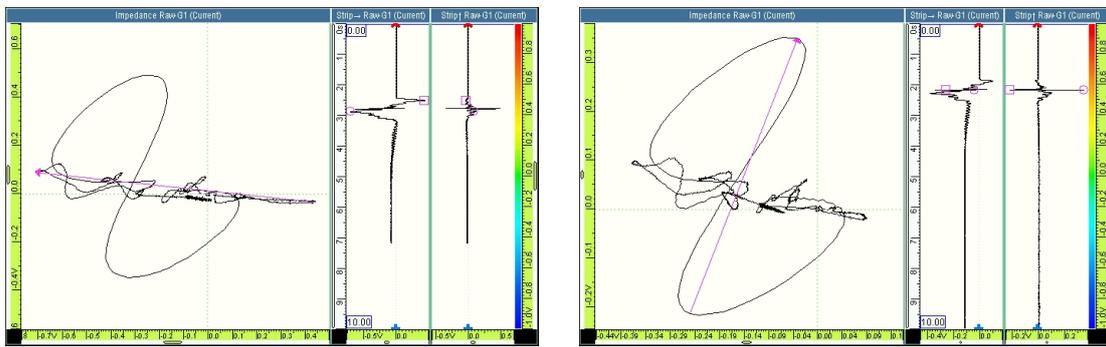


Figura 4.1: *Lift-offs* 0,5 e 1,5mm.

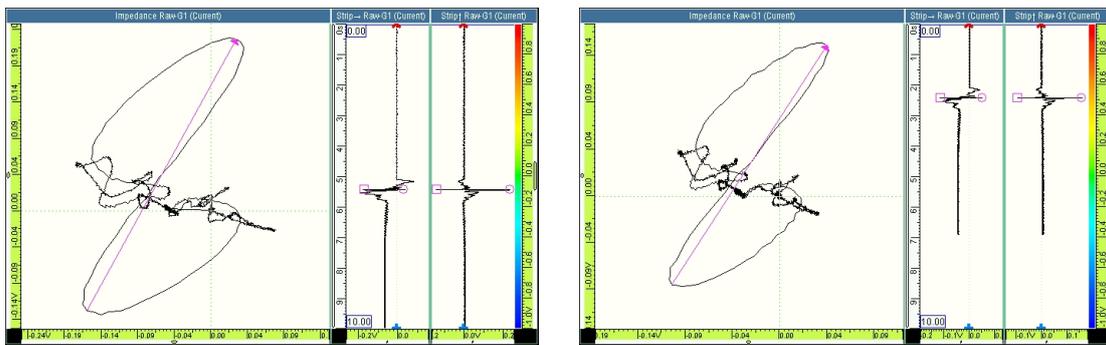


Figura 4.2: *Lift-offs* 2,5 e 3,5mm.

Para melhor clareza, nesse capítulo serão apresentados os extremos do experimento e os resultado intermediários serão apresentados no Anexo 1.

- Dados tratados no MatLab

- Sem filtro

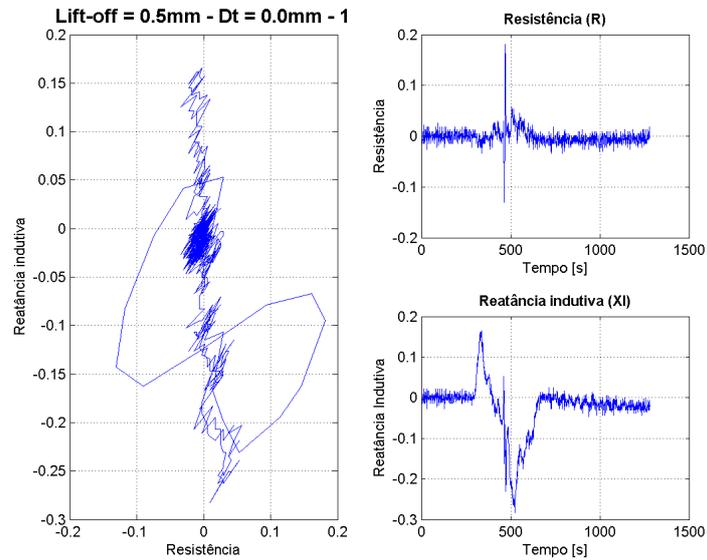


Figura 4.3: *Lift-off* de 0,5mm sem filtro.

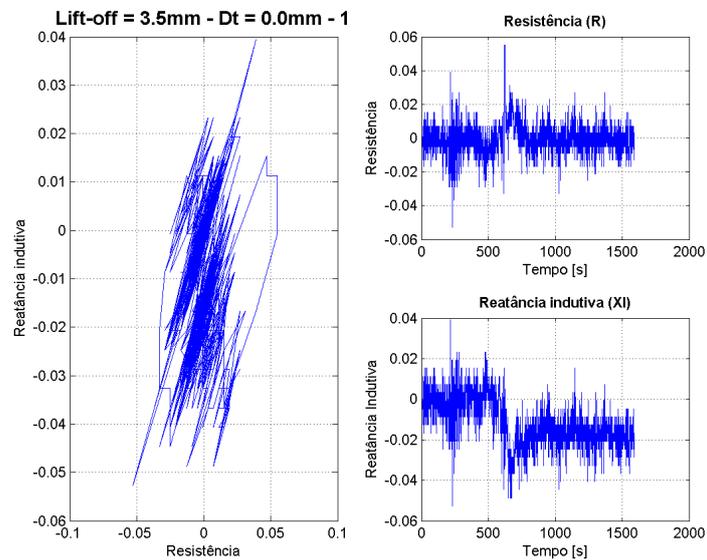


Figura 4.4: *Lift-off* de 3,5mm sem filtro.

– Filtro 1

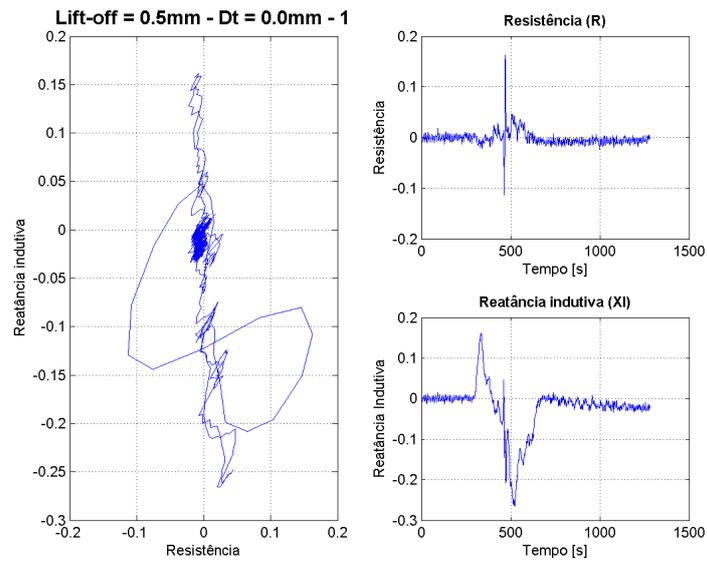


Figura 4.5: *Lift-off* de 0,5mm com filtro 1.

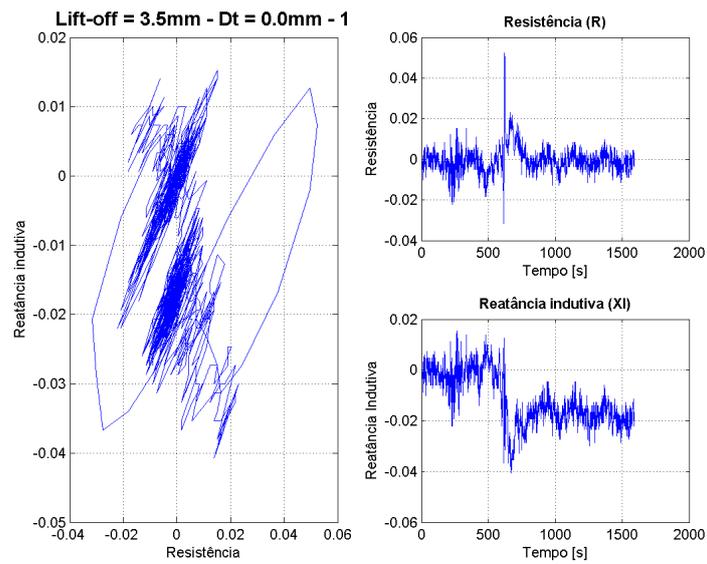


Figura 4.6: *Lift-off* de 3,5mm com filtro 1.

– Filtro 2

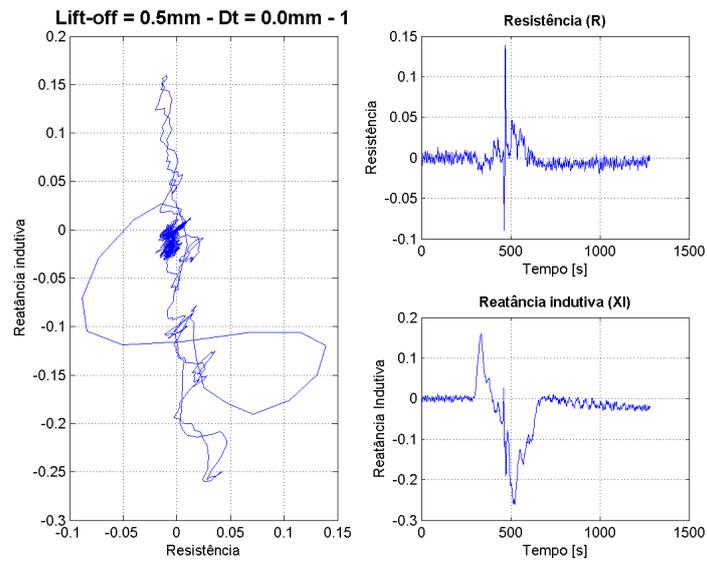


Figura 4.7: *Lift-off* de 0,5mm com filtro 2.

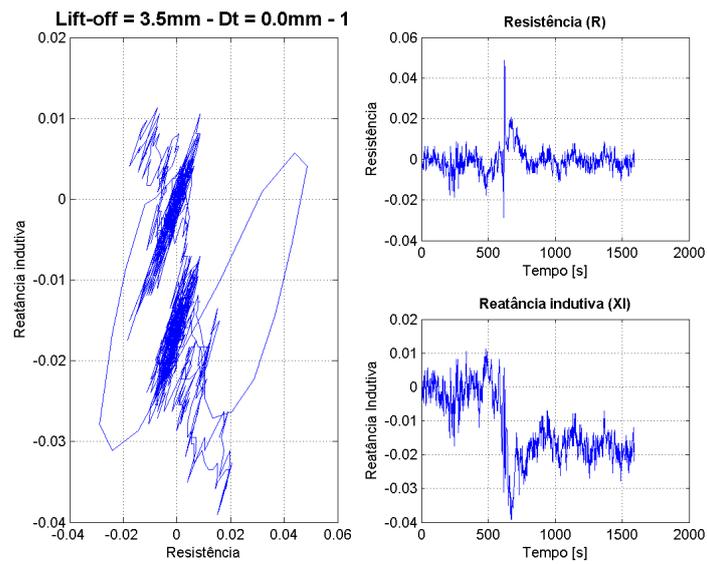


Figura 4.8: *Lift-off* de 3,5mm com filtro 2.

– Filtro 3

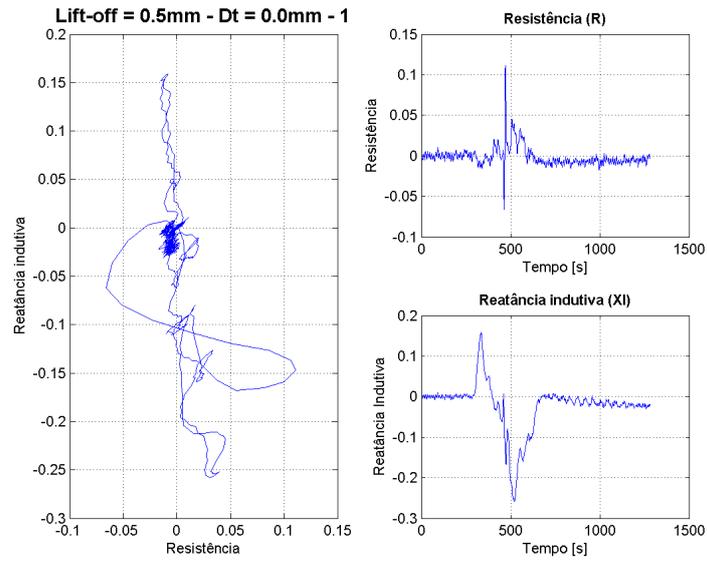


Figura 4.9: *Lift-off* de 0,5mm com filtro 3.

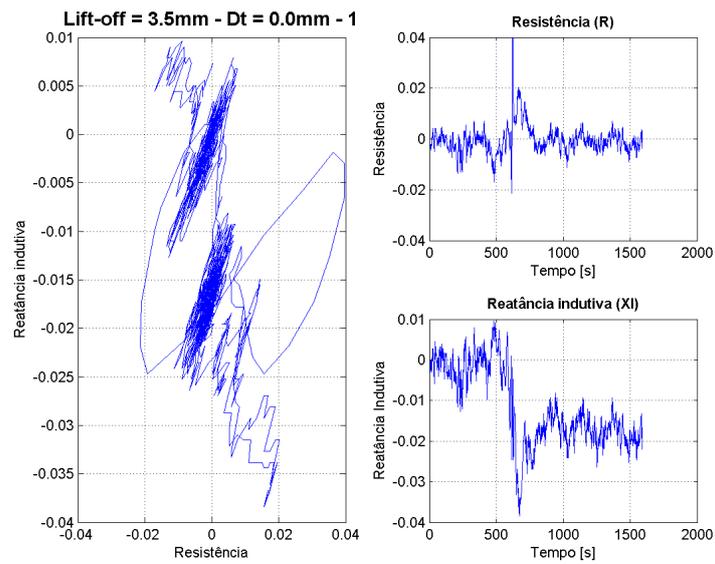


Figura 4.10: *Lift-off* de 3,5mm com filtro 3.

4.2 Análise da distância longitudinal

O estudo da distância longitudinal se torna importante, pois queremos ter o menor número de sensores possíveis. Dessa forma, precisamos de sensores mais longos o que torna necessário o estudo da distância do defeito até o centro da sonda.

- Imagens da tela do OmniScan

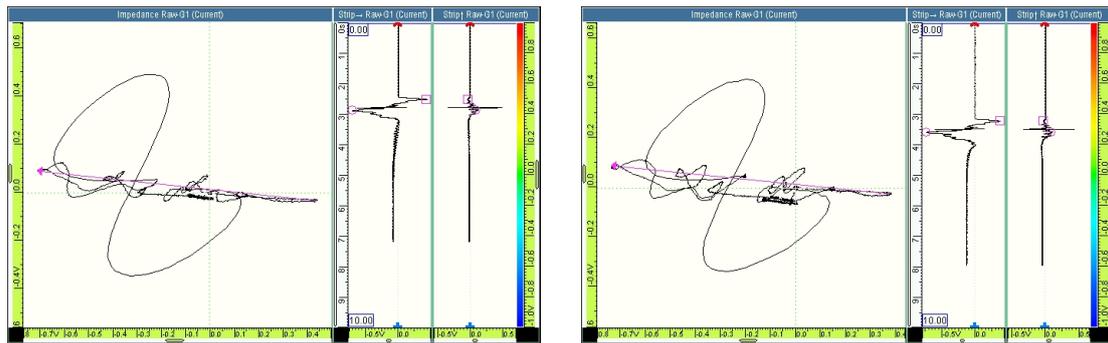


Figura 4.11: *Lift-offs* 0,5 e 1,5mm.

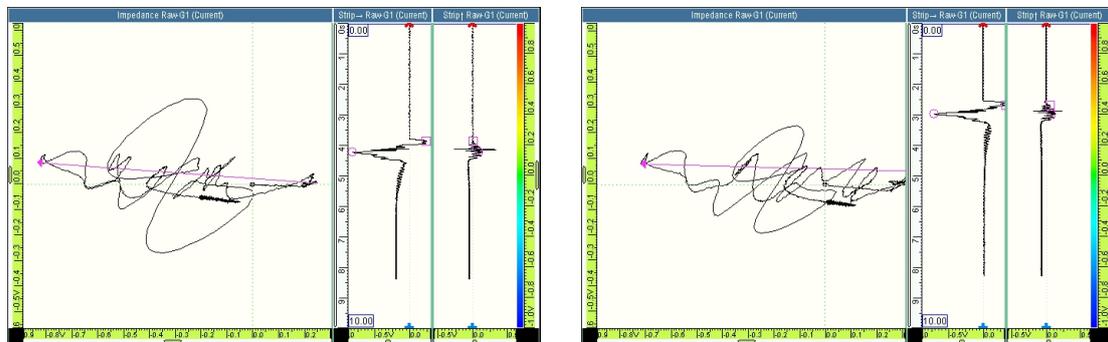


Figura 4.12: *Lift-offs* 2,5 e 3,5mm.

De forma semelhante ao estudo do *lift-off*, aqui serão apresentados os extremos do experimento e os demais resultados estarão no Anexo 1.

- Dados tratados no MatLab

- Sem filtro.

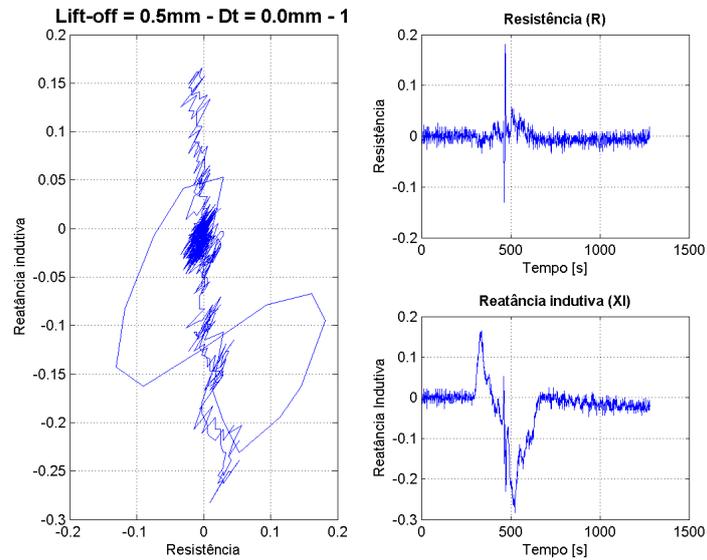


Figura 4.13: Distância longitudinal igual a 0mm.

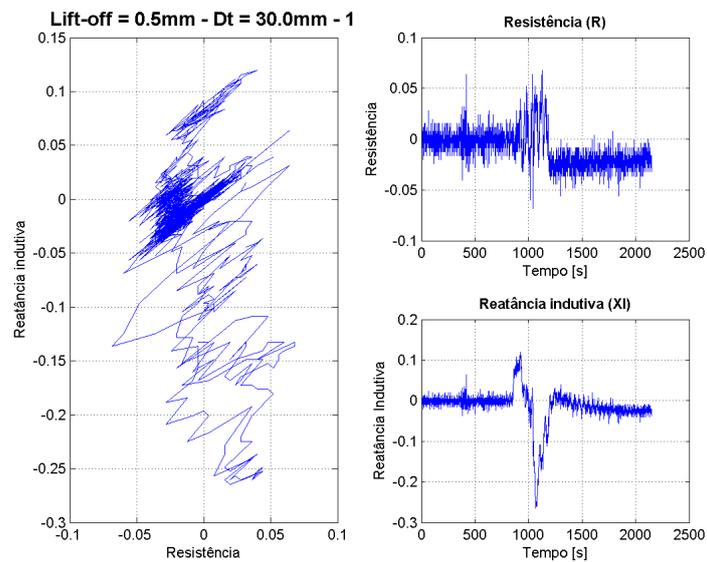


Figura 4.14: Distância longitudinal igual a 30mm.

– Filtro 1.

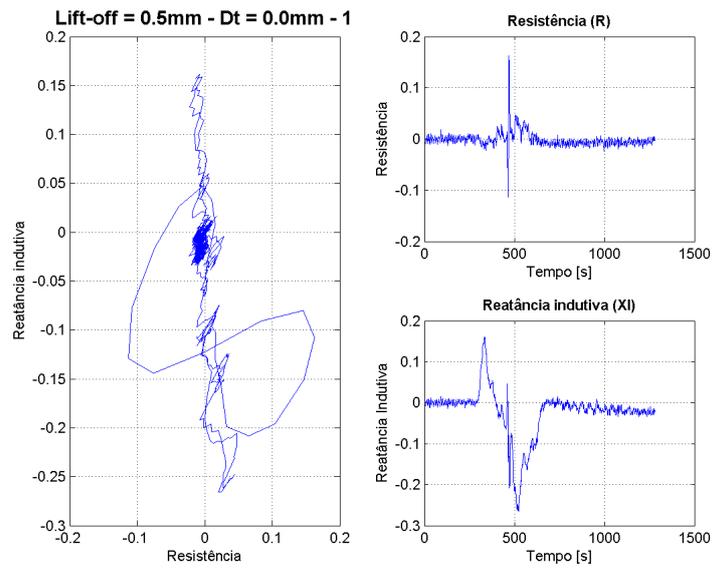


Figura 4.15: Distância longitudinal igual a 0mm.

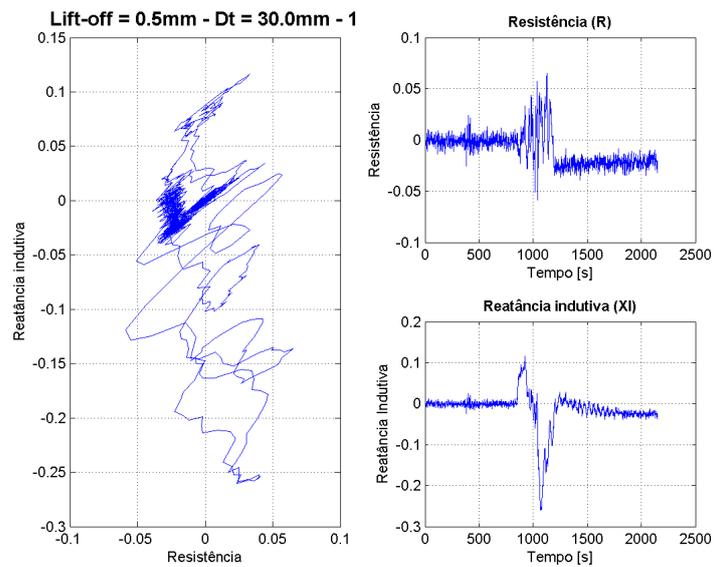


Figura 4.16: Distância longitudinal igual a 30mm..

– Filtro 2.

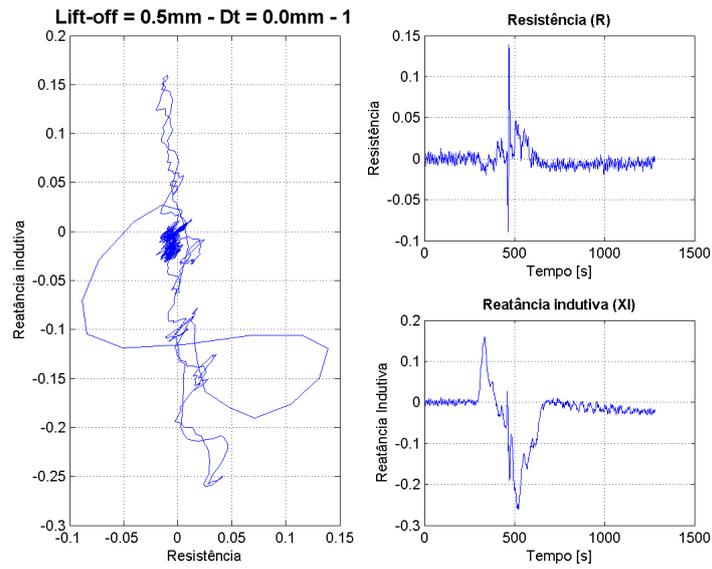


Figura 4.17: Distância longitudinal igual a 0mm.

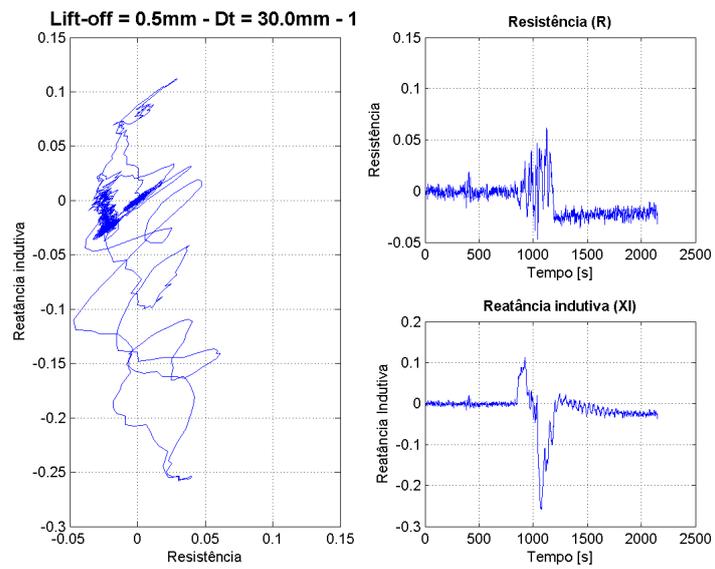


Figura 4.18: Distância longitudinal igual a 30mm.

– Filtro 3.

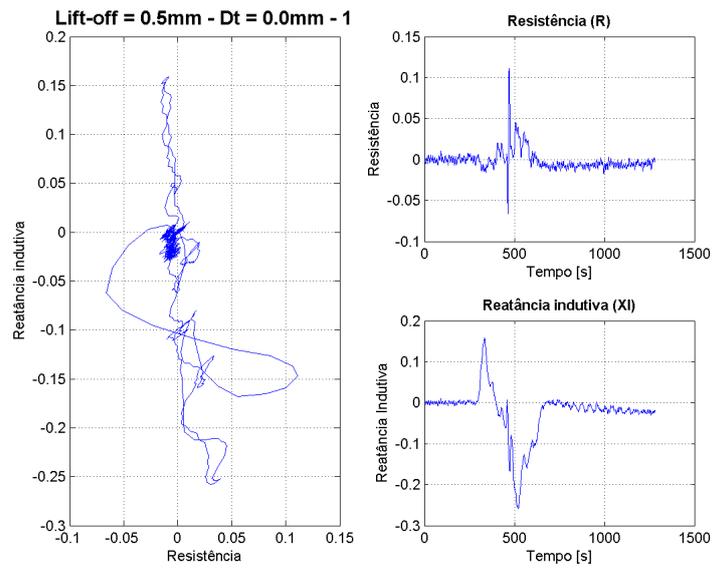


Figura 4.19: Distância longitudinal igual a 0mm.

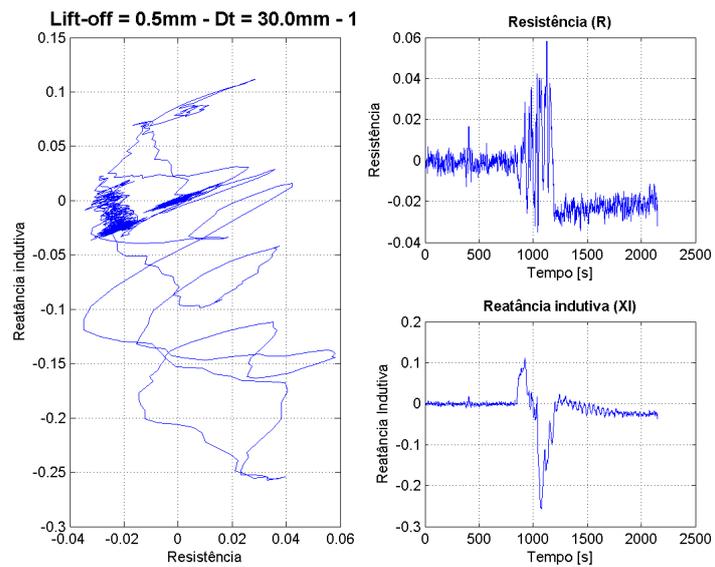


Figura 4.20: Distância longitudinal igual a 30mm.

Capítulo 5

Conclusão

Esse projeto englobou duas partes de um PIG que usa a técnica de correntes parasitas, um estudo para analisar a viabilidade da construção do módulo para suporte dos sensores e o projeto dos próprios sensores que serão usados.

O projeto do módulo mostrou que para que o PIG inicie o movimento, considerando o diferencial de pressão usualmente utilizado e o disco com uma espessura de 8 mm, precisa-se que o disco seja dimensionado com um diâmetro de 3,6 % maior que o diâmetro interno do duto. As tensões máximas que o módulo e as hastes estão sujeitos, 0,7 MPa e 5,27 MPa, respectivamente, não são suficientes para superar o limites de escoamento dos mesmos, dessa forma sabemos que ambos suportarão a inspeção com boa margem de segurança. Deve-se atentar que o projeto foi feito apenas para um módulo e o PIG completo teria, pelo menos, mais um módulo para carregar a eletrônica, o que causaria um maior atrito, entretanto, o diferencial de pressão de 5 bar, continuaria suficiente para iniciar o movimento.

No projeto do sensor foi visto que o sensor de 60 mm atendeu bem os requisitos e mostrou um bom sinal para o defeito a ser inspecionado. Apesar da queda de sinal e aumento de ruído quando o defeito não está centralizado, ainda sim o sensor foi capaz de captar sinal suficiente para que o inspetor identificasse o defeito.

Capítulo 6

Trabalhos futuros

Como foi explicitado no decorrer do projeto existe a necessidade da utilização do menor número de sensores que for possível e isso contrapõe o fato de que com o aumento do tamanho do sensor, pode aumentar a distância longitudinal do defeito para o centro do sensor, o que afeta a resolução. Então o próximo passo é encontrar outra geometria de sensor que mesmo com o defeito distante do centro da sonda, mantenha um bom sinal.

Os primeiros experimentos foram feitos em chapa, para ter um ponto de partida. Então a próxima etapa estudo é a utilização de sensores curvos, já que a inspeção será feita em uma tubulação.

Referências Bibliográficas

- [1] P. D. V BUSCHINELLI. *Desenvolvimento de um Sistema Óptico por Triangulação Cônica para Inspeção do Perfil Interno de Dutos*. Tese de M.Sc. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2007.
- [2] ASM HandBook. *ASM Metals HandBook Vol. 17 Nondestructive Evaluation and Quality Control*. ASM International, 9º edição, 1997.
- [3] NDT resource center. *Eddy current testing*. https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm. Acessado em: 18/04/2018.
- [4] Laura Barcellos Pereira. *Análise da influência da representação de trincas de fadiga a partir de entalhes de eletroerosão nos sinais de inspeção por correntes parasitas.*, 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Curso de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro.
- [5] Cesar G. Camerine. *Desenvolvimento de sondas de correntes parasitas para detecção e quantificação de fase sigma em aço inoxidável duplex*, 2012. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia metalúrgica e de materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- [6] John Tiratsoo. *Pipeline Pigging Technology*. Gulf Professional Publishing, 1992.
- [7] Jim Cordell e Hershel Vanzant. *Pipeline Pigging Handbook*. Clarion Technical Publishers, 2003.
- [8] Ricardo Dias De Souza. *Avaliação estrutural de dutos com defeitos de corrosão reais.*, 2003. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia mecânica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO.

- [9] 4PIPE-HIDROPIG. Pig espuma. <http://hidropig.com.br>. Acessado em: 10/05/2018.
- [10] T. D. Williamson. Pipeline cleaning pig. <http://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-pigging/pipeline-pigs/cleaning-pigs>. Acessado em: 10/05/2018.
- [11] International Testing Pipelines do Brasil. Serviços de limpeza. <http://www.itpbrasil.com/limpeza.html>. Acessado em: 15/08/2018.
- [12] Grupo IPB. Pig espuma. <http://www.grupoipb.com/produtos/pig/>. Acessado em: 10/12/2018.
- [13] Retaprene poliuretanos. Peças em pu. <http://www.retaprene.com.br/servicos/esferas-para-limpeza-pigs/>. Acessado em: 15/08/2018.
- [14] Pig esfera. <http://girardindustries.com/>. Acessado em: 10/12/2018.
- [15] Jarbas Santos Medeiros. Medição e modelagem da resposta de um sensor de PIG perfilométrico sob diferentes solicitações dinâmicas., 2013. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [16] Ciro Rodolfo Santos Silva. Desenvolvimento de uma ferramenta para controle de velocidade em PIGs., 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [17] Carlos Eduardo Mazzini. Comparação de Métodos de Inspeção de Integridade de Dutos: Método PIG e CIS/DCVG., 2009. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal do Espírito Santo, Curso de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro.
- [18] Rosen Group. Pig espuma. <https://www.rosen-group.com/global/solutions/services/inspection.html>. Acessado em: 10/12/2018.
- [19] Rosen. Rocombo mfl-a/xt service. http://www.rosen-group.com/global/solutions/services/service/rocombo-mfl-a_xt.html. Acessado em: 12/09/2018.

- [20] C. Ramella, G. Canavese, S. Corbellini, M. Pirola, M. Cocuzza, L. Scaltrito, S. Ferrero, C.F. Pirri, G. Ghione, V. Rocca, A. Tasso, and A. Di Lullo. A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection - part b: Field test and data processing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 133:771 – 775, 2015.
- [21] John Faber Archila Diaz. Estudo e projeto conceitual de um robô para inspeção de linhas de serviço., 2008. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- [22] Pure Technology. Smart ball technology. Catálogo Smart Ball Tachnology, Pure Technology. Acessado em: 10/11/2018.
- [23] Pure HM. Pig espuma. <http://www.purehm.net/inline-inspection/>. Acessado em: 10/12/2018.
- [24] Pure Tech Ltd. Pig espuma. <https://puretechltd.com/technology/smartball-leak-detection/>. Acessado em: 10/12/2018.
- [25] Jim Cordell e Hershel Vanzant. *All About Pigging*. On-Stream Systems, 1996.
- [26] Claudenier Viana. Passagem de pig - operação crítica. <https://www.linkedin.com/pulse/passagem-de-pig-operação-crítica-conceitos-operações-viana>. Acessado em: 30/04/2018.
- [27] Tormene Americana Brasil. Catálogo de lançador e receptor de pig. Tormene Americana do Brasil Equipamentos de Gás Natural LTDA. Acessado em: 23/10/2018.
- [28] Ricardo de Oliveira Carneval e Paulo Cesar F. Henriques. *Ensaio não destrutivo por correntes parasitas*.

Apêndice A

Estudo de *Lift-off* e distância longitudinal.

A.1 Resultados do Lift-off

- Dados tratados no MatLab

– Sem filtro

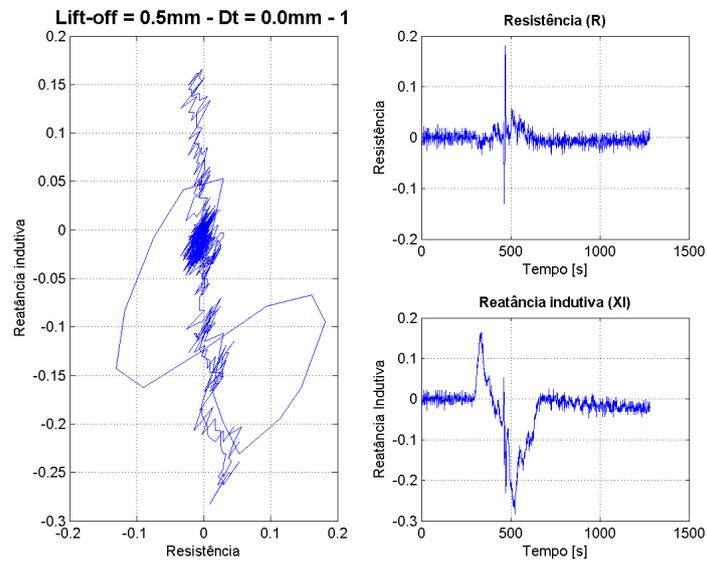


Figura A.1: *Lift-off* de 0,5mm sem filtro.

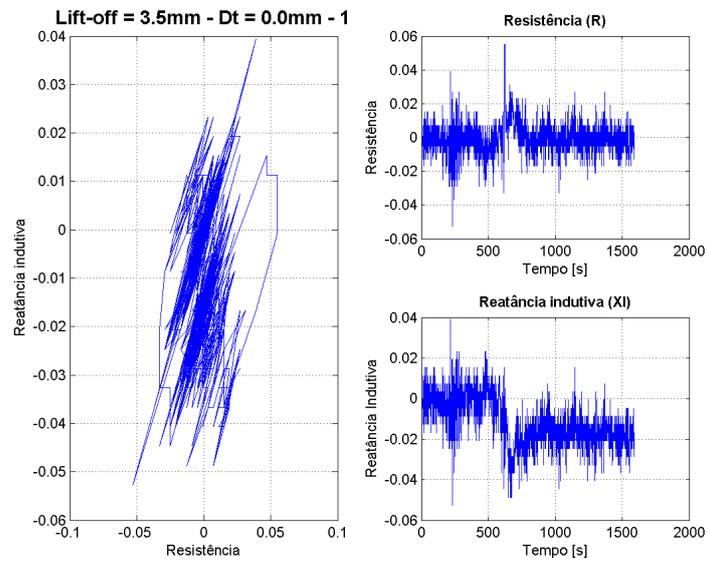


Figura A.2: *Lift-off* de 3,5mm sem filtro.

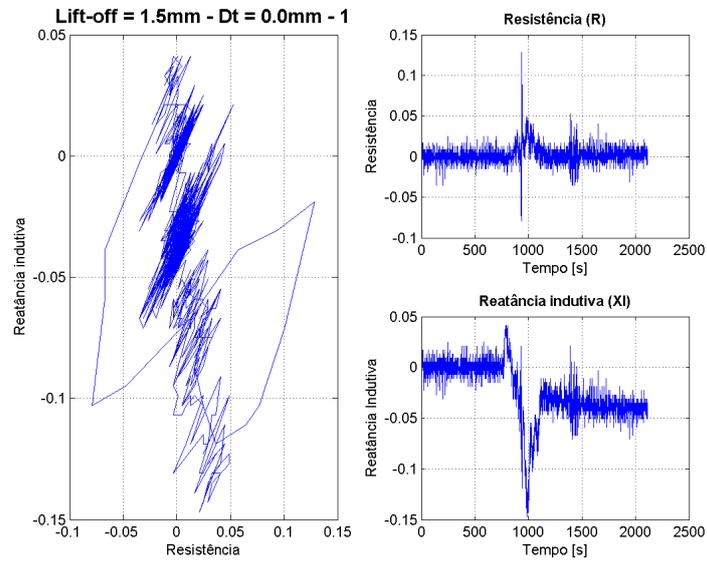


Figura A.3: *Lift-off* de 1,5mm sem filtro.

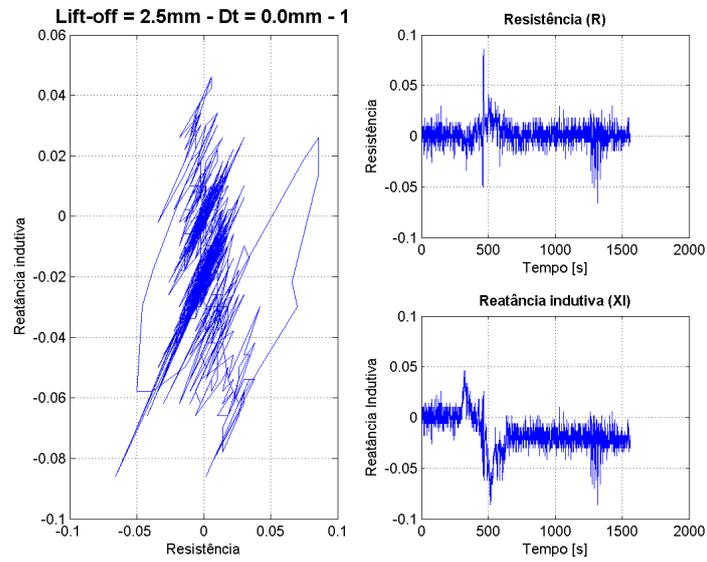


Figura A.4: *Lift-off* de 2,5mm sem filtro.

– Filtro 1

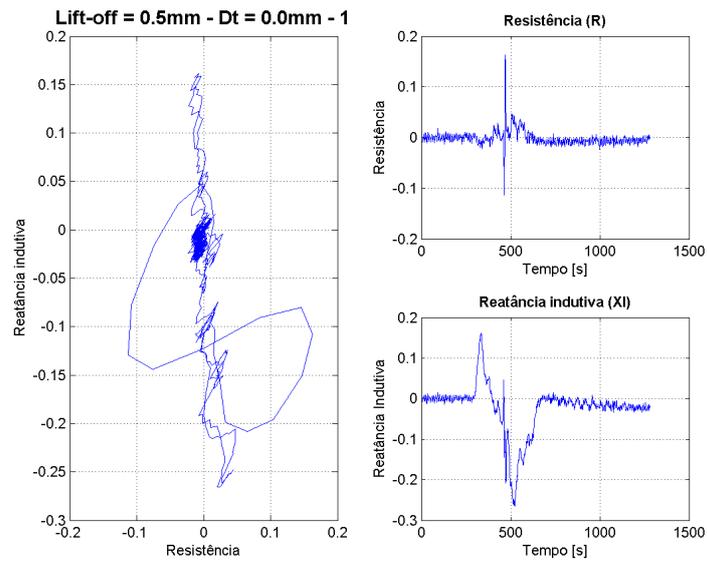


Figura A.5: *Lift-off* de 0,5mm com filtro 1.

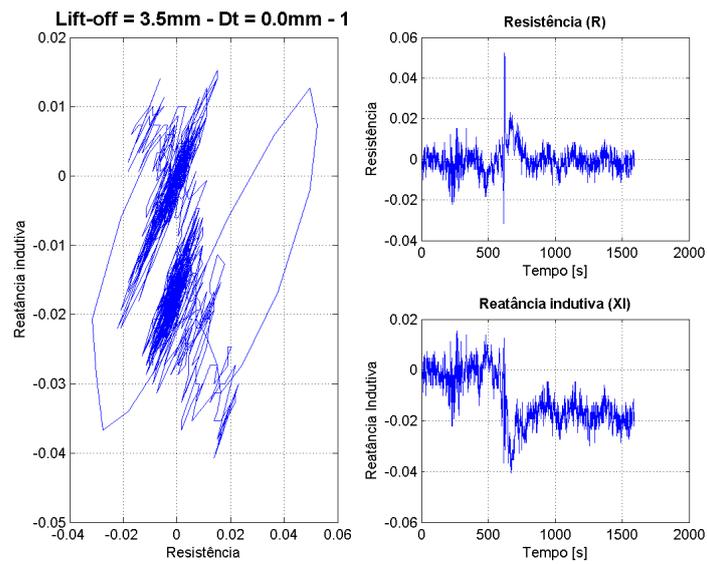


Figura A.6: *Lift-off* de 3,5mm com filtro 1.

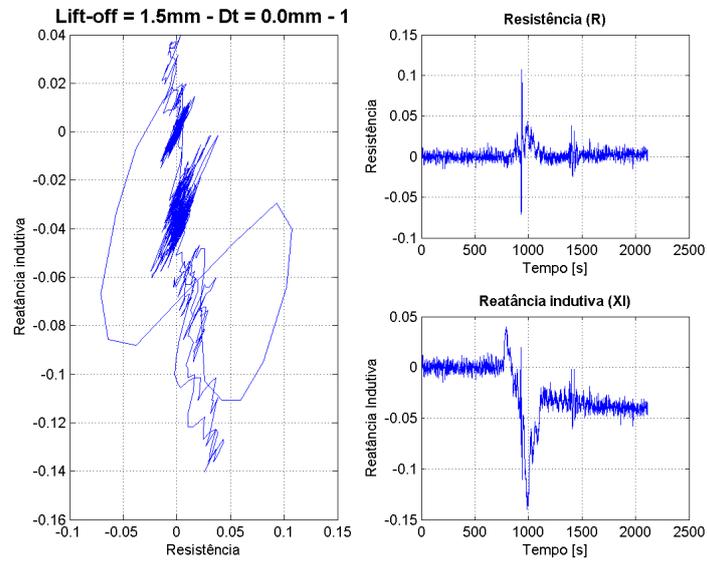


Figura A.7: *Lift-off* de 1,5mm com filtro 1.

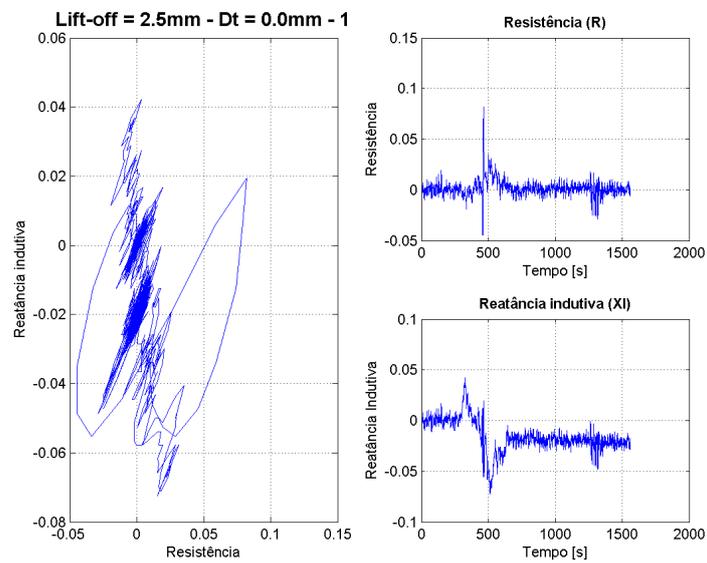


Figura A.8: *Lift-off* de 2,5mm com filtro 1.

– Filtro 2

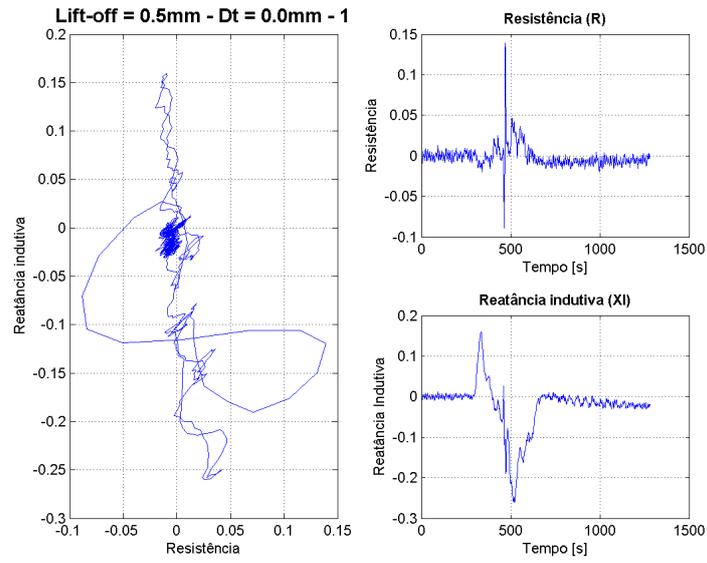


Figura A.9: *Lift-off* de 0,5mm com filtro 2.

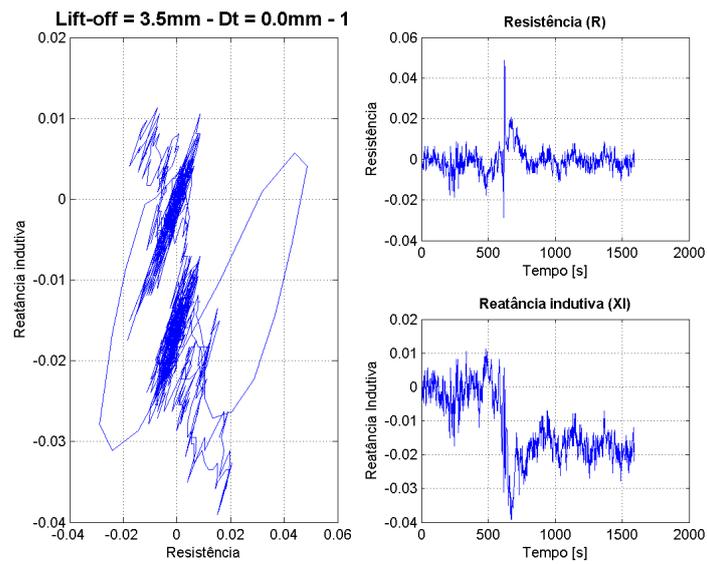


Figura A.10: *Lift-off* de 3,5mm com filtro 2.

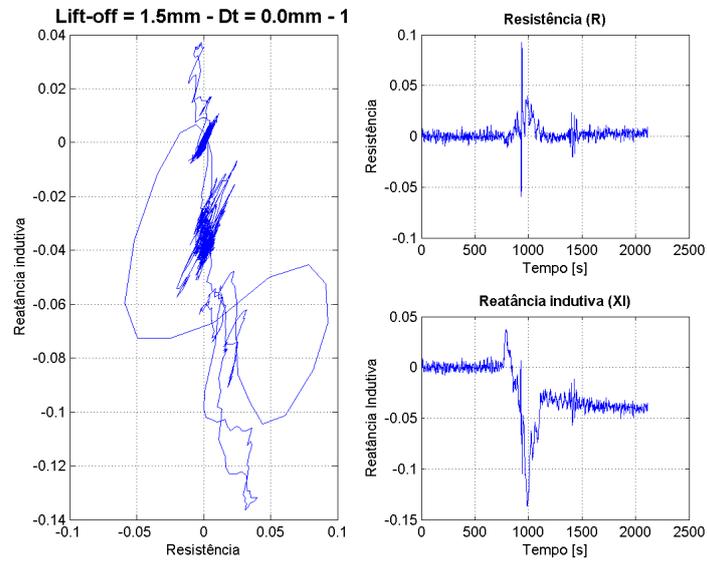


Figura A.11: *Lift-off* de 1,5mm com filtro 2.

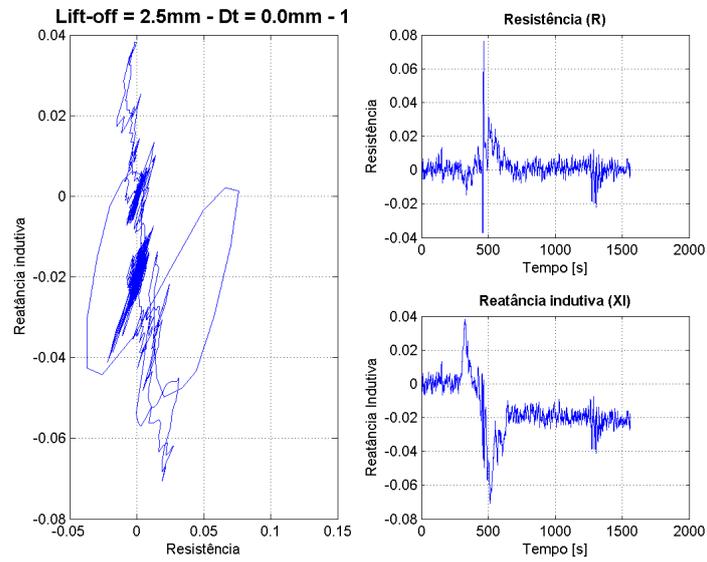


Figura A.12: *Lift-off* de 2,5mm com filtro 2.

– Filtro 3

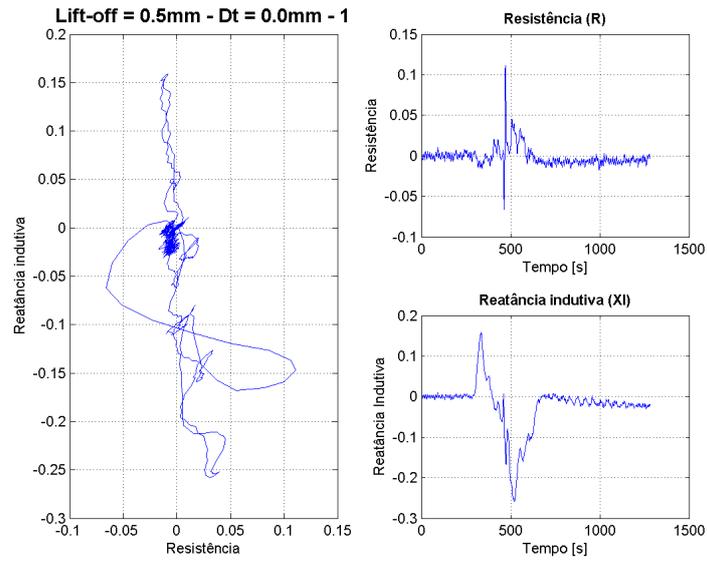


Figura A.13: *Lift-off* de 0,5mm com filtro 3.

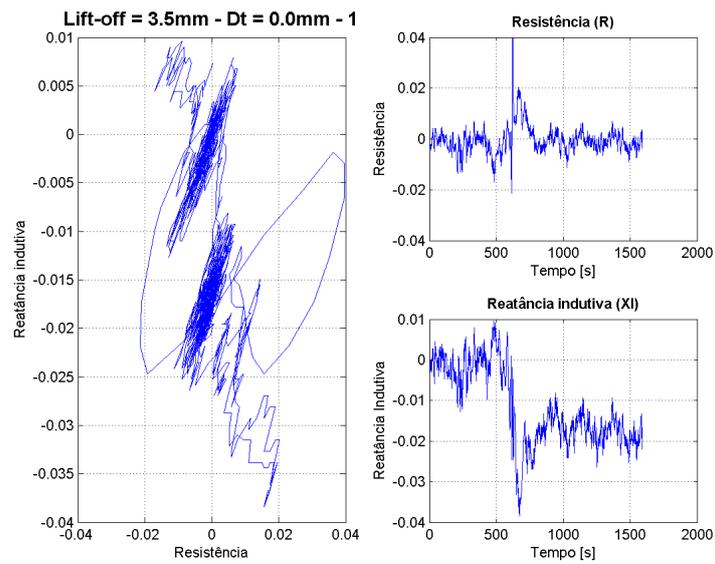


Figura A.14: *Lift-off* de 3,5mm com filtro 3.

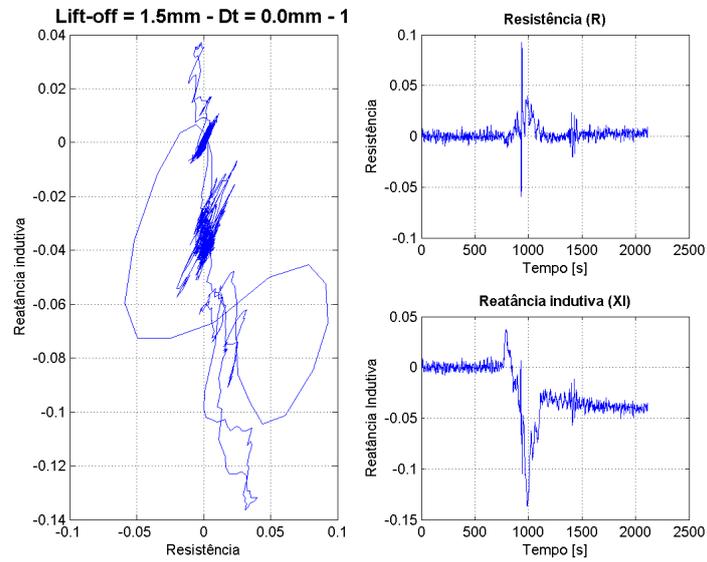


Figura A.15: *Lift-off* de 1,5mm com filtro 2.

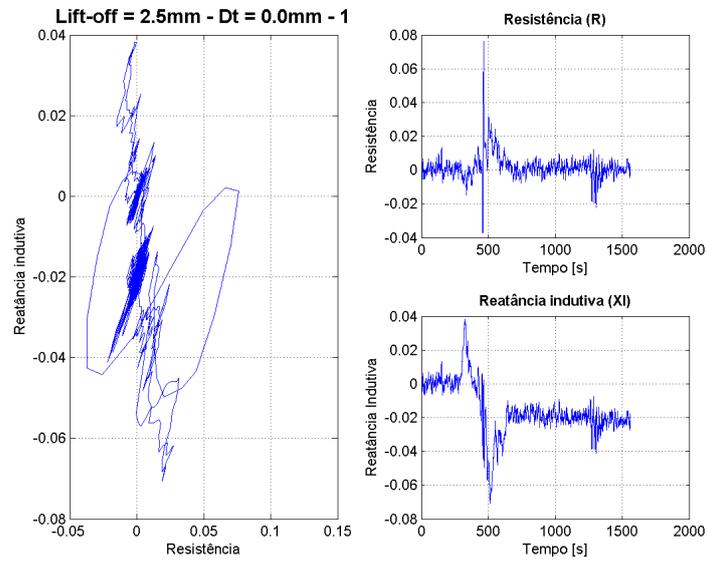


Figura A.16: *Lift-off* de 2,5mm com filtro 2.

A.2 Resultados do estudo da distância longitudinal

- Dados tratados no MatLab

– Sem filtro.

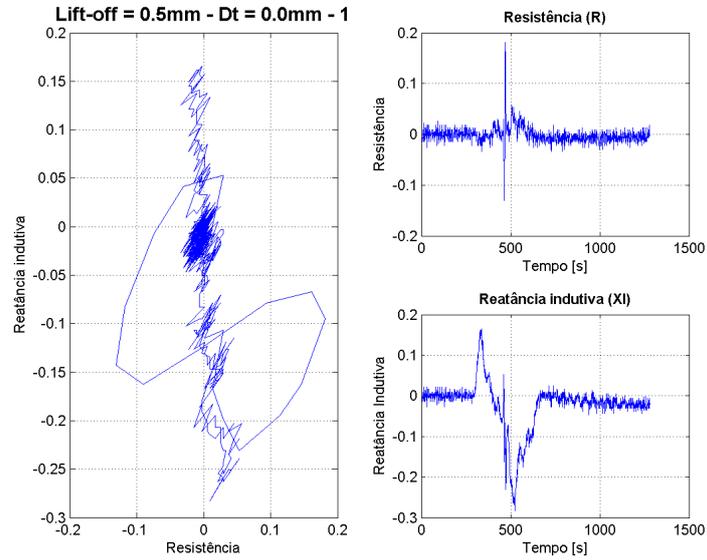


Figura A.17: Distância longitudinal igual a 0mm.

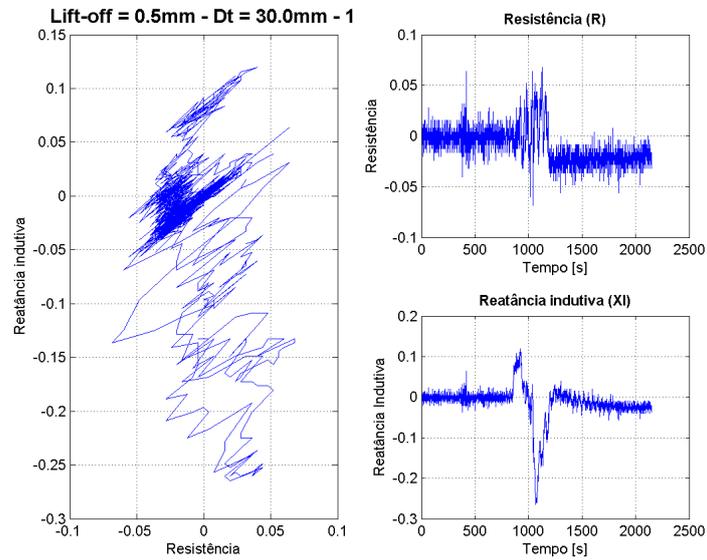


Figura A.18: Distância longitudinal igual a 30mm.

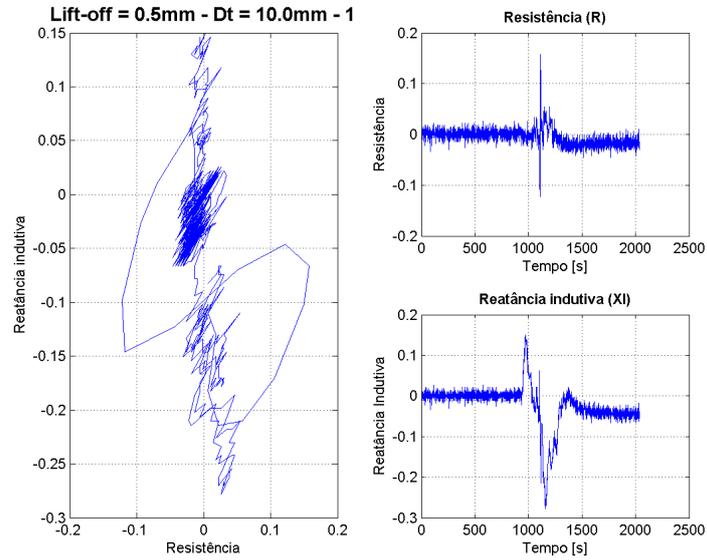


Figura A.19: Distância longitudinal igual a 0mm.

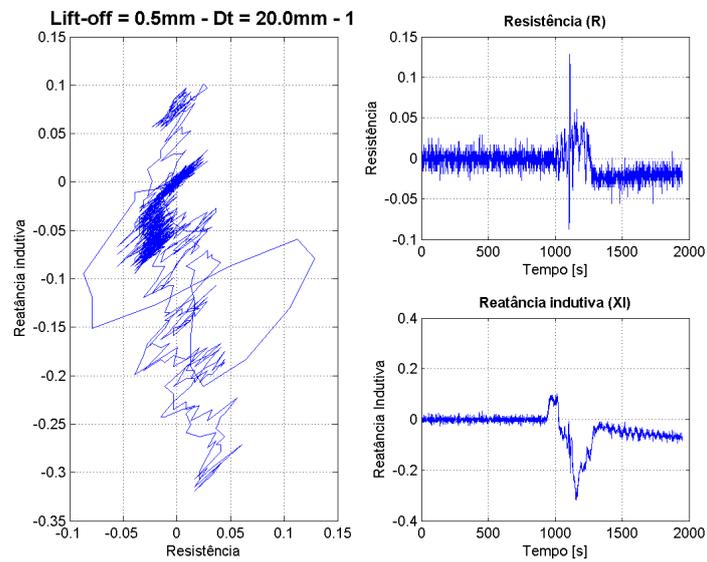


Figura A.20: Distância longitudinal igual a 30mm.

– Filtro 1.

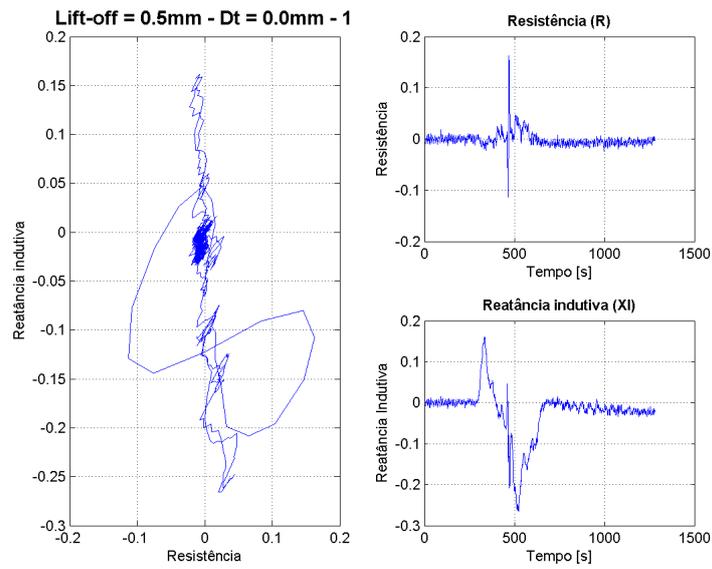


Figura A.21: Distância longitudinal igual a 0mm.

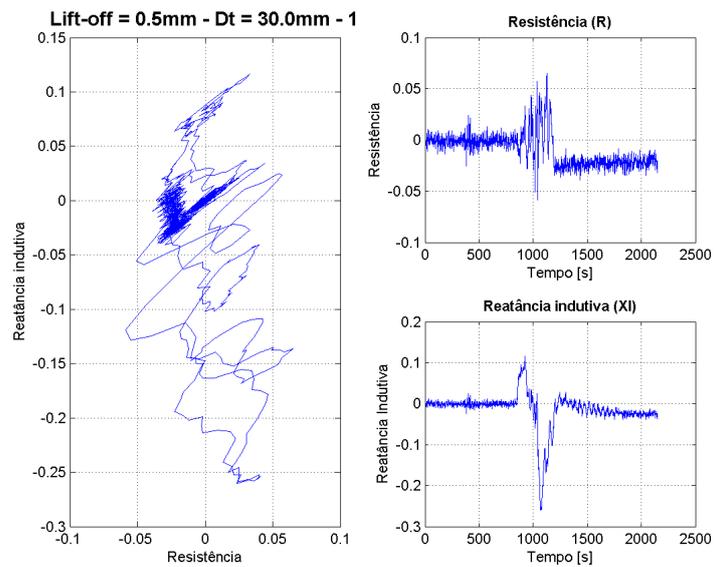


Figura A.22: Distância longitudinal igual a 30mm.

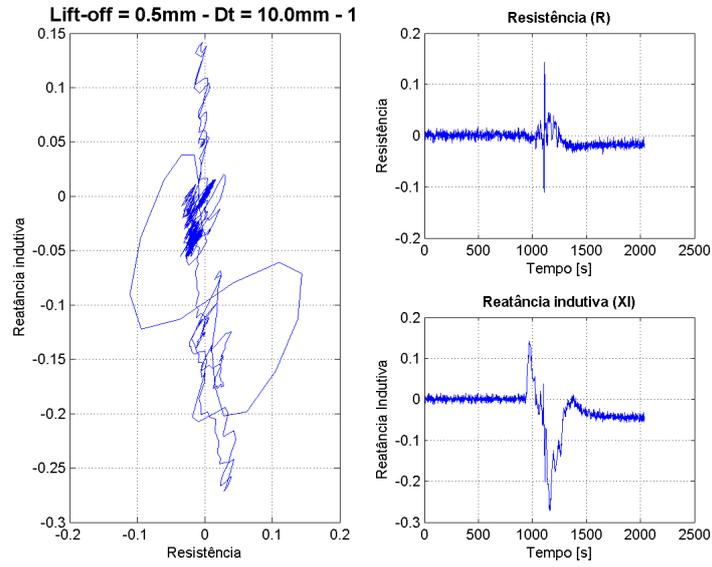


Figura A.23: Distância longitudinal igual a 0mm.

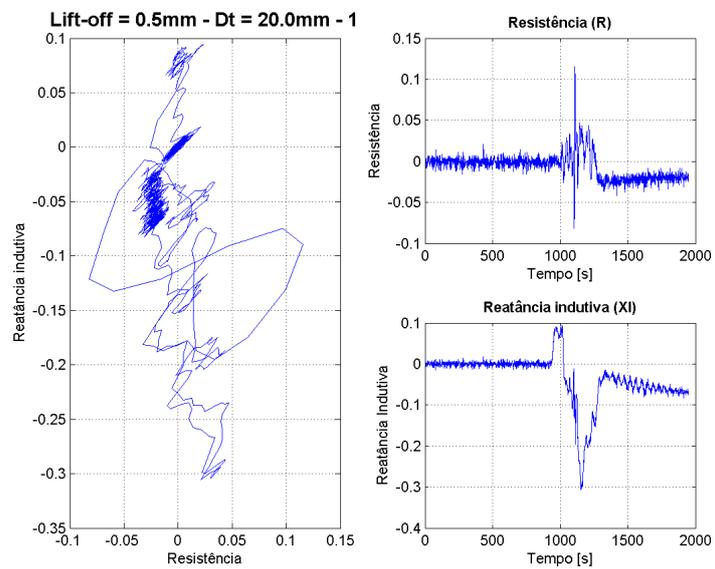


Figura A.24: Distância longitudinal igual a 30mm.

– Filtro 2.

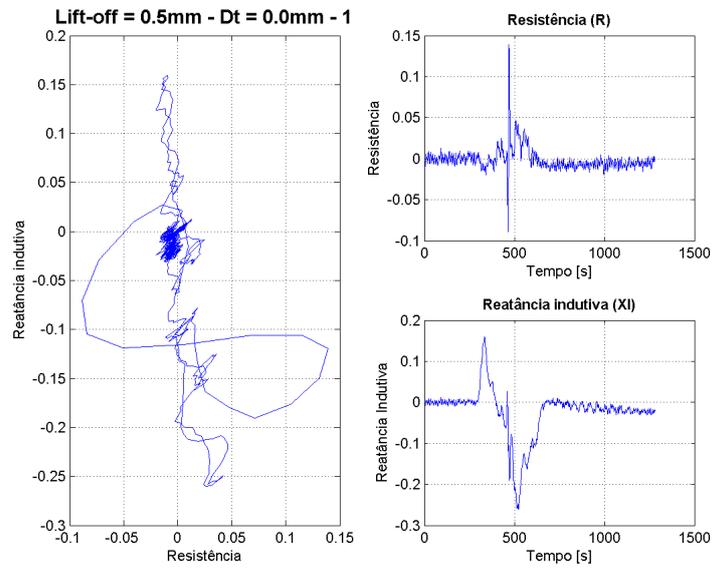


Figura A.25: Distância longitudinal igual a 0mm.

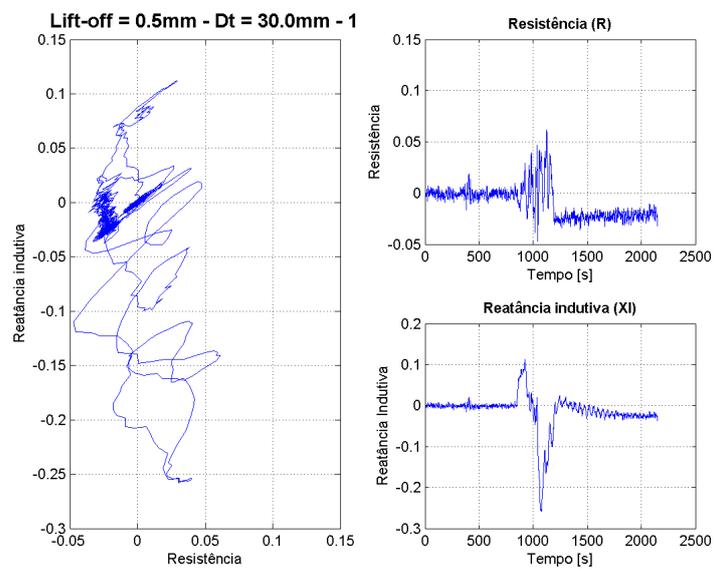


Figura A.26: Distância longitudinal igual a 30mm.

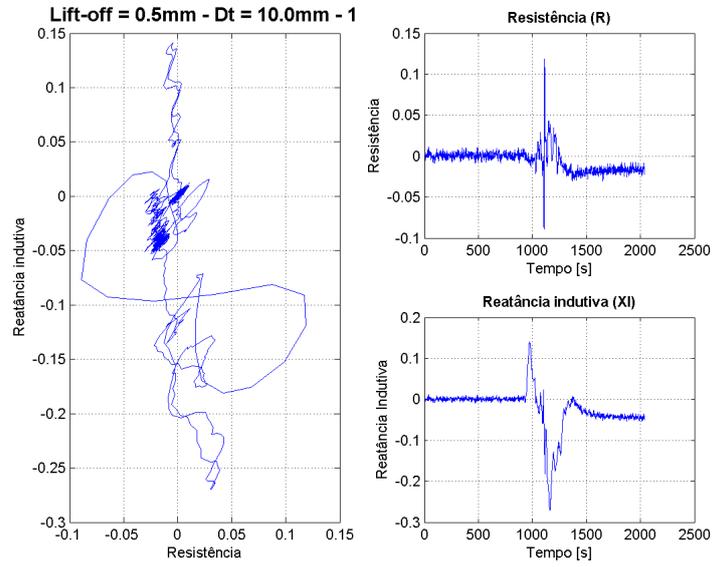


Figura A.27: Distância longitudinal igual a 0mm.

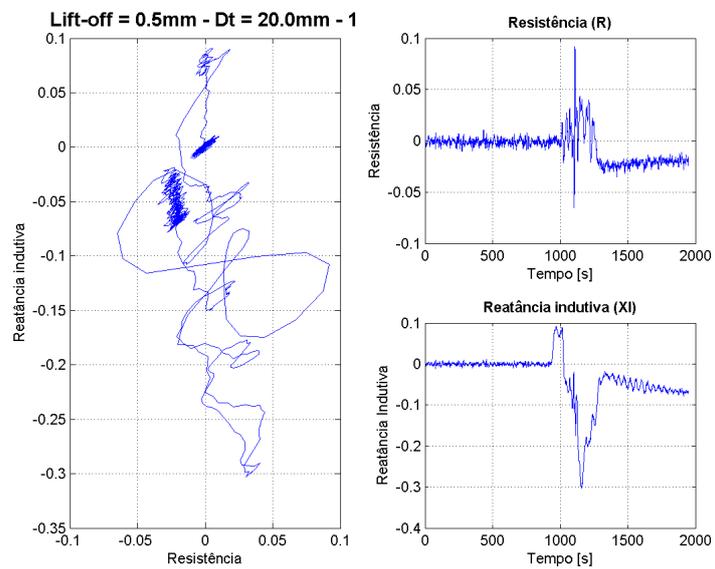


Figura A.28: Distância longitudinal igual a 30mm.

– Filtro 3.

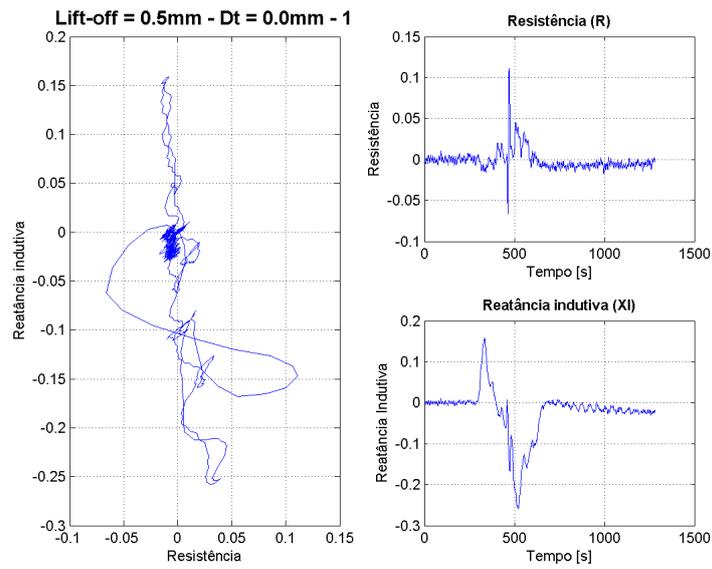


Figura A.29: Distância longitudinal igual a 0mm.

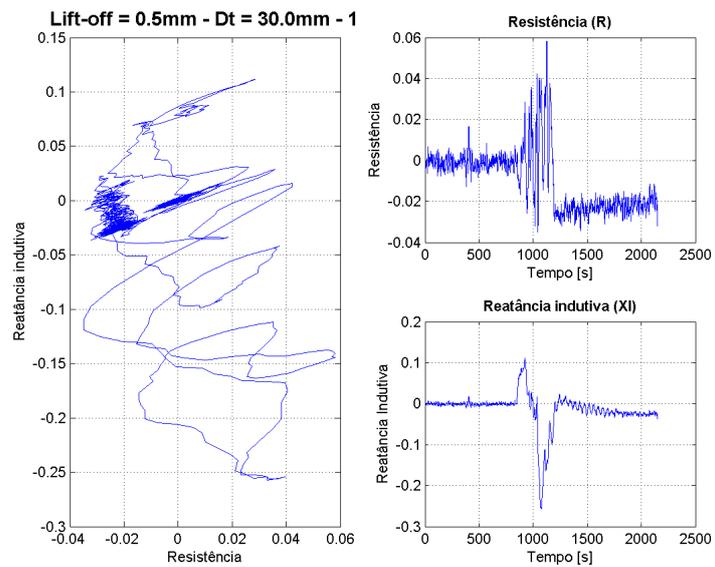


Figura A.30: Distância longitudinal igual a 30mm.

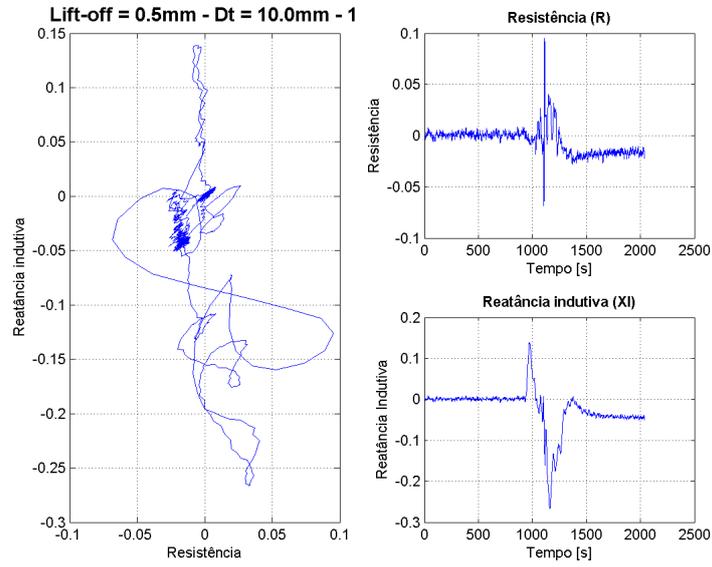


Figura A.31: Distância longitudinal igual a 0mm.

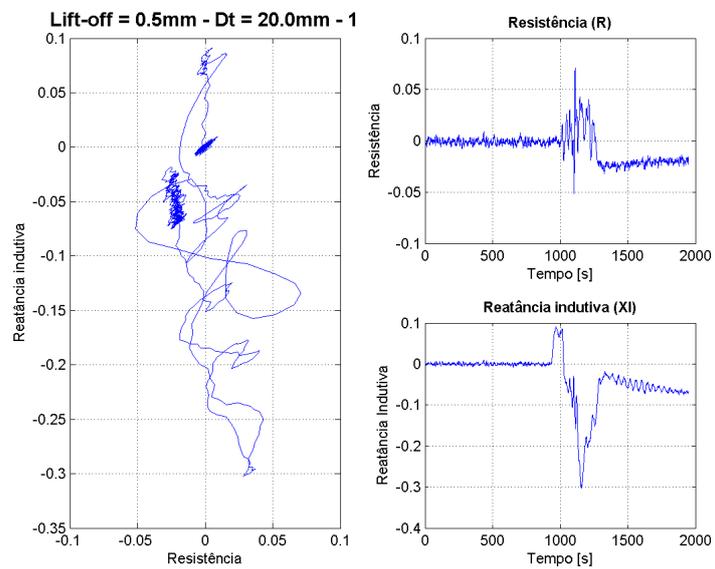
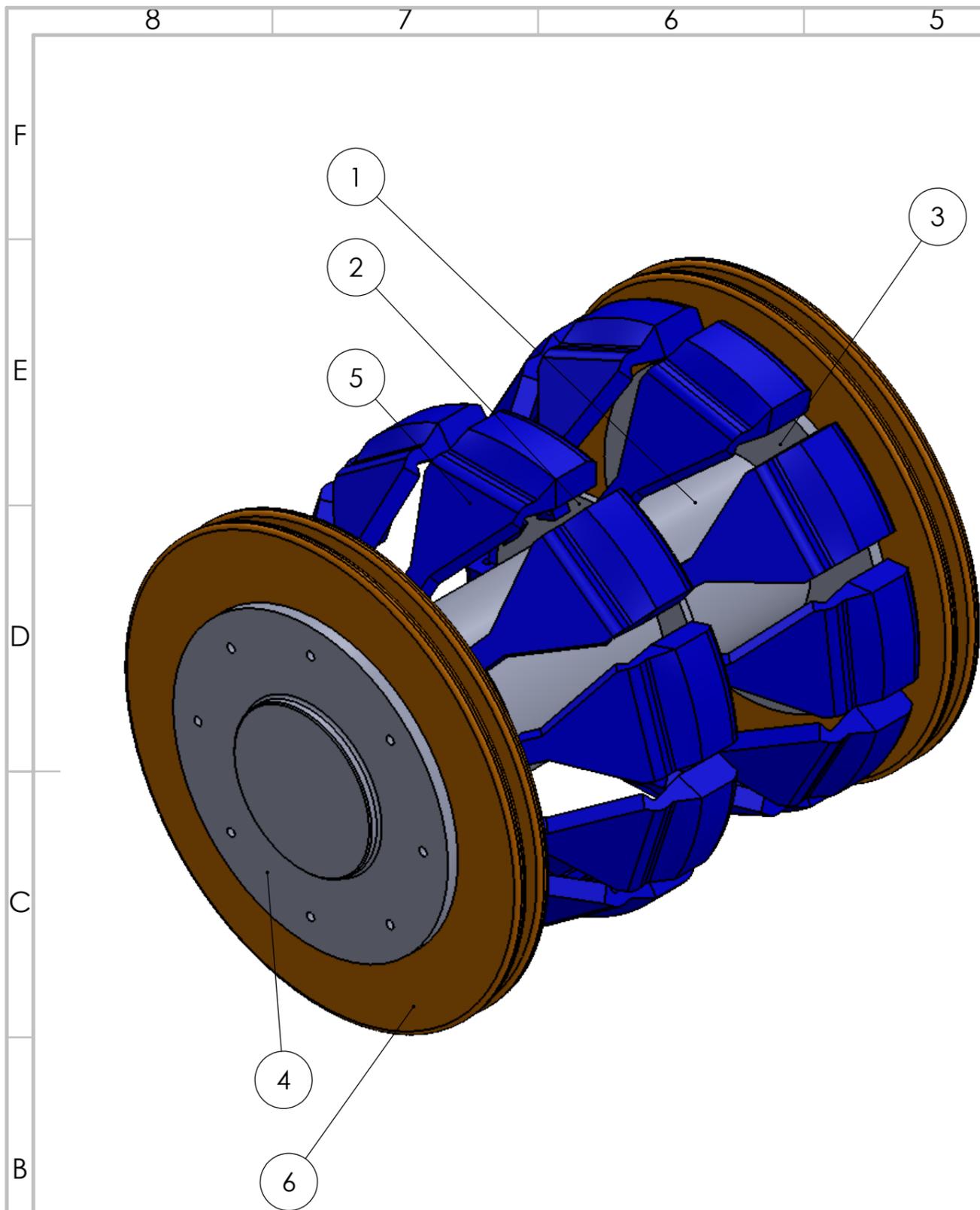


Figura A.32: Distância longitudinal igual a 30mm.

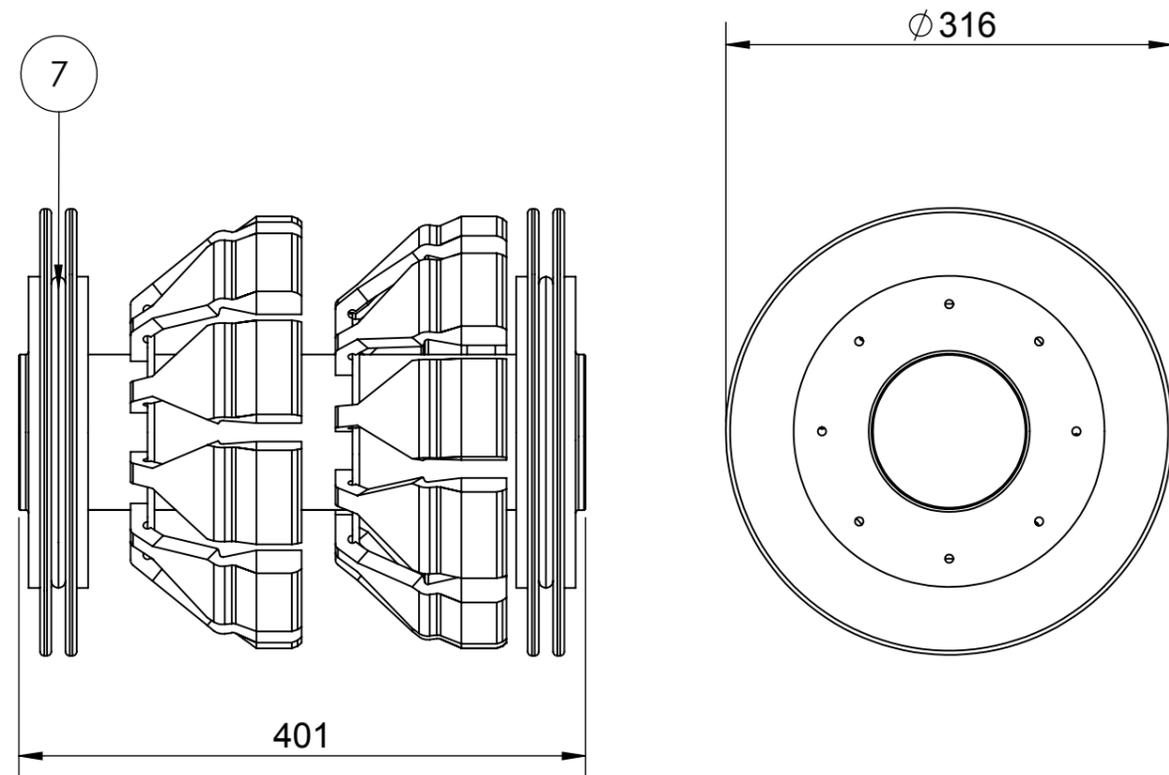
Apêndice B

Desenhos de fabricação.

Nesse apêndice serão apresentados os desenhos de fabricação das peças do módulo do FIG.



ITEM	QNT.	DESCRIÇÃO	MATERIAL
1	1	DE 0001.1 CORPO VER 2	AL 5052
2	2	DE 0001.2 FLANGE	AL 5052
3	2	DE 0001.4 DISCO CORPO	AL 5052
4	2	DE 0001.9 TAMPA FRONTAL	
5	20	DE 0001.7 BRAÇO	PU - 70 SHORE A
6	4	DE 0001.5 DISCO SELANTE	PU - 70 SHORE A
7	2	DE 0001.6 ESPAÇADOR DO SELANTE	PU - 70 SHORE A

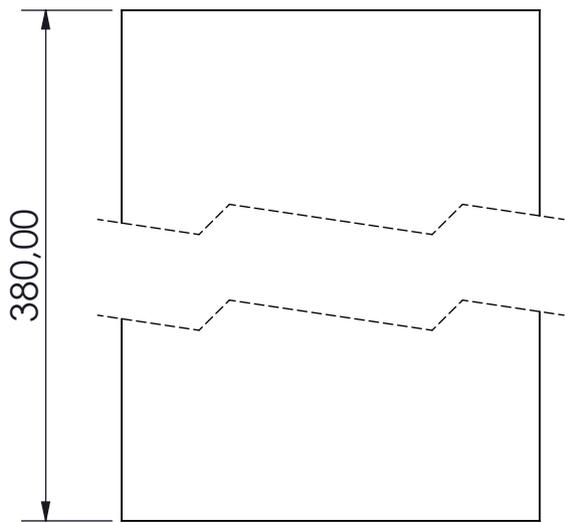


Victor Hugo Cid Pereira			Observações:	
1º Diedro	Data: 11/05/2018	Desenho: 1		
Unidade: mm	Projeto de graduação	UFRJ		
			Escala: 1 : 5	

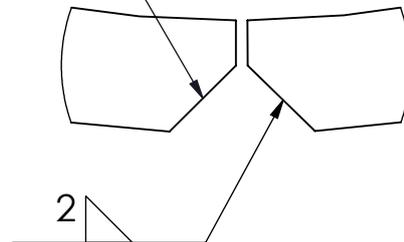
ITEM	QNT	DIMENSÕES	MATERIAL
1	1	CHAPA# 5mm x 350mm x 315mm	AL 5052

F

F



3,00 x 45°



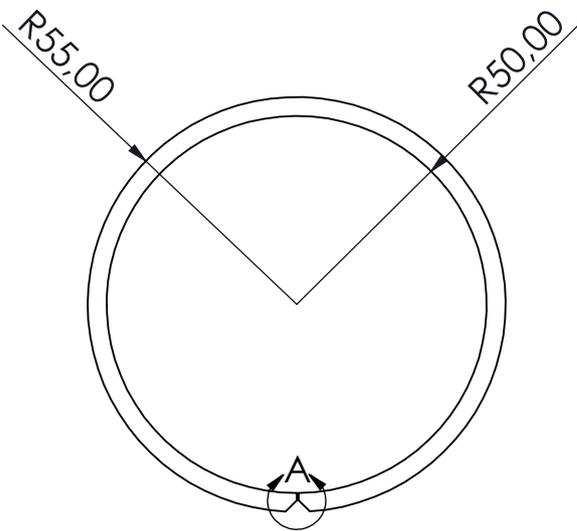
DETAIL A
SCALE 3 : 1

E

E

D

D

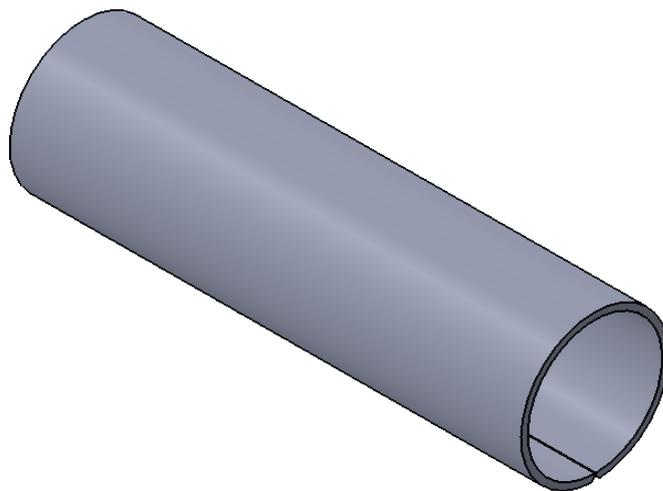


C

C

B

B



A

A

Victor Hugo Cid Pereira

Observações:

1° Diedro

Data: 11/05/2018

Desenho: 1.1

Unidade: mm

Projeto de graduação

UFRJ



Escala: 1 : 2

4

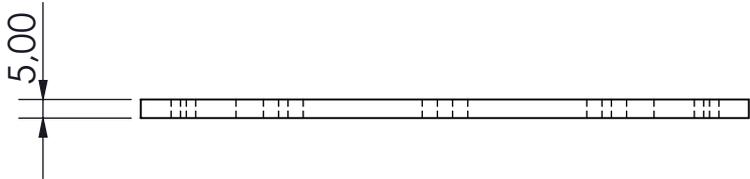
3

2

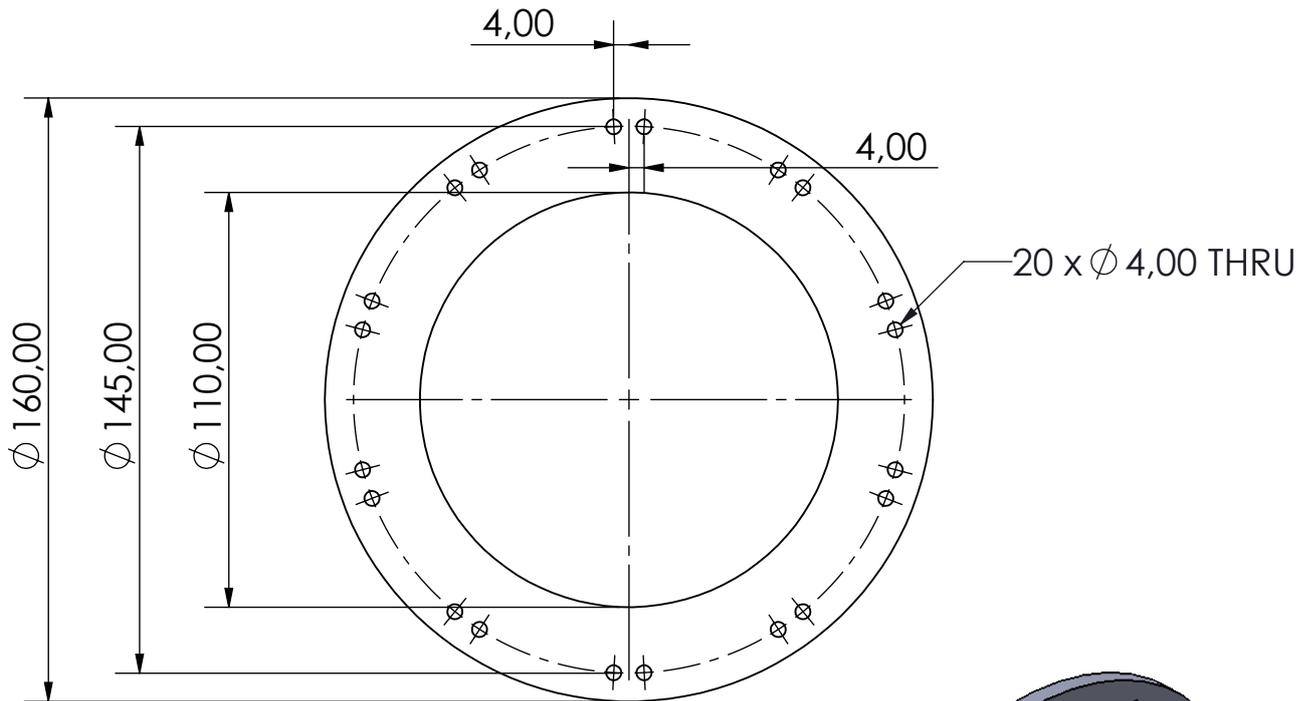
1

ITEM	QNT	DIMENSÕES	MATERIAL
1	1	CHAPA #5/16" x ØEXT450mm x ØINT360mm	AL 5052

F ▽▽ F

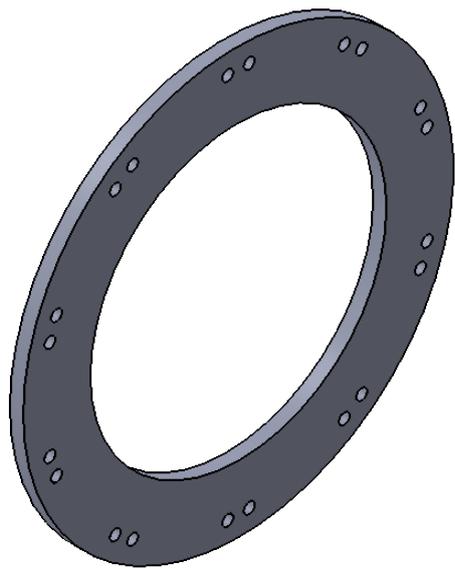


E E



D D

C C



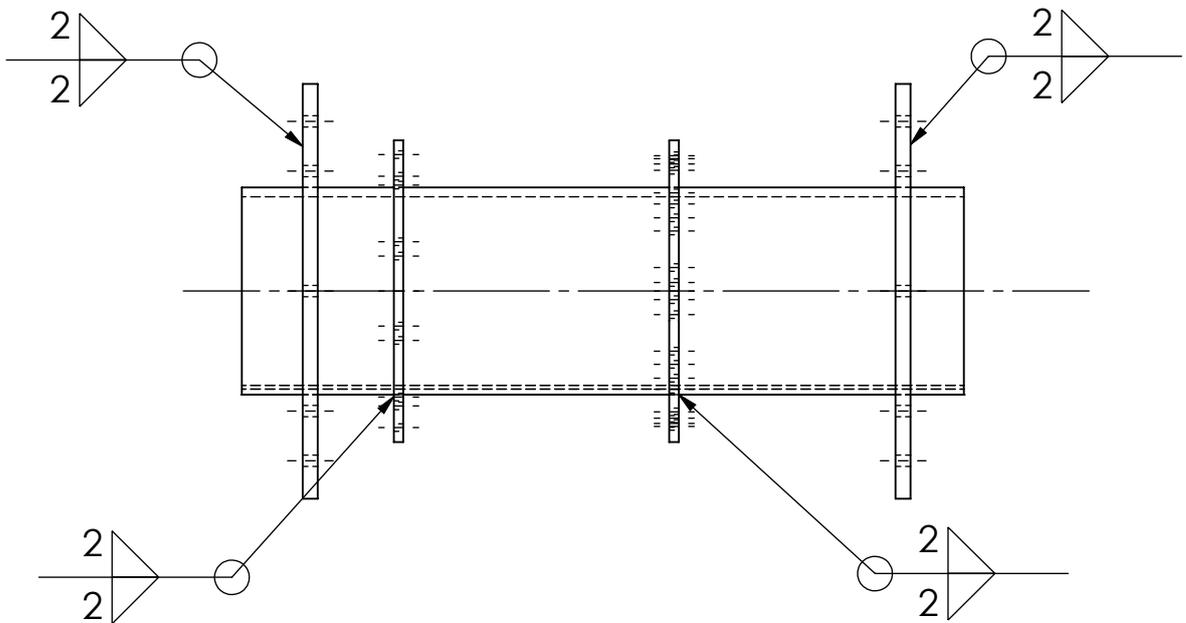
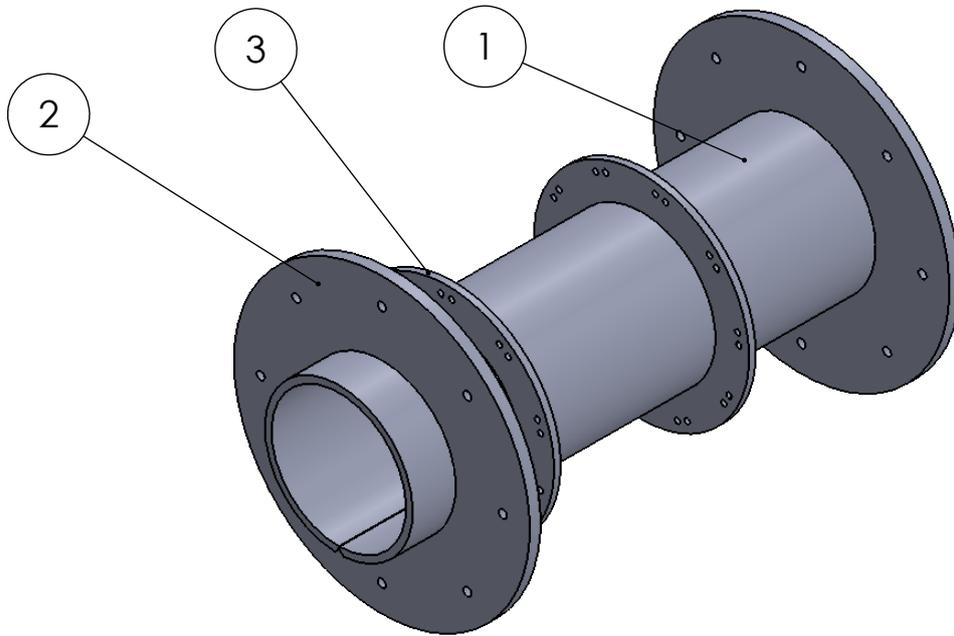
B B

Victor Hugo Cid Pereira			Observações:	 <small>PEMM/DMM - COPPE-EP-UFRJ</small>
1° Diedro	Data: 11/05/2018	Desenho: 1.2		
Unidade: mm	Projeto de graduação	UFRJ	Escala: 1 : 2	

A A

4 3 2 1

ITEM	QNT.	DESCRIÇÃO	MATERIAL
1	1	DE 0001.1 CORPO VER 2	AL 5052
2	2	DE 0001.4 DISCO CORPO	AL 5052
3	2	DE 0001.2 FLANGE	AL 5052



Victor Hugo Cid Pereira

Observações:

1° Diedro

Data: 11/05/2018

Desenho: 1.3

Unidade: mm

Projeto de graduação

UFRJ



Escala: 1 : 4

ITEM	QNT.	DESCRIÇÃO	MATERIAL
1	1	DE 0001.4 DISCO CORPO	AL 5052

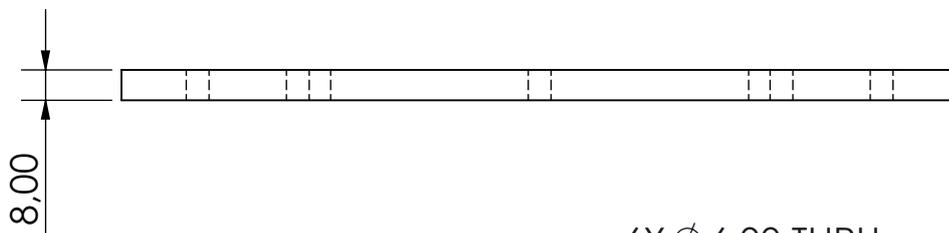
F

F



E

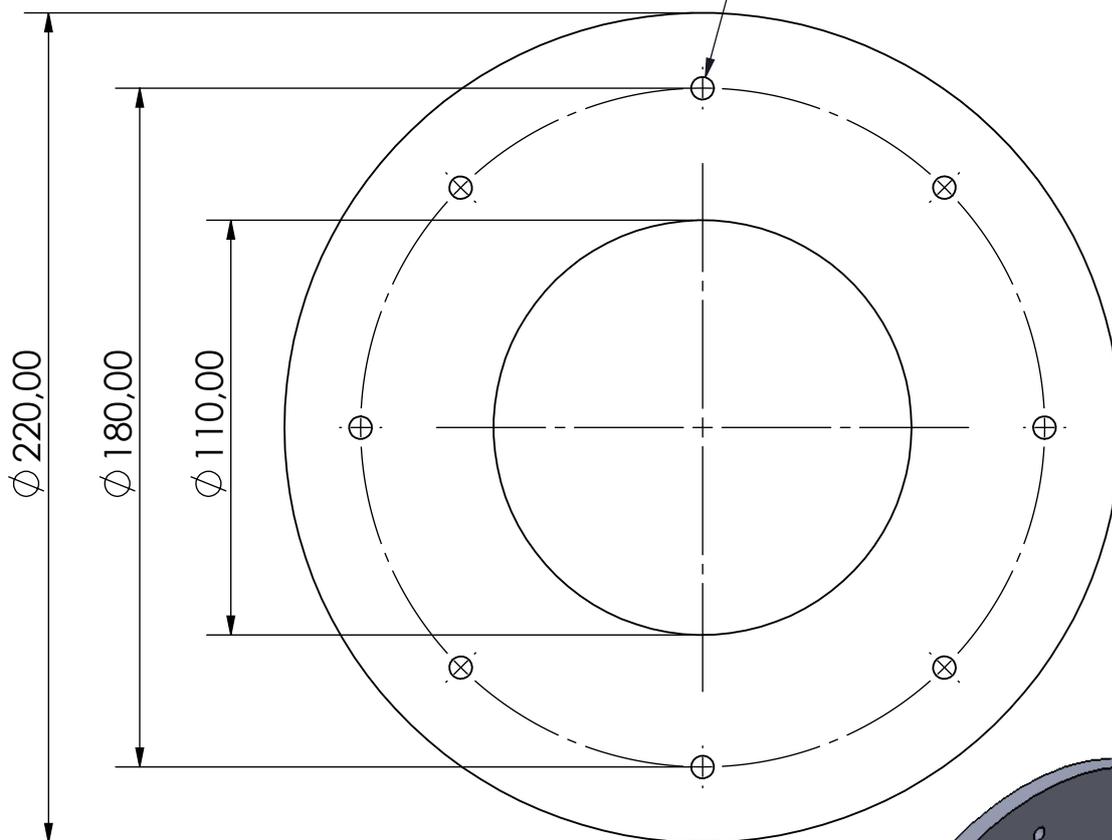
E



6X Ø 6,00 THRU

D

D

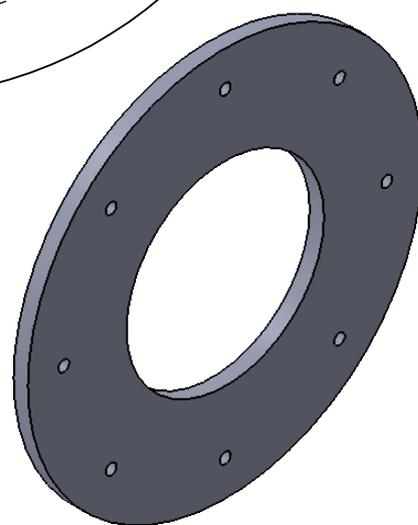


C

C

B

B



A

A

Victor Hugo Cid Pereira

Observações:

1° Diedro

Data: 11/05/2018

Desenho: 1.4

Unidade: mm

Projeto de graduação

UFRJ



Escala: 1 : 2

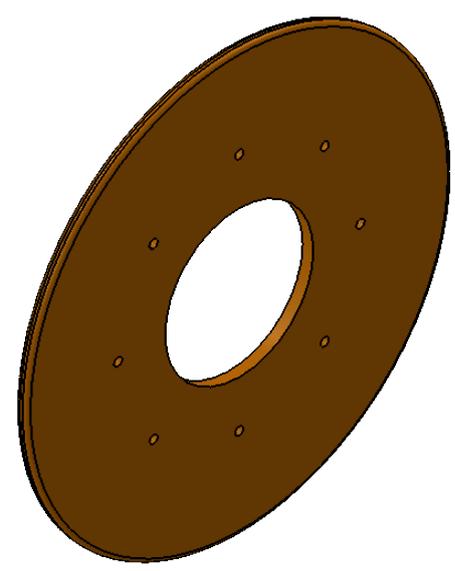
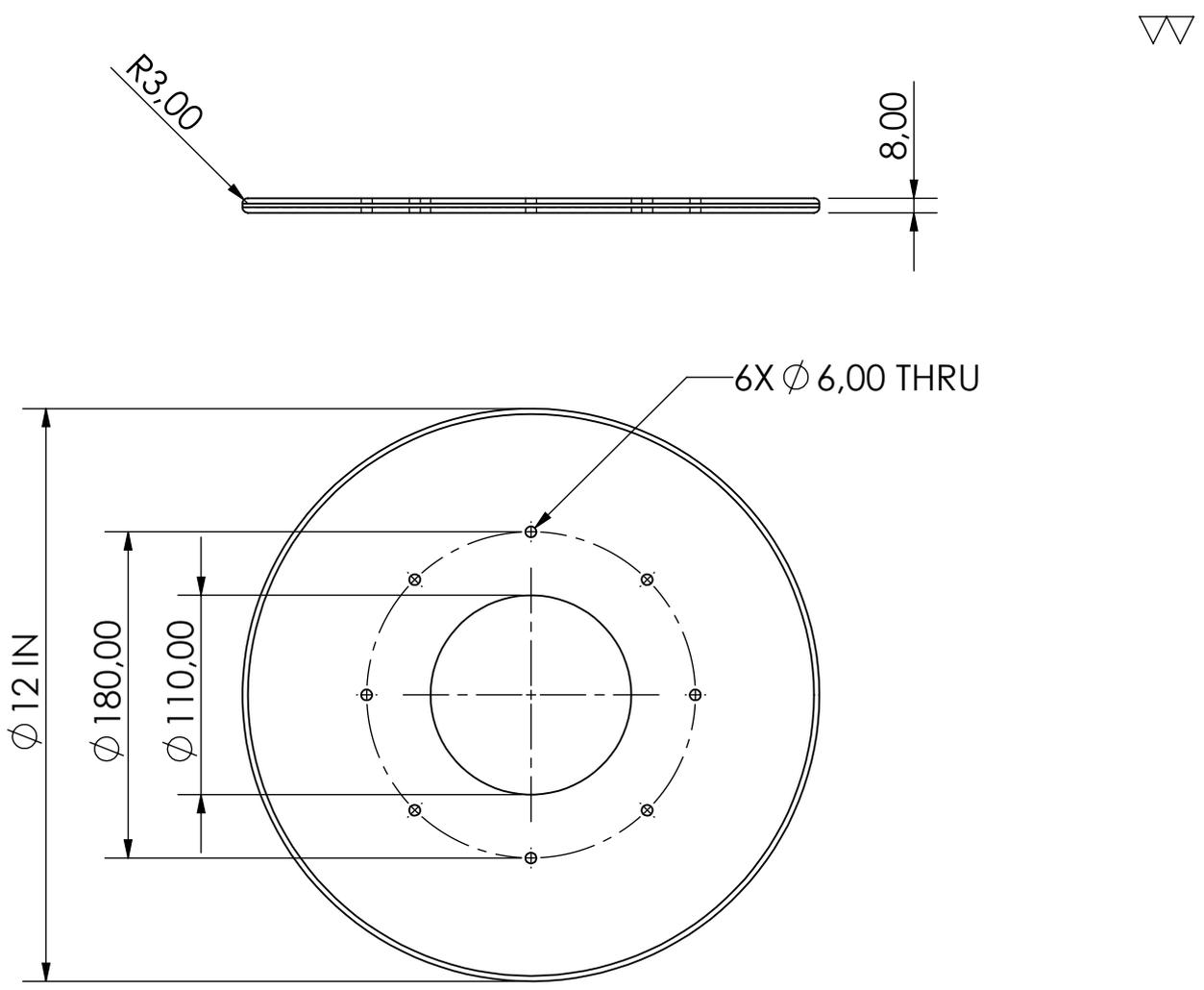
4

3

2

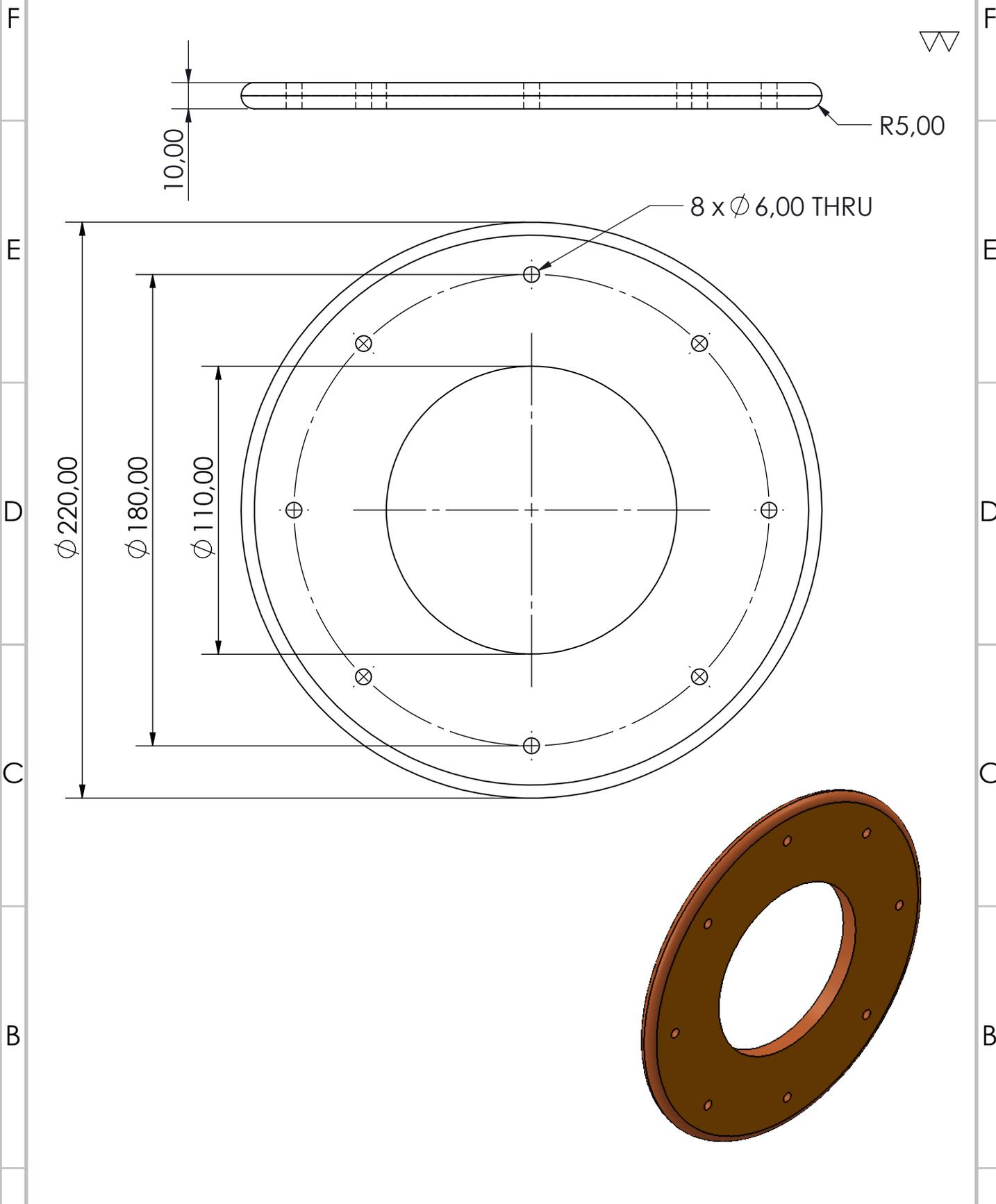
1

ITEM	QNT.	DESCRIÇÃO	MATERIAL
1	1	DE 0001.5 DISCO SELANTE	PU - 70 SHORE A



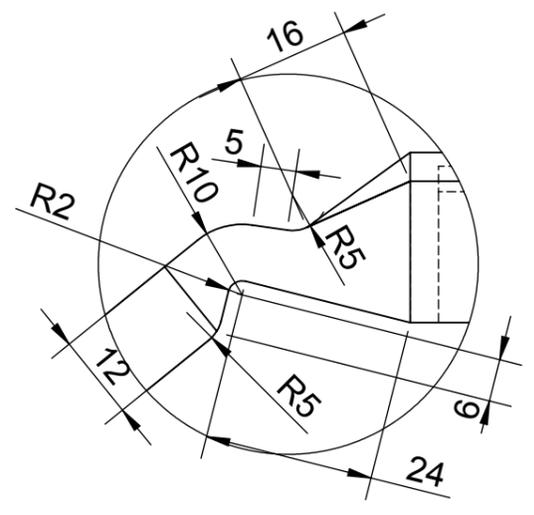
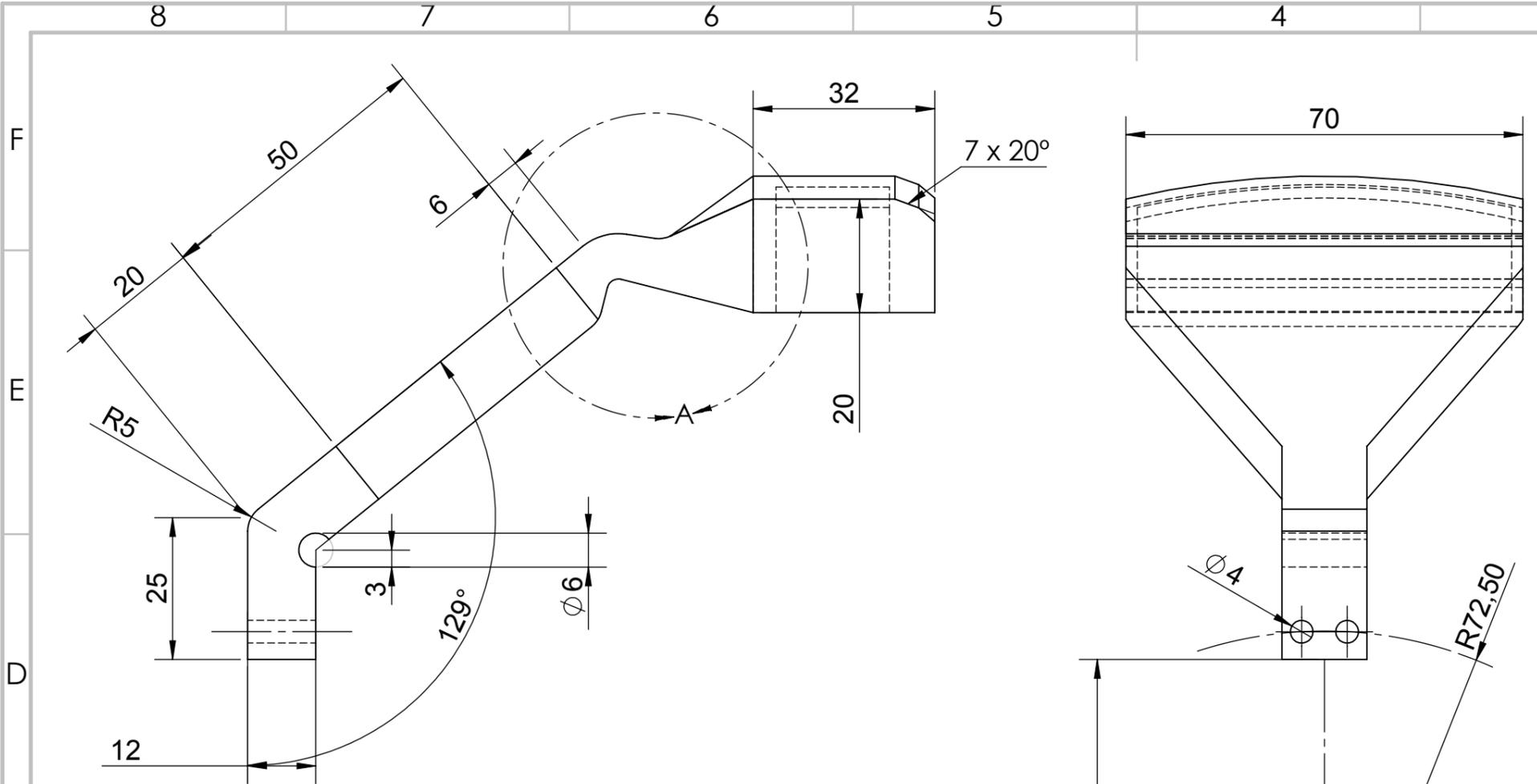
Victor Hugo Cid Pereira			Observações:	
1º Diedro	Data: 11/05/2018	Desenho: 1.5		
Unidade: mm	Projeto de graduação	UFRJ	Escala: 1 : 4	

ITEM	QNT.	DESCRIÇÃO	MATERIAL
1	1	DE 0001.6 ESPAÇADOR DO SELANTE	PU - 70 SHORE A

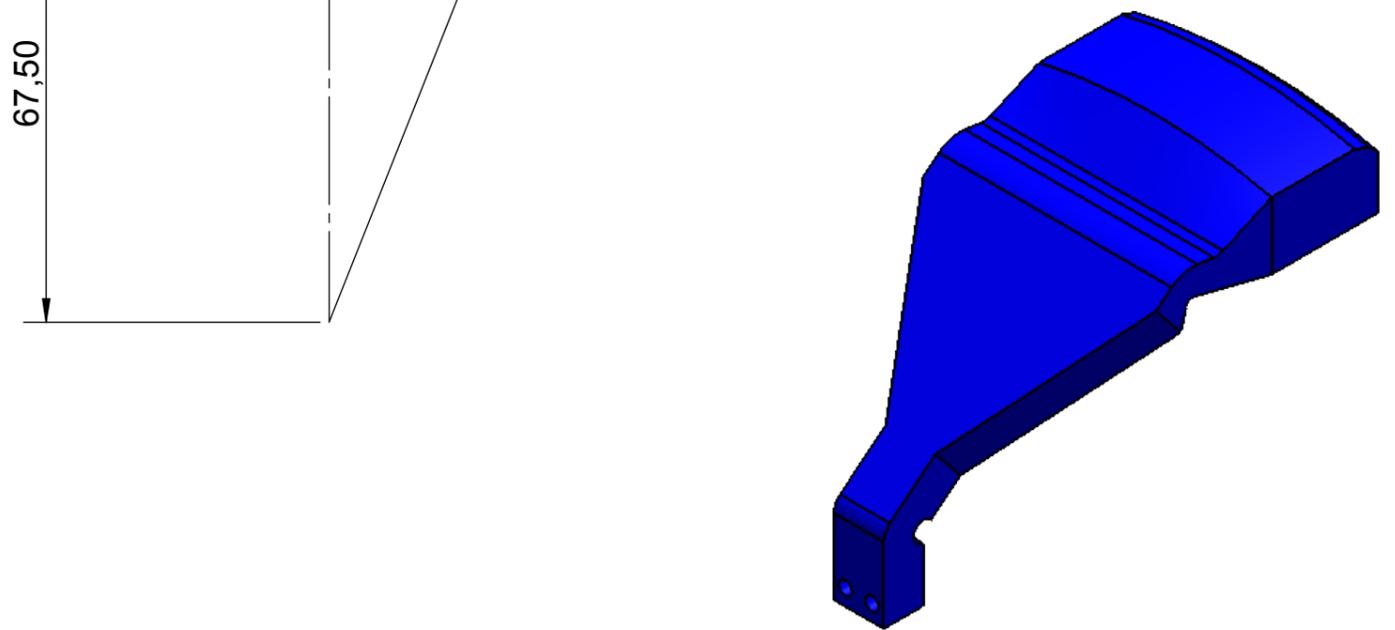


Victor Hugo Cid Pereira			Observações:	
1° Diedro	Data: 11/05/2018	Desenho: 1.6		
Unidade: mm	Projeto de graduação	UFRJ	Escala: 1 : 2	

ITEM	QNT.	DESCRIÇÃO	MATERIAL
1	20	DE 0001.7 BRAÇO	PU - 70 SHORE A



Detalhe A
ESCALA 1 : 1



Victor Hugo Cid Pereira			Observações:	 Escala: 1 : 1
1º Diedro	Data: 11/05/2018	Desenho: 1.7		
Unidade: mm	Projeto de graduação	UFRJ		