

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

PEDRO MARTINS LOUREIRO FERNANDEZ

**MODELAGEM, ANÁLISE ANALÍTICA E NUMÉRICA DE UM
MECANISMO MANUAL PARA INSPEÇÃO DE TUBOS DE REFORMA
HP POR MEIO DA TÉCNICA DE CORRENTES PARASITAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2020**

PEDRO MARTINS LOUREIRO FERNANDEZ

**MODELAGEM, ANÁLISE ANALÍTICA E NUMÉRICA DE UM
MECANISMO MANUAL PARA INSPEÇÃO DE TUBOS DE REFORMA
HP POR MEIO DA TÉCNICA DE CORRENTES PARASITAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Matheus Campolina Mendes, D.Sc.

Co-orientador: Clara Johanna Pacheco, D.Sc.

RIO DE JANEIRO

2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

F363 Fernandez, Pedro Martins Loureiro
Modelagem, análise analítica e numérica de um mecanismo manual para inspeção de tubos de reforma HP por meio da técnica de correntes parasitas / Pedro Martins Loureiro Fernandez — 2020.
80f.+ anexo: il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2020.
Bibliografia : f. 77-80
Orientador: Matheus Campolina Mendes
Coorientadora: Clara Johanna Pacheco

1. Engenharia mecânica. 2. Correntes elétricas . 3. Tubos de aço. 4. Solda e soldagem. 5. Robótica I. Mendes, Matheus Campolina. (Orient.). II. Pacheco, Clara Johanna (Coorient.). III. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e avó, por todo o esforço físico, financeiro e psicológico destinados à minha educação e a de minhas irmãs;

Ao CEFET/RJ, por me acolher desde 2012 como aluno do ensino médio, técnico e, posteriormente, graduação;

Aos meus colegas de classe, por todo o suporte e companheirismo durante a caminhada pela graduação;

À pesquisadora Johanna Pacheco (D.Sc), por toda a atenção, orientação e disponibilidade durante a elaboração deste trabalho;

À Eng. Iane Araújo, pela atenção e suporte contínuo durante a elaboração deste trabalho, sobretudo durante a quarentena;

À equipe do LNDC, em especial ao Tibério, Thiago, Matheus, Lucas e Ana Carolina, pelo acolhimento, atenção e contribuição com diversas ideias ao longo do trabalho;

Ao professor Matheus Campolina (D.Sc), pela docência em diversos períodos da minha graduação e confiança em me indicar ao laboratório do LNDC;

Aos professores Pedro Villela (D.Sc) e Fernando Ribeiro (D.Sc) pelas contribuições por e-mail durante a fase de desenvolvimento dos cálculos.

RESUMO

MARTINS, Pedro. Modelagem, análise analítica e numérica de um mecanismo manual para inspeção de tubos de reforma HP por meio da técnica de correntes parasitas. 2020. 97. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

A manutenção preditiva de tubos de reforma a vapor, feita através de técnicas de inspeção não destrutivas, tem o objetivo de validar a integridade estrutural desses equipamentos e acompanhar o estado e o desenvolvimento de descontinuidades. Nesse sentido, o presente trabalho propõem um mecanismo para a inspeção manual de tubos de reforma da família HP por meio da técnica de correntes parasitas. Este mecanismo deverá ser utilizado em laboratório de forma alternativa ou complementar à inspeção em braço robótico, feita usualmente. O mecanismo manual de inspeção deve atender a requisitos cuja inspeção em braço robótico não é capaz de atender, como a inspeção de tubos de diversos diâmetros, tubos de comprimento maiores que um metro e inspecionar satisfatoriamente tubos contendo uniões soldadas. Visando compreender todas as variáveis presentes em um ensaio de correntes parasitas em braço robótico e quais as possíveis oportunidades de melhoria que um mecanismo manual poderia fornecer em relação a esta modalidade de inspeção, foram inspecionados dois segmentos de tubo, os quais tiveram seus dados analisados qualitativamente e quantitativamente. A análise quantitativa permitiu sugerir novos padrões de descarte de pontos, o que otimizou a inspeção em braço robótico. Posteriormente as inspeções em braço robótico e modelagem de um mecanismo manual de inspeção em SolidWorks que atendessem às necessidades observadas na inspeção robotizada, foi desenvolvida uma análise analítica e numérica para estudar o comportamento de dois dos componentes do mecanismo manual de inspeção: o conjunto de inspeção e o estojo. Os estudos analítico-numéricos destes componentes permitiram obter alguns valores essenciais aos seus projetos e constataram que as alterações estruturais realizadas no conjunto de inspeção se mostraram adequadas ao permitirem a sua adaptabilidade e boa fixação ao mecanismo manual de inspeção proposto neste trabalho.

Palavras-chave: Correntes Parasitas. Tubos HP. Solda. Braço Robótico. Mecanismo Manual de Inspeção.

ABSTRACT

MARTINS, Pedro. Modeling, analytical and numerical analysis of a manual mechanism for inspection of HP reform tubes using eddy current technique. 2020. 97. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

The predictive maintenance of steam reform tubes, carried out using non-destructive inspection techniques, aims to validate the structural integrity of this equipment and monitor the state and the development of discontinuities. In this sense, the present work proposes a mechanism for the manual inspection of reform tubes of the HP family using the eddy current technique. This mechanism should be used in the laboratory as an alternative or complementary to the inspection on a robotic arm, which is usually done. The manual inspection mechanism must meet requirements that inspection on a robotic arm is not able to meet, such as inspection of tubes of various diameters, tubes longer than one meter and satisfactorily inspect tubes containing welded joints. In order to understand all the variables present in a test of eddy currents in a robotic arm and what are the possible opportunities for improvement that a manual mechanism could provide in relation to this type of inspection, two pipe segments were inspected, which had their data analyzed qualitatively and quantitatively. The quantitative analysis allowed to suggest new patterns of disposal of points, which optimized the inspection in robotic arm. Subsequently the inspections in robotic arm and modeling of a manual inspection mechanism in SolidWorks that met the needs observed in the robotic inspection, an analytical and numerical analysis was developed to study the behavior of two of the components of the manual inspection mechanism: the inspection set and the case. The analytical-numerical studies of these components allowed to obtain some essential values for their projects and found that the structural changes carried out in the inspection set proved to be adequate by allowing their adaptability and good fixation to the manual inspection mechanism proposed in this work.

Keywords: Eddy Current. HP Tubes. Welding. Robotic Arm. Manual Inspection Mechanism.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - (a) Esquema de um forno de reforma top-fired. (b) Escala de temperatura e envelhecimento na zona de radiação de um tubo catalizador de reforma. Fonte: ARENAS (2017)	20
Figura 2 - Desenho esquemático do princípio da técnica de correntes parasitas. Fonte: ASSYS, Aimê	25
Figura 3 - (a) Densidade de Corrente. (b) Profundidade de Penetração. Fonte: PEREIRA (2007), adaptado.	30
Figura 4 - Profundidade de Penetração (skin depth). Fonte: SILVA (2007), adaptado.	31
Figura 5 - Efeito de Borda - Edge-Effect. Fonte: PEREIRA (2007), adaptado.....	32
Figura 6 - Plano de Impedância (I). Fonte: PEREIRA (2007), adaptado.	33
Figura 7 - Plano de Impedância (II). [0-3]: Lift-off; [0-1]: Lift-off; [3-4] e [1-2]: Detecção de descontinuidade - queda na resistência e aumento da reatância. Fonte: NDT RESOURCE CENTER (2015), adaptado.	35
Figura 8 - Ilustração do Efeito Hall. Fonte: < https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod08/m_s03.html > (Acesso em: 02 abril. 2020).	36
Figura 9 - Desenho esquemático da Sonda de Correntes Parasitas aliada a técnica de saturação magnética. Fonte: ARENAS (2017).	37
Figura 10 - Movimento de Translação – Esquema Representativo do Sensor desenvolvido por (ARENAS, 2017). Fonte: O Autor	39
Figura 11 - Movimento de Rotação – Esquema Representativo do Sensor desenvolvido por (ARENAS, 2017). Fonte: O Autor	40
Figura 12 - Fluxograma ilustrativo da metodologia do projeto.....	41
Figura 13 - Representação em corte longitudinal do percurso percorrido pelo sensor. Em detalhe, a sua passagem pela solda e os pontos de estudo 0,1 e 2. Fonte: O Autor	43
Figura 14 - Conjunto de Inspeção versão 1.....	43
Figura 15 - Ensaio em braço robótico – Segmento B. Fonte: O Autor	44
Figura 16 - Geratrizes Inspeccionadas. segmento A e segmento B. Fonte: O Autor ..	45
Figura 17 – Desenho isométrico do Estojo – Componente Conjunto de Inspeção. Dimensão: 60 x 60 mm Fonte: LNDC/COPPE/UFRJ	46
Figura 18 - a) Marcação das regiões com base em medições feitas manualmente com paquímetro. b) Marcação das regiões com base nos resultados obtidos através da análise quantitativa. Fonte: O Autor	56
Figura 19 - a) Marcação das regiões com base em medições feitas manualmente com paquímetro. b) Marcação das regiões com base nos resultados obtidos através da análise quantitativa. Fonte: O Autor	60

Figura 30 - Perfil BOSCH – 30 x 30 mm. ASTM 6061-T6 Fonte: < https://www13.boschrexroth-us.com/Framing_Shop/Product/View_Product.aspx?category=10102&subcategory=1 > (Acesso em: 20 abril. 2020).....	62
Figura 31 - Mecanismo manual de inspeção. Composto pelo Conjunto de Inspeção fixado à Estrutura de Alumínio Bosch. Dimensões: 430 x 210 x 150 mm. Fonte: O Autor.....	63
Figura 32 - Mecanismo manual de inspeção ajustado ao ensaio dos segmentos A e B. Unidade: mm. Fonte: O Autor.....	64
Figura 33 - Detalhamento do fixador metálico. Fonte: O Autor	64
Figura 20 – Desenho isométrico do Conjunto de Inspeção – Versão 1. Dimensão aproximada: 90 x 25 x 150 mm. Fonte: LNDC/COPPE/UFRJ	68
Figura 21 – Desenho isométrico do Conjunto de Inspeção – Versão 2. Dimensão aproximada: 90 x 25 x 150 mm Fonte: O Autor	68
Figura 22 - Detalhamento Fixação e carregamento vertical distribuído descendente de 11N. Fonte: O Autor	69
Figura 23 - Tensão normal em Y. Fonte: O Autor	69
Figura 24 - Deformação Estática Equivalente. Fonte: O Autor	70
Figura 25 - Deslocamento Estático Equivalente [mm]. Fonte: O Autor.....	70
Figura 26 - Detalhamento Fixação e carregamento vertical distribuído descendente de 11N. Fonte: O Autor	71
Figura 27 - Tensão normal em Y. Fonte: O Autor	71
Figura 28 - Deformação Estática Equivalente. Fonte: O Autor.....	72
Figura 29 - Deslocamento Estático Equivalente [mm]. Fonte: O Autor.....	72
Figura 34 - Diagrama de corpo livre Conjunto de Inspeção – Fase II (compressão). Fonte: O Autor.....	81
Figura 35 - Eixo de referências - Fase II (compressão). Fonte: O Autor	85
Figura 36 - Diagrama de corpo livre Conjunto de Inspeção – Fase IV (torção). Fonte: O Autor	88
Figura 37 - Eixo de referências - Fase IV (torção). Fonte: O Autor	88
Figura 38 - Diagrama de corpo livre – Viga engastada (deslocamento transversal máximo). Fonte: O Autor	92
Gráfico 1 - Segmento A. Estado de envelhecimento característico: III.....	51
Gráfico 2 - Segmento A > Geratriz 03 > Sentido de Ida	52
Gráfico 3 - Segmento A > Geratriz 03 > Sentido de volta	52
Gráfico 4 - Segmento A > Geratriz 03 > Compilado ida e volta.....	52
Gráfico 5 - Segmento A > Geratriz 07 > Compilado ida e volta.....	55
Gráfico 6 - Segmento A > Geratriz 10 > Compilado ida e volta.....	55

Gráfico 7 - Segmento B. Estado de envelhecimento característico: IV	57
Gráfico 8 - Segmento B > Geratriz 01 > Compilado ida e volta.....	58
Gráfico 9 - Segmento B > Geratriz 02 > Compilado ida e volta.....	59
Gráfico 10 - Segmento B > Geratriz 03 > Compilado ida e volta.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Análise química realizada pelo IPT nos segmentos de tubos de reforma (% em peso). Fonte: LNDC/COPPE/UFRJ.....	42
Tabela 2 – Dimensões dos segmentos. Fonte: LNDC/COPPE/UFRJ.....	42
Tabela 3 – Estados de Envelhecimento dos segmentos. Fonte: (Queiroz, 2017)	42
Tabela 4 – Dimensões do Cordão de Solda – segmento A e segmento B. Fonte: O Autor.....	42
Tabela 5 – Grandezas e Propriedades do Estojo. Fonte: SolidWorks.....	47
Tabela 6 – Propriedades Mecânicas ABS. Fonte: SolidWorks.....	47
Tabela 7 – Tabela de entradas e variáveis do Segmento A – Geratriz 03. Fonte: O Autor.....	54
Tabela 8 – Tabela de entradas e variáveis do segmento A – Geratrizes 07. Fonte: O Autor.....	55
Tabela 9 – Tabela de entradas e variáveis do segmento A – Geratrizes 10. Fonte: O Autor	Erro! Indicador não definido.
Tabela 10 - Tabela de entradas e variáveis do segmento B – Geratrizes 01,02 e 03. Fonte: O Autor.....	59
Tabela 11 - Forças Superficiais em função da altura (Dinâmica). Fonte: O Autor:.....	66
Tabela 12 - Comparação de valores. Análise numérica x Análise analítica (Deslocamento Transversal Máximo). Fonte: O Autor.....	73
Tabela 13 - Comparação de valores. Análise numérica x Análise analítica (Tensão Normal em Y). Fonte: O Autor.....	73
Tabela 14 - Variáveis para o cálculo da força superficial. Fonte: O Autor.....	81
Tabela 15 - Força Superficial em função da altura da solda (Estática). Fonte: O Autor	82
Tabela 16 – Variáveis do conjunto de inspeção genérico. Fonte: O Autor	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	FORNOS DE REFORMA A VAPOR	18
2.1.1	ESTRUTURAÇÃO E COMPONENTES PRINCIPAIS DE UM FORNO DE REFORMA	19
2.1.2	SOLDAGEM DE AÇOS HP	21
2.1.3	PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM UM FORNO DE REFORMA	23
2.2	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)	24
2.2.1	TÉCNICA DE CORRENTES PARASITAS	24
2.2.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	24
2.2.2.1	Lift-off	27
2.2.2.2	Condutividade elétrica	27
2.2.2.3	Permeabilidade magnética	28
2.2.2.4	Frequência e profundidade de penetração	29
2.2.2.5	Geometria da amostra	31
2.2.2.6	Plano de Impedância	32
2.2.3	SENSOR DE EFEITO HALL	35
2.2.4	TÉCNICA DE SATURAÇÃO MAGNÉTICA	36
2.2.5	SENSOR HÍBRIDO	37
2.2.6	CLASSIFICADORES SVM	37
2.3	CINÉTICA DO SENSOR DE CORRENTES PARASITAS	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	MATERIAL UTILIZADO	41
3.2	SONDA HÍBRIDA PARA INSPEÇÃO	43
3.3	INSPEÇÃO EM BRAÇO ROBÓTICO	44
3.4	MODELAGEM ANALÍTICA	46
3.4.1	MOLA DE TORÇÃO E FORÇA SUPERFICIAL	46
3.4.2	DESLOCAMENTO TRANSVERSAL MÁXIMO E TENSÃO NORMAL DE FLEXÃO	48
3.5	MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DO <i>SOLIDWORKS</i>	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	INSPEÇÕES EM BRAÇO ROBÓTICO	51
4.1.1	INSPEÇÃO SEGMENTO A	51
4.1.1.1	Análise qualitativa	51
4.1.1.2	Análise quantitativa	52
4.1.2	INSPEÇÃO SEGMENTO B	57
4.1.2.1	Análise qualitativa	57
4.1.2.2	Análise quantitativa	58
4.2	DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO MANUAL DE INSPEÇÃO	61
4.2.1	PROJETO	62
4.3	MODELAGEM ANALÍTICA	65
4.3.1	CONSTANTE IDEAL DE ELASTICIDADE – MOLA DE TORÇÃO:	65
4.3.2	FORÇA SUPERFICIAL EM FUNÇÃO DA ALTURA DA SOLDA – EQUACIONAMENTO DINÂMICO:	66

4.3.2.1 Dinâmico:	66
4.3.3 DESLOCAMENTO TRANSVERSAL MÁXIMO EM FUNÇÃO DE ESFORÇOS FLEXIVOS:	66
4.4 MODELAGEM NUMÉRICA	67
4.4.1 CONJUNTO DE INSPEÇÃO – VERSÃO 1.....	69
4.4.2 CONJUNTO DE INSPEÇÃO – VERSÃO 2.....	71
5 CONCLUSÃO	74
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
7 REFERÊNCIAS.....	77
8 ANEXOS.....	81

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de se prever com satisfatória precisão o período exato em que uma falha funcional ocorre em um equipamento ou peça industrial, bem como os fatores que levam a este episódio, não foi uma habilidade sempre dominada pela engenharia. O estudo dos diferentes tipos de mecanismos de falha e suas diversas formas e condições de atuação possibilitaram o desenvolvimento de metodologias eficientes de inspeção que, desde então, permitem a detecção e acompanhamento de descontinuidades operacionais e a prevenção a falhas repentinas. Dentre os tipos de abordagem, a análise preventiva segue um roteiro pré-definido de tarefas a serem executadas baseadas no tempo ou condições do equipamento, enquanto que os exames preditivos se resumem em um conjunto de técnicas cujo objetivo principal é a busca pelo conhecimento e otimização do tempo de vida útil do equipamento ou componente.

A crescente demanda por desenvolvimento da infraestrutura industrial, acompanhada da necessidade de preservação da vida, integridade das instalações e de tentativas de atenuar os impactos ambientais, resulta em um cenário cada vez mais exigente em termos de responsabilidades e cuidados por parte da engenharia. Investimentos focados na redução das emissões de poluentes atmosféricos, por exemplo, promovem o crescimento industrial enquanto simultaneamente atendem às exigências cada vez mais rigorosas de órgãos reguladores. Nos últimos anos, exemplos de intervenções regulamentadoras na indústria foram promovidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) que emitiu, em 2007 (edição ANP 32/2007) e em 2018 (ANP 16/2018), portarias responsáveis por, respectivamente, limitar os níveis de enxofre tolerados no óleo diesel no país e determinar um percentual de adição de no mínimo 11% e no máximo 15% em volume de biodiesel ao óleo diesel convencional (DUTRA, 2019).

Nesse sentido, setores específicos, como a indústria petroquímica, investiram em meios de reduzir os níveis de poluentes, sobretudo o enxofre, em seus combustíveis. Isso porque combinado com o oxigênio, o enxofre resulta no dióxido de enxofre (SO_2), extremamente prejudicial ao meio ambiente e à saúde. No decorrer dos anos e com o desenvolvimento de inúmeras pesquisas, a solução encontrada para promover o desenvolvimento da produção de biocombustíveis no Brasil, através da

diminuição do percentual de enxofre na sua composição, consistiu na produção de hidrogênio em Unidades de Geração de Hidrogênio (UGH) para utilizá-lo em reações de hidrogenação.

A hidrogenação consiste em uma reação de redução por meio da adição de hidrogênio, sendo usualmente necessária a presença de um catalisador. Em um dos processos de hidrogenação, o hidrotratamento, o hidrogênio é o principal meio utilizado para capturar o enxofre (subprocesso de dessulfurização) de combustíveis como a gasolina e o óleo diesel, atenuando o seu potencial poluidor (DA CRUZ, 2000). O hidrogênio produzido nas UGH's é ainda utilizado em processos de hidrocrackeamento, os quais consistem na quebra das ligações moleculares dos hidrocarbonetos pesados em fragmentos menores, permitindo um aumento do número de opções de utilização por parte da refinaria (DA CRUZ, 2000). O processo de hidrocrackeamento corresponde em uma das principais utilizações do hidrogênio na indústria, consumindo-o diretamente no decorrer do processo, sendo responsável por possibilitar um alto grau de aproveitamento da matéria prima.

Dentre os processos industriais mais utilizados para a geração deste elemento na forma molecular (H_2) estão a eletrólise da água, a oxidação parcial de derivados de petróleo, a reforma a vapor de hidrocarbonetos leves como o gás natural, constituído sobretudo por metano, e a reforma catalítica da nafta e do óleo pesado, a qual produz a molécula de hidrogênio como subproduto (DA CRUZ, 2000). Em cada um desses processos, o nível de pureza do hidrogênio obtido varia consideravelmente, logo, de acordo com o grau de pureza necessário pela planta petroquímica é possível estabelecer a rota de processo. Em plantas de hidrotratamento, por exemplo, por necessitarem da molécula no seu estado de maior pureza para realizar a dessulfurização adequada do combustível, utiliza-se o hidrogênio oriundo da reforma do gás natural. Enquanto que para plantas de hidrocrackeamento, o hidrogênio em menor estado de pureza é suficiente para atender a demanda requerida no processo (DA CRUZ, 2000).

Fundamentalmente, as UGH's consistem em fornos de reforma a vapor capazes de sintetizar hidrogênio através de reações endotérmicas ocorridas a elevadas temperaturas e impulsionadas por catalisadores. Neste processo tem-se como reagentes os hidrocarbonetos e vapor d'água e formam-se como produtos dióxido de carbono e hidrogênio. Por ser de natureza endotérmica, esta reação

necessita de altos aportes térmicos para aquecer a mistura de hidrocarbonetos leves e vapor d'água, desativando muitas vezes os catalisadores por conta do acúmulo de depósitos de coque (carbono depositado sobre a superfície do catalisador) (ARENAS, 2017).

Visando atender a condições tão severas de operação, os elementos que compõem um forno de reforma devem ser compostos por materiais resistentes à altas temperaturas, a um sistema levemente pressurizado e a um longo período de operação contínua. Para isso, o material utilizado industrialmente para compor um forno de reforma a vapor consiste em ligas de aços inoxidáveis austeníticos fundidos por centrifugação da família HP modificado. Os fornos são constituídos essencialmente por um conjunto de tubos, verticalmente enfileirados, inseridos em uma câmara de radiação isolante responsável por aumentar a eficiência das trocas de calor e das reações.

Apesar dos aços HP possuírem elevada resistência térmica, as condições de operação sob a qual estão submetidos levam ao processo de envelhecimento do material podendo ter como consequência o surgimento de danos macro e microestruturais que podem comprometer a vida útil dos tubos de reforma a vapor. Dessa forma, estratégias preventivas usando inspeções não destrutivas regulares são necessárias com a intenção de prever a ocorrência de falhas a fim de evitar paradas não planejadas de produção e reduzir custos.

Nesse sentido, recentemente foi desenvolvido por (ARENAS, 2017) um sistema de inspeção não destrutiva baseado na técnica de correntes parasitas para a avaliação do estado de envelhecimento dos tubos de reforma a vapor. O sistema proposto é constituído por um sensor de correntes parasitas com magnetização externa, eletrônica embarcada e o uso de um sistema classificador *SVM - Support Vector Machine* que funciona sob o princípio de *Machine Learning* para a classificação dos estados de envelhecimento. Para validação do sistema é indispensável a realização de testes que estudem o seu deslocamento ao longo do comprimento dos tubos.

Com a finalidade preliminar de se avaliar o desempenho do conjunto de inspeção desenvolvido por (ARENAS, 2017), foram realizados ensaios por meio do uso de braço robótico em segmentos de tubo de 300mm de comprimento, com solda e sem solda. Um dos objetivos destes ensaios foi analisar a qualidade dos dados

coletados pela sonda através da relação pontos coletados x pontos classificados, identificando e mensurando as oportunidades de melhoria estruturais do modelo que pudessem levar ao aumento da eficiência do ensaio. Adicionalmente, os ensaios em braço robótico objetivavam mensurar as distâncias a serem descartadas antes e depois da solda, por tipo de segmento, visto que até o momento o processo de descarte de pontos é feito sem o embasamento formal de testes e simulações.

Finalmente, visando realizar ensaios em tubos de verdadeira grandeza, em ambiente laboratorial, surgiu a necessidade de se propor e modelar um mecanismo manual de inspeção que possibilitasse a movimentação do conjunto de inspeção, desenvolvido por (ARENAS, 2017) e remodelado neste trabalho, ao longo da superfície de tubos oriundos de fornos de reforma a vapor. O mecanismo manual deve ser acoplável ao conjunto de inspeção reestruturado, o qual é composto por dois sensores híbridos e eletrônica, bem como ser adaptável à diferentes dimensões de tubo sem perder a qualidade da inspeção.

Dessa forma, o mecanismo manual de inspeção proposto deve ser capaz de inspecionar tubos de características construtivas distintas, maiores que um metro de comprimento, tendo o potencial de aumentar a amostragem de pontos coletados (quando comparado a inspeção em braço robótico). Deve conferir mais assertividade aos resultados, além de potencialmente reduzir parâmetros influenciadores como o *lift-off* (a ser detalhado em capítulo posterior) e vibrações indesejadas, devido as reformulações feitas na estrutura de um conjunto de inspeção (versão 1), já usado em braço robótico, que resultaram em um novo modelo de conjunto de inspeção (versão 2), adaptável ao mecanismo manual de inspeção.

Com o intuito de obter dados essenciais de projeto e adicionalmente compreender as diferenças existentes entre a versão 1 e a versão 2 do conjunto de inspeção, foi desenvolvida uma análise analítica e numérica para estudar o comportamento deste componente do mecanismo manual de inspeção. A análise analítica objetivou conhecer variáveis importantes para o projeto, como o máximo deslocamento transversal tolerado para o conjunto de inspeção, a constante elástica ideal para a mola de torção do estojo (componente do conjunto de inspeção) e a ordem de grandeza da força superficial exercida no conjunto de inspeção durante a sua passagem pela solda, enquanto que a numérica comparou as duas propostas do conjunto de inspeção quanto a grandezas de deslocamento e tensão cisalhante.

Os estudos analíticos e numéricos permitiram concluir que a versão 2 do conjunto de inspeção é ligeiramente mais resistente mecanicamente quando comparada a versão 1. Apesar da pouca diferença em termos mecânicos, a versão 2 se provou perfeitamente adaptável ao mecanismo manual de inspeção, proposto neste trabalho, possuindo melhor fixação e adaptabilidade a diferentes condições de inspeções.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORNOS DE REFORMA A VAPOR

O uso do hidrogênio como vetor energético em fontes de energia sustentáveis vem, como o passar dos anos, assumindo um papel protagonista. São inúmeras as possibilidades de utilizá-lo e produzi-lo em processos de geração de energia. Isso porque a sua abundância, eficiência, não toxicidade e aplicabilidade a tecnologias promissoras como as células combustíveis, são alguns dos fatores mais relevantes para o incentivo a pesquisas e desenvolvimento do tema. Entretanto, mesmo constituindo um importante papel em setores de energias renováveis, a aplicação à indústria tradicional, sobretudo a petroquímica, ainda é responsável pelo consumo da maior parte do hidrogênio produzido mundialmente, mostrando que a sua utilização vem, com o passar dos anos, ainda adquirindo cada vez mais relevância neste cenário.

Na indústria petrolífera, os processos de hidrogenação são, dentre outras aplicações, encarregados de duas principais atividades: Realizar a conversão de grandes e pesadas cadeias de hidrocarbonetos em frações mais leves, através de processos como o hidrocrackeamento, e promover a remoção de elementos contaminantes e tóxicos dos combustíveis - como o enxofre - através de processos de hidrotreatamento, como por exemplo, a dessulfurização. Devido ao fato de combustíveis como a gasolina e o diesel serem os mais demandados industrialmente por conta da sua importância estratégica industrial e social, o processo de hidrogenação que os produzem - o hidrocrackeamento - adquire uma grande relevância neste cenário. Por terem cadeias de hidrocarbonetos mais curtas (leves), o diesel e a gasolina, são os principais responsáveis pela demanda elevada de plantas industriais destinadas ao processo de hidrocrackeamento, tornando este o processo de hidrogenação mais realizado.

2.1.1 Estruturação e Componentes Principais de um Forno de Reforma

As características construtivas e operacionais de um forno de reforma variam conforme o processo de produção de hidrogênio empregado. Para este trabalho, o forno do qual são oriundos os segmentos de tubo inspecionados são do tipo top fired, e tem como característica principal a disposição na direção vertical dos tubos de catalisador, além do posicionamento dos queimadores no teto da câmara de radiação. Os tubos possuem comprimento variando entre 10-14 m, sendo soldados circunferencialmente a cada 5 m, o que resulta em no máximo três juntas soldadas por coluna. O diâmetro externo varia entre 100-200 mm e as espessuras de 10-20 mm (SILVEIRA, 2006).

São severas as condições de temperatura as quais os fornos de reforma a vapor são submetidos durante processos de hidrogenação. A temperatura máxima da parede dos tubos varia em torno de 800 e 1000 °C, enquanto a pressão interna de trabalho em condições normais pode operar entre 5 e 40 Kgf/cm², mantendo-se constante (Liu, 2011). Para resistir às exigências operacionais os tubos de reforma devem atender a características específicas. Deste modo, o material dos tubos oriundos de fornos de reforma a vapor dessa natureza pertence à família de aços austeníticos resistentes a altas temperaturas da família HP.

As elevadas temperaturas de operação sob as quais os tubos de reforma ficam expostos por longos períodos, provocam na superfície da tubulação um gradiente térmico. Como consequência, observa-se um gradiente microestrutural resultante do fenômeno de envelhecimento do material, o qual tem intensidade variável ao longo do comprimento do tubo. Com influência maior que o tempo de operação, a temperatura de trabalho é a variável mais influente no desenvolvimento deste fenômeno.

Adicionalmente, durante a sua vida útil, os tubos de reforma estão sujeitos a diversos fenômenos, dentre eles a carburização, oxidação, sobreaquecimento, corrosão sob tensão, sulfidação, dentre outros (QUEIROZ, 2017). Os estados de envelhecimento variam de I ao VI, escala definida por (QUEIROZ, 2017) para categorizar estados de envelhecimentos de aços HP40 (Figura 1 (b)).

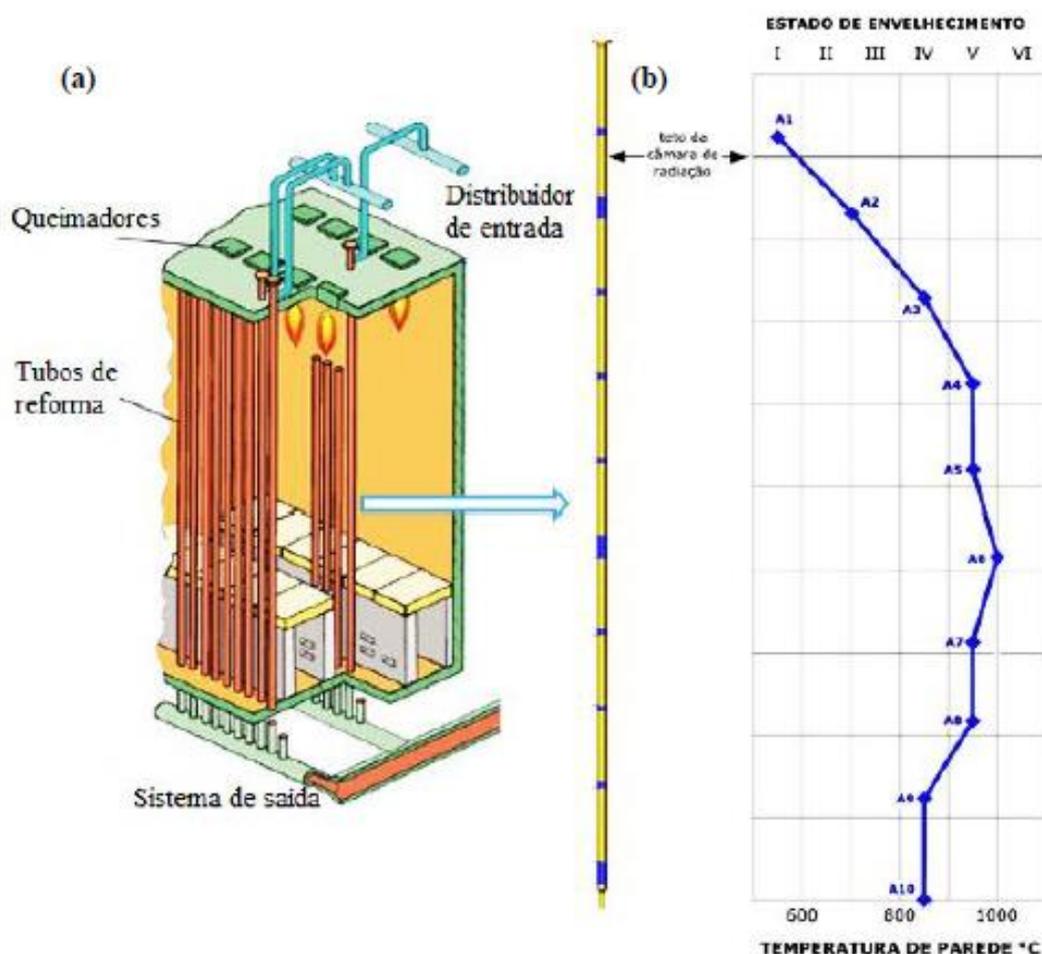


Figura 1 - (a) Esquema de um forno de reforma top-fired. (b) Escala de temperatura e envelhecimento na zona de radiação de um tubo catalizador de reforma. Fonte: ARENAS (2017)

A composição química dos tubos de reforma utilizados atualmente, caracterizados por ligas super austeníticas com alto teor de cromo e níquel, modificadas ao nióbio e outros possíveis elementos de liga, impedem a sua fabricação por conformação ou extrusão, sendo a fundição por centrifugação o processo de fabricação utilizado para a sua produção. Esse processo confere a esses equipamentos características microestruturais adequadas a sua aplicação, sendo um dos responsáveis por fornecer aos tubos de reforma a capacidade de trabalhar sob condições de fluência (BONACCORSI, 2014), terem alta resistência a oxidação e a carburização a altas temperaturas (WHITTAKER; WILSHIRE; BREAR, 2013).

A fabricação de tubos através da fundição por centrifugação é especificada pela norma ASTM A 608 (ARENAS, 2017). A letra “H” indica que o material é apropriado para operar a altas temperaturas, enquanto a letra “P” aponta o teor nominal de níquel

na liga. Quanto maior o teor de níquel no aço, mais próximo de “Z” estará a segunda letra (ASTM A608, 2014).

O projeto de tubos de reforma atende à norma internacional API 530 - *Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries* sendo capazes de operar por longos períodos, tendo uma vida útil de 100.000 horas, por volta de 11 anos (API 530, 1996). Porém, na prática o tempo de serviço dos tubos variam de 30.000 - 180.000 horas, a depender das condições as quais o tubo se encontra bem como da severidade do serviço (Liu, 2011).

Devido ao alto grau de criticidade operacional que envolve a reforma a vapor de hidrocarbonetos, torna-se necessário um acompanhamento meticuloso de todos os equipamentos e variáveis envolvidas neste processo. Visando o máximo aproveitamento e eficiência da planta, através da eliminação de falhas operacionais e estruturais nos tubos, a supervisão das condições dos equipamentos, sobretudo das tubulações verticais, as quais custam na ordem de dezenas de milhares de reais cada (BONACCORSI, 2014), deve ser feita periodicamente por profissional habilitado através de técnicas preditivas de inspeção. Portanto, pode-se dizer que o acompanhamento com técnicas preditivas através da realização de inspeções de integridade em campo, agrega à planta maior confiança operacional e conhecimento pleno das condições do equipamento, auxiliando na assertividade das tomadas de decisões em justificar e validar o momento certo para intervir realizando a troca ou reparo de equipamentos.

2.1.2 Soldagem de Aços HP

Em geral, na indústria há sempre dois tipos de soldagem: A soldagem de fabricação, a qual une componentes pré-fabricados, livres de descontinuidades e avarias geradas pelas condições operacionais e a soldagem de reparo, feita após determinado período de funcionamento do componente. Em processos industriais robustos como a reforma a vapor, de condições operacionais severas, os cuidados necessários para a soldagem de soldas de reparo, principalmente, devem ser redobrados. Segundo Emygdio (2002), em soldagens desse tipo, o metal de adição a ser escolhido deve ter a capacidade de absorver as tensões geradas durante a soldagem. Para isso, ele deve apresentar características dúcteis e tenazes, podendo

ser da família de ligas de níquel, nos casos em que a junta é exposta à enxofre ou possuir um alto teor de carbono, para o caso contrário.

Nos processos de soldagem atuais, para a maioria dos metais e suas ligas, destacam-se as técnicas de soldagem que usam o arco elétrico como energia necessária para a fusão e deposição de material em juntas soldadas. Os possíveis métodos de soldagem utilizados para a soldagem de tubos de reforma são: GMAW (Gas Metal Arc Welding), SMAW (Shielded Metal Arc Welding) e GTAW (Gas-shielded Tungsten Arc Welding).

Dentre os métodos que utilizam arcos voltaicos como energia para a soldagem de tubos HP, o GMAW (Gas Metal Arc Welding) modalidade MIG (Metal Inert Gas), é o mais utilizado, pois permite uma alta produtividade e uma solda de qualidade satisfatória, além de ser um processo versátil e possibilitar a soldagem em diversas posições (SOUZA, 2017). O processo consiste na utilização de um eletrodo consumível, fornecido por um alimentador, geralmente uma pistola, que ao entrar em contato com a peça a ser soldada provoca um arco elétrico capaz de alcançar altas temperaturas, fundindo-o e formando a poça de fusão. Todo o processo ocorre sob a proteção de uma atmosfera inerte, composta normalmente por argônio ou hélio.

A soldagem de materiais austeníticos fundidos por centrifugação resistentes à altas temperaturas deve ser muito bem dimensionada, uma vez que esses materiais terão de resistir a severas condições de operação. No entanto, não existe nenhum código ou norma regulamentadora na indústria que reja as diretrizes de fabricação e os níveis de aceitação e avaliação de uma junta soldada deste material. Como consequência, não há um padrão definido que caracterize o método e muito menos a geometria da solda de um tubo de reforma. Entretanto, recomendações e cuidados comuns a soldagem de aços austeníticos podem ser seguidas para se evitar sobretudo a trinca a quente, uma vez que os aços austeníticos não são suscetíveis ao trincamento a frio, além de perdas de propriedades específicas como resistência a corrosão, calor e desgaste (ASM, 1993).

Como recomendação principal para se evitar perdas de resistência à corrosão indica-se a realização da soldagem por meio de consumíveis compatíveis com a aplicação, como eletrodos austeno-ferríticos, para se evitar o trincamento a quente. Além disso, é recomendado também realizar a soldagem por meio de baixos aportes térmicos, o que resulta consequentemente em um processo de resfriamento mais

rápido. Isso porque quando a soldagem é feita sob altos aportes de energia, o resfriamento da junta é lento, o que pode facilitar a formação de carbonetos por meio da combinação do carbono e do cromo através do fenômeno de sensitização. Ao se combinarem, precipitam-se nas regiões dos contornos de grão, reduzindo a quantidade de cromo nas regiões adjacentes, podendo resultar no fenômeno de corrosão intergranular. Em geral, para aços austeníticos, qualquer evento que reduza o teor de cromo em solução sólida compromete a resistência a oxidação do material e a diminuição de sua passividade (ASM, 1993).

2.1.3 Processos de Produção de Hidrogênio em um Forno de Reforma

A utilização de hidrocarbonetos é mandatória na produção de hidrogênio em fornos de reforma a vapor, uma vez que são insumos do processo e reagentes das principais reações químicas ocorridas para a sua produção. A geração de hidrogênio através de processos térmicos pode ser obtida por duas principais operações: a reforma de hidrocarbonetos leves e a oxidação parcial de hidrocarbonetos (DA CRUZ, 2000, pp. 18-19). Esta última, utiliza o oxigênio no lugar do vapor e gera uma menor quantidade de hidrogênio em comparação com o gerado no processo de reforma a vapor. Em geral, processos de reforma caracterizam-se pela mistura de hidrocarbonetos e vapor de água reagindo endotermicamente a elevadas temperaturas na presença de um catalisador. A reação simplificada deste processo encontra-se abaixo (Equação 2.1):



O gás natural, constituído principalmente por metano, é um dos hidrocarbonetos mais utilizados em processos de reforma. A alta oferta deste consumível, aliada ao fácil armazenamento, possibilita a criação de plantas próximas aos grandes polos consumidores de hidrogênio, como por exemplo, as refinarias.

2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)

Segundo definição da ABENDI (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeções), Ensaios Não Destrutivos (END) são “técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem para isso danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção”. Tais técnicas são importantes ferramentas de controle de qualidade de materiais e produtos, sendo mandatórias para validação das condições de equipamentos e processos. As principais técnicas de END são: Correntes Parasitas, Emissão Acústica, Radiografia, Radioscopia, Gamagrafia, Ensaio Visual, Ensaio de Estanqueidade, Líquido Penetrante, Partículas Magnéticas, Ultrassom e Termografia (ABENDI, 2019).

Do universo de técnicas de ensaio não destrutivo utilizadas em tubos de reforma, destacam-se aquelas que utilizam a resposta de sinais elétricos ou variações de um campo magnético para detectar defeitos e alterações microestruturais localizadas. A técnica de inspeção por correntes parasitas utiliza este princípio e, portanto, será mais bem detalhada na sessão a seguir.

2.2.1 Técnica de Correntes Parasitas

O ensaio não destrutivo por correntes parasitas consiste na indução de uma corrente elétrica alternada na superfície inspecionada utilizando uma ou mais bobinas para isso. Este ensaio possui a particularidade de ser utilizado somente para a inspeção de materiais condutores de energia elétrica, pois utiliza fenômenos eletromagnéticos para detectar discontinuidades superficiais e subsuperficiais (SOARES, 2015).

2.2.2 Princípio de funcionamento

A indução de correntes elétricas é feita por meio de um campo eletromagnético variável no tempo o qual é induzido nas proximidades da peça por eletricidade. A criação de campos magnéticos através de correntes elétricas é um princípio físico explicado pela Lei de Ampère-Maxwell e calculado pela Lei de Ampère

(DUTRA,2019). O surgimento de correntes parasitas em si é explicado pela Lei de Indução de Faraday.

O sensor de correntes parasitas consiste em uma bobina a ser instalada próximo a superfície do material que será inspecionado. Quando excitada por uma corrente elétrica (geralmente alternada) ou pela variação temporal do fluxo do campo elétrico, um campo magnético alternado primário, de mesma frequência da corrente indutora, é gerado nesta bobina. Quando o sensor se aproxima da superfície do material condutor a ser inspecionado são induzidas, neste material, correntes parasitas em reação às forças eletromotrizes geradas por este campo primário (REITZ, 1982). A partir dessas correntes geradas na superfície do material condutor inspecionado, um campo magnético secundário, oposto ao campo primário, é gerado como consequência (STEGEMANN, 1990). A estas correntes que circulam na peça continuamente e perpendicularmente ao fluxo magnético gerado pelas bobinas, pelo campo magnético primário, dá-se o nome de correntes parasitas (do inglês: *eddy currents*), conforme ilustradas na Figura 2:

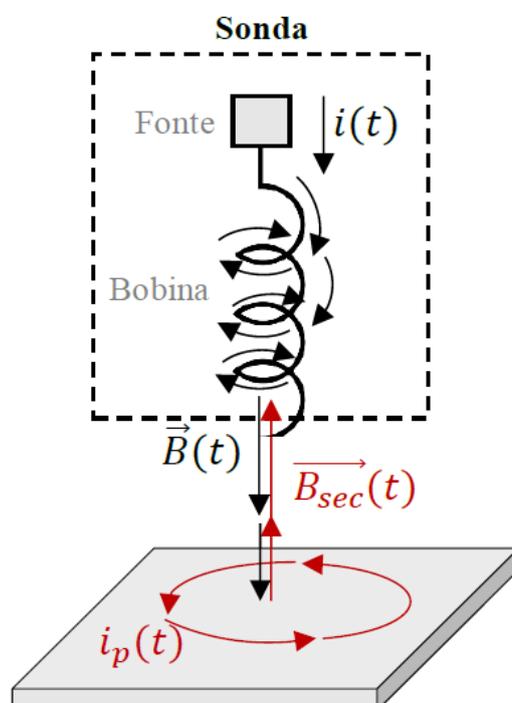


Figura 2 - Desenho esquemático do princípio da técnica de correntes parasitas. Fonte: ASSYS, Aimê

Caso seja observada durante a inspeção alguma alteração, como trincas ou mudanças microestruturais, há como consequência uma variação de impedância, parâmetro que mede a resistência à passagem de correntes elétricas. Além disso, ocorrem alterações no fluxo de correntes parasitas, o qual diminui em regiões que contém descontinuidades (ARENAS, 2017). Desse modo, a técnica consiste essencialmente na leitura de perturbações ocorridas no plano de impedância, ferramenta pela qual se faz a leitura do efeito da interação entre a bobina o material condutor inspecionado, comparando-a com as respostas aos mesmos estímulos em materiais conhecidos.

Portanto, a análise e interpretação dos resultados obtidos através do método de inspeção por correntes parasitas caracteriza-se por um método comparativo. Através da comparação dos resultados obtidos com um conjunto de padrões de referência conhecidos, inseridos no sistema durante a calibração do sensor, é possível não só localizar como também dimensionar as áreas dissemelhantes de regiões superficiais e subsuperficiais. Desse modo, torna-se possível, através da comparação com objetos semelhantes de propriedades e defeitos conhecidos, o dimensionamento e acompanhamento de trincas, corrosões, variações microestruturais localizadas e perdas de espessura no material inspecionado.

Como a maioria dos métodos de ensaios não destrutivos, os resultados obtidos através da inspeção via correntes parasitas também se caracterizam por serem sensíveis à diversas variáveis de ensaio. Dentre os fatores responsáveis por provocarem alterações nos sinais emitidos e dados coletados estão: as características geométricas da bobina, a distância entre a sonda e a amostra inspecionada (*lift-off*), o diâmetro da sonda utilizada e o seu posicionamento durante o ensaio, a correta caracterização do material durante a fase de calibração, a frequência utilizada no ensaio, as variações na espessura de camadas isolantes, as propriedades elétricas e magnéticas do material e as dimensões da amostra inspecionada.

A padronização do processo e da técnica de ensaio, a mitigação dos fatores influenciadores, além do conhecimento pleno das características do material ensaiado através do uso correto de padrões de referência durante a calibração, são medidas que possibilitam a coleta correta de dados durante o ensaio. Reduzindo a influência destas variáveis de ensaio é possível perceber claramente as variações nos

resultados encontrados na amostra inspecionada através de sua comparação com os padrões de microestrutura e defeitos conhecidos.

2.2.2.1 Lift-off

É a variação de impedância em função da distância entre a bobina, localizada no interior da sonda, e o material condutor inspecionado. Uma bobina energizada e mantida no ar, suficientemente afastada da amostra inspecionada ou de qualquer outro condutor, apresenta um valor de impedância inicial conhecido como *lift-off* infinito, o qual depende exclusivamente das configurações construtivas da sonda (HELLIER, 2003). Com a aproximação da bobina em relação ao material condutor inspecionado, o valor de impedância inicial começa a sofrer variações, atingindo um valor fixo quando a sonda encosta na superfície inspecionada.

Dessa forma, a variação da impedância ao longo do ensaio é um claro indicador de que o *lift-off* sofreu variações. Tais variações podem ser causadas por erros na técnica de uso, descontinuidades sub ou superficiais, como trincas e vazios e/ou camadas de revestimento (estruturais ou de óxido) que resultem em um acréscimo ou decréscimo na distância da sonda em relação a superfície inspecionada. Quando o objetivo é a detecção de descontinuidades, variações de qualquer natureza na impedância são prejudiciais ao ensaio e devem ser anuladas. Isso porque o *lift-off*, causador deste fenômeno, pode mascarar resultados e assim gerar interpretações inconsistentes com a realidade da amostra. Qualquer variação nas leituras de resistência e reatância deve ser gerada exclusivamente por descontinuidades e não pelo *lift-off* provocado pela má execução do ensaio (DUTRA, 2019).

2.2.2.2 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é uma característica inerente de cada material, sendo caracterizada como o inverso da propriedade de resistividade. Caracteriza-se como a capacidade de o material conduzir ou transmitir corrente elétrica. É geralmente expressa na literatura pelo símbolo σ , sendo representado pela unidade [S/m] no SI. No ensaio por correntes parasitas, a condutividade elétrica interfere de forma

diretamente proporcional no fluxo de correntes parasitas na superfície inspecionada. Quanto maior for a condutividade da amostra, maior será este fluxo. Entretanto, apesar de ser uma característica intrínseca ao material, existem fatores específicos que podem alterar a sua condutividade elétrica, dentre eles: composição química, tratamentos térmicos e condições microestruturais (BUCKLEY, 2003).

A influência direta da condutividade elétrica do material inspecionado está na profundidade de penetração do ensaio. Quanto maior a condutividade elétrica da amostra, maior será a densidade das correntes parasitas desenvolvidas na superfície da peça. Esta intensidade elevada de correntes parasitas superficiais gera um aumento no valor do campo secundário provocado na peça, diminuindo a influência do campo primário oriundo da bobina energizada, tornando-o menos propenso a desenvolver correntes parasitas capazes de atingir uma maior profundidade (HELLIER, 2003). Sendo assim, através da identificação de variações na condutividade elétrica da amostra é possível, com o uso de métodos de inspeção não destrutivas como a inspeção por correntes parasitas, detectar e estimar variações estruturais e microestruturais, como por exemplo, perda de espessura em revestimentos, resultantes de processos oxidativos, e graus de envelhecimento ocasionados por condições operacionais.

2.2.2.3 Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética pode ser definida como a capacidade de magnetização de um material, não sendo uma característica intrínseca a ele. Representada pela letra μ , esta propriedade dimensiona o nível de indução magnética do material quando um campo magnético indutor é aplicado sobre ele, sendo esta propriedade, diretamente proporcional a intensidade desse campo (SOARES, 2015). A indução eletromagnética caracteriza-se como sendo um fenômeno originador de uma força eletromotriz em um meio ou corpo quando exposto a um campo magnético variável.

Durante a inspeção de materiais ferromagnéticos, de alta permeabilidade elétrica, como revestimentos metálicos e camadas de óxido superficiais, as correntes parasitas formadas têm como característica permanecerem predominantemente na

superfície ensaiada. Esse fenômeno resulta na diminuição da profundidade de penetração do ensaio e, portanto, na dificuldade de leitura de descontinuidades subsuperficiais. Para contornar os prejuízos gerados por este fenômeno, utiliza-se a saturação magnética da superfície como uma técnica que permite a inibição de camadas de revestimento ferromagnéticas. O detalhamento desta técnica será feito em sessões posteriores deste trabalho.

Ainda, qualquer mudança na permeabilidade magnética da amostra gera desvios muito mais expressivos nas respostas das correntes parasitas ao ensaio do que variações na condutividade elétrica (MARTIN, 2011), prejudicando a leitura correta de descontinuidades ou detecção de alterações microestruturais.

2.2.2.4 Frequência e profundidade de penetração

A frequência de operação e a profundidade de penetração resultante, são duas variáveis correlacionadas. A profundidade de penetração padrão para corrente parasita, definida como a profundidade na qual a densidade de correntes parasitas é reduzida a 37% do seu valor superficial, é expressa pela Equação 2.2, abaixo. Sendo δ a profundidade de penetração [m], f a frequência [Hz] e as duas constantes μ e σ , respectivamente, a permeabilidade magnética [Tm/A] e a condutividade [S/m].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad \text{Equação (2.2)}$$

A equação denota que, com o aumento da frequência, a profundidade de penetração diminui. Já diminuindo-se a frequência, a capacidade de observar descontinuidades em maior profundidade aumenta. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento da sensibilidade a descontinuidades superficiais, causado por altos valores de frequência. Com a superfície mais sensível à leitura de descontinuidades, menor será a profundidade do ensaio e maior será a limitação para leitura de descontinuidades subsuperficiais. Por esse motivo, o ensaio por correntes

parasitas possui limitações quanto a profundidade de leituras quando comparado a outros métodos convencionais, como por exemplo, o ultrassom (CAMERINI, 2015).

A análise de um corpo de prova sujeito ao ensaio por correntes parasitas, evidencia que uma diminuição na intensidade do campo primário resulta conseqüentemente em um aumento da profundidade de penetração do ensaio. Como a geração de correntes parasitas está relacionada com a intensidade deste campo eletromagnético, ocorre que, quanto menor o fluxo de correntes parasitas, maior será a profundidade de penetração (CAMERINI, 2015).

Para regiões subsuperficiais, a intensidade de correntes parasitas será baixa e diminui exponencialmente ao longo da espessura da amostra. Ao fenômeno de decaimento da intensidade das correntes parasita dar-se o nome de “efeito peculiar”, do inglês, *skin depth* (CARNEVAL, 1990). A Figura 3 ilustra o que foi dito:

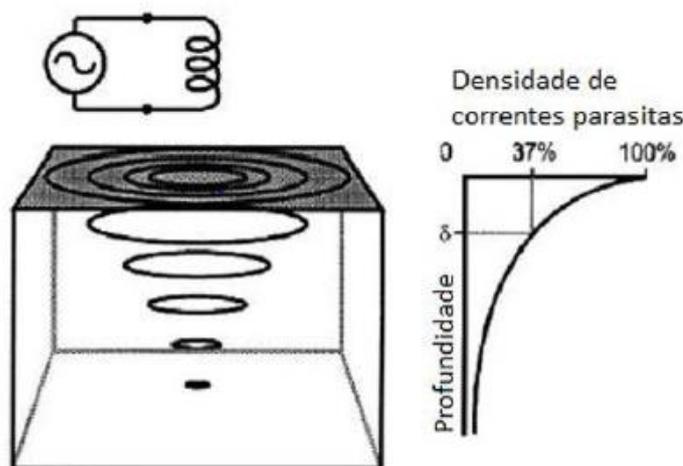


Figura 3 - (a) Densidade de Corrente. (b) Profundidade de Penetração. Fonte: PEREIRA (2007), adaptado.

Entretanto, apesar de baixos níveis de frequência resultarem em uma maior profundidade de penetração, nem sempre é possível trabalhar com frequências baixas. Isso porque nestes casos a densidade de correntes parasitas na superfície do material é menor, o que resulta na perda de sensibilidade da sonda (CAMERINI, 2015). Outro fator influenciador para a profundidade de penetração do ensaio é a permeabilidade magnética. Quanto maior a intensidade desta propriedade, maiores serão os níveis de magnetização superficiais, resultando em uma menor profundidade de penetração. A Figura 4 contém uma ilustração da influência da frequência,

condutividade e permeabilidade magnética para a profundidade de penetração do ensaio.

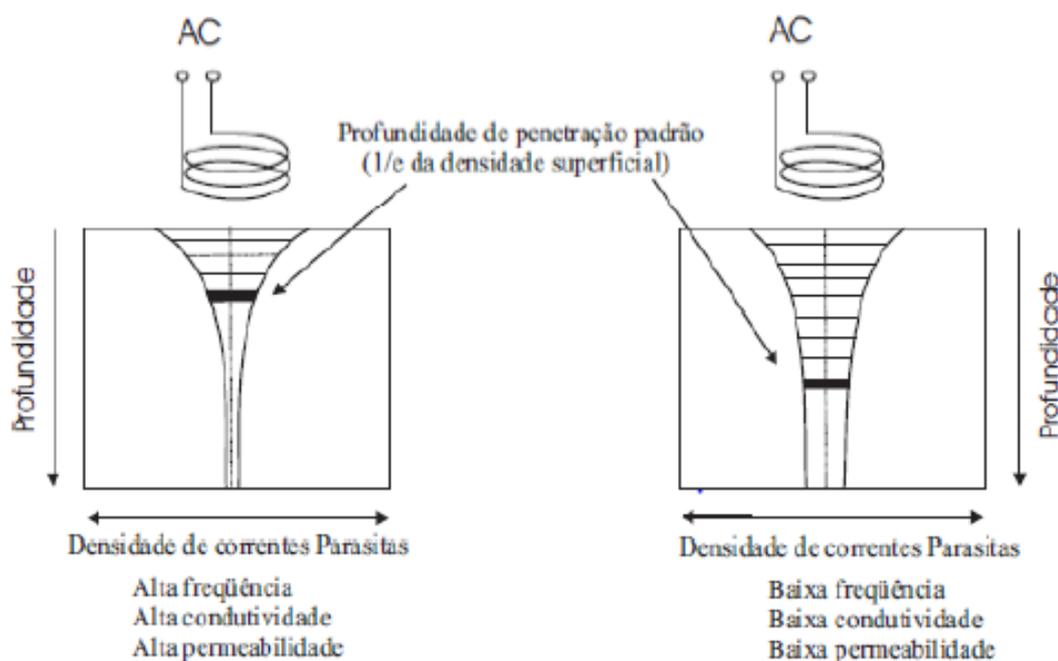


Figura 4 - Profundidade de Penetração (skin depth). Fonte: SILVA (2007), adaptado.

2.2.2.5 Geometria da amostra

A geometria da amostra afeta a eficácia do ensaio de algumas formas. A primeira delas é em relação a espessura da peça inspecionada. Quanto maior a espessura da amostra, maior a probabilidade de as linhas de campo magnético não alcançarem todo volume da peça, resultando como consequência em regiões não inspecionadas. Já para corpos de menor espessura as linhas de campo ultrapassam a amostra, resultando em um acréscimo na condutividade elétrica lido pelo sensor justamente pela interceptação de um ambiente ou material externo a amostra (PEREIRA, 2007).

Há de se atentar ainda para o efeito Edge-Effect, o qual resulta na distorção de resultados. Este efeito ocorre quando as linhas das correntes parasitas são distorcidas ao encontrarem a borda da amostra. Como resultado, elas se comportam da mesma forma que em casos de detecção de defeitos fornecendo, portanto, falsas indicações. Como uma forma de evitar esses efeitos indesejados, usa-se bobinas de menor

diâmetro em regiões próximas as bordas da amostra (SHULL, 2002). A Figura 5 contém uma ilustração do *Edge-Effect*.

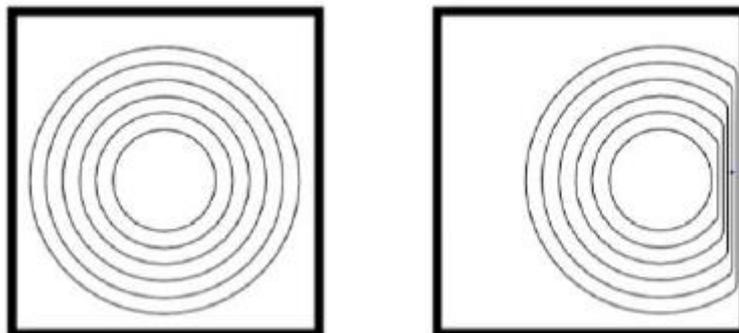


Figura 5 - Efeito de Borda - Edge-Effect. Fonte: PEREIRA (2007), adaptado.

2.2.2.6 Plano de Impedância

O plano de impedância é a ferramenta pela qual se faz a leitura do efeito da interação entre a bobina energizada e o material condutor a ser inspecionado. A aproximação de ambos gera sinais no plano de impedância elétrica da bobina, os quais podem ser interpretados como trincas, defeitos ou alterações microestruturais. Em linhas gerais a impedância representa a resistência que um circuito oferece a passagem de um fluxo de corrente elétrica variável.

Através do plano de impedância, duas informações importantes para a interpretação dos resultados podem ser adquiridas: a amplitude e o ângulo de fase. Geralmente, variações na amplitude do sinal evidenciam discontinuidades, enquanto alterações no ângulo de fase apontam mudanças nas propriedades do material (MARTINS, 2000).

A impedância elétrica (Z) é um número complexo cuja parte real é representada pela componente resistiva (R), expressa em ohms (Ω) e a parte imaginária é dada pelas reatâncias capacitiva (X_C) indutiva (X_L) (ARENAS, 2017). Entretanto, a influência da reatância capacitiva é muito baixa, tornando-se desprezível, restando apenas a reatância indutiva como parte complexa da impedância elétrica (STEGEMANN, 1990).

Compondo o plano de impedância tem-se, no eixo das abcissas, a resistência e no eixo das ordenadas a reatância indutiva, conforme Figura 6.

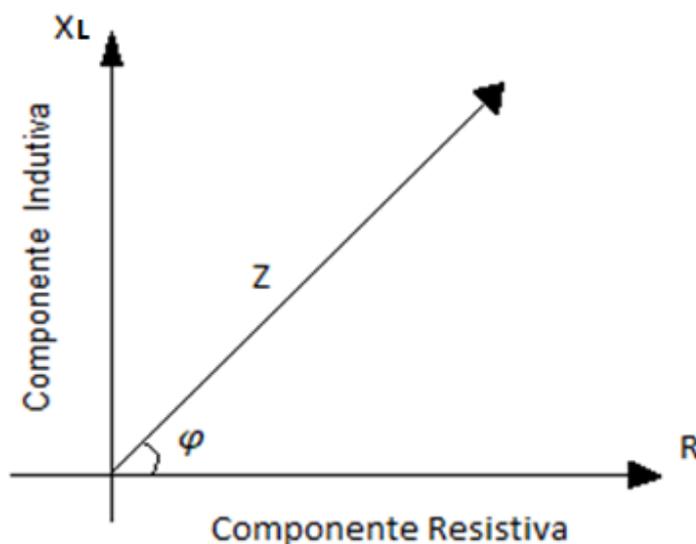


Figura 6 - Plano de Impedância (I). Fonte: PEREIRA (2007), adaptado.

A resultante das duas componentes é o vetor Z , que representa a impedância elétrica. Seu módulo pode ser obtido por meio das equações 2.3 e 2.4 abaixo, sendo f é a frequência e L é a indutância em Henrys. Já o ângulo de fase (φ) é obtido através da divisão do arco tangente da reatância indutiva pela resistência, através da equação 2.5, também expressa abaixo (LIMA, 2014):

$$Z = \sqrt{R^2 + X_i^2} \quad \text{Equação (2.3)}$$

$$X_i = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad \text{Equação (2.4)}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_i}{R} \right) \quad \text{Equação (2.5)}$$

A interpretação do plano de impedância pode ser feito da seguinte maneira: Para materiais paramagnéticos, fracamente magnetizáveis, a aproximação da sonda em direção a peça inspecionada eleva a resistência da bobina. Isso pode ser explicado devido ao campo primário emitido pela bobina energizada gerar correntes parasitas na superfície da peça inspecionada, retirando energia da bobina e por consequência

aumentando a sua resistência. Em decorrência disso, a reatância indutiva, por sua vez, decresce. Isso porque o campo magnético secundário gerado pelas correntes parasitas se opõe ao campo primário da bobina, resultando em um campo magnético insuficiente para produzir indutância (CAMERINI, 2015). Quando há a presença de alguma descontinuidade, como trincas, ocorre uma queda na resistência e um aumento na reatância indutiva.

A diminuição da resistência pode ser explicada pela redução da densidade das correntes parasitas devido aos desvios sofridos ao se deparar com algum defeito. Como consequência, há uma redução na “drenagem” de energia da mesma bobina, diminuindo a sua resistência (NDT RESOURCE CENTER, 2015). Já em relação ao aumento na reatância, ele se dá em função da diminuição do fluxo de correntes parasitas no material, resultando no decréscimo do campo magnético secundário, o que favorece a reatância da bobina.

Já quando a inspeção é feita em um material ferromagnético, a permeabilidade magnética destes materiais concentra o campo magnético da bobina na superfície inspecionada, diminuindo o campo secundário gerado pelas correntes parasitas e elevando o fluxo magnético na bobina, sendo conseqüentemente responsável por aumentar a reatância indutiva. Devido à alta densidade de correntes parasitas na superfície em função da permeabilidade elevada desse grupo de materiais, haverá a perda de energia da bobina e conseqüentemente um aumento na resistência. Para a detecção de descontinuidades em materiais ferromagnéticos, o princípio é o mesmo que o visto em materiais paramagnéticos: redução na resistência e aumento na reatância (DUTRA, 2019). A Figura 7 contém a exemplificação de um plano de impedância, bem como suas interpretações:

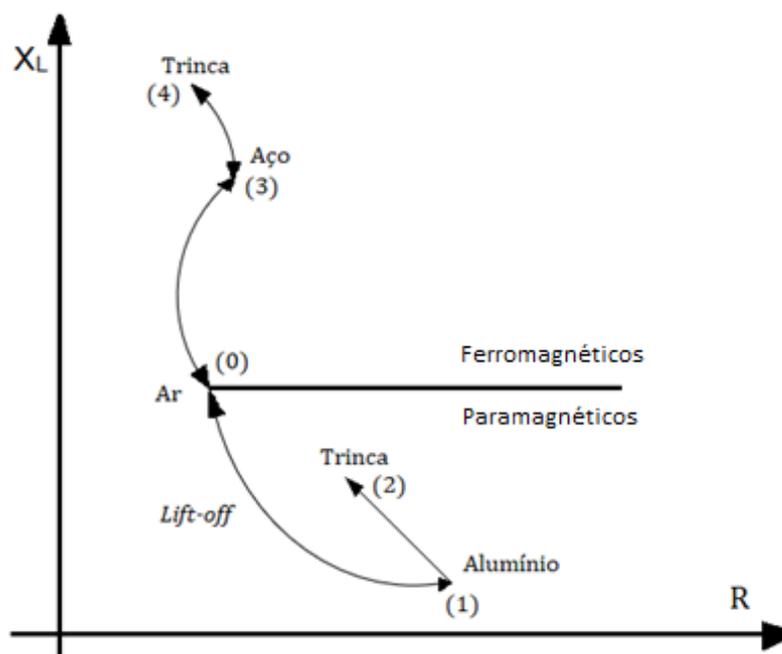


Figura 7 - Plano de Impedância (II). [0-3]: Lift-off; [0-1]: Lift-off; [3-4] e [1-2]: Detecção de descontinuidade - queda na resistência e aumento da reatância. Fonte: NDT RESOURCE CENTER (2015), adaptado.

2.2.3 Sensor de Efeito Hall

Em busca de maior precisão, a técnica de correntes parasitas é comumente associada a outros tipos de sensores. Dentre os tipos de sensores utilizados está o sensor de efeito Hall. Este sensor é um dispositivo capaz de variar sua tensão de saída quando exposto a um campo magnético (B), funcionando como um transdutor.

Este tipo de sensor tem o princípio de funcionamento baseado no efeito Hall, descoberto por Edwin Herbert Hall, em 1889. O efeito Hall manifesta-se quando um condutor sofre a influência de um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente aplicado sobre ele (ARENAS, 2017). A influência desse campo magnético e do sentido da corrente pelo condutor gera uma força eletromagnética (F_B) que concentra cargas negativas e positivas em suas extremidades opostas, gerando uma diferença de potencial, chamada de tensão Hall, a qual por sua vez gera o campo elétrico de Hall (E_H) e a força elétrica de Hall (F_E). O sensor de efeito Hall pode suportar grandes campos magnéticos sem saturar, sendo fundamental neste trabalho quando sua utilização é aliada à técnica de saturação magnética. A Figura 8 contém uma representação do princípio de funcionamento do Efeito Hall.

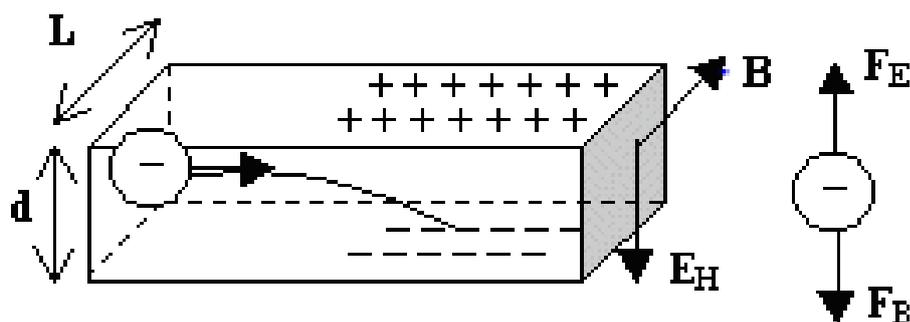


Figura 8 - Ilustração do Efeito Hall. Fonte: https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod08/m_s03.html (Acesso em: 02 abril. 2020).

2.2.4 Técnica de Saturação Magnética

Como já comentado, a profundidade de penetração é inversamente proporcional a permeabilidade magnética. Tubos de reforma são normalmente revestidos por uma camada de óxido, de natureza ferromagnética, portanto, para a inspeção destes materiais, utiliza-se a técnica de saturação magnética.

A técnica consiste em utilizar um campo magnético externo constante (DC) que inibe o efeito ferromagnético da superfície externa da amostra inspecionada, permitindo a aquisição de dados subsuperficiais, os quais possuem maior relevância para a caracterização de estados de envelhecimento (ARENAS, 2017). A Figura 9 ilustra a infraestrutura envolvida na inspeção via correntes parasitas aliada a técnica de saturação magnética.

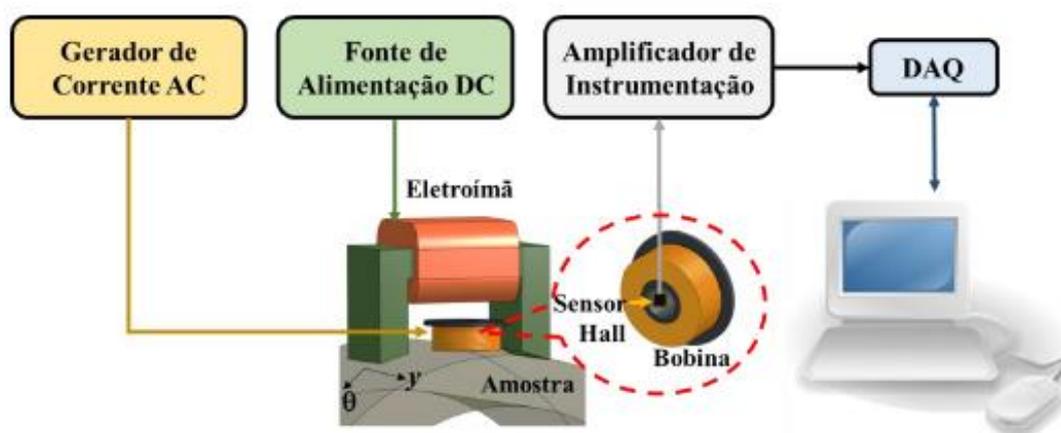


Figura 9 - Desenho esquemático da Sonda de Correntes Parasitas aliada a técnica de saturação magnética. Fonte: ARENAS (2017).

2.2.5 Sensor híbrido

Em linhas gerais, os sensores utilizados em ensaios de correntes parasitas podem ser classificados quanto ao seu modo de operação e a configuração de sua bobina. Para este trabalho, o modo de operação utilizado foi o característico de um sensor híbrido.

Um sensor híbrido pode ter diversas configurações. Neste projeto, o sensor híbrido utilizado tem como componentes essenciais uma bobina, instalada paralela à superfície inspecionada, e um sensor magnético de efeito Hall. Ao sensor híbrido pode ser adicionado ainda um eletroímã para saturação externa, configurando sensor de saturação magnética parcial.

2.2.6 Classificadores SVM

As Máquinas de Vetores de Suporte, do inglês, *Support Vector Machine (SVM)*, desenvolvidas por Vapnik (1995), fazem parte do campo de estudo das Teorias de Aprendizagem Estatística (TAE), conhecidas como Aprendizado de Máquina (AM). Este campo da Inteligência Computacional estuda o desenvolvimento de metodologias capazes de capturar conceitos (conhecimento) a partir de amostras de dados. Utilizam-se diversos algoritmos de aprendizado de máquina com o intuito de gerar classificadores para caracterizar um determinado conjunto. O processo de

classificação consiste em atribuir a uma determinada informação de entrada um rótulo da classe à qual ela pertence. Espera-se sempre que um classificador tenha a capacidade de prever a classificação de uma amostra com considerável exatidão além de conseguir repetibilidade neste resultado para quaisquer outras amostras pertencentes ao mesmo grupo de análise das utilizadas para o seu treinamento.

Entretanto, a classificação pode se estender para amostras de características distintas das utilizadas para o treinamento das rotinas. A eficiência de um classificador está diretamente relacionada com a sua capacidade de generalização. Para um alto grau de confiabilidade, o classificador deve desconsiderar dados isolados, fora do padrão utilizado no treinamento, classificando grande parte dos dados. Quanto mais bem-sucedida for a classificação de uma amostra, cujos dados distanciam-se em parte dos utilizados no aprendizado, melhor será o classificador.

A utilização desta ferramenta (SVM), por meio da TAE, objetiva neste projeto classificar amostras dos tubos de reforma quanto aos seus estágios de envelhecimento, baseando-se no histórico de dados utilizados para o seu aprendizado de rotinas. Ressalta-se que os estados de envelhecimento dos segmentos inspecionados já são conhecidos, tendo sido determinados por (QUEIROZ, 2017) e categorizados de I a VI. A expectativa é que os estados de envelhecimento identificados pelos classificadores durante as inspeções realizadas neste trabalho sejam equivalentes aos já conhecidos, para cada segmento, consolidando a assertividade e confiabilidade dos classificadores.

2.3 CINÉTICA DO SENSOR DE CORRENTES PARASITAS

A modelagem que representa o comportamento do conjunto de inspeção durante a passagem pelo cordão de solda do tubo de reforma durante a sua inspeção pode ser representada por um movimento de dois graus de liberdade: Translação e Rotação.

O movimento de Translação executado pelos sensores consiste na movimentação ascendente e descendente ao longo do eixo vertical perpendicular ao plano paralelo do tubo. Este movimento é causado pela força superficial exercida no

sensor durante a sua passagem pela solda. Visando retornar o sensor à posição original após a passagem pelo cordão de solda e mantê-lo sempre em contato com a superfície, molas de compressão são utilizadas para garantir estas condições.

As molas de compressão atuam verticalmente nas laterais do sensor comprimindo-o contra a superfície inspecionada. A força exercida pela mola é calculada através do produto de sua constante elástica (k) pelo seu deslocamento linear (x), conforme expresso pela Lei de Hooke (Equação 2.6), abaixo. Para comprimir o sensor contra a superfície, essa força deverá ser maior do que a força de reação da superfície. A figura 10 ilustra o movimento de translação realizado pelo sensor, bem como as forças que agem sobre ele através de um modelo representativo massa-mola.

$$F = -kx$$

Equação (2.6)

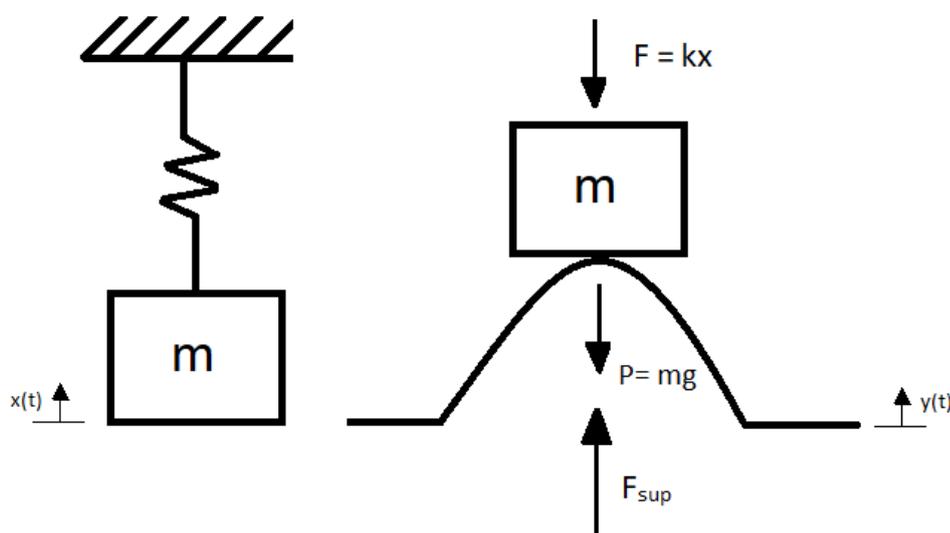


Figura 10 - Movimento de Translação – Esquema Representativo do Sensor desenvolvido por (ARENAS, 2017). Fonte: O Autor

Por sua vez, o movimento de Rotação executado pelo sensor consiste no movimento de arfagem, o qual é caracterizado pela sua inclinação em relação ao plano paralelo à superfície do tubo durante o início e finalização da passagem pelo cordão de solda. A alteração do ângulo de arfagem do sensor ao longo do tempo e o

seu retorno à posição inicial, durante a passagem pela solda, é garantida por molas de torção.

As molas de torção atuam nas laterais do sensor desempenhando um torque restaurador durante o tempo em que ele estiver fora de sua posição de equilíbrio. O torque exercido pela mola de torção é calculado através do produto de sua constante elástica (k) pelo seu deslocamento angular (θ), conforme expresso pela Lei de Hooke para movimentos torcionais (Equação 2.7). abaixo A figura 11 ilustra o movimento de rotação (aliado ao de translação) realizado pelo sensor, bem como as forças que agem sobre ele através de um modelo representativo massa-mola.

$$\tau = -k\theta$$

Equação (2.7)

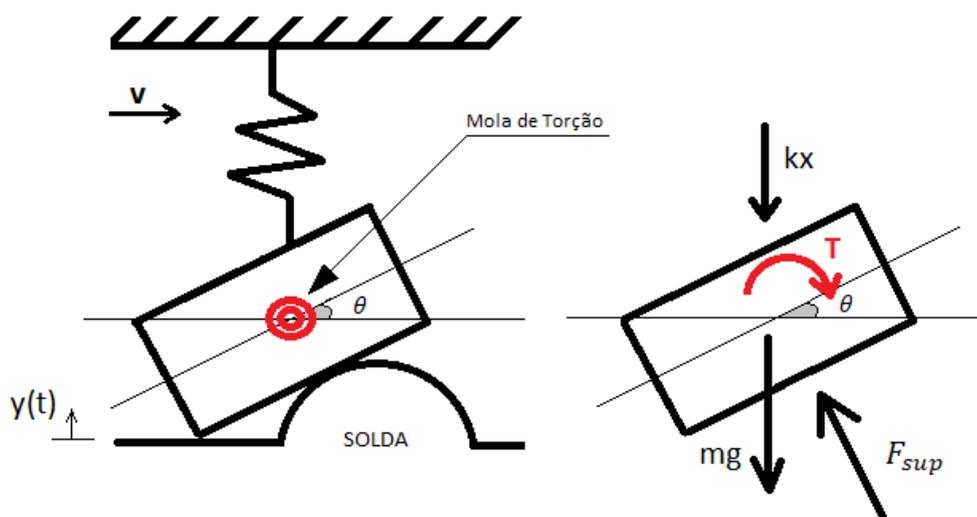


Figura 11 - Movimento de Rotação – Esquema Representativo do Sensor desenvolvido por (ARENAS, 2017). Fonte: O Autor

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho foi composta de inspeções em braço robótico, seguindo-se do desenvolvimento de um mecanismo manual de inspeção e, posteriormente, desenvolvimento de uma análise analítico-numérica para as duas versões do conjunto de inspeção. A Figura 12 ilustra o que foi dito.

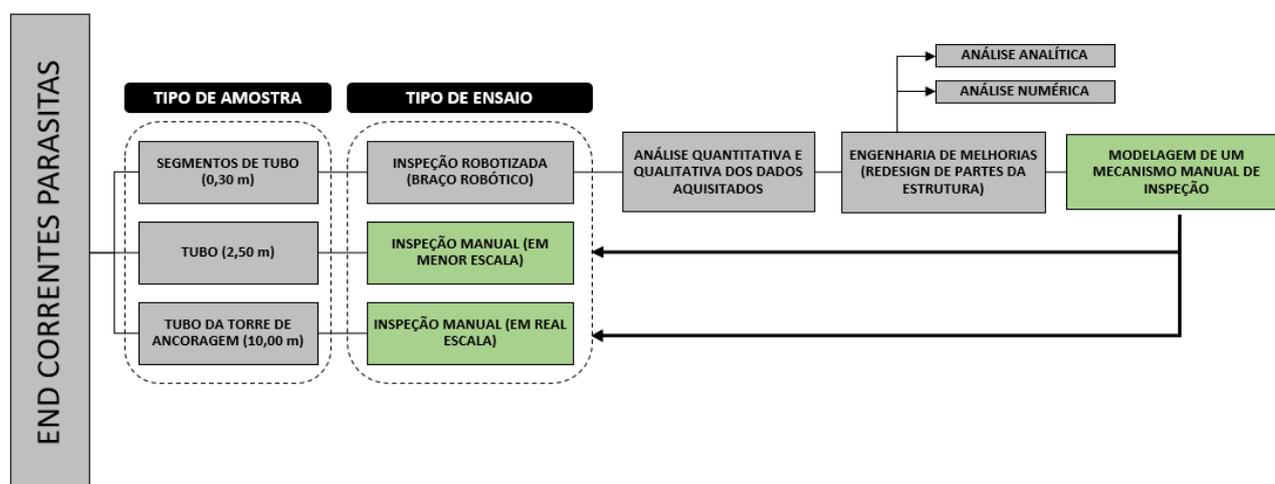


Figura 12 - Fluxograma ilustrativo da metodologia do projeto

3.1 MATERIAL UTILIZADO

Para este trabalho foram utilizados segmentos de tubo pertencentes à classe de aços austeníticos inoxidáveis HP resistentes ao calor e fundidos por centrifugação, retirados de colunas do Forno de reforma de diferentes unidades industriais. As microestruturas dos segmentos utilizados para as inspeções estão indicadas na Tabela 1 (teor de ferro em balanço), enquanto suas dimensões encontram-se descritas na Tabela 2.

Tabela 1 - Análise química realizada pelo IPT nos segmentos de tubos de reforma (% em peso).

Fonte: IPT

Tubo	Ni	Cr	C	Nb	Ti	Si	Mn	P	Zr	S	Mo	Co	W
SEGMENTO A	34,60	27,00	0,45	0,74	0,05	1,24	0,91	0,02	0,00	0,01	0,03	0,05	0,04
SEGMENTO B	34,00	26,10	0,44	0,92	<0,01	1,34	0,85	0,02	0,02	0,01	0,05	0,06	0,13

Tabela 2 – Dimensões dos segmentos. Fonte: O Autor

Segmento	Dimensão (Ø externo x Ø interno x Comprimento)
SEGMENTO A	112,7 x 91,3 x 300 (mm)
SEGMENTO B	130,1 x 108,1 x 300 (mm)

Os estados de envelhecimento característicos, detectados por micrografia, dos segmentos utilizados para as inspeções estão indicadas na Tabela 3, abaixo, segundo a nomenclatura definida por (QUEIROZ, 2017). Já as dimensões das soldas dos dois segmentos de tubo inspecionados, segmento A e segmento B, medidas por meio de Relógio Comparador Mitutoyo JCM 534 – No. 2119S-10 e Relógio Comparador Mitutoyo NYA783 – No. 513-426, encontram-se na Tabela 4.

Tabela 3 – Estados de Envelhecimento dos segmentos. Fonte: (Queiroz, 2017)

Segmento	Estado de envelhecimento
SEGMENTO A	III
SEGMENTO B	V

Tabela 4 – Dimensões do Cordão de Solda – segmento A e segmento B. Fonte: O Autor

	Segmento A (mm)	Segmento B (mm)
Altura da solda (mm)	17,7	15,5
Largura da Solda (mm)	20	14,63
Largura do Vale Maior da solda (mm)	8,55	10,93
Largura do Vale Menor da solda (mm)	7,9	11,45
Distância (Ponto 0 – Ponto 1)	147	150
Distância (Ponto 1 – Ponto 2)	36,45	37,01

Como característica comum entre os dois segmentos inspecionados, as suas uniões soldadas possuem a geometria ilustrada, fora de escala, representada pelo desenho esquemático (Figura 13), a qual se aproxima da seção longitudinal do segmento. Denominou-se Ponto 0 o primeiro ponto do segmento, Ponto 1 o ponto onde inicia-se a geometria da solda e Ponto 2 onde finaliza-se a solda.

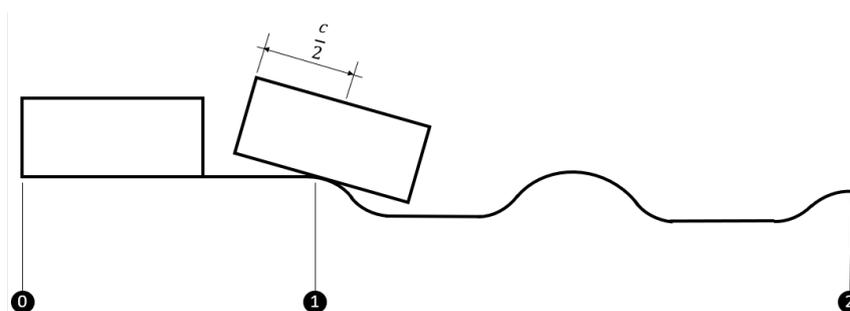


Figura 13 - Representação em corte longitudinal do percurso percorrido pelo sensor. Em detalhe, a sua passagem pela solda e os pontos de estudo 0,1 e 2. Fonte: O Autor

3.2 SONDA HIBRIDA PARA INSPEÇÃO

Para esse projeto, a sonda híbrida utilizada foi a desenvolvida por (ARENAS, 2017). Esta sonda é composta por dois sensores híbridos denominados, a título de simplificação, de Sensor 1 e Sensor 2 e por um sistema embarcado para excitação e aquisição de sinais. A Figura 14 ilustra o conjunto de inspeção utilizado, o qual contém em seu interior os Sensores 1 e 2.

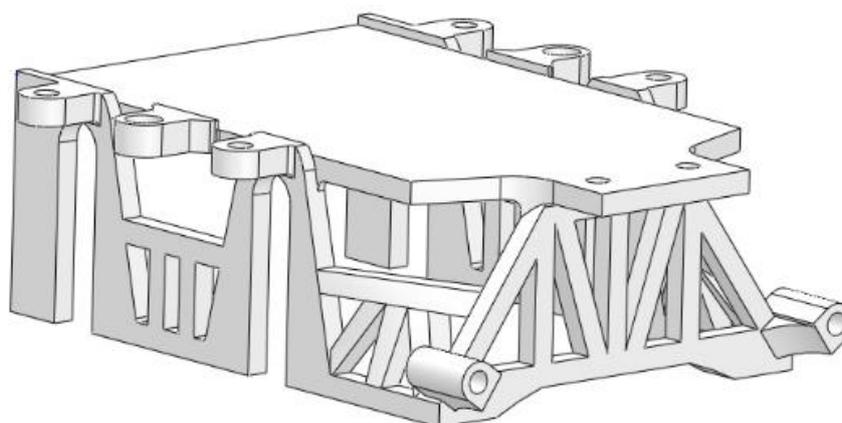


Figura 14 - Conjunto de Inspeção versão 1

3.3 INSPEÇÃO EM BRAÇO ROBÓTICO

O ensaio em braço robótico foi, além de o meio utilizado para se obter as curvas de aquisição e classificação de dados, um requisito de (ARENAS, 2017) para validar a eficácia do conjunto de inspeção em ensaiar segmentos de tubo de reforma. A Figura 13 ilustra a versão do conjunto de inspeção utilizada durante esta modalidade de inspeção, enquanto que a Figura 15 evidencia a inspeção do segmento B.

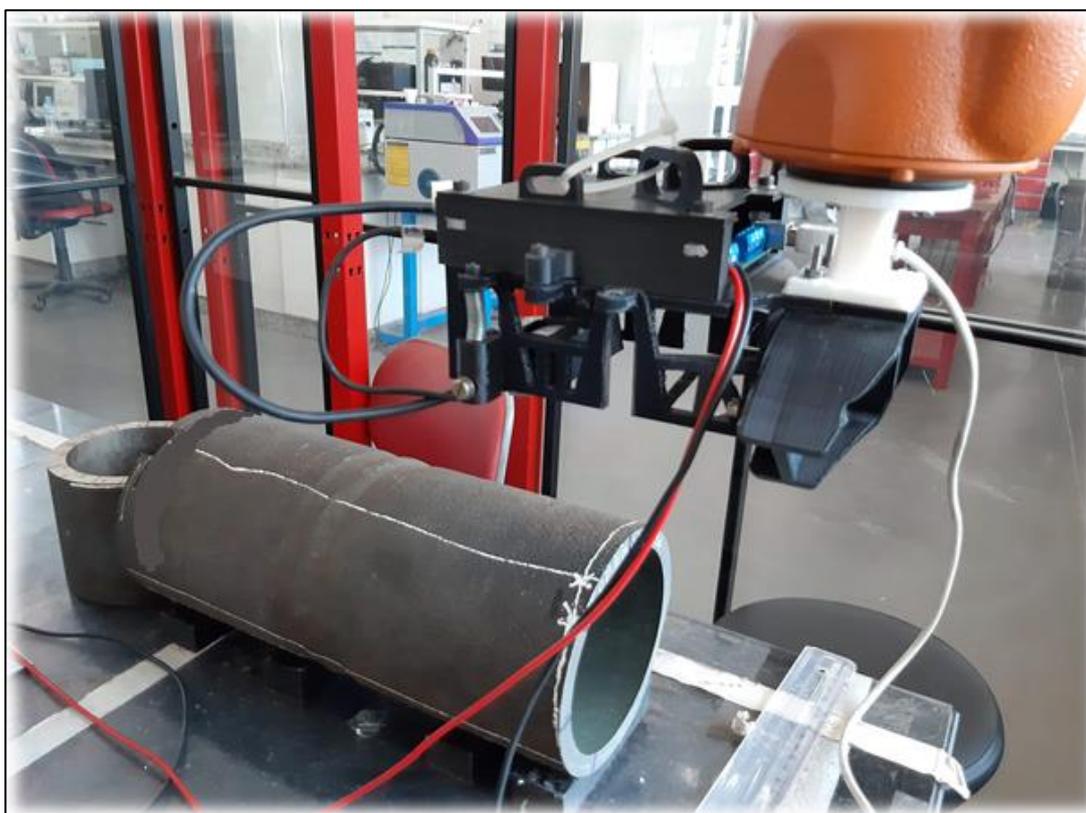


Figura 15 - Ensaio em braço robótico – Segmento B. Fonte: O Autor

O ensaio em braço robótico foi dividido em duas fases. Inicialmente utilizou-se somente o Sensor 1 para a inspeção dos segmentos A e B, fixando-o na parte da frente do suporte, seu local de origem. Em um segundo momento, removeu-se o Sensor 1, e utilizou-se somente o Sensor 2, preso na parte de trás do suporte, como usualmente é fixado.

Para cada uma das fases do ensaio, os segmentos foram percorridos em sentido ascendente e descendente por 10 vezes, escolhendo-se 3 geratrizes de cada segmento para serem inspecionadas. Para o segmento A, as geratrizes escolhidas para a inspeção foram as geratrizes 3,7 e 10. Para o segmento B, as geratrizes escolhidas para a inspeção foram as geratrizes 1, 2 e 3, conforme exposto na Figura 16, a seguir. Para a classificação dos estados de envelhecimento dos segmentos A e B utilizou-se como classificadores os algoritmos desenvolvidos por (ARENAS, 2017).

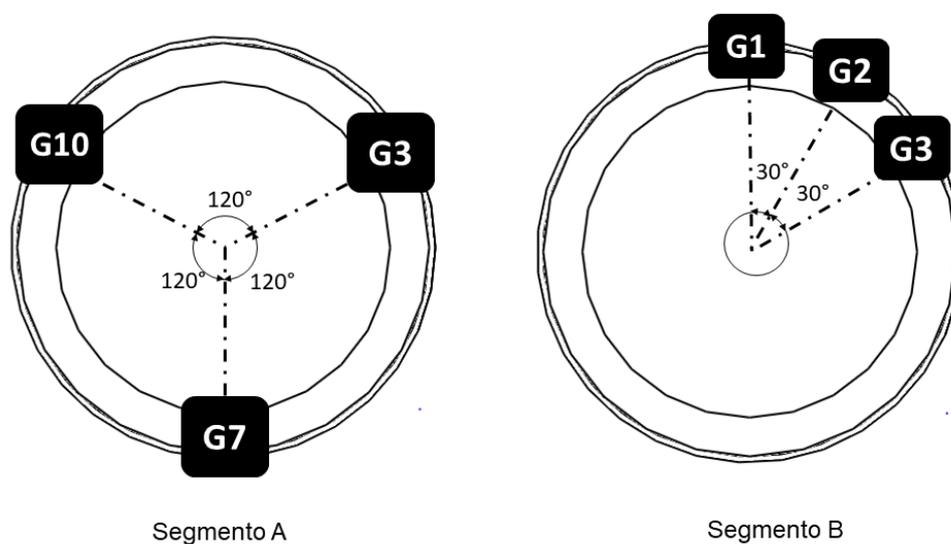


Figura 16 - Geratrizes Inspeccionadas. segmento A e segmento B. Fonte: O Autor

3.4 MODELAGEM ANALÍTICA

3.4.1 Mola de Torção e Força Superficial

Para a obtenção da constante elástica da mola de torção e de uma ordem de grandeza da força exercida pela superfície no conjunto de inspeção, foi desenvolvida uma modelagem analítica que visou, primeiramente, estudar qual seria a melhor configuração da mola de torção a ser instalada na sonda que reduzisse ao menor valor o *lift-off* durante o ensaio. Adicionalmente, a modelagem objetivou mensurar a magnitude da força superficial exercida na parte inferior do conjunto de inspeção durante a sua passagem pela solda. A modelagem considera como condições de contorno as alturas dos cordões de solda dos segmentos A e B.

A modelagem foi feita, primeiramente, reduzindo o mecanismo manual de inspeção a um sistema massa mola sujeito a forçamento vertical e torcional, ambos ocasionados pelas molas durante a passagem da sonda pela solda. O estudo pôde ser análogo ao de casos característicos da literatura como o de vibração forçada não amortecida e o problema típico de oscilador harmônico torcional. O objeto a sofrer as forças compressiva e torcional é um dos componentes do Conjunto de Inspeção, denominado Estojo. A ilustração do estojo é representada pela Figura 17, enquanto que as propriedades mecânicas deste componente, obtidas por meio da ferramenta “Propriedades de Massa” do SolidWorks, estão expressas nas Tabelas 5 e 6.

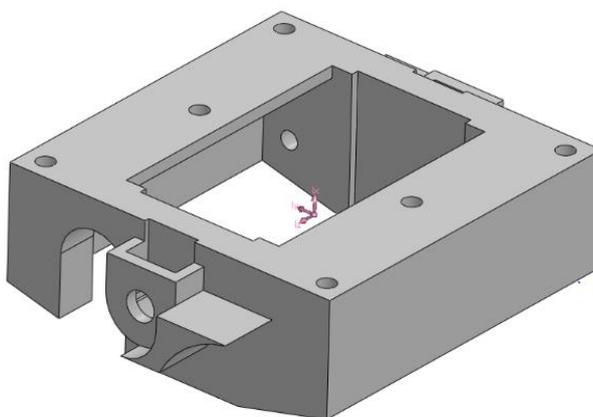


Figura 17 – Desenho isométrico do Estojo – Componente Conjunto de Inspeção. Dimensão: 60 x 60 mm Fonte: LNDC/COPPE/UFRJ

Tabela 5 – Grandezas e Propriedades do Estojo. Fonte: SolidWorks

DENSIDADE		CENTRO DE MASSA (M)	
1000 Kg/m ³		X	0,00076798
MASSA		Y	0,00938638
0,02356553 Kg		Z	-0,00127002
VOLUME		ÁREA SUPERFICIAL	
0,00002357 m ³		0,01519131 m ²	
EIXOS PRINCIPAIS DE INÉRCIA E MOMENTOS DE INÉRCIA PRINCIPAIS (KG*M2) – TOMADO NO CENTRO DE MASSA			
Ix	(0,000000000, 1,000000000, 0,000000000)	Px	0,00002174
Iy	(-1,000000000, 0,000000000, 0,000000000)	Py	0,00001349
Iz	(0,000000000, 0,000000000, 1,000000000)	Pz	0,00001018

Tabela 6 – Propriedades Mecânicas ABS. Fonte: SolidWorks

MÓDULO ELÁSTICO	2000000000	N/m ²
COEFICIENTE DE POISSON	0,394	N/A
MÓDULO DE CISALHAMENTO	318900000	N/m ²
MASSA ESPECÍFICA	1020	kg/m ³
RESISTÊNCIA DE TRAÇÃO	30000000	N/m ²
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	-	N/m ²
LIMITE DE ESCOAMENTO	-	N/m ²
COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA	-	/K
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	0,2256	W/(m·K)
CALOR ESPECÍFICO	1386	J/(kg·K)
COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO MATERIAL	-	N/A

Para sistemas dinâmicos, as Equações de Governo que representam os fenômenos de translação e rotação realizados pela sonda durante a inspeção da superfície e do cordão de solda do tubo são obtidas através de relações com a 2ª Lei de Newton e suas variações. Para melhor análise, o movimento do sensor foi dividido em 2 (duas) fases: I e II. O desenvolvimento dos equacionamentos para ambas as fases pode ser encontrado no capítulo 7 deste trabalho.

- Fase I: Sonda em contato apenas com a solda, inclinado;
- Fase II: Sonda em contato apenas com a solda, paralelo a superfície do tubo. Neste instante, no ponto mais alto da solda, a força superficial e a força exercida pela mola de compressão, são máximas.

3.4.2 Deslocamento Transversal Máximo e Tensão Normal de Flexão

Adicionalmente aos cálculos realizados para obtenção das configurações ideais das molas de torção e mensuração da força superficial sobre o conjunto de inspeção, elaborou-se um estudo analítico para avaliar o seu comportamento estrutural quando submetido a carregamentos distribuídos verticalmente, causadores de esforços de flexão. Tais esforços, podem ser convertidos em valores de tensão, deslocamentos transversais e deformações, os quais serão os objetivos dos cálculos desta sessão. A análise objetificou mensurar qual seria a máxima deformação transversal do conjunto de inspeção quando sujeito a atuação de uma carga distribuída de magnitude igual a força superficial, calculada anteriormente.

Sendo as duas versões (original e remodelada) do conjunto de inspeção muito similares estruturalmente, quando analisadas sob uma abordagem simplificada, assumiu-se que as duas poderiam ser representadas por um único corpo rígido de dimensões 90 x 25 x 150 mm, o que, além de unificar a abordagem, simplificou os equacionamentos. Por conta do elevado nível de aproximação da análise, esta modelagem pode requisitar outros meios alternativos, menos conservativos, para validá-la com níveis mais altos de precisão, considerando inclusive diferentes níveis de refinamento de malha e novas variáveis de contorno. Foi considerado, para efeitos de simplificação, que o corpo estaria engastado ao mecanismo motor, sendo submetido a esforços de flexão gerados pelo momento fletor provocado pela carga distribuída de 11N na face superior do conjunto, valor este obtido calculado por meio da análise analítica.

3.5 MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DO *SOLIDWORKS*

Os dados obtidos através das modelagens analíticas desenvolvidas nas sessões anteriores, foram comparados com os valores obtidos nas simulações estáticas desenvolvidas dentro do módulo Solid Simulation e Solid Motion do SolidWorks nesta sessão. As variáveis comparadas foram: deslocamento transversal e tensão normal de flexão, para o caso de um forçamento definido, calculado por meio da análise analítica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez realizadas as inspeções em braço robótico, iniciou-se a etapa de avaliação dos dados coletados. Além da análise feita sob os dados da inspeção robotizada, um estudo analítico e numérico foi desenvolvido com o intuito de validar propostas de alteração estruturais no conjunto de inspeção, por sua vez motivadas pelas conclusões obtidas com o ensaio robotizado.

A primeira interpretação feita dos dados obtidos com a inspeção em braço robótico configurou-se uma análise qualitativa. Isso porque visou obter, através dos ensaios em braço robótico, o estado de envelhecimento característico dos segmentos inspecionados, comparando-os com o encontrado por (QUEIROZ, 2017) em suas análises metalográficas. Obter o mesmo valor que (QUEIROZ, 2017), através deste experimento, comprova a eficácia do classificador em classificar corretamente o estado de envelhecimento do segmento.

A segunda análise realizada teve caráter quantitativo, isso porque analisou o número de pontos classificados e não classificados ao longo da inspeção de cada um dos segmentos, evidenciando os prejuízos que a irregularidade superficial causada pelo cordão de solda resulta na quantidade de pontos coletados e na qualidade da classificação dos estados de envelhecimento. Para esta análise fez-se uma “análise binária”, onde qualquer estado de envelhecimento classificado foi considerado como 1, enquanto a não classificação é representada como 0.

Para a análise quantitativa, mesclou-se, para cada geratriz, os dois gráficos obtidos separadamente para ida e para a volta da sonda com o intuito de se observar o intervalo de pontos não lidos entre o início e o final da irregularidade superficial gerada pela solda e sua periferia. A interpretação dos gráficos obtidos nesta análise permite calcular em distância métrica o comprimento exato do segmento que não foi mapeado durante a inspeção.

Os valores obtidos nas análises qualitativas e principalmente nas análises quantitativas, serviram de referência e parâmetros métricos para inspeções futuras nestes segmentos A e B. Além disso, motivaram este projeto a buscar soluções que melhorassem a qualidade das leituras, aquisições e classificações dos dados por meio de remodelagens do conjunto de inspeção e sua posterior validação através do

confronto de estudos analíticos – por meio de um modelo simplificado do sensor – e numéricos através do módulo de simulação estática do SolidWorks.

Preliminarmente ao ensaio, supôs-se que a eficiência da aquisição e classificação de dados pela sonda seria afetada durante a sua passagem pela união soldada dos segmentos. As perturbações na leitura de fato foram identificadas, sendo o intervalo de pontos compreendidos entre os pontos 1 e 2 os mais impactados. Os dados coletados entre o Ponto 1 e o Ponto 2 revelaram-se, em sua maioria, pontos sem classificação (classificados 0) ou de classificação instável. Isso pode ser explicado devido à trajetória curvilínea desenvolvida pela sonda durante a passagem pela solda. Devido ao fato de o sensor híbrido estar posicionado no centro da solda, ao declinar-se e erguer-se durante o avanço através da união soldada, há em decorrência disso um aumento do *lift-off*, implicando na perda de leitura de pontos.

4.1 INSPEÇÕES EM BRAÇO ROBÓTICO

4.1.1 Inspeção segmento A

4.1.1.1 Análise qualitativa

Pode-se extrair do Gráfico 1, abaixo, que o número médio de pontos classificados durante a inspeção do segmento A foi de 55 pontos. Além disso, o estado de envelhecimento obtido em cada uma das três geratrizes inspecionadas foi, dentro da escala de (QUEIROZ, 2017), estado III de envelhecimento. O valor encontrado mostrou-se o mesmo obtido através de análises metalográficas, comprovando a eficácia do classificador em classificar o estado de envelhecimento do segmento A.

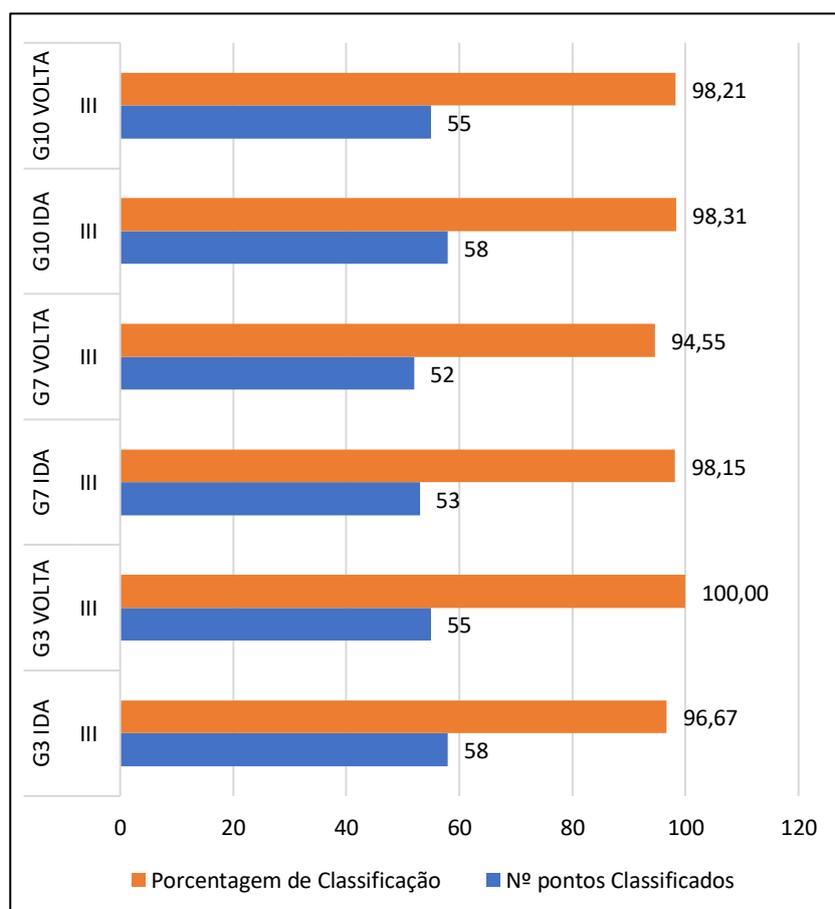


Gráfico 1 - Segmento A. Estado de envelhecimento característico III para as três geratrizes inspecionadas

4.1.1.2 Análise quantitativa

Os gráficos 2,3 e 4 contêm as curvas de aquisição e classificação da geratriz 03 do segmento A. Foram feitas 3 passadas, onde uma passada completa representa uma ida e uma volta. Os dois primeiros gráficos representam a ida e a volta, respectivamente. O terceiro gráfico une os dois anteriores e fornece uma estimativa do intervalo de pontos não classificados.

A numeração dos pontos cresce com o comprimento do segmento. Os primeiros pontos representam o início do segmento, enquanto os últimos, o final. Para melhor entendimento, o segundo gráfico teve o eixo das abcissas invertido, sendo todos os gráficos lidos da esquerda para direita. O primeiro gráfico indica que a partir do ponto 21, em média, a classificação foi interrompida (Ponto A). O segundo gráfico mostra a interrupção da classificação no ponto 12 (Ponto B). Através da análise do terceiro gráfico, encontra-se que o intervalo de pontos não classificados compreende, em média, 9 pontos. Os pontos não classificados coincidem, em parte, com a região soldada do segmento e suas periferias.

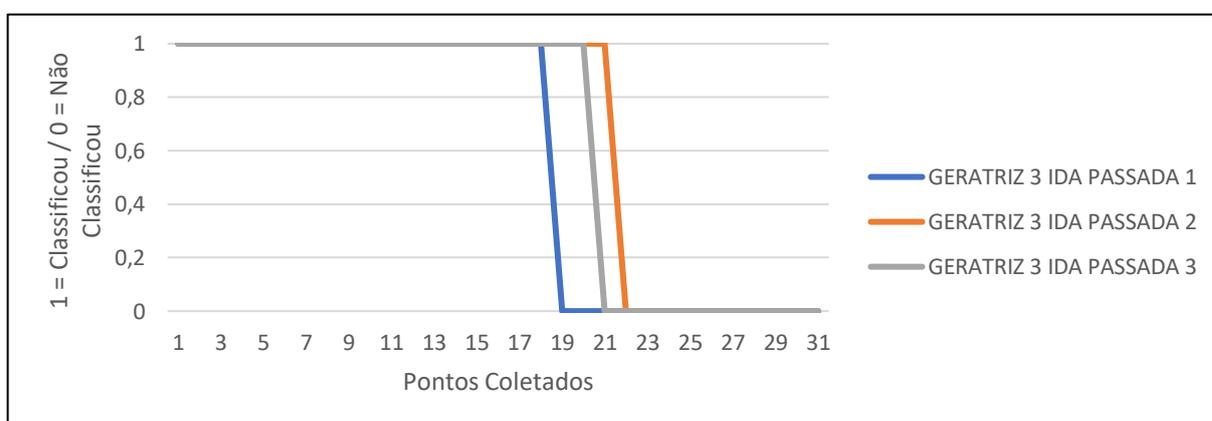


Gráfico 2 - Segmento A > Geratriz 03 > Sentido de Ida

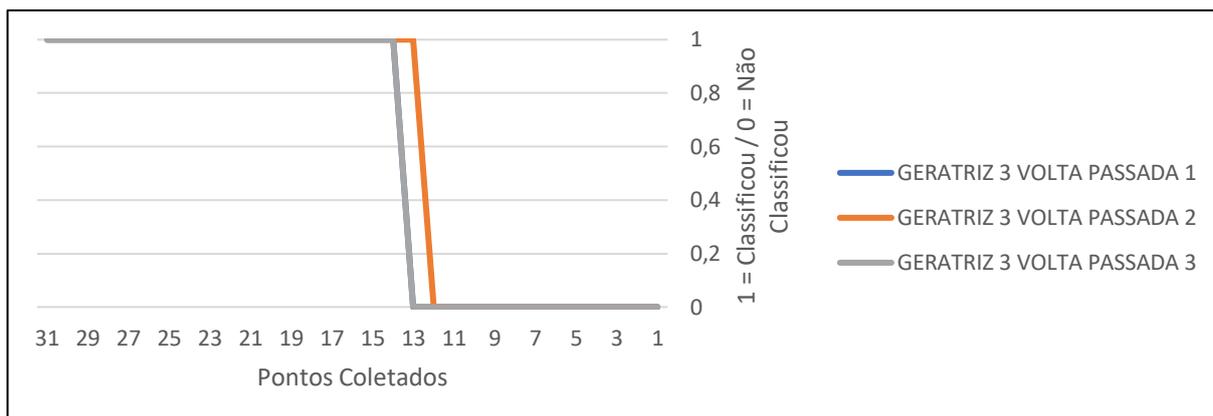


Gráfico 3 - Segmento A > Geratriz 03 > Sentido de Volta

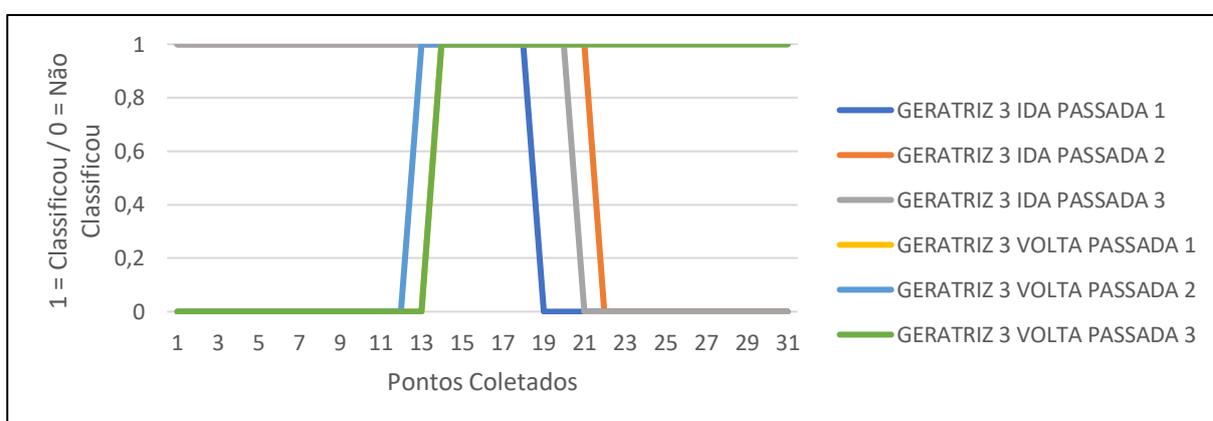


Gráfico 4 - Segmento A > Geratriz 03 > Compilado ida e volta

Convertendo o número de pontos não classificados em distância métrica, é possível conhecer dois dados importantes: O primeiro dado corresponde a fração do segmento que não foi caracterizada quanto ao seu estado de envelhecimento (PA-PB), esta geralmente é a região que compreende a solda. Já o segundo permite conhecer a distância máxima até o início do descarte recomendado de pontos para cada tipo de segmento (P0-PA). A tabela abaixo fornece os dados obtidos para a distância métrica entre os pontos 0 e A e A e B, bem como os seus respectivos erros relativos.

Tabela 7 – Tabela de entradas e variáveis do Segmento A – Geratriz 03. Fonte: O Autor

SEGMENTO A – GERATRIZ 03		UNIDADE
Nº PONTOS COLETADOS	31	unidades
Nº PONTOS PERDIDOS	9	unidades
TAXA DE AQUISIÇÃO	10,33	pontos/segundo
1º DADO: DISTÂNCIA MÁXIMA ATÉ O DESCARTE (P0-PA)	182,56	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA P0-PA (EM MÓDULO)	19,48	%
2º DADO: DISTÂNCIA NÃO LIDA (PA-PB)	47,74	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA PA-PB (EM MÓDULO)	23,65	%

A distância entre os pontos A e B é obtida por meio de simples cálculos matemáticos. A razão entre o comprimento do segmento inspecionado e o número de pontos coletados fornece a distância métrica equivalente a 01 (um) ponto. Multiplicando-se o número de pontos não coletados pela distância métrica equivalente a 01 (um) ponto encontrada e descontando-se metade do comprimento da placa cerâmica duas vezes (para a entrada e para a saída da sonda da solda), obtém-se o valor da distância entre os pontos A e B. Para o segmento A – geratriz 03, a distância encontrada entre os pontos A e B foi de 47,74 mm, apresentando um erro de 24% em relação à mesma distância obtida por paquímetro em laboratório. Esta alta discrepância pode ser associada erros de medição manual ou heterogeneidade da solda a cada geratriz.

Para descobrir a distância máxima até o descarte para o segmento em análise é preciso verificar em que ponto a classificação de dados é interrompida. Os dados coletados da inspeção do segmento A – geratriz 03 recomendam o descarte de pontos a partir do ponto 19, no sentido de ida, equivalente uma distância métrica de 182,56 mm a partir do início do segmento (ponto 0). A distância máxima até o descarte (para essa geratriz), obtida através da análise dos dados, é 19,48% maior que a distância entre os pontos 0 e A, medida com paquímetro em laboratório, sinalizando que a perda de leitura ocorre instantes após o início da passagem da sonda pela solda, e não antes, como se previa. A mesma análise foi feita para as geratrizes 07 e 10 do segmento A. A título de simplificação, na sequência, somente os gráficos compilados de cada geratriz (Gráficos 5 e 6), bem como suas tabelas contendo os valores referentes às duas principais medições coletadas (1º dado e 2º dado) serão apresentados.

Tabela 8 – Tabela de entradas e variáveis do segmento A – Geratrizes 07. Fonte: O Autor

SEGMENTO A – GERATRIZ 07		UNIDADE
1º DADO: DISTÂNCIA MÁXIMA ATÉ O DESCARTE (P0-PA)	149,79	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA P0-PA (EM MÓDULO)	1,00	%
2º DADO: DISTÂNCIA NÃO LIDA (PA-PB)	39,05	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA PA-PB (EM MÓDULO)	7,00	%

Tabela 9 – Tabela de entradas e variáveis do segmento A – Geratrizes 10. Fonte: O Autor

SEGMENTO A – GERATRIZ 10		UNIDADE
1º DADO: DISTÂNCIA MÁXIMA ATÉ O DESCARTE (P0-PA)	173,87	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA P0-PA (EM MÓDULO)	15,00	%
2º DADO: DISTÂNCIA NÃO LIDA (PA-PB)	39,05	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA PA-PB (EM MÓDULO)	7,00	%

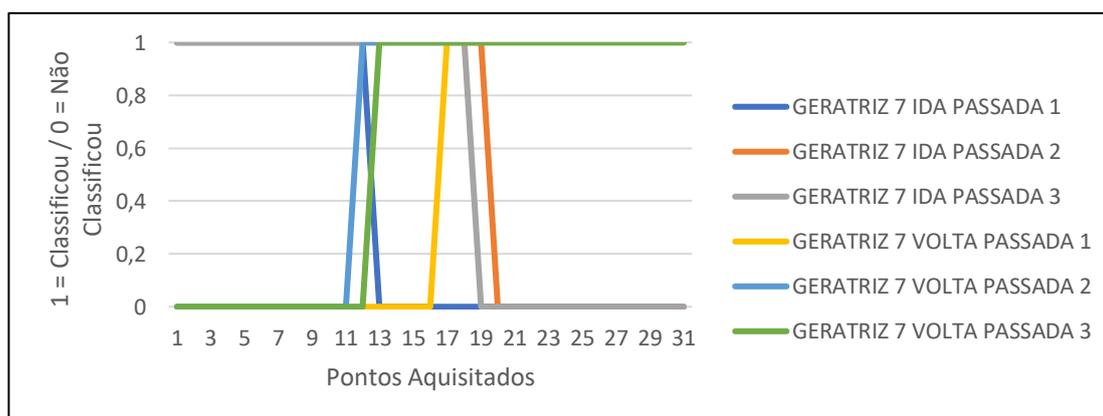


Gráfico 5 - Segmento A > Geratriz 07 > Compilado ida e volta

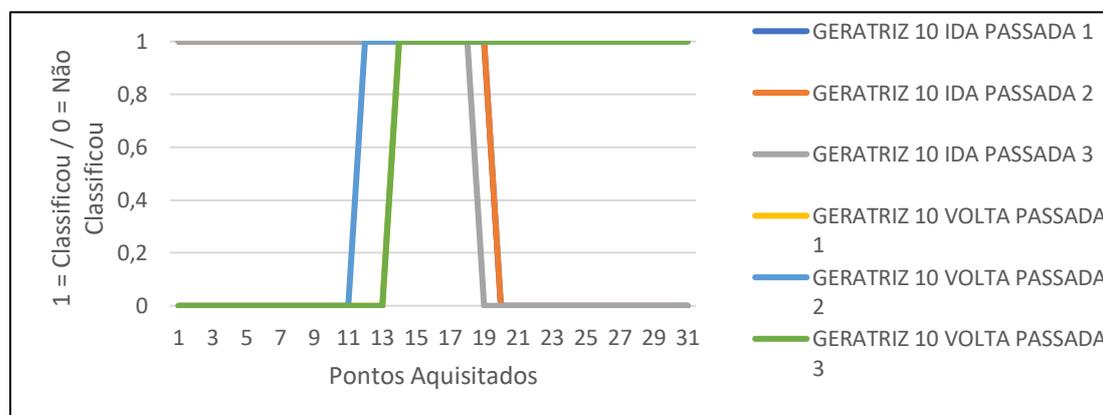


Gráfico 6 - segmento A > Geratriz 10 > Compilado ida e volta

Em média, a distância não lida para o segmento A (2º dado), considerando todas as geratrizes inspecionadas, foi de 41,94 mm (13,09% maior que o medido manualmente). Para este resultado, um aumento da região não lida pelo sensor é um indicativo de que a solda tem uma influência negativa na taxa de aquisição de pontos maior do que se pensava e que, apesar disso, a margem de pontos para descarte (56,45 mm) é superdimensionada em 14,51 mm (25,70%) para o segmento A.

Já o resultado obtido para a máxima distância recomendada a ser considerada até o descarte (1º dado), constatou-se que, em média, uma distância de 168,09 mm (12,55% maior que o medido manualmente) pode ser atribuída como padrão para este segmento. Para este resultado, um aumento nesta grandeza é um indício de que a prática de descartar pontos antes e depois da solda, cerca de 10 mm de cada lado, realizadas até o momento em ensaios em laboratório, deve ser revista. Na prática, 21,09 mm antes desconsiderados, passam, com este estudo, a serem regiões potencialmente fornecedoras de dados válidos.

Adicionalmente, pode-se obter a que distância o sensor retoma a caracterização de dados. De acordo com a análise dos dados, para o segmento A, em média, pode-se considerar como padrão uma distância de retomada de leitura em 210,03 mm (a partir do ponto 0). A Figura 18 ilustra o que foi dito:

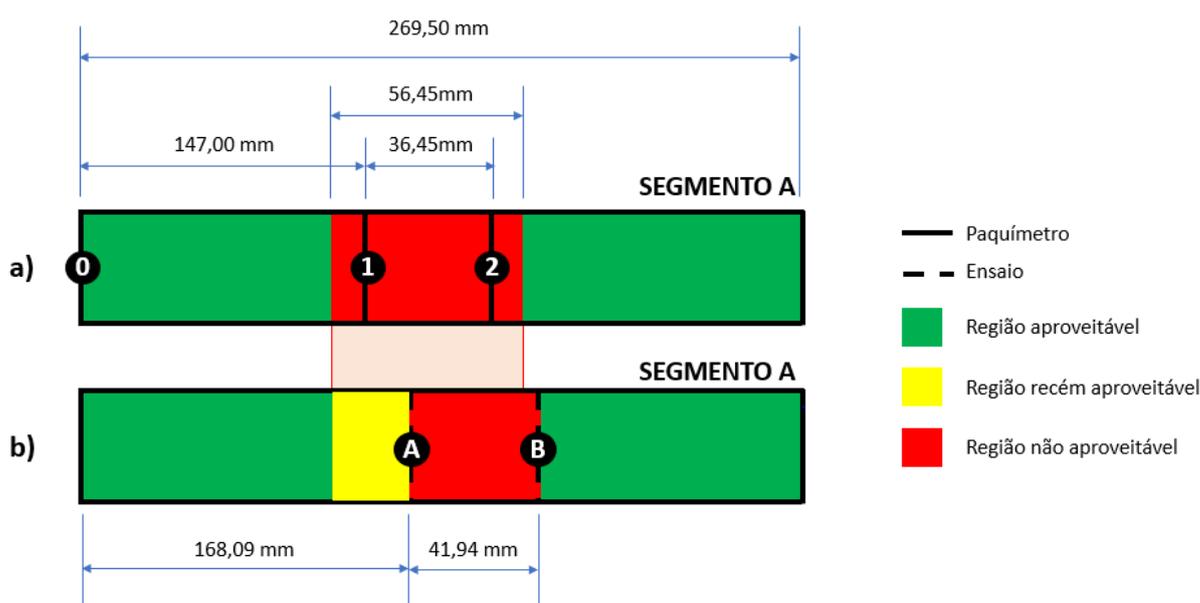


Figura 18 - a) Marcação das regiões com base em medições feitas manualmente com paquímetro. b) Marcação das regiões com base nos resultados obtidos através da análise quantitativa. Fonte: O Autor

4.1.2 Inspeção segmento B

4.1.2.1 Análise qualitativa

Pode-se extrair do gráfico que o número médio de pontos classificados durante a inspeção do segmento B foi de 65 pontos. Além disso, o estado de envelhecimento obtido em cada uma das três geratrizes inspecionadas foi, dentro da escala de (QUEIROZ, 2017), estado IV de envelhecimento. O valor encontrado mostrou-se o mesmo obtido através de análises metalográficas, comprovando a eficácia do classificador em classificar o estado de envelhecimento do segmento B.

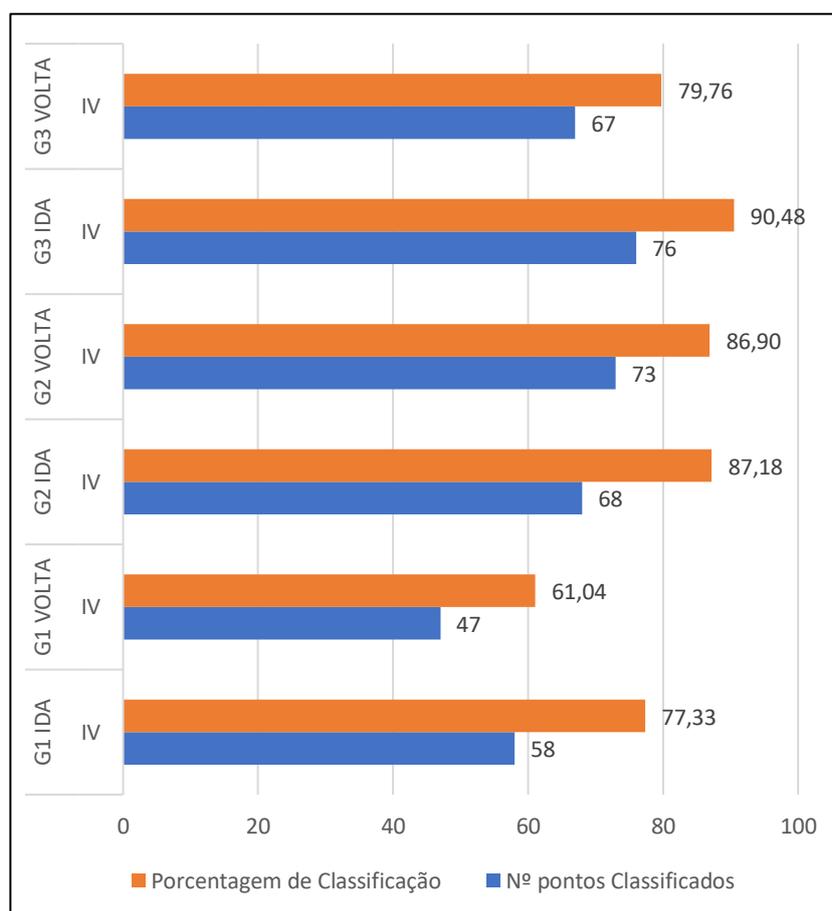


Gráfico 7 - Segmento B. Estado de envelhecimento característico IV para as três geratrizes inspecionadas

4.1.2.2 Análise quantitativa

A análise quantitativa do segmento B se mostrou menos confiável quando comparada com a análise feita para o segmento A. Isso porque os gráficos de classificação das três geratrizes inspecionadas (01,02 e 03) não apresentaram o comportamento esperado em relação à aquisição de pontos antes, durante e após a passagem da sonda pela solda e sua periferia, revelando-se muito instáveis e sem o platô característico de pontos não coletados bem definido. Isso pode ser explicado devido à geometria da solda deste segmento, que apresentou vales de maior comprimento (conforme Tabela 4), além de uma provável maior rugosidade aparente (não mensurada neste trabalho) do segmento quando comparada ao segmento A, o que trouxeram prejuízos à leitura. A seguir somente os gráficos compilados de cada geratriz serão apresentados (Gráficos 8, 9 e 10), bem como suas tabelas contendo os valores referentes às duas principais medições coletadas (1º dado e 2º dado).

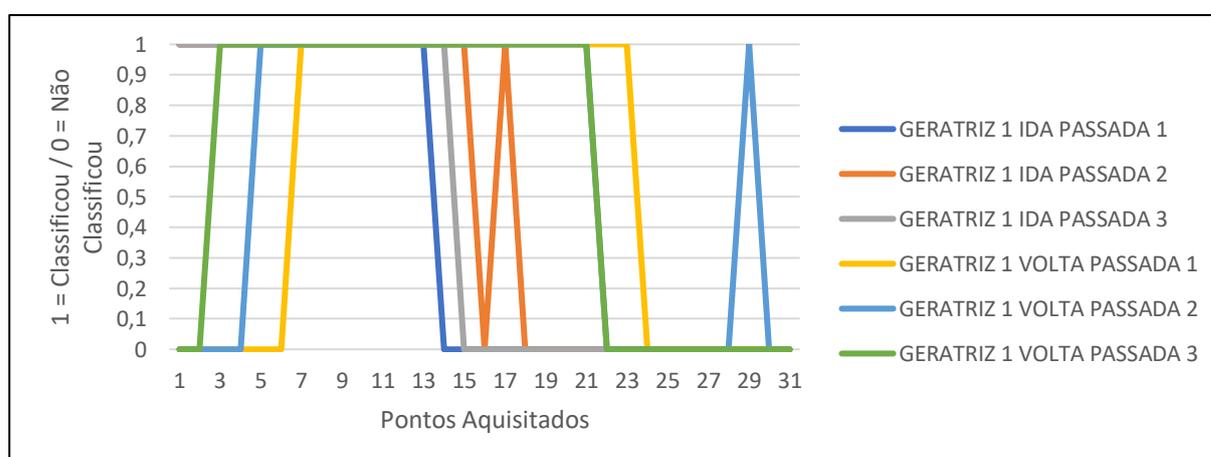


Gráfico 8 - Segmento B > Geratriz 01 > Compilado ida e volta

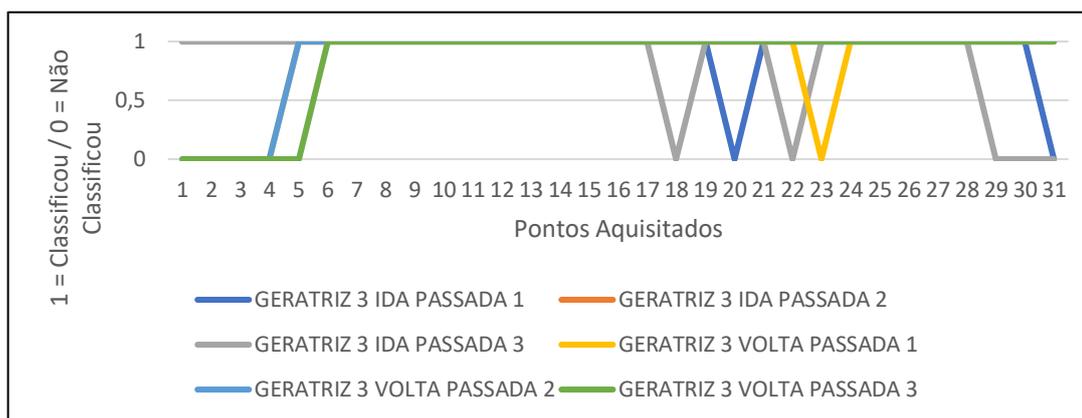


Gráfico 9 - Segmento B > Geratriz 02 > Compilado ida e volta

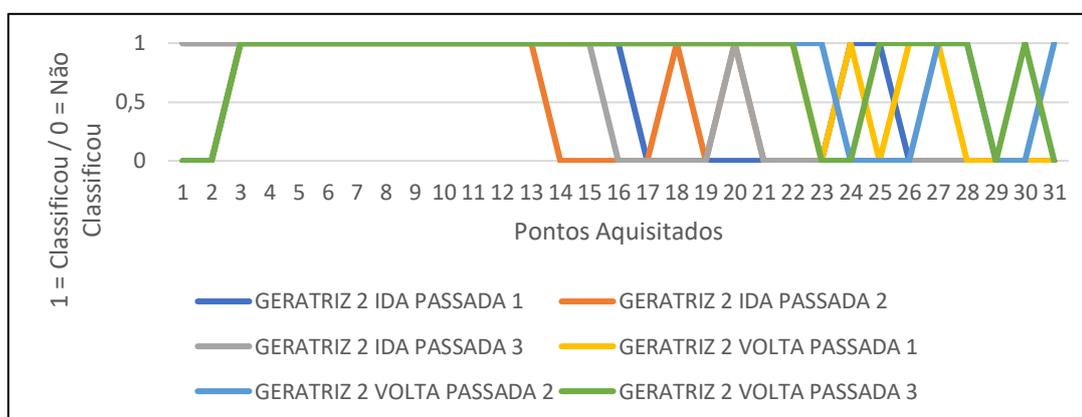


Gráfico 10 - Segmento B > Geratriz 03 > Compilado ida e volta

Tabela 10 - Tabela de entradas e variáveis do segmento B – Geratrizes 01,02 e 03. Fonte: O Autor

SEGMENTO B – GERATRIZ 01		UNIDADE
1º DADO: DISTÂNCIA MÁXIMA ATÉ O DESCARTE (P0-PA)	139,1	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA P0-PA (EM MÓDULO)	-8,00%	%
2º DADO: DISTÂNCIA NÃO LIDA (PA-PB)	65,13	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA PA-PB (EM MÓDULO)	43%	
SEGMENTO B – GERATRIZ 02		UNIDADE
1º DADO: DISTÂNCIA MÁXIMA ATÉ O DESCARTE (P0-PA)	139,1	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA P0-PA (EM MÓDULO)	-8,00%	%
2º DADO: DISTÂNCIA NÃO LIDA (PA-PB)	39,05	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA PA-PB (EM MÓDULO)	5%	
SEGMENTO B – GERATRIZ 03		UNIDADE
1º DADO: DISTÂNCIA MÁXIMA ATÉ O DESCARTE (P0-PA)	173,87	mm
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA P0-PA (EM MÓDULO)	14,00%	%
2º DADO: DISTÂNCIA NÃO LIDA (PA-PB)	39,05	
ERRO RELATIVO À MEDIÇÃO FÍSICA PA-PB (EM MÓDULO)	5%	mm

Em média, a distância não lida para o segmento B (2º dado), considerando todas as geratrizes inspecionadas, foi de 47,74 mm (22,45% maior que o medido manualmente). Para este resultado, um aumento da região não lida pelo sensor é um indicativo de que a solda tem uma influência negativa na taxa de aquisição de pontos maior do que se pensava e que, apesar disso, a margem de pontos para descarte (57,02 mm) é superdimensionada em 9,28 mm (16,27%) para o segmento B.

Já o resultado obtido para a máxima distância recomendada a ser considerada até o descarte (1º dado), constatou-se que, em média, uma distância de 150,69 mm (0,46% maior que o medido manualmente) pode ser atribuída como padrão para este segmento. Para este resultado, mesmo com um aumento insignificante, o que constata que para o segmento B o início da perda da classificação ocorre no momento em que o sensor passa pela solda, a prática de descartar pontos antes e depois da solda, cerca de 10 mm de cada lado, realizadas até o momento em ensaios em laboratório, deve ser revista. Na prática, 0,69 mm antes desconsiderados, passam, com este estudo, a serem regiões potencialmente fornecedoras de dados válidos.

Adicionalmente, pode-se obter a que distância o sensor retoma a caracterização de dados. De acordo com a análise dos dados, para o segmento B, em média, pode-se considerar como padrão uma distância de retomada de leitura em 198,43 mm (a partir do ponto 0). A Figura 19 ilustra o que foi dito:

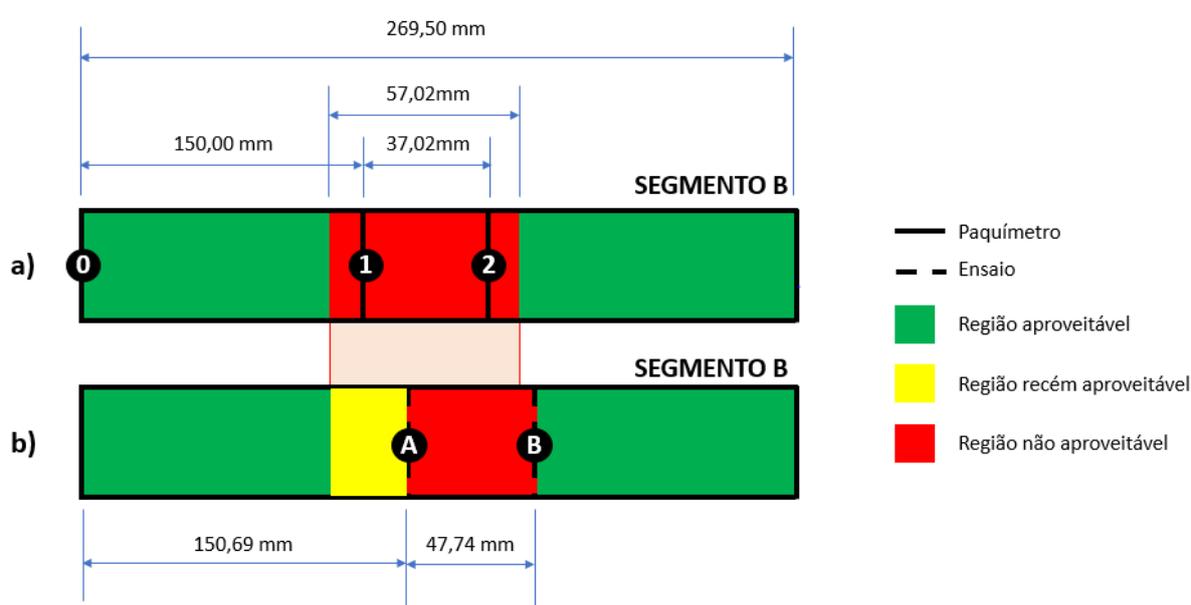


Figura 19 - a) Marcação das regiões com base em medições feitas manualmente com paquímetro. b) Marcação das regiões com base nos resultados obtidos através da análise quantitativa. Fonte: O Autor

4.2 DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO MANUAL DE INSPEÇÃO

Apesar de se revelarem satisfatórias em inspecionar segmentos de tubo e classificá-los quanto a seu estado de envelhecimento, as inspeções com braço robótico suscitaram o desenvolvimento de um mecanismo de inspeção que independesse de um braço robotizado. A limitação de poucos metros para inspeção de segmentos, imposta pelo curso do braço robótico, além de problemas na fixação do conjunto de inspeção ao braço, que por sua vez afetaram variáveis de ensaio na medida em que provocaram excessivas vibrações e conseqüentemente aumentos indesejados no *lift-off*, motivaram a construção de um mecanismo manual de inspeção.

O mecanismo proposto visa atender as demandas de inspeção do laboratório em ambientes internos e externos, sendo facilmente manipulado por um operador minimamente treinado. Para isso, uma vez fabricado, o mecanismo manual de inspeção deve atender aos seguintes pontos listados abaixo:

- Realizar inspeções dentro do Laboratório do LNDC, possibilitando a testagem de sondas e equipamentos de inspeção;
- Elevar o número de pontos coletados e caracterizados em virtude da sua melhor fixação ao conjunto de inspeção;
- Capacidade de se inspecionar tubos de diferentes diâmetros sem prejuízos à leitura dos dados. Por permitir regulagens em função do diâmetro do tubo inspecionado, o mecanismo proposto torna-se habilitado a inspecionar tubos de diversas características geométricas. A regulagem para cada diâmetro de tubo garante que o sensor estará sempre em contato com a superfície inspecionada, eliminando o *lift-off*, que é um dos parâmetros mais prejudiciais ao ensaio.

4.2.1 Projeto

O projeto do mecanismo manual de inspeções, bem como as simulações estáticas e dinâmicas de seus componentes foram feitos no SolidWorks e visaram atender a todas as oportunidades de melhoria identificadas na inspeção em braço robótico. O software é dedicado a modelagem em 3D de elementos mecânicos e possibilita a simulação computacional do mecanismo modelado sob diversas condições conhecidas na engenharia.

O mecanismo manual de inspeção é formado por meio da fixação do conjunto de inspeção a perfis de alumínio (ASTM 6061-T6) da fabricante BOSCH REXROTH, ilustrados na Figura 30, conectados entre si por porcas do tipo martelo de mesmo material e fabricante. O material utilizado tem baixa massa e se caracteriza por sua fácil manipulação e diferentes ofertas de montagens estruturais. A escolha dos perfis de alumínio Bosch se deu pela disponibilidade da matéria prima no laboratório e pelo fato de o alumínio não ser um material que promova interferências magnéticas no ensaio, já que tem características paramagnéticas.

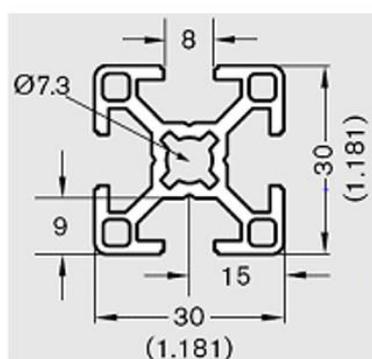


Figura 20 - Perfil BOSCH – 30 x 30 mm. ASTM 6061-T6 Fonte: < https://www13.boschrexroth-us.com/Framing_Shop/Product/View_Product.aspx?category=10102&subcategory=1 > (Acesso em: 20 abril. 2020).

O conjunto de inspeção composto por dois sensores híbridos encapsulados no suporte de material polimérico impresso em 3D (conjunto de inspeção) e eletrônica embarcada, é fixado por meio de uma chapa de alumínio (3 mm) de furos oblongos à estrutura de alumínio. Para permitir a movimentação desta estrutura ao longo da superfície dos tubos inspecionados, um rodízio de rodas de nylon são aparafusados em suas laterais. Como resultado, a Figura 31 ilustra o mecanismo manual de inspeção idealizado e modelado em software:

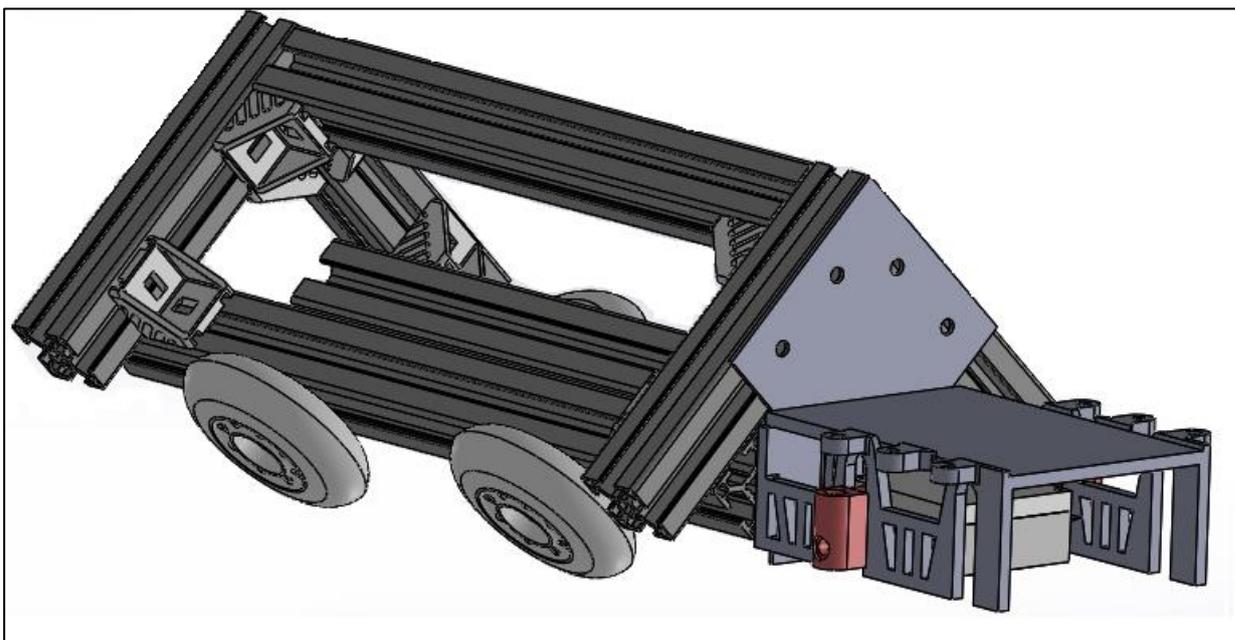


Figura 21 - Mecanismo manual de inspeção. Composto pelo Conjunto de Inspeção fixado à Estrutura de Alumínio Bosch. Dimensões: 430 x 210 x 150 mm. Fonte: O Autor

As Figuras 32 e 33 ilustram como a montagem do mecanismo manual de inspeção o permite inspecionar tubos de diferentes diâmetros, através de simples ajustes nas conexões e fixações. A altura do conjunto de inspeção pode ser ajustada através de sua movimentação na direção vertical ao longo do fixador metálico, ilustrado na figura abaixo, o qual é responsável por unir o conjunto de inspeção, em material polimérico, à estrutura de alumínio.

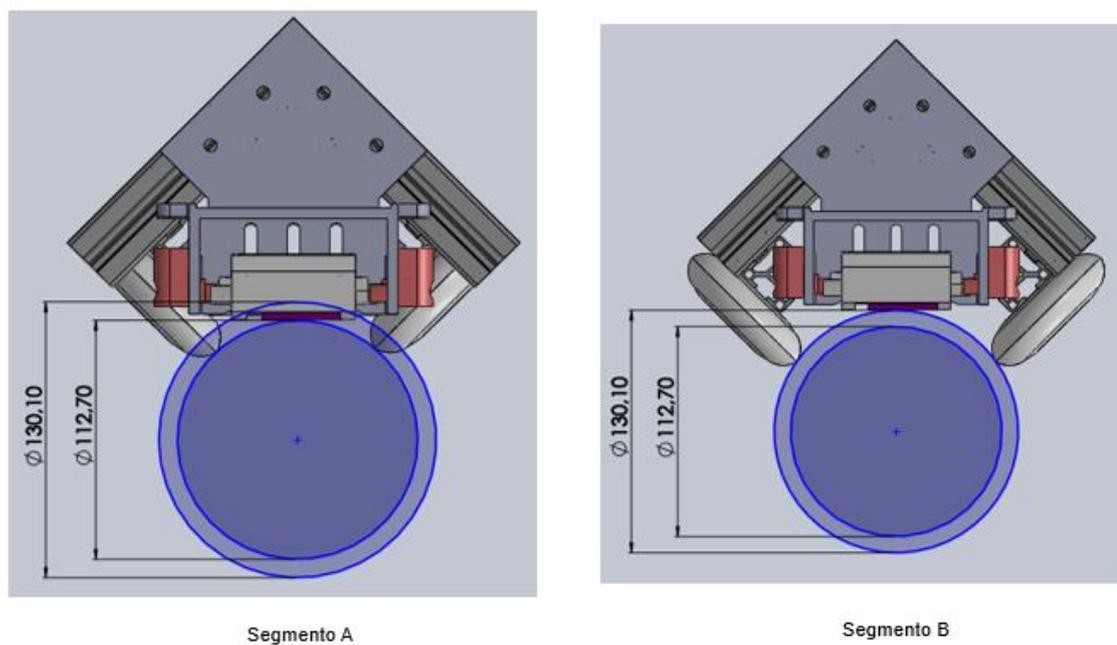


Figura 22 - Mecanismo manual de inspeção ajustado ao ensaio dos segmentos A e B. Unidade: mm. Fonte: O Autor

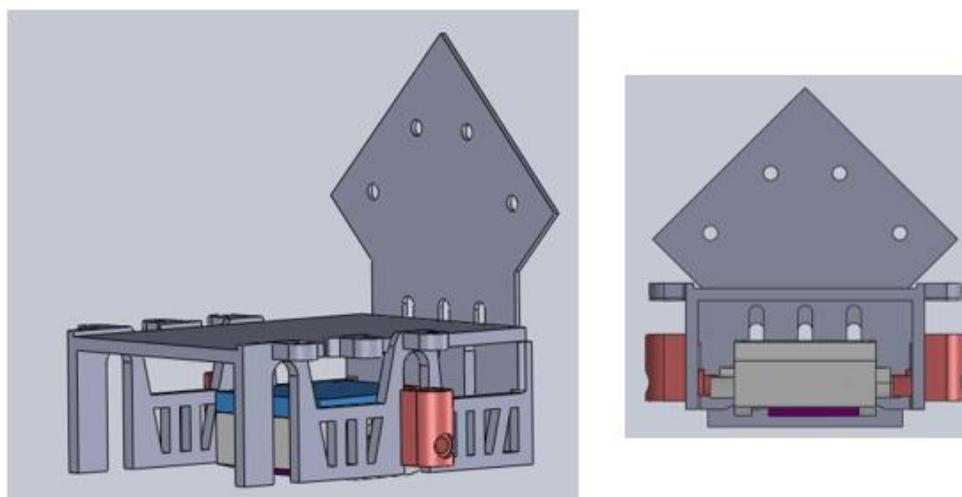


Figura 23 - Detalhamento do fixador metálico. Fonte: O Autor

4.3 MODELAGEM ANALÍTICA

Para manter-se sempre em contato com a superfície do tubo durante a sua inspeção, o conjunto de inspeção conta com dois pares de molas: Um par de molas de compressão, para impor uma força compressiva no conjunto contra a superfície inspecionada e outro par de molas de torção, para realizar o torque restaurador no encapsulamento do sensor de correntes parasitas no momento em que ele se ergue ou se declina para passar pela solda.

Como os maiores prejuízos à inspeção foram detectados durante a passagem do sensor pelo cordão de solda, prejuízos estes provocados pela queda na coleta de pontos, formulou-se a hipótese de que, além de outros fatores construtivos relacionadas a estrutura do conjunto de inspeção, a mola de torção estaria subdimensionada. Para simplificação dos cálculos, o estojo foi representado por um bloco de massa “m”. A seguir, serão expressos os resultados obtidos para a constante de elasticidade da mola de torção (Equação 4.1), bem como para o valor da força superficial exercida no conjunto de inspeção durante a sua passagem pela solda (Equação 4.2). Adicionalmente, foi calculada por meio da Equação 4.4, o máximo deslocamento transversal do conjunto de inspeção quando submetido a um forçamento de 11 N.

4.3.1 Constante Ideal de Elasticidade – Mola de Torção:

$$k_{torção\ ideal} = k = \frac{I\pi^2}{4t_f^2} \quad \text{Equação (4.1)}$$

$$k_{torção\ ideal} = 1,004726 \times 10^{-4} \text{ N/m}$$

4.3.2 Força Superficial em Função da Altura da Solda – Equacionamento Dinâmico:

4.3.2.1 Dinâmico:

$$F_{sup} = \frac{y(t)k}{\left[1 - \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)\right]} + mg \quad \text{Equação (4.2)}$$

Tabela 11 - Forças Superficiais em função da altura (Dinâmica). Fonte: O Autor:

	Altura Cordão de Solda (m)	Força Superficial (N)
SEGMENTO A	0,0177	11,198
SEGMENTO B	0,0155	9,835

4.3.3 Deslocamento transversal máximo em função de esforços flexivos:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{qL^4}{8EI} \quad \text{Equação (4.3)}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 5,094 \cdot 10^{-3} m = 5,09 \text{ mm}$$

$$M_A = \frac{qL^2}{2} \quad \text{Equação (4.4)}$$

$$M_A = 123,75 \cdot 10^{-3} N \cdot m^2$$

$$\sigma_A = \frac{M_A y}{I} \quad \text{Equação (4.5)}$$

$$\sigma_A = 4,076 \cdot 10^6 N/m^2 = 4,08 N/mm^2$$

4.4 MODELAGEM NUMÉRICA

Inicialmente, formulou-se a hipótese de que a configuração, até então atual, do conjunto de inspeção (versão 1) implicava em flexões exageradas de sua estrutura durante a sua passagem por uniões soldadas em inspeções com braço robótico. O elevado deslocamento da estrutura nesta etapa do ensaio pode ter aumentado o *lift-off* e ter sido o causador do alto número de pontos não coletados e caracterizados, o que gerou resultados inconclusivos e prejuízos à eficiência da inspeção como um todo.

Dessa forma, uma opção de modelagem alternativa (versão 2) à original foi sugeridas com o intuito de aumentar a resistência estrutural do conjunto durante ensaios robotizados e manuais. As melhorias passaram por alterações na parte frontal da estrutura com o intuito de melhorar a sua fixação ao cabeçote do braço robótico e ao mecanismo manual de inspeção desenvolvido, reduzindo a sua flexão. A versão 2 foi redesenhada para se adaptar também ao mecanismo manual de inspeção, desenvolvido neste projeto e é apresentada em sessões posteriores.

A título de simulação computacional, a versão 2, teve os seus dados computacionais comparados com os obtidos para a versão 1, sendo ambos confrontados com o encontrado na análise analítica (sessão anterior). A seguir, nas Figuras 20 e 21, são apresentados, respectivamente, os dois modelos de conjunto de inspeção: Versão 1 (original) e versão 2 (modificada).

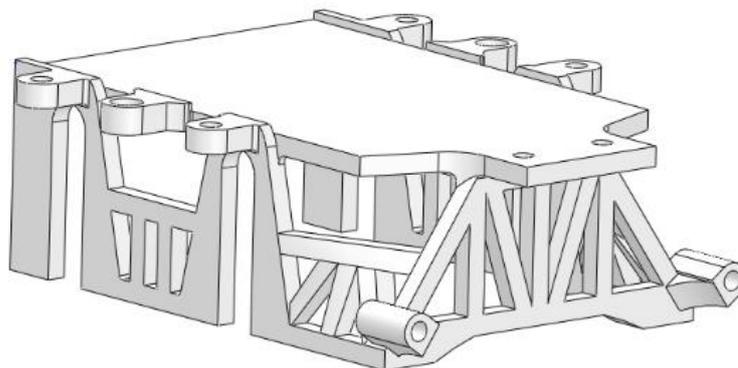


Figura 24 – Desenho isométrico do Conjunto de Inspeção – Versão 1. Dimensão aproximada: 90 x 25 x 150 mm. Fonte: LNDC/COPPE/UFRJ

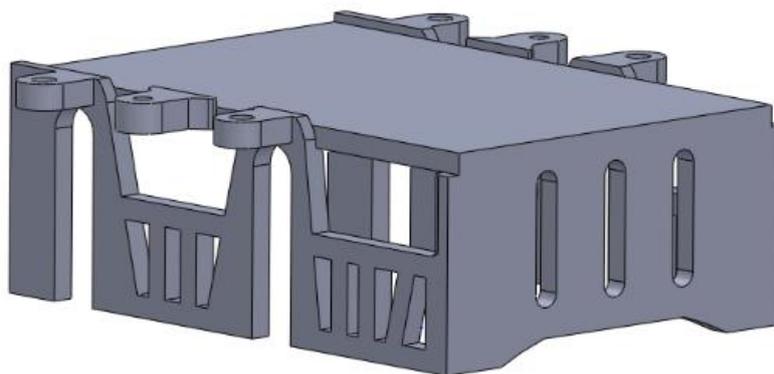


Figura 25 – Desenho isométrico do Conjunto de Inspeção – Versão 2. Dimensão aproximada: 90 x 25 x 150 mm Fonte: O Autor

4.4.1 Conjunto de Inspeção – Versão 1

As Figuras 22, 23, 24 e 25 representam respectivamente uma vista isométrica da versão 1 (com um carregamento distribuído de 11 N em superfície superior), bem como os efeitos da tensão normal no eixo y, da deformação estática equivalente e do deslocamento estático equivalente.

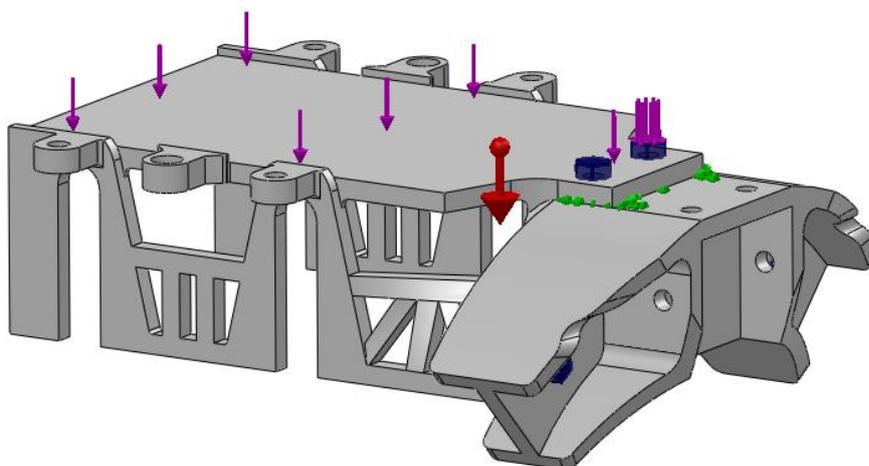


Figura 26 - Detalhamento Fixação e carregamento vertical distribuído descendente de 11N.

Fonte: O Autor

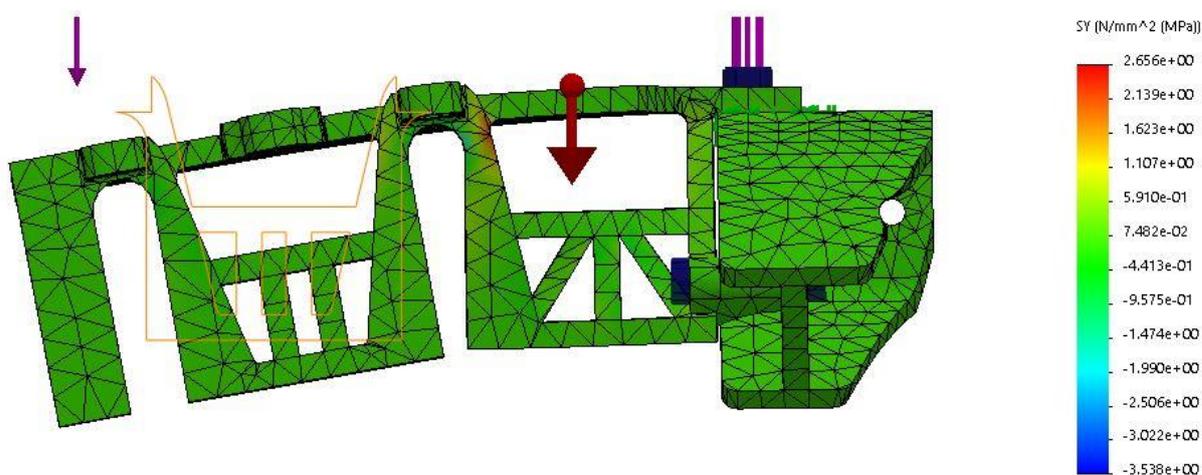


Figura 27 - Tensão normal em Y. Fonte: O Autor

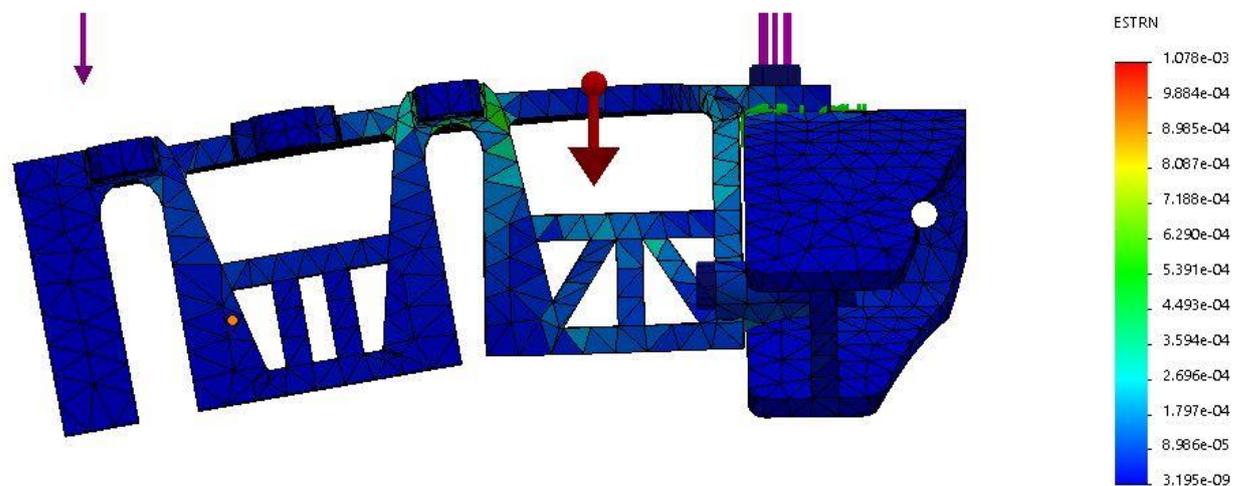


Figura 28 - Deformação Estática Equivalente. Fonte: O Autor

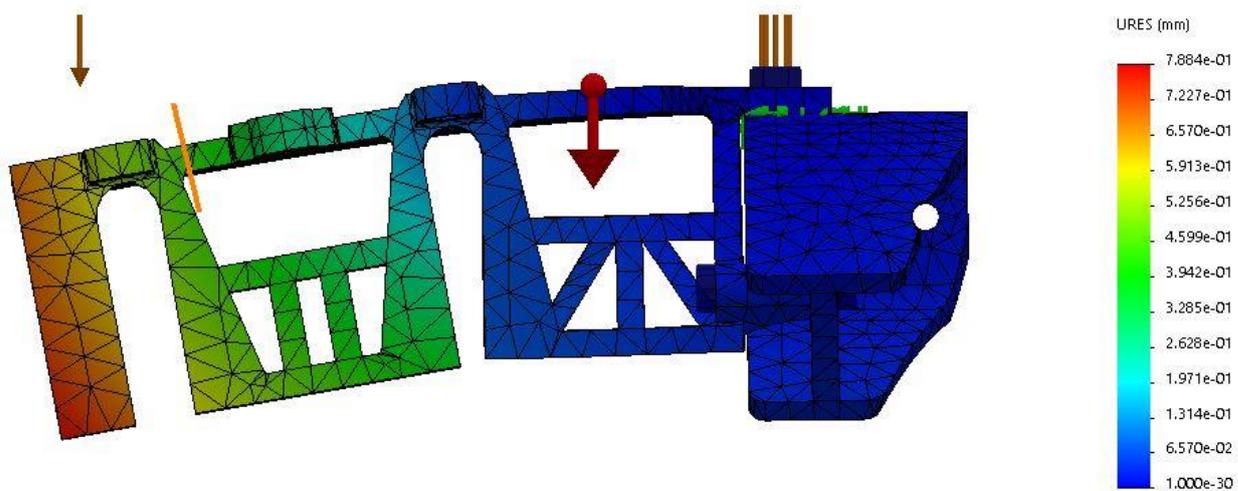


Figura 29 - Deslocamento Estático Equivalente [mm]. Fonte: O Autor

4.4.2 Conjunto de Inspeção – Versão 2

As Figuras 26, 27, 28 e 29 representam respectivamente uma vista isométrica da versão 2 (com um carregamento distribuído de 11 N em superfície superior), bem como os efeitos da tensão normal no eixo y, da deformação estática equivalente e do deslocamento estático equivalente.

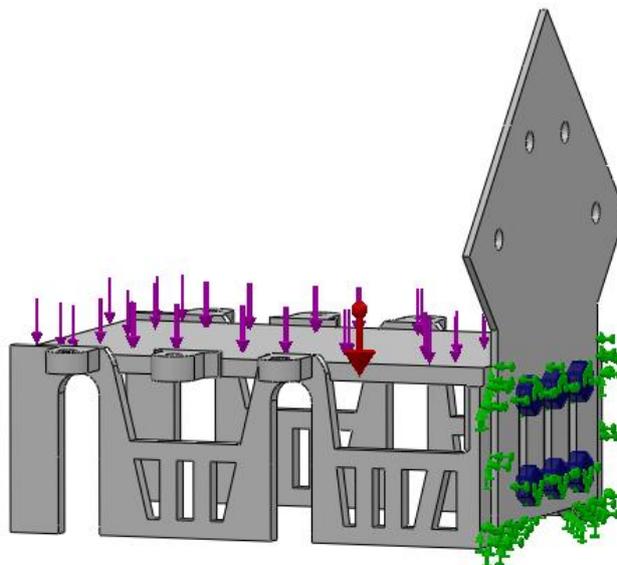


Figura 30 - Detalhamento Fixação e carregamento vertical distribuído descendente de 11N. Fonte: O Autor

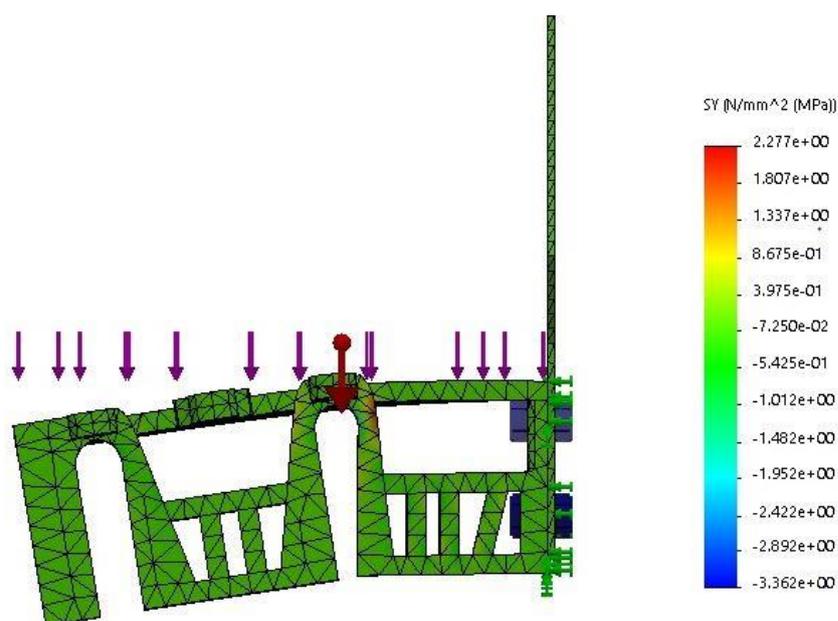


Figura 31 - Tensão normal em Y. Fonte: O Autor

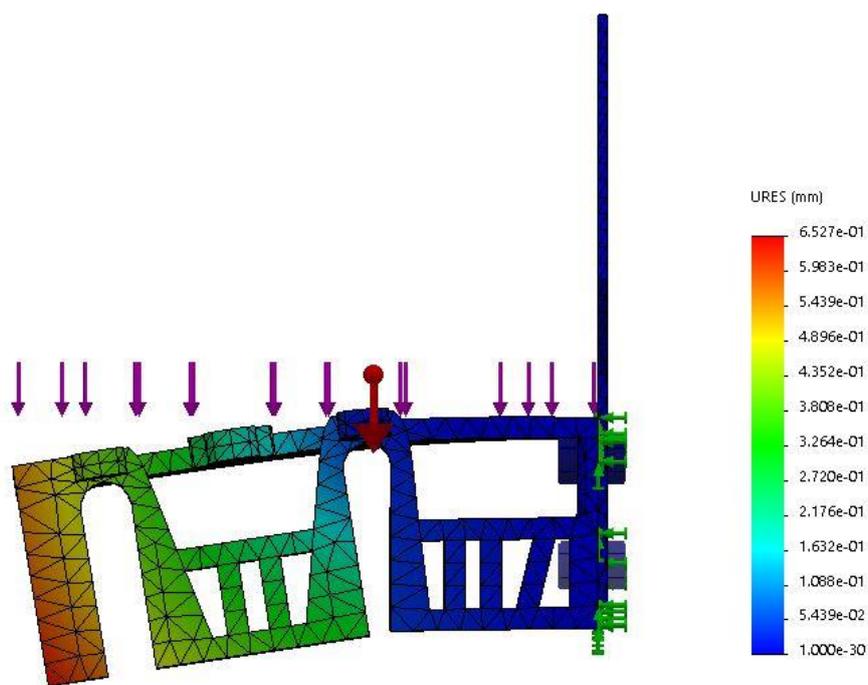


Figura 32 - Deformação Estática Equivalente. Fonte: O Autor

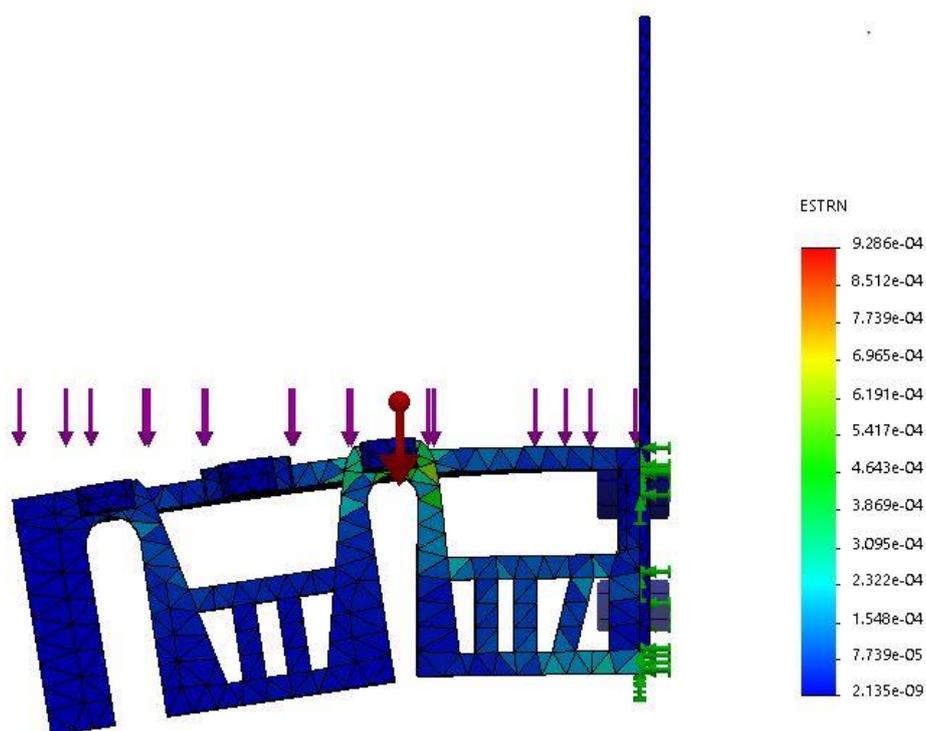


Figura 33 - Deslocamento Estático Equivalente [mm]. Fonte: O Autor

De acordo com a análise dos resultados das simulações numéricas, nessas condições de carregamento, o deslocamento transversal e a tensão normal em Y da versão 2 se revelaram menores do que os mesmos valores obtidos para a versão 1, estando ambos abaixo dos valores limite encontrados por meio dos cálculos analíticos para um conjunto de inspeção de dimensões genéricas.

Os resultados obtidos configuram-se como bons indicadores de que as alterações realizadas na parte frontal do conjunto de inspeção, as quais permitiram, dentre outras modificações, alterações em seu modo de fixação ao mecanismo de inspeção, aumentaram sensivelmente a resistência estrutural do conjunto de inspeção e possuem potencial de diminuir a frequência e a amplitude das vibrações ocorridas nos próximos ensaios em braço robótico ou por meio do mecanismo manual de inspeção. A versão 2 teve um deslocamento transversal máximo e uma tensão normal em y 17,72% e 14,34%, respectivamente, menores do que os obtidos para a versão 1. As tabelas 12 e 13 contêm o que foi dito.

Tabela 12 - Comparação de valores. Análise numérica x Análise analítica (Deslocamento Transversal Máximo). Fonte: O Autor

Versão	Deslocamento Transversal Máximo (Método Numérico)	Deslocamento Transversal Máximo (Método Analítico)
Versão 1	0,79 mm	5,09 mm
Versão 2	0,65 mm	5,09 mm

Tabela 13 - Comparação de valores. Análise numérica x Análise analítica (Tensão Normal em Y). Fonte: O Autor

Versão	Tensão normal em Y (Método Numérico)	Tensão normal em Y (Método Analítico)
Versão 1	2,65 N/mm ²	4,08 N/mm ²
Versão 2	2,27 N/mm ²	4,08 N/mm ²

5 CONCLUSÃO

As inspeções com braço robótico permitiram otimizar as distâncias de descarte adotadas como padrão por meio da avaliação empírica dos inspetores em laboratório. Dentre os ganhos percebidos, pode-se citar:

- O aumento da distância máxima recomendada até o descarte para os segmentos A e B. Para o segmento A, houve um aumento de 12,55% em relação a medida feita manualmente, enquanto que para o segmento B, o aumento foi de 0,46%. Na prática concluiu-se que menos pontos devem ser descartados para os segmentos A e B.
- A região cujos dados eram automaticamente descartados, como procedimento de inspeção, se mostrou menor do que a empiricamente utilizada para os segmentos A e B. Para o segmento A, houve uma diminuição de 25,70% em relação a medida feita manualmente, enquanto que para o segmento B, a diminuição foi de 16,27%. Na prática concluiu-se que menos pontos devem ser descartados para os segmentos A e B.

Em relação as modificações realizadas no conjunto de inspeção, a versão 2 do componente se mostrou promissora em compor com eficiência o mecanismo manual de inspeção projetado, uma vez que apresentou como resultados da análise computacional (numérica):

- Deslocamento Transversal Máximo: 17,72% menor do que o em relação a versão 1 e 87,23% menor que o valor máximo dessa grandeza calculado analiticamente.
- Tensão Normal em Y: 14,34% menor do que o em relação a versão 1 e 44,36% menor que o valor máximo dessa grandeza calculado analiticamente.

De posse dos dados obtidos nas análises qualitativa, quantitativa, analítica e numérica, foi possível projetar um mecanismo de inspeção manual, a ser utilizado em inspeções laboratoriais para ser utilizado como complementarmente ou

alternativamente a inspeção em braço robótico, sendo uma solução para a inspeção de tubos de diâmetros maiores que um metro e de diâmetros variados.

Adicionalmente, foi possível concluir que as alterações realizadas na versão 1 do conjunto de inspeção, apesar de não resultarem em ganhos significativos em termos de resistência mecânica, possibilitaram uma melhor fixação do conjunto de inspeção ao mecanismo manual de inspeção e em uma maior adaptabilidade a inspeção de tubos de diferentes diâmetros, quando comparada a versão 1.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Realizar mais ensaios em braço robótico a diferentes velocidades de deslocamento, visando aumentar a base de dados e conseqüentemente trazendo mais confiabilidade aos resultados expostos neste trabalho. Adicionalmente, recomenda-se monitorar e documentar as taxas de aquisição em função das diferentes velocidades de deslocamento do braço robótico;
- Repetir os ensaios realizados no segmento B visando eliminar a dispersão dos dados na análise quantitativa deste segmento;
- Na análise numérica das versões 1 e 2, recomenda-se refinar a malha e comparar, com os valores apresentados neste trabalho, os valores de deslocamento transversal e tensão normal em y obtidos.
- Realizar uma simulação numérica dinâmica, considerando um modelo com três graus de liberdade: movimentos de flexão, compressão e torção, simultaneamente.
- Considerar inserir uma tecnologia de amortecimento ao conjunto de inspeção que seja associada às molas de compressão objetivando estudar como esta associação poderia diminuir a frequência de oscilação das duas molas de compressão.

7 REFERÊNCIAS

ABENDI, Ensaios não Destrutivos e Inspeção: Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos e Inspeção Disponível em:

<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=> Acesso em 29 nov. 2019

A.C. Lorena, A. de Carvalho, Introdução à Máquinas de Vetores de Suporte, Relatórios Técnicos Do ICMC. (2003) 66.

ANP 16/2018:

http://www.mme.gov.br/documents/10584/71068545/Resolucao_16_CNPE_29-10-18.pdf/71cd909d-2ec9-492e-8540-53b46c712aab Acesso em 18 nov. 2019

ANP 32/2007: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2007/outubro&item=ranp-32--2007> Acesso em 18 nov. 2019

ARENAS, M.P. Caracterização por ensaios magnéticos não destrutivos de aços HP provenientes de fornos de reforma. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, 1993.

ASTM-A608/A608M-14, Standard Specification for Centrifugally Cast IronChromium-Nickel High-Alloy Tubing for Pressure Application at High Temperatures, 2014. doi:10.1520/A0608.

BONACCORSI, L. et al. Damage analysis in Fe-Cr-Ni centrifugally cast alloy tubes for reforming furnaces. *Engineering Failure Analysis*, v. 36, p. 65–74, 2014.

CAMERINI, C., SACRAMENTO, R., AREIZA, M.C., ROCHA, A., SANTOS, R., REBELLO, J.M., PEREIRA, G.R., Eddy current techniques for super duplex stainless steel characterization, *J. Magn. Mater.* 388 (2015) 96–100. doi:10.1016/j.jmmm.2015.04.034.

D. Stegemann, Fundamentos do método de correntes parasitas, Scientific Series of the International Bureau, 1990.

DA CRUZ, F. E. Produção de Hidrogênio em Refinarias de Petróleo: Avaliação Exergética e Custo de Produção, Dissertação de M.Sc.– USP, São Paulo, 2010.

David, HALLIDAY, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. Fundamentos de Física - Vol. 3 - Eletromagnetismo, 10ª edição. LTC, 06/2016. VitalBook file.

DUTRA, Caio César Gomes. Análise de Dados de Inspeção não Destrutiva em Tubos de Reforma a Vapor Utilizando Treinamento de Máquina. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2019.

EBRAHIMI, H. et al. Analysis of reformer furnace tubes for hydrogen production using radiative zonal model. International Journal of Hydrogen Energy, v. 39, n. 25, p. 13164–13173, 2014.

EMYGDIO, P. R. OLIVEIRA. Caracterização de juntas soldadas em tubos fundidos por centrifugação de aços para altas temperaturas. UFRJ, 2002.

HAYKIN, S. Neural networks: a comprehensive foundation, Second, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 1999

HELLIER, Charles. Handbook of Nondestructive Evaluation. New York: Mcgrawhill, 2003.

J. M. Buckley and H. NDT, “An introduction to Eddy Current Testing theory and technology”, vol 8, 2003.

J.R. Reitz, F.J. Milford, R.W. Christy, Fundamentos da Teoria Eletromagnética, 3ra ed., Addison Wesley, 1982.

L.L da Silva, Caracterização de revestimentos de níquel compósito por correntes parasitas, Tese de doutorado, UFRJ, (2007).

LIU, C. J., CHEN, Y. “Variations of the microstructure and mechanical properties of HP40Nb hydrogen reformer tube with time at elevated temperature”, Materials & Design; v. 32, n. 4, pp. 2507-2512, Abr 2011.

LIMA, Andre Henrique Mascarenhas. Detecção de falhas em revestimentos anticorrosivos através da técnica de correntes parasitas – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014

M.V.M. Martins, Correlação entre os sinais de correntes parasitas e o nível de dano em tubos de aço HK-40, Dissertação de mestrado - PEMM/UFRJ, 2000.

MARTIN, J. G. GIL, J. G. SÁNCHEZ, E. V. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing, Sensors, 2011.

PEREIRA, P. A. de S., Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes Parasitas Visando a Inspeção Submersa de Elementos Combustíveis, Tese de M.Sc., COPPE COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007

QUEIROZ F. dos S, Caracterização microestrutural em função da temperatura de serviço de tubos de aços HP-modificados ao Nb e Ti envelhecidos em fornos de reforma a vapor, Dissertação de mestrado - PEMM/UFRJ, 2017.

R.O Carneval, P. C. F Henriques, Apostila de Ensaios não-destrutivos por correntes parasitas, 1990.

SOARES, Iane de Araújo. Desenvolvimento de sensores de correntes parasitas para detecção de trincas de fadiga em dutos de aços cladeados / Iane de Araújo Soares. _ 2015.

SOUZA, Tassiany Yegros. Caracterização das Juntas Soldadas em Aços HP Usados em Fornos de Reforma a Vapor / Tassiany Yegros de Souza – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2017.

SHULL, P. J. Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications. New York: M. Dekker, 2002. xxiv, 841p. ISBN 0824788729

Standard by American Petroleum Institute, Calculation of heater-tube thickness in petroleum refineries: API recommended practice 530, (1996).

T.L. da Silveira, I. Le May, Reformer Furnaces: Materials, damage mechanisms and assessment, Arab. J. Sci. Eng. 31 (2006) 99–119.

[24] VAPNIK, V.N. The Nature of Statistical Learning Theory, Springer-Verlag, New York, NY, 1995.

WHITTAKER, M.; WILSHIRE, B.; BREAR, J. Creep fracture of the centrifugally-cast superaustenitic steels, HK40 and HP40. Materials Science and Engineering A, v. 580, p. 391–396, 2013.

8 ANEXOS

MEMÓRIA DE CÁLCULO ANALÍTICO – FORÇA SUPERFICIAL

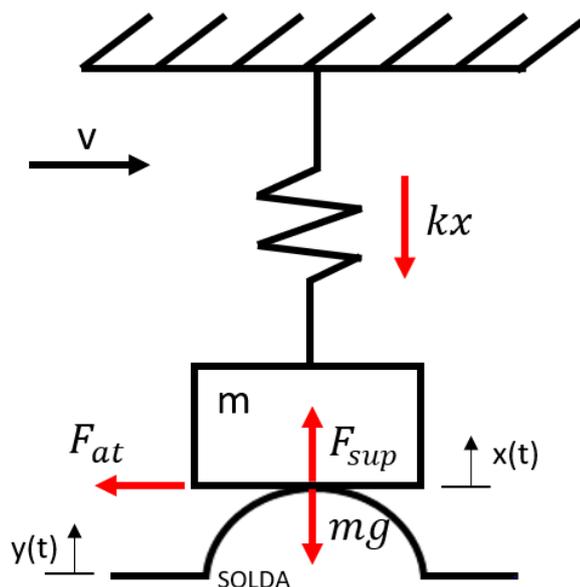


Figura 34 - Diagrama de corpo livre Conjunto de Inspeção – Fase II (compressão). Fonte: O Autor

Para $y = 0$, $x \neq 0$.

Estática:

$$\sum F_y = 0$$

$$-kx - mg + F_{sup} = 0$$

$$F_{sup} = kx + mg$$

$$(x = y)$$

$$F_{sup} = ky + mg$$

Tabela 14 - Variáveis para o cálculo da força superficial. Fonte: O Autor

Variáveis		Unidades
m	0,0235	Kg
K (ref. experimental)	15	N/m
g	9,81	m/s ²

Tabela 15 - Força Superficial em função da altura da solda (Estática). Fonte: O Autor

	Altura Corão de Solda (m)	Força Superficial (N)
Segmento A	0,0177	0,4960
Segmento B	0,0155	0,4630

Dinâmica (em x):

$$\sum F_x = m \frac{d(v)}{d(t)}$$

$$F_{Braço} - Fat = ma$$

$$F_{Braço} - \mu \cdot (F_{sup}) = ma$$

$$F_{sup} = \frac{F_{Braço} - ma}{\mu} \quad \text{Equação (8.2)}$$

Dinâmica (em y):

$$\sum F_y = m\ddot{x}$$

$$-kx - mg + F_{sup} = m\ddot{x}$$

$$(x = y)$$

$$F_{sup} = ky + mg + m\ddot{y} \quad \text{Equação (8.3)}$$

Desenvolvendo a equação diferencial ordinária de segunda ordem não homogênea (Equação 7.3), temos:

$$m\ddot{y} + ky + mg = F_{sup}$$

$$\ddot{y} + \frac{ky}{m} = \frac{F_{sup}}{m} - g$$

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Equação diferencial ordinária linear de segunda ordem não homogênea com coeficientes constantes:

$$\ddot{y} + w_n^2 y = \frac{F_{sup}}{m} - g \quad \text{Equação (8.4)}$$

Solução Homogênea:

$$\ddot{y} + w_n^2 y = 0$$

A equação acima é oriunda da equação diferencial ordinária homogênea linear abaixo, tendo $a = 0$ e $b = w_n^2$:

$$a\dot{y} + by = 0$$

A solução desta equação tem o formato $y = e^{rx}$. Realizando as devidas derivações, tem-se:

$$\dot{y} = r e^{rx}$$

$$\ddot{y} = r^2 e^{rx}$$

Substituindo na equação homogênea:

$$r^2 e^{rx} + b e^{rx} = 0$$

$$e^{rx}(r^2 + b) = 0, \text{ como } e^{rx} \neq 0, \text{ então:}$$

$$r^2 + b = 0$$

$$r^2 = -b$$

$$r = \sqrt{-b} = \sqrt{(-1) \cdot b} = \sqrt{i^2 \cdot b} = \sqrt{b} \cdot i = Bi$$

A equação homogênea tem como soluções duas raízes complexas conjugadas, representadas por:

$$S_{1,2} = A \pm Bi$$

$$S_{1,2} = 0 \pm w_n i$$

As raízes da equação características podem ser reescritas como o par:

$$\{e^{Ax} \cos(Bt) + e^{Ax} \text{sen}(Bt)\}$$

A solução homogênea da equação pode ser escrita como:

$$y_h(t) = C_1 e^{Ax} \cos(Bt) + C_2 e^{Ax} \text{sen}(Bt)$$

Sendo $A = 0$ e $B = w_n$, tem-se:

$$y_h(t) = C_1 \cos(w_n t) + C_2 \text{sen}(w_n t) \quad \text{Equação (8.5)}$$

Solução Particular:

$$y_p(t) = C$$

$$\ddot{y}_p(t) = 0$$

Da equação 8.4, tem-se:

$$\ddot{y} + w_n^2 y = \frac{F_{sup}}{m} - g$$

$$0 + \frac{k}{m} y = \frac{F_{sup}}{m} - g$$

$$\frac{k}{m} C = \frac{F_{sup}}{m} - g$$

$$C = \left(\frac{F_{sup}}{m} - g \right) \frac{m}{k}$$

$$C = \frac{F_{sup} - mg}{k} \quad \text{Equação (8.6)}$$

A Solução Geral do Movimento $y(t)$ pode ser obtida por meio da soma das soluções Homogênea $y_h(t)$ e particular $y_p(t)$ da equação diferencial obtida:

$$y(t) = y_h(t) + y_p(t)$$

$$y(t) = C_1 \cos(w_n t) + C_2 \text{sen}(w_n t) + \frac{F_{sup} - mg}{k} \quad \text{Equação (8.7)}$$

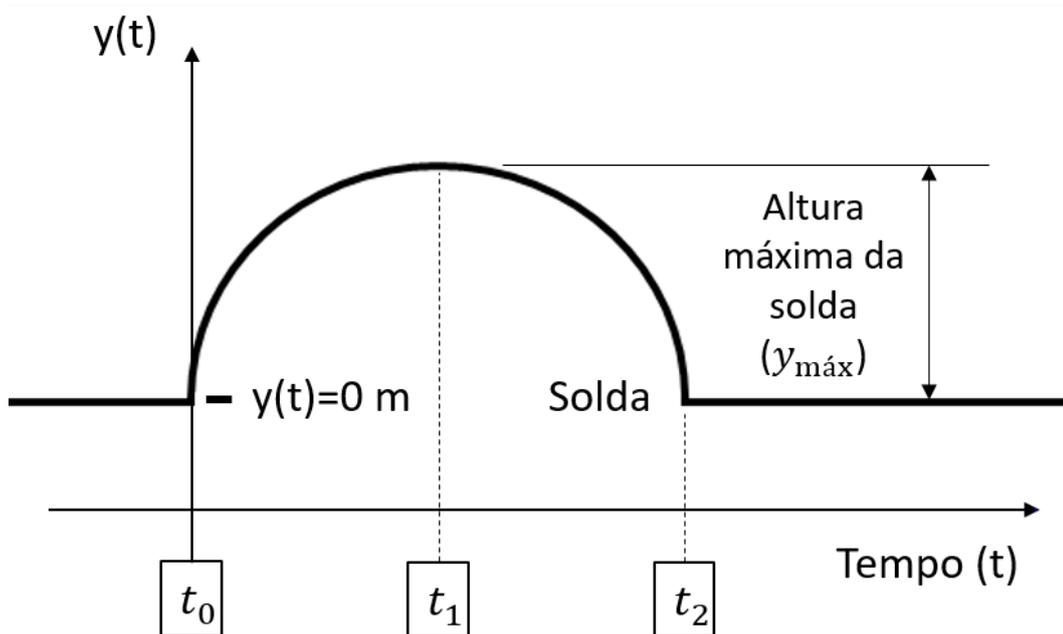


Figura 35 - Eixo de referências - Fase II (compressão). Fonte: O Autor

1ª Condição: Para $\dot{y}(t_0) = 0$. No instante inicial $t_0 = 0$ seg, a velocidade de subida do bloco é 0 m/s.

$$\dot{y}(t) = -C_1 \text{sen}(w_n t_0) + C_2 \text{cos}(w_n t_0)$$

$$\dot{y}(0) = -C_1 \text{sen}(0) + C_2 \text{cos}(0) = 0$$

$$\dot{y}(0) = C_2 = 0$$

2ª Condição: Para $y(t_0) = y_{\min} = 0$. No instante t_0 , a posição (altura) do bloco é mínima e igual a zero.

$$y(t_0) = C_1 \cos(w_n t_0) + C_2 \sin(w_n t_0) + \frac{F_{sup} - mg}{k} = y_{\min} = 0$$

Fazendo $t_0 = 0$, tem-se:

$$y(t_0) = C_1 \cos(0) + C_2 \sin(0) + \frac{F_{sup} - mg}{k} = y_{\min} = 0$$

$$y(t_0) = C_1 + \frac{F_{sup} - mg}{k} = 0$$

$$y(t_0) = C_1 = - \left(\frac{F_{sup} - mg}{k} \right)$$

Substituindo- se os valores das constantes na equação 8.7, tem-se:

$$y(t) = - \left(\frac{F_{sup} - mg}{k} \right) \cos(w_n t) + \frac{F_{sup} - mg}{k}$$

$$y(t) = \frac{F_{sup} - mg}{k} [1 - \cos(w_n t)]$$

$$\frac{F_{sup} - mg}{k} = \frac{y(t)}{[1 - \cos(w_n t)]}$$

$$F_{sup} - mg = \frac{y(t)k}{[1 - \cos(w_n t)]}$$

$$F_{sup} = \frac{y(t)k}{[1 - \cos(w_n t)]} + mg$$

Sendo:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Fazendo $y(t_1) = y(0,5) = y_{m\acute{a}x} = 0,0166 \text{ m}$, ou seja, $y(0,5)$ é uma função que resulta na média das alturas das soldas dos segmentos A e B, $0,0166 \text{ m}$. Adicionalmente, considerando $k=15 \text{ N/m}$ (obtido empiricamente) e $m=0,02335 \text{ Kg}$ (obtido por meio do SolidWorks), tem-se:

$$F_{sup} = \frac{y(t)k}{\left[1 - \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)\right]} + mg \quad \text{Equação (8.8)}$$

$$F_{sup} = \frac{0,0166 * 15}{\left[1 - \cos\left(\sqrt{\frac{15}{0,0235}} * 0,5\right)\right]} + 0,0235 * 9,81$$

$$F_{sup} = \frac{0,249}{[1 - \cos(12,632)]} + 0,2305$$

$$F_{sup} = 10,5175 \text{ N}$$

MEMÓRIA DE CÁLCULO ANALÍTICO – MOLA DE TORÇÃO

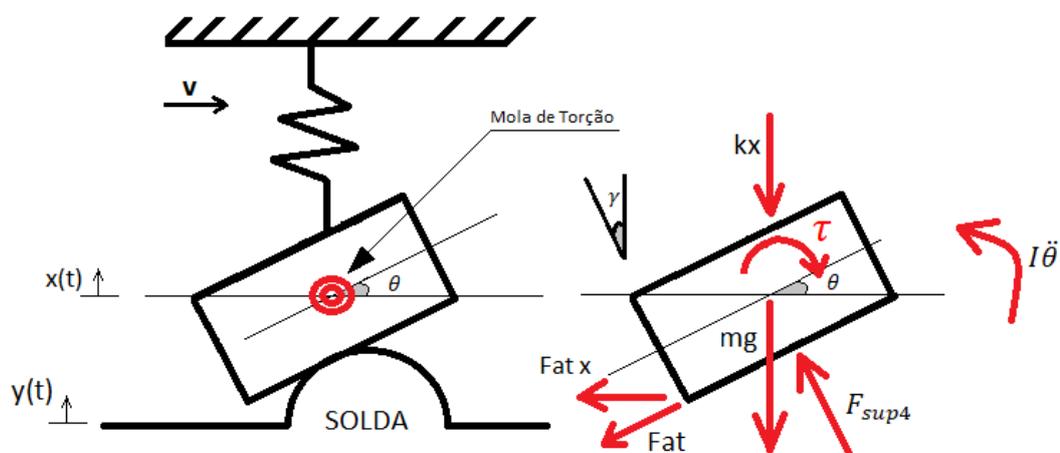


Figura 36 - Diagrama de corpo livre Conjunto de Inspeção – Fase IV (torção). Fonte: O Autor

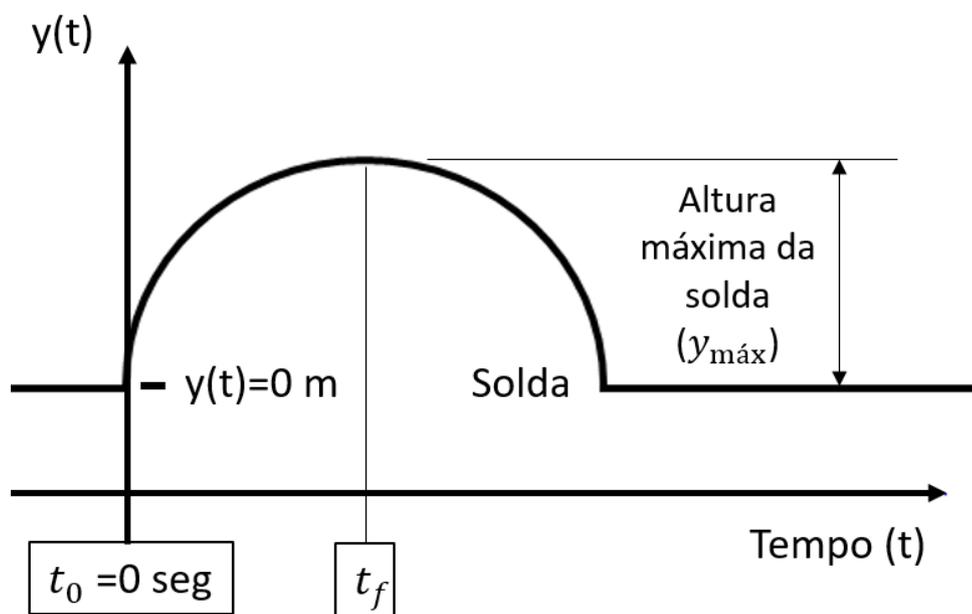


Figura 37 - Eixo de referências - Fase IV (torção). Fonte: O Autor

Ao passar pela solda, o estojo tem seu eixo longitudinal rotacionado a amplitudes que variam entre $\pm \theta$, sendo a sua posição de equilíbrio definida por $\theta=0$. De acordo com a Lei de Hooke, um torque restaurador (τ) é exercido pela mola de torção, cujo coeficiente de torção é representado por k , durante a subida ou a descida

do estojo ao passar pela solda, atuando em sentido oposto ao seu deslocamento angular, sendo responsável por retorná-la a sua posição de equilíbrio (equação 7.9).

$$\tau = k\theta \quad \text{Equação (8.9)}$$

Para dinâmica rotacional de corpos, a 2ª lei de newton descreve o torque restaurador como o produto do momento de inércia (I) pela aceleração angular, a qual é representada pela derivada segunda da posição angular ($\ddot{\theta}$). A equação 8.10, obtida, configura-se uma equação diferencial ordinária homogênea de segunda ordem.

$$\sum M = I\ddot{\theta} \quad \text{Equação (8.10)}$$

$$-\tau = I\ddot{\theta}$$

$$-k\theta = I\ddot{\theta}$$

$$I\ddot{\theta} + k\theta = 0 \quad \text{Equação (8.11)}$$

Dividindo ambos os termos da Equação 8.11 pelo momento de inércia (I) e substituindo-se a frequência natural de torção da mola (ω) por $\sqrt{\frac{k}{I}}$, tem-se o encontrado na Equação 8.12:

$$\ddot{\theta} + \frac{k\theta}{I} = 0$$

$$\ddot{\theta} + \omega^2\theta = 0 \quad \text{Equação (8.12)}$$

A solução geral da equação diferencial homogênea é:

$$\theta(t) = A\cos wt + B\sin wt$$

1ª Condição: Para $\theta(t_0) = \theta_{máx} = \phi_0$. No instante inicial $t_0 = 0$ seg, a mola encontra-se deslocada de sua posição de equilíbrio, estando a uma amplitude de ϕ_0 , até ser abandonada a partir do repouso.

$$\theta(0) = A\cos(0) + B\sin(0)$$

$$\theta(0) = A = \phi_0$$

2ª Condição: Para $\dot{\theta}(t_0) = 0$. No instante inicial $t_0 = 0$ seg, a velocidade (inicial) é igual a 0 m/s.

$$\dot{\theta}(t) = -A\omega\sin(\omega t) + B\omega\cos(\omega t)$$

$$\dot{\theta}(0) = -A\omega\sin(0) + B\omega\cos(0)$$

$$\dot{\theta}(0) = B\omega = 0.$$

$$\text{Sendo } \omega \neq 0, B = 0$$

Logo, substituindo-se A e B na solução geral da equação Homogênea, tem-se:

$$\theta(t) = \phi_0 \cos \omega t \qquad \text{Equação (8.13)}$$

$$\theta(t) = \phi_0 \cos \left(\sqrt{\frac{k}{I}} t \right)$$

$\phi_0 = \text{Amplitude}$

3ª Condição: Para $\theta(t_f) = 0$. No instante final t_f , a angulação do bloco (θ) é nula.

$$\theta(t_f) = \phi_0 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{I}}(t_f)\right) = 0$$

Sendo a amplitude uma constante não nula, assume-se, portanto, que $\cos\left(\sqrt{\frac{k}{I}}(t_f)\right) = 0$.

$$\cos\left(\sqrt{\frac{k}{I}}(t_f)\right) = 0$$

$$\text{arc cos}(0) = \sqrt{\frac{k}{I}}(t_f)$$

$$\frac{\pi}{2} = \sqrt{\frac{k}{I}}(t_f)$$

$$k = \frac{I\pi^2}{4t_f^2} \quad \text{Equação (8.14)}$$

Conforme tabela 5, é possível obter, dentre as propriedades de massa extraídas do SolidWorks, o momento de inércia (I) é: $I = P_z = 0,00001018 = 1,018 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$. Substituindo-se o valor do momento de inércia (I) na equação 3.15 e assumindo um $t_f = 0,5 \text{ seg}$, tem-se:

$$k = \frac{(1,018 \cdot 10^{-5})\pi^2}{4(0,5)^2} = 1,004726 \times 10^{-4} \text{ N/m}$$

$$k = 1,004726 \times 10^{-7} \text{ N/mm}$$

MEMÓRIA DE CÁLCULO ANALÍTICO – DESLOCAMENTO TRANSVERSAL MÁXIMO

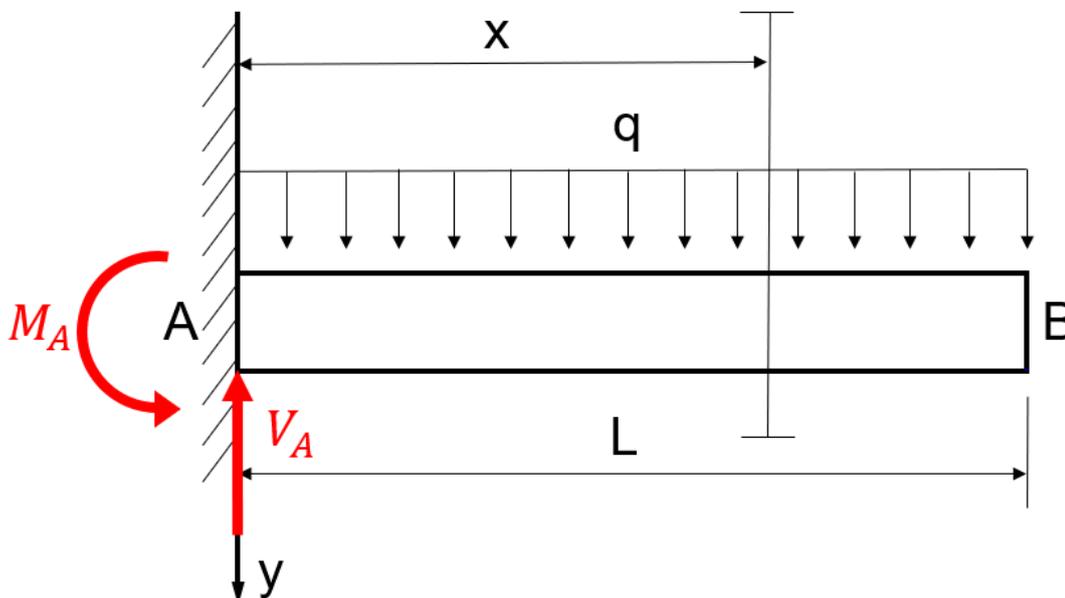


Figura 38 - Diagrama de corpo livre – Viga engastada (deslocamento transversal máximo). Fonte: O Autor

$$\sum V = 0 \quad V_A - qL = 0 \quad V_A = qL$$

$$\sum M = 0 \quad M_A - qL \frac{L}{2} = 0 \quad M_A = \frac{qL^2}{2}$$

Equação dos momentos fletores ($0 \leq x \leq L$):

$$M(x) = -M_A + V_A \cdot x - \frac{qx^2}{2} = -\frac{qL^2}{2} + qLx - \frac{qx^2}{2}$$

Equação diferencial da linha elástica ($0 \leq x \leq L$):

$$M(x) = -M_0$$

$$EI\ddot{y}(x) = \frac{qL^2}{2} - qLx + \frac{qx^2}{2}$$

Integrando a primeira vez:

$$EI\dot{y}(x) = \frac{qL^2x}{2} - \frac{qLx^2}{2} + \frac{qx^3}{6} + C_1$$

Integrando a segunda vez:

$$EIy(x) = q\frac{L^2x^2}{4} - \frac{qLx^3}{6} + q\frac{x^4}{24} + C_1x + C_2$$

Condições de contorno:

$$\dot{y}(0) = 0 ; C_1 = 0$$

$$y(0) = 0 ; C_2 = 0$$

A equação da linha elástica fica ($0 \leq x \leq L$):

$$EIy(x) = \frac{qL^2x^2}{4} - \frac{qLx^3}{6} + \frac{qx^4}{24}$$

A flecha máxima ($\delta_{m\acute{a}x}$) na extremidade livre B fica:

$$\delta_{m\acute{a}x} = y(L) = \frac{qL^4}{4} - \frac{qL^4}{6} + \frac{qL^4}{24}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{qL^4}{8EI}$$

Variáveis:

Tabela 16 – Variáveis do conjunto de inspeção genérico. Fonte: O Autor

CARREGAMENTO (q)	11,000E+00	N
MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)	2,000E+09	Pa
COMPLIMENTO (L)	1,500E-01	m
BASE (b)	9,000E-03	m
ALTURA (h)	4,500E-03	m
CENTROIDE (y)	2,250E-03	m

Momento de Inércia (I):

$$I = \frac{bh^3}{12} = 6,83 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4$$

Deslocamento Transversal Máximo ($\delta_{m\acute{a}x}$):

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{qL^4}{8EI}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{11 \cdot (1,5 \cdot 10^{-1})^4}{8 \cdot (2 \times 10^9) \cdot (6,83 \cdot 10^{-11})} = 5,094 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 5,09 \text{ mm}$$

Momento Fletor (M_A):

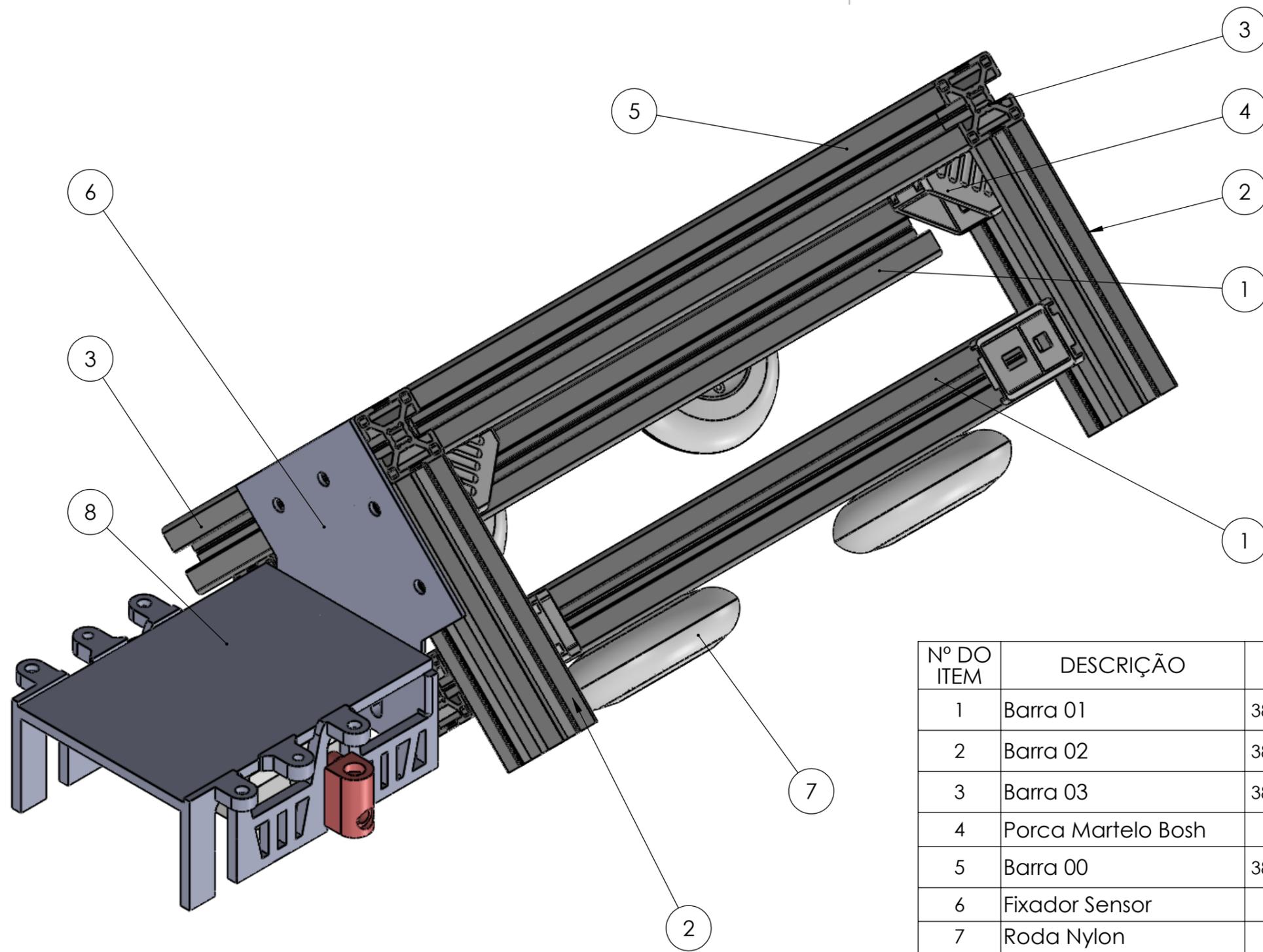
$$M_A = \frac{qL^2}{2}$$

$$M_A = \frac{11 \cdot (1,5 \cdot 10^{-1})^2}{2} = 123,75 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Tensão Normal de Flexão (σ):

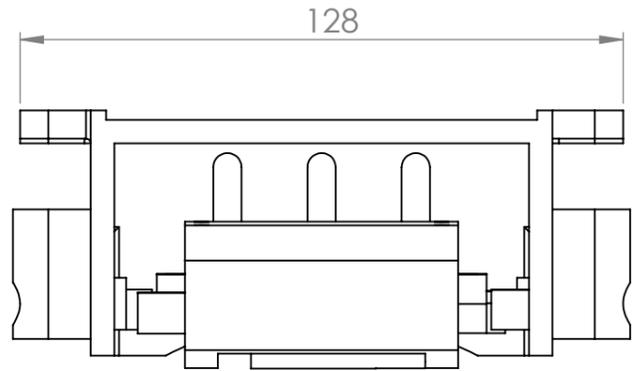
$$\sigma_A = \frac{M_A y}{I}$$

$$\sigma_A = \frac{(123,75 \cdot 10^{-3}) \cdot (2,25 \cdot 10^{-3})}{6,83 \cdot 10^{-11}} = 4,076 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 4,08 \text{ N/mm}^2$$

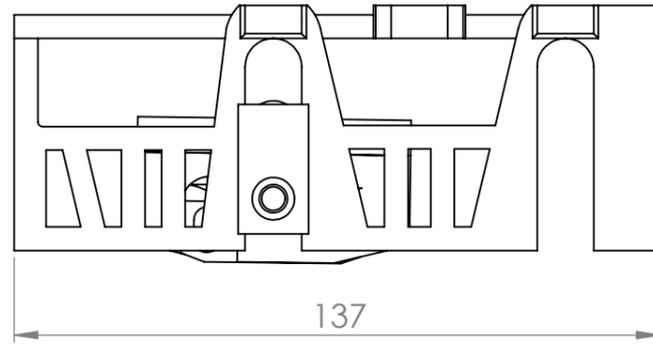


Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	ID FABRICANTE	ID DESENHO	QTD.
1	Barra 01	3842990721 Profile 30x30X350, M8	DF - 002	2
2	Barra 02	3842990721 Profile 30x30X120, M8	DF - 002	2
3	Barra 03	3842990721 Profile 30x30X150, M8	DF - 002	2
4	Porca Martelo Bosh	Rexroth-3 842 523 525	DF - 003	10
5	Barra 00	3842990721 Profile 30x30X290, M8	DF - 002	1
6	Fixador Sensor	LNDC/UFRJ	DF - 001	1
7	Roda Nylon	-	DF - 004	4
8	Conjunto de Inspeção	LNDC/UFRJ	DC - 002	1

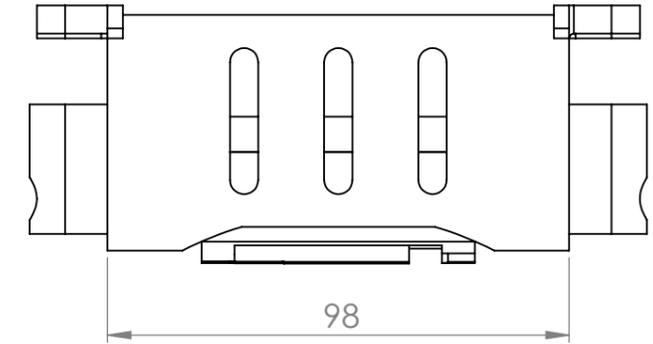
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR E ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: Desenho de Conjunto - Mecanismo Manual de Inspeção	
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
MATERIAL:			DES. Nº	DC - 001	
PESO:			FOLHA 1 DE 5		



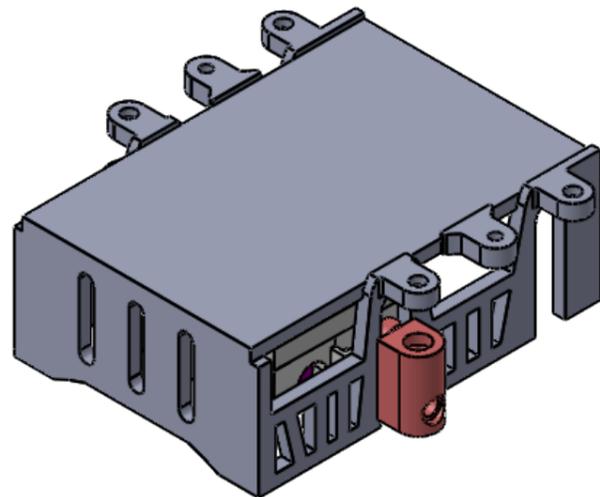
ESCALA 1:1.5



ESCALA 1:1.5



ESCALA 1:1.5



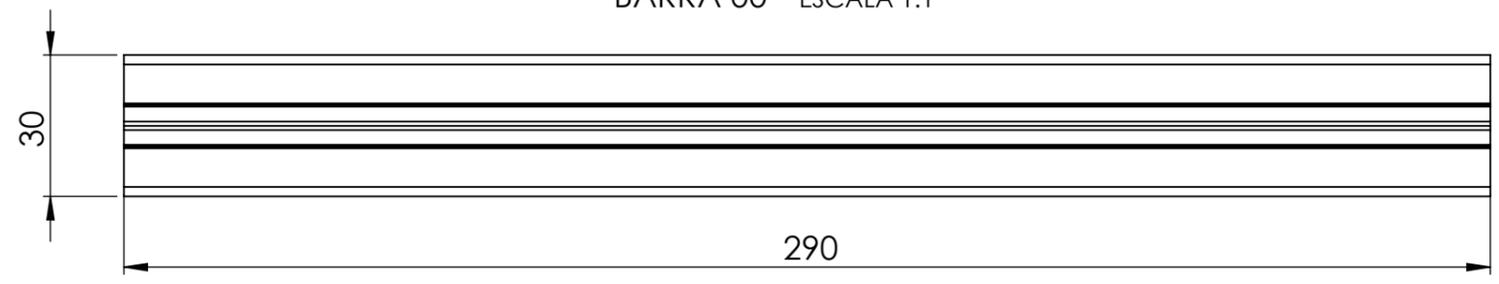
ESCALA 1:2

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.		NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:	
VERIF.								Conjunto de Inspeção	
APROV.									
MANUF									
QUALID						MATERIAL:		DES. Nº	
						PESO:		DC - 002	
								A3	
								FOLHA 2 DE 5	

8 7 6 5 4 3 2 1

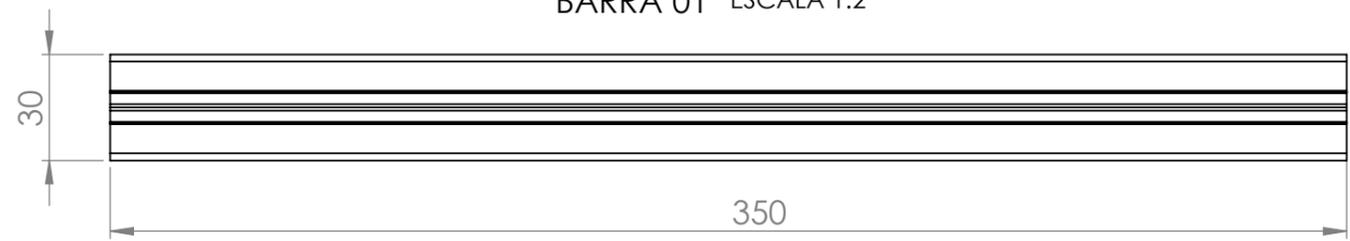
F
E
D
C
B
A

BARRA 00 ESCALA 1:1



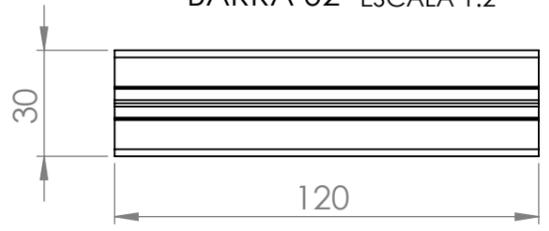
VISTA FRONTAL

BARRA 01 ESCALA 1:2



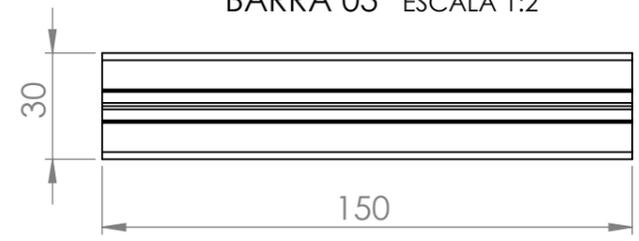
VISTA FRONTAL

BARRA 02 ESCALA 1:2



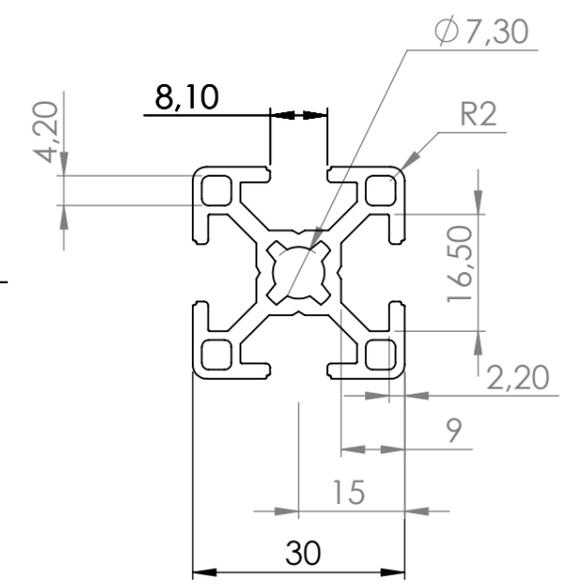
VISTA FRONTAL

BARRA 03 ESCALA 1:2

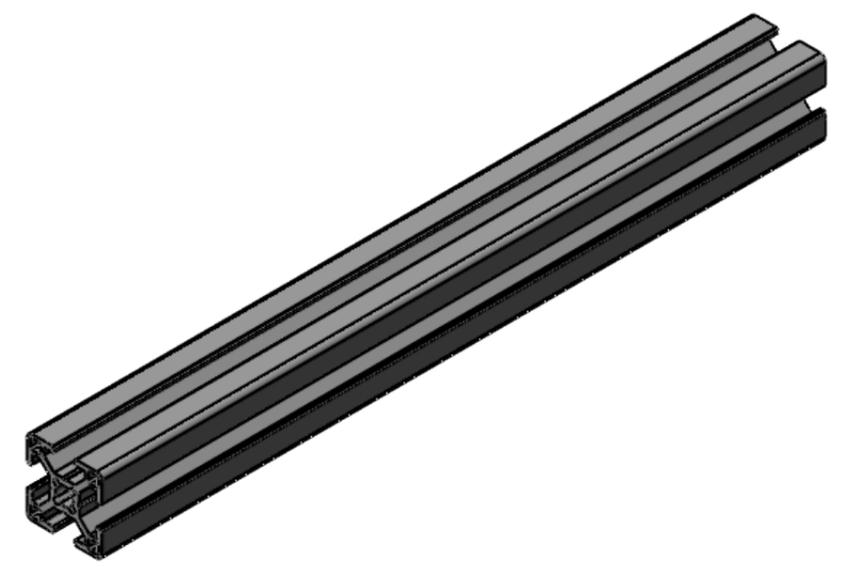


VISTA FRONTAL

VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL ESQUERDA



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
VERIF.						Estrutura de Alumínio - Perfis Bosh			
APROV.						DES. Nº		A3	
MANUF.						DF - 002			
QUALID.						PESO:		FOLHA 4 DE 5	

8 7 6 5 4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

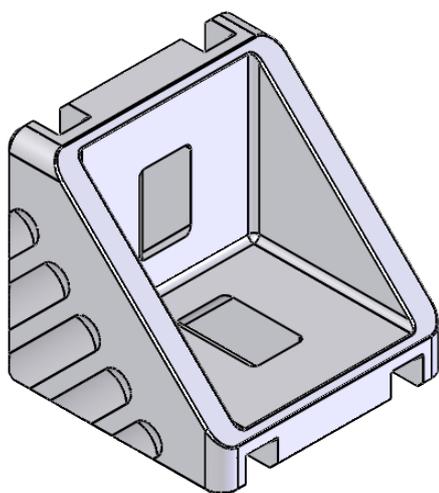
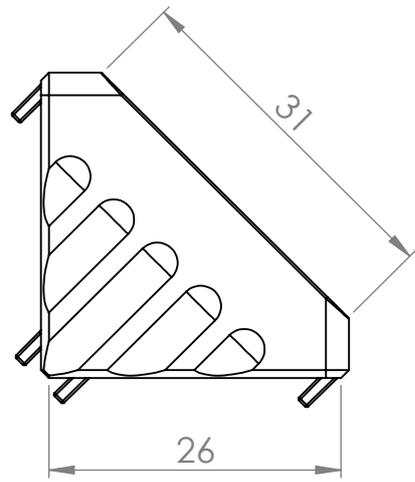
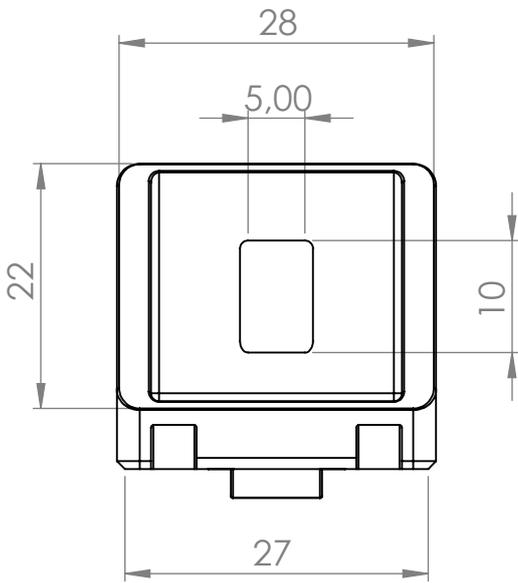
D

C

C

B

B



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA	
DESEN.				
VERIF.				
APROV.				
MANUF.				
QUALID.				
				MATERIAL:
				PESO:

TÍTULO:	
Porca Martelo Bosh	
DES. Nº	DF - 004
	A4
FOLHA 5 DE 5	

4 3 2 1

A

A