

**RAFAEL NARDON FERRARESI**

**COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS  
RFT E IRIS EM FEIXES TUBULARES DE AÇO CARBONO  
DE TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO & TUBOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2023**

**RAFAEL NARDON FERRARESI**

**COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS  
RFT E IRIS EM FEIXES TUBULARES DE AÇO CARBONO  
DE TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO & TUBOS**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre Em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

**UBERLÂNDIA – MG**

**2023**



Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F374 Ferraresi, Rafael Nardon, 1989-  
2023 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS RFT E IRIS  
EM FEIXES TUBULARES DE AÇO CARBONO DE TROCADORES DE  
CALOR DO TIPO CASCO & TUBOS [recurso eletrônico] /  
Rafael Nardon Ferraresi. - 2023.

Orientador: Ruham Pablo Reis.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.660>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Reis, Ruham Pablo, 1979-  
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-  
graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br


**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 626, PPGEM				
Data:	07/02/2023	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	12122EMC012				
Nome do Discente:	Rafael Nardon Ferraresi				
Título do Trabalho:	Comparação entre os Ensaios Não Destrutivos RFT e IRIS em Feixes Tubulares de Aço Carbono de Trocadores de Calor do Tipo Casco & Tubos				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento de Metodologias Baseadas em Risco para Inspeção via Ensaios Não Destrutivos de Feixes de Trocadores de Calor Tipo Casco & Tubo, TC 2017/00368-9				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Antonio Marcos Gonçalves de Lima - FEMEC/UFU; Henrique Coelho Fernandes - FACOM/UFU; Gabriela Ribeiro Pereira - UFRJ; e Ruham Pablo Reis - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Ruham Pablo Reis, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reiser, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/02/2023, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Henrique Coelho Fernandes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/02/2023, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Marcos Gonçalves de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/02/2023, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Gabriela Ribeiro Pereira, Usuário Externo**, em 07/02/2023, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4230114** e o código CRC **D98FD569**.

---

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Ruham Pablo Reis, pela orientação, profissionalismo, ensinamentos e amizade que ao longo desses anos permitiu a realização deste trabalho.

Ao meu Pai, Prof. Valtair Antônio Ferraresi, pelos ensinamentos ao longo de toda a vida e pelas sugestões a este trabalho, e à minha mãe, Domercília do Carmo Nardon Ferraresi, pelo carinho e por acreditar na minha capacidade de sempre melhorar meus conhecimentos.

À minha esposa Jenifer Silva Lopes Ferraresi, pelo carinho, atenção e paciência para a conclusão desse trabalho.

Aos alunos de iniciação científica Gabriel Cicelini, Iago Pereira Lemos e Vitor Calasense de Campos, pelo auxílio no trabalho desenvolvido e pela amizade.

Aos amigos e amigas do curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e do Laboratório de Acústica e Vibrações, especialmente ao Prof. Marcus Antonio Viana Duarte pelos conselhos, apoio e com a infraestrutura para o desenvolvimento desse trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio em publicações e materiais.

Ao Especialista em END, Wesley Carlos Dias da Silva, por coordenar o projeto de pesquisa que originou no desenvolvimento desse trabalho, assim como à Refinaria Gabriel Passos (REGAP) por ceder dois feixes tubulares de trocadores de calor do tipo casco & tubos para serem utilizados na pesquisa.

E a todos aqueles que me apoiaram de alguma forma na realização deste trabalho.

FERRARESI, R. N. **COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS RFT E IRIS EM FEIXES TUBULARES DE AÇO CARBONO DE TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO & TUBOS**. 2023. 220 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Resumo**

As refinarias constituem um setor da indústria que transforma o petróleo bruto em produtos essenciais e de uso diário da população. Dentre os equipamentos essenciais que compõem uma refinaria e que atuam diretamente no refino do petróleo são os trocadores de calor, destinados à troca térmica e/ou reutilização de energia. Por ser um equipamento crucial, existem várias técnicas de inspeções, incluindo o uso de Ensaio Não Destrutivo (END). Tais ensaios permitem realizar a inspeção sem comprometimento da integridade dos equipamentos. Os trocadores de calor são em geral compostos por feixes tubulares, que são os componentes que realizam a troca de calor com o ambiente de operação, e eles podem sofrer vários danos ao longo da operação, incluindo erosão e corrosão. Existem alguns métodos de inspeção não destrutiva para feixes tubulares, e atualmente o mais utilizado é o IRIS (Internal Rotary Inspection System), que tem como base o emprego de ultrassom, permitindo boa visibilidade das descontinuidades ocorrentes nos tubos, porém, com baixa velocidade e custo elevado de procedimento. Sendo assim, com o objetivo de buscar melhores opções para a inspeção dos feixes tubulares, esse trabalho visa estudar o ensaio RFT (Remote Field Testing), uma técnica eletromagnética baseada em correntes parasitas, com maior velocidade de inspeção e menor custo de procedimento, porém menos empregada. Assim, após um levantamento bibliográfico e treinamento na técnica por RFT, foi realizado um estudo dos parâmetros desse ensaio que mais influenciam nos resultados de inspeção e, por fim, comparou-se seus resultados frente ao IRIS utilizando-se de tubos com descontinuidades produzidas em laboratório e de tubos, também de aço carbono, oriundos de trocadores de calor do tipo Casco & Tubos cedidos por uma refinaria. Nesse comparativo os resultados da técnica RFT foram confrontados com os da técnica IRIS (considerada como teste padrão) buscando medir o grau de equivalência entre as duas técnicas. Ao final, fez-se ainda medidas destrutivas com auxílio de um Escâner 3D como complemento à análise de equivalência entre as técnicas não destrutivas. Como conclusão principal pode-se dizer que a técnica por RFT é equivalente à técnica por IRIS no que tange a capacidade de detecção e caracterização de perdas de espessura de tubos em trocadores de calor do tipo Casco & Tubos, apesar de demandar do inspetor um esforço maior durante a análise dos resultados.

**Palavras-chave:** RFT, Campo Remoto, IRIS, feixe tubular, Casco & Tubo, Corrente parasita

FERRARESI, R. N. **COMPARISON BETWEEN THE RFT AND IRIS NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES ON CARBON STEEL TUBULAR BUNDLE OF SHELL & TUBE HEAT EXCHANGERS.** 2023. 220 f. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Abstract**

Refineries constitute an industry sector that transforms crude oil into essential products for daily use by the population. Among the essential equipment that make up a refinery and that act directly in oil refining are the heat exchangers, intended for thermal exchange and/or reuse of energy. When it comes to crucial equipment for refining, has some technique to inspection them, including the use of Non-Destructive Testing (NDT). Such tests allow carrying out the inspection without compromising the integrity of the equipment. Heat exchangers are generally composed of tube bundles, which are the components that exchange heat with the operating environment, and they can suffer various damages throughout the operation, including erosion and corrosion. There are some non-destructive inspection methods for tube bundles, and currently the most used is IRIS (Internal Rotary Inspection System), which is based on the use of ultrasound, allowing good visibility of the discontinuities occurring in the tubes, but with low speed and high cost of procedure. Therefore, with the purpose of seeking better options for the inspection of tube bundles, this work aims to study the RFT (Remote Field Testing) test, an electromagnetic technique based on eddy currents, with higher inspection speed and lower procedure cost, however less employed. Thus, after a bibliographical survey and training in the RFT technique, a study was carried out on the parameters of this test that most influence the inspection results and, finally, its results were compared with the IRIS using tubes with discontinuities produced in laboratory and carbon steel tubes from Hull & Tubes heat exchangers provided by a refinery. In this comparison, the results of the RFT technique were confronted with those of the IRIS technique (considered the standard test) in order to measure the degree of equivalence between the two techniques. At the end, destructive measurements were also made with the aid of a 3D scanner as a complement to the equivalence analysis between the non-destructive techniques. As a main conclusion, it can be said that the RFT technique is equivalent to the IRIS technique in terms of the ability to detect and characterize thickness losses of tubes in Hull & Tube heat exchangers, despite requiring greater effort from the inspector to analyze the results.

**Keywords:** RFT, Remote Field Testing, IRIS, Tubular bundle, Shell & Tube, Eddy current

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Representação de uma troca térmica entre dois fluidos (Fonte: Adaptado de BARBOZA, 2009).....	6
Figura 2.2 - Trocador de calor do tipo Casco & Tubos. (Fonte: WWMCONSULTORIA, 2022) .....	8
Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de um trocador de calor do tipo Casco & Tubos (Fonte: GREICIUNAS, 2019).....	9
Figura 2.4 - Nomenclatura de trocadores de calor do tipo Casco & Tubos (Fonte: TEMA, 2007). .....	10
Figura 2.5 - Arranjos dos tubos em trocadores do tipo Casco & Tubos (Fonte: ARAÚJO, 2013) .....	12
Figura 2.6 - Estrutura de um trocador de calor do tipo Casco & Tubos (Fonte: Adaptado de SILVA, 2010). .....	13
Figura 2.7 - Apresentação esquemática dos principais danos em feixe de trocadores de calor (Fonte: SHULL, 2002). .....	15
Figura 2.8 - Imagem de incrustação em um tubo de um trocador de calor do tipo Caso & Tubos (Fonte: Autor da Obra). .....	16
Figura 2.9 - Imagem de depósitos em tubos de trocadores de calor do tipo Caso & Tubos (Fonte: Autor da Obra).....	16
Figura 2.10 - Formas de corrosão (Fonte: ABRACO, 2022). .....	19
Figura 2.11 - Operador realizando a limpeza de um feixe tubular de trocador do tipo Casco & Tubos (Fonte: Autor da Obra). .....	21
Figura 2.12 - Esquema da formação da corrente parasita a) Campo magnético primário. b) Corrente parasita. c) Campo magnético secundário. (Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2022). .....	25
Figura 2.13 - Circuito RLC em série (Fonte: FORMIGONI, 2012). .....	27
Figura 2.14 - Diagrama de Argand (Fonte: Autor da Obra).....	28

Figura 2.15 - a) Circuito elétrico RL de um ensaio por corrente parasita. b) Plano de tensão do circuito (Fonte: FORMIGONI, 2012). .....	28
Figura 2.16 - Efeito pelicular (Fonte: Adaptado de BUCKLEY, 1994) .....	31
Figura 2.17 - Profundidade de penetração da corrente induzida (corrente parasita) (Adaptado de Soares, 2005) .....	32
Figura 2.18 - Plano de impedância (Fonte: MACHADO, 2014).....	33
Figura 2.19 - Vista qualitativa da intensidade e localização das correntes parasitas geradas por uma bobina (Fonte: SANTOS, 2013 apud MACHADO, 2014).....	34
Figura 2.20 - Configurações de sondas para ensaios de correntes parasitas em tubulações (Fonte: adaptador de IOWA STATE UNIVERSITY, 2022).....	35
Figura 2.21 - Esquema de um ensaio em tubo pela técnica de corrente parasita com uma sonda absoluta e uma sonda diferencial (Fonte: Adaptado de IOWA STATE UNIVERSITY, 2022). .....	36
Figura 2.22 - Diagramas típicos fase-amplitude (A e B) e registro gráfico típico com descontinuidades (C) (Fonte: ABNT NBR 15246, 2005). .....	39
Figura 2.23 - Equipamento da EDDYFI – Ectane 2(1), computador com software da Magnifi (2), simulador de feixe tubular com tubos reais (3) e sonda para ensaio RFT(4) (Fonte: Autor da Obra). .....	39
Figura 2.24 - Esquema de uma sonda para RFT com duas bobinas excitadoras e duas receptoras (Fonte: Autor da Obra). .....	40
Figura 2.25 - Elementos finitos dos campos magnéticos gerados e o posicionamento das bobinas (Fonte: Adaptado de RUSSELL NDE SYSTEMS INC, 2022). .....	41
Figura 2.26 - Esquema apresentado a mudança de fluxo devido à perda de metal em um tubo (Fonte: Adaptado de NDE-ED, 2019). .....	41
Figura 2.27 - Ilustração de uma sonda com o campo magnético e as respostas no plano de impedância (Fonte: Adaptado de TUBE INSPECTION, 2006).....	42
Figura 2.28 - Acoplamento magnético direto e indireto entre as bobinas do RFT (Fonte: Adaptado de Huang e Wang, 2013). .....	42



Figura 2.29 - Amplitude do campo magnético em função da distância da bobina excitadora (Adaptado de RUSSELL; MACKINTOSH; A SHATAT, 2004) .....	43
Figura 2.30 - Ilustração das zonas de campo próximo, transição e remoto com o diagrama da variação da amplitude e fase do sinal detectado em relação à distância da bobina excitadora (Fonte: NDE-ED, 2019). .....	44
Figura 2.31 - Desenho técnico de um tubo padrão para calibração do sistema RFT (Fonte: ASTM, 2019).....	48
Figura 2. 32 - Tubo padrão para caracterização de descontinuidade (Fonte: EDDYFI, 2022)	49
Figura 2.33 - Sonda Single Driver (Fonte: Adaptado de Olympus®, 2022).....	50
Figura 2.34 - Sonda Dual Driver (Fonte: Adaptado de Olympus®, 2022) .....	51
Figura 2.35 - Sonda Dual Pickup (Fonte: Adaptado de Olympus®, 2022).....	51
Figura 2.36 - Configurações de sondas para o Ensaio por RFT (Fonte: ABNT NBR 15246, 2005).....	52
Figura 2.37 - Sinal resposta do ensaio por RFT, software MAGNIFI 4.6R13 da EDDYFI (Fonte: Autor da Obra).....	53
Figura 2.38 - Croqui do Tubo 1 com defeitos do tipo ranhura, medições com paquímetro e representações do ensaio por IRIS e RFT (Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, 2003).....	57
Figura 2.39 - Croqui do Tubo 2 com defeitos do tipo entalhe, medições com paquímetro e representações do ensaio por IRIS e RFT (Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, 2003).....	57
Figura 2.40 - Croqui do Tubo 3 com defeitos do tipo ranhura, medições com paquímetro e representações do ensaio por IRIS e RFT (Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, 2003).....	58
Figura 2.41 - Croqui do Tubo 4 com defeitos do tipo entalhe, medições com paquímetro e representações do ensaio por IRIS e RFT (Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, 2003).....	58
Figura 3.1 - Módulo Ectane 2 e computador com software Magnifi 4.6R13 para comando e realização do ensaio por RFT (Fonte: Autor da Obra) .....	61
Figura 3.2 – Sonda Dual Driver para ensaios por RFT (Fonte: EDDYFI TECNOLOGIES®, 2019).....	62
Figura 3.3 - Tracionador para auxílio do ensaio por RFT (Fonte: Autor da Obra).....	62

Figura 3.4 - Módulo controlador do tracionador (Fonte: Autor da Obra). .....	63
Figura 3.5 - Conjunto sonda-centralizador para ensaio por IRIS (Fonte: EDDYFI TECNOLOGIES, 2019) .....	64
Figura 3.6 - Conduítes, mangueiras e bomba d'água usados para o ensaio por IRIS (Fonte: Autor da Obra). .....	64
Figura 3.7 - Conjunto de equipamentos necessários para realizar um ensaio por IRIS (Fonte: Autor da Obra). .....	64
Figura 3.8 - Tubo com descontinuidades conhecidas semelhante ao tubo padrão para caracterização de descontinuidade (Fonte: Autor da Obra). .....	65
Figura 3.9 - Feixe tubular utilizado no comparativo de campo Entre IRIS e RFT (Fonte: Autor da Obra). .....	67
Figura 3.10 - Motor e painel de controle da bomba de hidrojato de alta pressão utilizado da fabricante LEMASA, modelo L-300/4 (Fonte: Autor da Obra). .....	68
Figura 3.11 - Bico rotativo de alta pressão para limpeza com hidrojato, CYCLONE CY12 22K, LEMASA (Fonte: LEMASA, 2022). .....	68
Figura 3.12 - Tubos plugueados (em vermelho) no feixe 01-E-10B (Fonte: Auto da Obra). ..	69
Figura 3.13 - Feixe 01-E-10B em condição de ensaio (a esquerda) e com a região de limpeza com 7.000 PSI (a direita) (Fonte: Autor da Obra). .....	70
Figura 3.14 - Tubos plugueados (em vermelho) no feixe 01-E-10F (Fonte: Auto da Obra). ..	71
Figura 3.15 - Escâner 3D de mão HandySCAN 3D Block Series da Creaform 3D (Fonte: CREAFORM3D) .....	72
Figura 4.1 - Sinal no canal Diferencial de um furo passante (Fonte: Autor da Obra). .....	75
Figura 4.2 - Sequência de experimentos relacionando amplitude do sinal no canal diferencial e velocidade de arraste da sonda no ensaio RFT com sinal de um furo passante no tubo. 1) 134 mm/s, 2) 218 mm/s, 3) 230 mm/s, 4) 300 mm/s, 5) 568 mm/s e 6) 764 mm/s (Fonte: Autor da Obra). .....	76
Figura 4.3 - Gráficos de efeito da velocidade de arrste da sonda RFT sobre a amplitude do sinal em um furo passante no tubo padrão (Fonte: Autor da Obra). .....	77

Figura 4.4 - Gráficos de efeito da velocidade de arraste da sonda RFT sobre o ângulo de fase do sinal em um furo passante no tubo padrão (Fonte: Autor da Obra). .....	77
Figura 4.5 - Área de sombra de detecção de descontinuidade devido à influência da chicana. (Fonte: Autor da Obra). .....	81
Figura 4.6 - Posicionamento da placa de suporte próxima à borda do furo passante do tubo de calibração (Fonte: Autor da Obra). .....	81
Figura 4.7 - Gráficos de efeito da proximidade da placa de suporte sobre a variação na leitura de perda de espessura do sinal no ensaio RFT (Fonte: Autor da Obra). .....	82
Figura 4.8 - Gráficos de efeito da proximidade da placa de suporte sobre a variação na leitura do ângulo de fase do sinal no ensaio RFT (Fonte: Autor da Obra). .....	82
Figura 4.9 - Área de sombra da borda tubo causado pelo distanciamento das bobinas. (Fonte: Autor da Obra). .....	83
Figura 4.10 - Sinal da placa de suporte conforme calibração do sistema (Fonte: Autor da Obra). .....	84
Figura 4.11 - Gráfico do ângulo de fase registrado em função da posição da placa de suporte em relação à borda do tubo (Fonte: Autor da Obra). .....	85
Figura 4.12 - Gráfico da amplitude registrado em função da posição da placa de suporte em relação à borda do tubo (Fonte: Autor da Obra). .....	85
Figura 4.13 - Imagem dos sinais laterais ao sinal do entalhe externo (Fonte: Autor da Obra). .....	86
Figura 4.14 - Interferência do tamanho do entalhe externo ao tubo nas laterais de seu sinal (Fonte: Autor da Obra). .....	87
Figura 4.15 - Sinal de dois furos passantes distanciados em 70 mm entre centro (Fonte: Autor da Obra). .....	88
Figura 4.16 - Sinal de dois furos passantes distanciados em 20 mm e 16 mm entre centro (Fonte: Autor da Obra). .....	88
Figura 4.17 - Sinal de dois furos passantes distanciados em 13 mm e 6 mm entre centros (Fonte: Autor da Obra). .....	89

Figura 4.18 - Gráfico da variação dos parâmetros do entalhe externo de 40 % (GR 40 %) para o ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 260 Hz. S[%] perda de espessura, Amp.[V] amplitude, Ang.[°] ângulo de fase (Fonte: Autor da Obra). .....	91
Figura 4.19 - Gráfico da variação dos parâmetros do entalhe externo de 60 % (GR 60 %) para o ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 380 Hz. S[%] perda de espessura, Amp.[V] amplitude, Ang.[°] ângulo de fase (Fonte: Autor da Obra). .....	92
Figura 4.20 - Gráfico da variação dos parâmetros do furo passante (HOLE) para o ensaio de repetibilidade. S[%] perda de espessura com frequência de excitação de 440 Hz, Amp.[V] amplitude, Ang.[°] ângulo de fase (Fonte: Autor da Obra). .....	93
Figura 4.21 - Vistas A-Scan, B-Scan, C-Scan e D-Scan de um ensaio por IRIS (Fonte: ORNELAS, 2017). .....	94
Figura 4.22 - Comparativo visual entre os resultados dos ensaios RFT e IRIS (C-Scan) utilizando o tubo padrão (Fonte: Autor da Obra). .....	95
Figura 4.23 - Comparativo visual do plano de voltagem e de Lissajous do RFT com a planificação do tubo no IRIS (B-Scan e D-Scan) utilizando o tubo padrão (Fonte: Autor da Obra). .....	96
Figura 4.24 - Gráfico comparativo da porcentagem de perda de espessura obtida com IRIS e RFT no tubo padrão (Fonte: Autor da Obra). .....	97
Figura 4.25 - Gráfico comparativo da porcentagem de perda de espessura obtida com IRIS e RFT em tubos com descontinuidades de dimensões desconhecidas fornecidos por uma empresa do setor de óleo e gás (Fonte: Autor da Obra). .....	98
Figura 4.26 - Comparativo visual entre os resultados dos ensaios RFT (abaixo) e IRIS (acima) para descontinuidades do tipo rasgo longitudinal (à esquerda) e pite em série (à direita) (Fonte: Autor da Obra). .....	99
Figura 5.1 - Tubos inspecionados por RFT no feixe 01-E-10B (em laranja) - total de 484 tubos com 77 tubos inspecionados com limpeza de baixa pressão (contorno em verde). (Fonte: Autor da Obra). .....	104
Figura 5.2 – Valor da perda em porcentagem de espessura versus posição longitudinal da maior perda de espessura encontrada no do feixe tubular 01-E-10B pela técnica por RFT (Fonte: Autor da Obra). .....	105
Figura 5.3 – Quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda na espessura de parede para o feixe 01-E-10B com o ensaio por RFT. .....	106
Figura 5.4 - Sinal resposta do ensaio por RFT do tubo 16/38 do feixe tubular 01-E-10B com as setes descontinuidades para o ensaio de repetibilidade (Fonte: Autor da Obra). .....	107

Figura 5.5 - Tubos inspecionados por RFT no feixe 01-E-10F (em laranja) - total de 659 tubos (Fonte: Autor da Obra).....	108
Figura 5.6 - Valor em porcentagem da perda de espessura e posição longitudinal da maior perda de espessura encontrada no feixe tubular 01-E-10F pela técnica por RFT (Fonte: Autor da Obra).....	109
Figura 5.7 – Quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda na espessura de parede para o feixe 01-E-10F com o ensaio por RFT (Fonte: Autor da Obra).....	110
Figura 5.8 - Sinal resposta do ensaio por RFT do tubo 16/38 do feixe tubular 01-E-10F com as setes descontinuidades para o ensaio de repetibilidade (Fonte: Autor da Obra).....	110
Figura 5.9 - Tubos inspecionados por IRIS no feixe 01-E-10B (em laranja), total de 270 tubos, onde 10 tubos foram inspecionados com limpeza de baixa pressão (contorno em verde). (Fonte: Autor da Obra).....	113
Figura 5.10 - Valor em porcentagem da perda de espessura e posição longitudinal de cada descontinuidade encontrada no feixe tubular 01-E-10B pela técnica IRIS (Fonte: Autor da Obra).....	113
Figura 5.11 - Quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda na espessura de parede para o feixe 01-E-10B com a técnica IRIS (Fonte: Autor da Obra).....	114
Figura 5.12 - Tubos inspecionados por IRIS no feixe 01-E-10F (em verde) - total de 624 tubos (Fonte: Autor da Obra).....	115
Figura 5.13 - Valor em porcentagem da perda de espessura e posição longitudinal de cada descontinuidade encontrada no feixe tubular 01-E-10F pela técnica IRIS (Fonte: Autor da Obra).....	115
Figura 5.14 - Quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda na espessura de parede para o feixe 01-E-10F com a técnica IRIS (Fonte: Autor da Obra).....	116
Figura 5.15 - Resultado comparativo global (Entre IRIS e RFT) do feixe 01-E-10B com a quantidade de tubos analisados em função da porcentagem de perda de espessura (Fonte: Autor da Obra).....	117
Figura 5.16 - Resultado comparativo global (Entre IRIS e RFT) do feixe 01-E-10F com a quantidade de tubos analisados em função da porcentagem de perda de espessura (Fonte: Autor da Obra).....	118

- Figura 5.17 - Perda de espessura das discontinuidades encontradas pelo IRIS e pelo RFT em função da posição longitudinal no trocador – inspetor 1 – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra)..... 120
- Figura 5.18 - Diferença de perda de espessura entre o RFT (inspetor 1) e IRIS em função da posição no tubo – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra)..... 120
- Figura 5.19 - Perda de espessura das discontinuidades encontradas pelo IRIS e pelo RFT em função da posição longitudinal no trocador – inspetor 2 – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra)..... 121
- Figura 5.20 - Diferença de perda de espessura entre o RFT (inspetor 2) e IRIS em função da posição no tubo – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra). ..... 122
- Figura 5.21 - Perda de espessura das discontinuidades encontradas pelo IRIS e pelo RFT em função da posição longitudinal no trocador – inspetor 3 – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra)..... 122
- Figura 5.22 - Diferença de perda de espessura entre o RFT (inspetor 3) e IRIS em função da posição no trocador – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra)..... 123
- Figura 5. 23 - (Esquerda) Boxplot dos dados de corrosão (perda de espessura) por inspetor; (Direita) Comparativo das médias dos dados de corrosão (perda de espessura) para um nível de confiança de 95 %..... 124
- Figura 5.24 – Comparação do ensaio por RFT entre os três inspetores na mesma faixa de perda de espessura do Feixe 01-E-10B (RFT 1 – inspetor 1; RFT – 2 – inspetor 2; RFT 3 – inspetor 3) (Fonte: Autor da Obra)..... 125
- Figura 5.25 - Comparação do ensaio por RFT entre os três inspetores com o ensaio por IRIS na mesma faixa de perda de espessura para o Feixe 01-E-10B (RFT 1 – inspetor 1; RFT – 2 – inspetor 2; RFT 3 – inspetor 3) (Fonte: Autor da Obra)..... 126
- Figura 5.26 - Quantidade de tubos em função da diferença entre os resultados dos inspetores com RFT e do ensaio com IRIS (RFT 1 - IRIS; RFT 2 - IRIS; RFT 3 - IRIS) (Fonte: Autor da Obra)..... 127
- Figura 5.27 - Média e desvio padrão das diferenças de perda de espessuras entre os valores de RFT e IRIS para os três inspetores no Feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra). ..... 128
- Figura 5.28 - Média e desvio padrão de acerto dos 3 inspetores de RFT em função da variação em torno do zero (determinado pelo ensaio de referência IRIS) do Feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra)..... 129

- Figura 5.29 – (Esquerda) Boxplot dos dados de corrosão entre técnicas IRIS e RFT; (Direita) Comparativo das médias dos dados de corrosão (perda de espessura) obtidos pelas técnicas IRIS e RFT para um nível de confiança de 95%. ..... 130
- Figura 5.30 - Perda de espessura das descontinuidades encontrada pelo IRIS e pelo RFT em função da posição longitudinal no tubo analisado – inspetor 1 – feixe 01-E-10F (Fonte: Autor da Obra). ..... 131
- Figura 5.31 - Diferença de perda de espessura entre o RFT e o IRIS em função da posição no tubo – inspetor 1 – feixe 01-E-10F (Fonte: Autor da Obra). ..... 132
- Figura 5.32 - Comparação do ensaio por RFT (inspetor 1) com o ensaio por IRIS na mesma faixa de perda de espessura do Feixe 01-E-10F (Fonte: Autor da Obra). ..... 133
- Figura 5.33 - Porcentagem de acertos do RFT em função da variação da diferença entre IRIS e RFT para o feixe 01-E-10F. (Fonte: Autor da Obra). ..... 134
- Figura 6.1 - Exemplo do aspecto de um tubo cortado na região de descontinuidade indicada pelo IRIS/RFT (Fonte: Autor da Obra). ..... 137
- Figura 6.2 - Imagens de um tubo cortado e limpo (à esquerda), imagens após escaneamento 3D (central) e imagens do mapa de espessura (à direita) (Fonte: Autor da Obra). ..... 138
- Figura 6.3 - Perda de espessura das 16 amostras dos tubos ensaiados com RFT, IRIS e Escâner 3D (Fonte: Autor da Obra). ..... 140
- Figura 6.4 - Diferença da perda de espessura entre Escâner, IRIS e RFT (Fonte: Autor da Obra). ..... 140
- Figura 6.5 - Média e desvio padrão das diferenças de perda de espessura entre os ensaios. . 141
- Figura 6.6 - (Esquerda) Boxplot dos dados de corrosão (perda de espessura) a partir das técnicas IRIS, RFT e Escâner 3D; (Direita) Comparativo das médias dos dados de corrosão (perda de espessura) a partir das técnicas IRIS, RFT e Escâner 3D para um nível de confiança de 95%. ..... 142
- Figura 6.7 - Imagem típica do óxido na parte interna e externa dos tubos (Fonte: Autor da Obra). ..... 143
- Figura 6.8 – Seção estudada para exemplificar a análise de caracterização da corrosão nos tubos (Fonte: Autor da Obra). ..... 144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parte de um trocador com classificação AJS, segundo norma TEMA (2007). ....	11
Tabela 2.2- Comparativo da aplicabilidade de técnicas END em tubos em função do tipo de material de construção .....	54
Tabela 2.3 - Comparativo entre técnicas END relacionando a capacidade de detecção de defeito de acordo com o tipo de defeito. ....	55
Tabela 2.4 - Comparativo entre técnicas END relacionando a capacidade de dimensionamento do defeito. ....	56
Tabela 2.5 - Tabela comparativa com os valores de perda de espessura obtidas com um paquímetro, com a técnica por IRIS e com a técnica por RFT.....	59
Tabela 3.1 - Resumo dos tubos limpos com hidrojateamento para o feixe 01-E-10B. ....	70
Tabela 3.2 - Resumo dos tubos limpos com hidrojateamento para o feixe 01-E-10F.....	71
Tabela 4.1 - Frequências de excitação para o ensaio RFT .....	79
Tabela 4.2 - Otimização da frequência de excitação da sonda RFT para adequação ao tubo de calibração.....	79
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios com variação na posição da placa de suporte.....	84
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 260 Hz.	90
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 380 Hz.	91
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 440 Hz.	92
Tabela 5.1 - Média e desvio padrão das medições do ensaio de repetibilidade do tubo 16/38 do feixe tubular 01-E-10B. ....	107
Tabela 5.2 - Média e desvio padrão das medições do ensaio de repetibilidade do tubo 16/38 do feixe tubular 01-E-10F.....	111
Tabela 5.3 - Valores de mediana, média e desvio padrão dos resultados dos inspetores 1, 2 e 3. ....	124



Tabela 5.4 - Valores de p-value para análise de variância com nível de significância de 5 %.	124
Tabela 5.5 - Correlação entre os resultados do ensaio por RFT entre os três inspetores.	125
Tabela 5.6 - Porcentagem média de acerto do RFT em função da variação (dispersão) adotada e tomando o IRIS como ensaio padrão para o feixe 01-E-10B.	128
Tabela 5.7 - Valores de mediana, média e desvio padrão dos resultados do IRIS e do RFT (inspetor 1).	130
Tabela 5.8 - Porcentagem de acerto do RFT em função da variabilidade (dispersão) adotada e tomando o IRIS como ensaio padrão para o feixe 01-E-10F.	133
Tabela 6.1 – Menores espessuras encontradas pelo ensaio por Escaneamento 3D nos 16 tubos analisados.	138
Tabela 6.2 - Valores das perdas de espessura da descontinuidade principal (menor espessura) de cada tubo obtidos pelos três ensaios realizados nos tubos dos feixes 01-E-10F e 01-E-10B	139
Tabela 6.3 - Porcentagem de acerto do IRIS e RFT em função da variabilidade em torno do zero a partir do Escâner 3D	141
Tabela 6.4 - Valores de mediana, média e desvio padrão dos resultados do Escâner 3D, IRIS e RFT	142
Tabela 6.5 - Caracterização do tipo de corrosão nos tubos escaneados.	144

## Sumário

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. TROCADORES DE CALOR.....	5
2.1.1. TROCADOR DE CALOR TUBULAR.....	6
2.1.2. TROCADOR DE CALOR TIPO CASCO & TUBOS.....	6
2.1.2.1. Tubos.....	11
2.1.2.2. Casco.....	13
2.1.2.3. Chicanas.....	13
2.2. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO.....	14
2.2.1. INCRUSTAÇÃO.....	15
2.2.2. DEPÓSITOS.....	16
2.2.3. CORROSÃO.....	17
2.3. TÉCNICAS PARA LIMPEZA DE FEIXES TUBULARES.....	20
2.4. ENSAIO NÃO DESTRUTIVO - END.....	22
2.5. CONCEITOS BÁSICOS PARA O ENTENDIMENTO DO ENSAIO POR RFT.....	24
2.5.1. CORRENTE DE FOUCAULT.....	24
2.5.2. RESISTÊNCIA, REATÂNCIA E IMPEDÂNCIA ELÉTRICAS.....	26
2.5.3. CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	29
2.5.4. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA.....	30
2.5.5. PROFUNDIDADE PADRÃO DE PENETRAÇÃO (PPP).....	30
2.5.6. PLANO DE IMPEDÂNCIA.....	32
2.5.7. LIMITAÇÕES DA CORRENTE PARASITA.....	33
2.5.8. INSPEÇÃO EM TUBOS - SONDA.....	34

2.6. CAMPO REMOTO (REMOTE FIELD TESTING – RFT) .....	36
2.6.1. TERMOS, DEFINIÇÕES E EQUIPAMENTO .....	37
2.6.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....	39
2.6.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.....	45
2.6.4. LIMITAÇÕES DA TÉCNICA RFT .....	46
2.6.5. CALIBRAÇÃO .....	47
2.6.6. TIPOS DE SONDAS.....	49
2.6.7. SINAL RESPOSTA DO RFT .....	52
2.7. ESTUDOS COM O RFT.....	53
CAPÍTULO III .....	61
MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA GERAL .....	61
3.1. ENSAIO POR CAMPO REMOTO - RFT.....	61
3.2. ENSAIO POR SISTEMA DE INSPEÇÃO POR ROTAÇÃO INTERNA - IRIS .....	63
3.3. TUBOS E FEIXE TUBULAR .....	65
3.3.1. HIDROJATEAMENTO.....	67
3.4. ENSAIO POR ESCÂNER 3D .....	71
3.5. METODOLOGIA GERAL .....	72
CAPÍTULO IV .....	75
ENSAIOS PRELIMINARES PARA ENTENDIMENTO DA TÉCNICA RFT .....	75
4.1. VELOCIDADE DO ENSAIO .....	75
4.2. FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO DA SONDA .....	78
4.3. INFLUÊNCIA DA PLACA DE SUPORTE .....	80
4.4. EFEITO DA BORDA .....	83
4.5. INFLUÊNCIA DO ENTALHE EXTERNO NA SUA VIZINHANÇA .....	86
4.6. MENOR DISTÂNCIA ENTRE DUAS DESCONTINUIDADES .....	87
4.7. ENSAIO DE REPETIBILIDADE.....	89
4.8. COMPARATIVO ENTRE IRIS E RFT EM TUBOS DE ENSAIO .....	94

4.9. COMENTÁRIOS FINAIS .....	100
CAPÍTULO V .....	102
COMPARATIVO ENTRE IRIS E RFT EM FEIXES TUBULARES .....	102
5.1 INTRODUÇÃO.....	102
5.2. ENSAIO POR CAMPO REMOTO – RFT .....	103
5.2.1. PARÂMETROS DE ENSAIO .....	103
5.2.2. ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR 01-E-10B .....	104
5.2.3. ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR 01-E-10F.....	108
5.3. ENSAIO IRIS .....	111
5.3.1. PARÂMETROS DE ENSAIO .....	111
5.3.2. ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR 01-E-10B .....	112
5.3.3. ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR 01-E-10F.....	114
5.4. COMPARATIVO GLOBAL ENTRE IRIS E RFT .....	116
5.4.1. – COMPARATIVO GLOBAL ENTRE IRIS E RFT NO FEIXE 01-E-10B	116
5.4.2. – COMPARATIVO GLOBAL ENTRE IRIS E RFT NO FEIXE 01-E-10F.	117
5.5. COMPARATIVO ENTRE IRIS E RFT NA MESMA POSIÇÃO DOs TUBOs ....	118
5.5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS ENTRE IRIS E RFT NO FEIXE 01-E-10B .....	119
5.5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS ENTRE IRIS E RFT NO FEIXE 01-E-10F .....	131
5.6. COMENTÁRIOS FINAIS .....	134
CAPÍTULO VI.....	136
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE IRIS E RFT VERSUS ESCANEAMENTO 3D.....	136
6.1. INTRODUÇÃO.....	136
6.2. ANÁLISE DE CORROSÃO.....	143
6.3. COMENTÁRIOS FINAIS .....	145
CAPÍTULO VII.....	147
CONCLUSÕES.....	147

TRABALHOS FUTUROS.....	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	150
APÊNDICE .....	156
APÊNDICE A.....	156
APÊNDICE B.....	157
APÊNDICE C.....	171
APÊNDICE D.....	188
APÊNDICE E.....	195
ANEXO A.....	209

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

As refinarias são mega indústrias que transformam o petróleo bruto em produtos essenciais e de uso diário, como: diesel, gasolina, gás liquefeito de petróleo, lubrificantes, combustível de aviação e outras substâncias que servem como matéria prima para diversos outros produtos. Segundo o *site* da Petrobras (2022), atualmente a empresa possui 13 refinarias, uma unidade de processamento de xisto e uma unidade de processamento de gás natural.

O processo de refinar petróleo possui basicamente três passos principais: a destilação que separa os derivados do petróleo através de aquecimento e refrigeração dos fluidos desejados; a conversão, que transforma as partes mais pesadas do petróleo em derivados mais nobres; e por fim, o tratamento, que é a adequação da qualidade dos produtos exigidos pelo mercado (PETROBRAS, 2022).

Dentre os equipamentos que compõem uma refinaria e atuam diretamente no refino do petróleo estão os trocadores de calor, que são destinados à troca térmica e reutilização de energia. Segundo Sabino (2008), 70 % dos vasos de pressões da planta de destilação atmosférica da refinaria Gabriel Passos da Petrobras, situada em Betim – MG, são trocadores de calor. Portanto, ele é considerado um equipamento de extrema importância, já que permite a otimização energética da planta, tornando-a economicamente lucrativa.

Como os trocadores de calor são cruciais e importantes para o refino, existem profissionais responsáveis pela inspeção e manutenção desses equipamentos com diversas técnicas de inspeção, incluindo o uso de Ensaio Não Destrutivo (END) que permitem a inspeção dos trocadores de calor, e ainda manter a integridade física dos mesmos. Uma parada não programada em um trocador pode comprometer toda a planta e gerar grandes prejuízos (BARBOZA, 2009).

E é pensando em reduzir/prevenir prejuízos que se investe em manutenção. A manutenção preventiva na indústria de refino de petróleo é de suma importância para que toda a operação seja bem sucedida. Neste contexto, a Petrobras investiu no ano de 2021 cerca de R\$ 2,3 bilhões, um recorde de investimentos em paradas de manutenção (ESTADÃO, 2022). Esse valor representa um aumento de 50% em relação ao ano anterior e a estatal informou que planeja investir mais R\$ 6,1 bilhões em refino e manutenção até o ano de 2026 (ESTADÃO, 2022).

Sabino (2008), afirma que o tipo de trocador mais utilizado na indústria de refino é o do tipo Casco & Tubos devido a sua flexibilidade operacional e facilidade de manutenção, sendo seus principais componentes estruturais um casco que envolve um feixe tubular, a tampa e o carretel. Esses componentes são de fácil acesso, permitindo a inspeção com técnicas convencionais como líquido penetrante, partícula magnética e até mesmo inspeção visual. Entretanto, não há maneiras convencionais de acessar e inspecionar o interior dos tubos do feixe tubular.

Segundo Ginzler (2018), tubos metálicos são frequentemente usados em componentes de troca de calor e, pelo ambiente de operação, eles podem sofrer vários danos, incluindo erosão e corrosão. Quando montados em uma unidade de troca de calor, os tubos são, em geral, acessíveis apenas pelo seu interior. Assim, a superfície externa dos tubos geralmente não é acessível devido ao casco ao redor do trocador de calor ou aos tubos vizinhos que são montados tão próximos que o acesso externo fica bastante limitado.

Com isso, vários métodos de inspeção não destrutiva com acesso interno aos tubos, tanto baseados em indução de correntes parasitas ou de campos magnéticos quanto como em ultrassom, têm sido utilizados com intuito de examinar equipamentos deste tipo, com destaque para as técnicas de Campo Remoto (RFT - Remote Field Testing) que ainda é pouco utilizada, e a técnica de Sistema de Inspeção por Rotação Interna (IRIS - Internal Rotary Inspection System) que atualmente é amplamente utilizada para inspecionar feixes tubulares.

Soares (2005) cita que os ensaios não destrutivos por correntes induzidas, caso do RFT e do ECT (Eddy Current Testing), são largamente empregados na indústria de transformações de metais, possibilitando resolver uma grande variedade de problemas de avaliação de materiais e produtos, assegurando uma qualidade uniforme dos mesmos. No geral, estas técnicas permitem a inspeção de tubos de materiais eletricamente condutores, ferromagnéticos e não ferromagnéticos. Mas muitas vezes a implementação esbarra na complexidade de interpretação dos resultados por parte da equipe de inspeção. Atualmente o IRIS é bastante difundido e utilizado nas refinarias em trocadores de calor. Porém, existem dificuldades de se utilizar essa técnica no curto período de manutenção da refinaria, dentre elas: o longo tempo necessário para a montagem do equipamento de ensaio, o longo tempo de ensaio de cada tubo e a necessidade de utilização de água durante o ensaio. Já o ensaio RFT apresenta algumas facilidades em relação ao IRIS, como: não utiliza água, o tempo de ensaio é menor (maior velocidade de varredura da sonda) e a necessidade de menor pressão de limpeza nos tubos do trocador. Porém, é necessária uma maior habilidade de análise e inspeção por parte do inspetor.

Assim, este trabalho contribui com o entendimento da técnica RFT e da influência de seus parâmetros de operação na inspeção de trocadores de calor do tipo Casco & Tubos tomando como base para comparação a técnica IRIS que é amplamente utilizada no setor de Óleo & Gás. Como objetivo principal buscou-se realizar um comparativo entre essas duas técnicas não destrutivas, com o intuito de adquirir maior conhecimento sobre o ensaio RFT, analisando as vantagens e limitações dessa técnica, sempre tendo o IRIS como referência e, em determinadas situações, o escaneamento 3D como sendo outra técnica de comparação.

Para isto, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o ensaio RFT para entender os seus principais fundamentos. Além disso, foi construído um tubo padrão para caracterização de descontinuidades e, em seguida, realizou-se ensaios preliminares para compreensão, identificação de limitações e a aquisição de experiências com essa técnica. Com o conhecimento inicialmente adquirido, foi realizado um comparativo entre RFT e IRIS em laboratório a partir dos resultados obtidos de tubos os com descontinuidades conhecidas, que teve também como objetivo escrever um procedimento de ensaio e de análise com base em normas e manual do equipamento de RFT. A próxima etapa foi realizar os ensaios RFT e IRIS em dois trocadores de calor do tipo Casco & Tubos fornecidos pela Petrobrás visando avaliar fatores como a capacidade de detecção de descontinuidades, facilidade de interpretação dos resultados e dificuldades operacionais de cada técnica. Por fim, foi realizada também uma avaliação das descontinuidades conhecidas de alguns tubos do trocador de calor com a técnica de Escâner 3D para comparação com os ensaios IRIS e RFT. Por fim, realizou-se uma análise geral da corrosão observada nos tubos dos trocadores de calor. Cabe ressaltar que todos os tubos ensaiados foram de aço carbono.

Ao final, concluiu-se que a técnica por Campo Remoto necessita de controle dos parâmetros que influenciam o sinal resposta como: velocidade, frequência de excitação, geometria da sonda e fatores externos que alteram a permeabilidade magnética do ensaio. O RFT é mais prático e rápido que o IRIS para realizar inspeção, entretanto necessita de prática do inspetor para analisar o sinal resposta. O RFT pode ser usada como uma ferramenta de inspeção inicial para uma varredura célere do feixe tubular, enquanto o IRIS pode ser usada como uma técnica de investigação.

Uma dificuldade encontrada nesse trabalho, foi a falta de outros trabalhos relacionados a área de RFT e IRIS. Esse tipo de comparativo entre duas técnicas, avaliando a capacidade de detectar e caracterizar descontinuidades em feixe tubulares de aço carbono de trocadores de calor do tipo Casco & Tubo, é algo inédito.





## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. TROCADORES DE CALOR

Trocar calor entre dois ou mais fluidos de diferentes temperaturas através de um condutor é uma prática comum na engenharia e que possui uma variedade de aplicações. Um equipamento que aplica tal conceito na prática é o trocador de calor, que pode ser usado para aquecer um ambiente, na produção de potência, na recuperação de calor em processos de refino, em processamentos químicos e em várias outras aplicações (INCROPERA et al., 2007).

Um trocador de calor é um equipamento que transfere calor por condução entre dois fluidos, líquido ou gasoso, separados ou não por uma barreira normalmente metálica, mas que pode ser plástica ou de outro material resistente à corrosão, sendo que no processo de troca de calor pode haver ou não mudança de fase dos fluidos envolvidos (MCGRAW-HILL, 2005).

Os trocadores de calor são usualmente classificados quanto à configuração de escoamento dos fluidos e quanto ao tipo construtivo, como em trocadores do tipo concêntricos, onde o fluido pode escoar em sentido paralelo ou contracorrente, ou como em trocadores de escoamento cruzado, onde um fluido escoar perpendicular ao outro, com auxílio de feixes tubulares e/ou aletas (INCROPERA et al., 2007).

Um trocador de calor pode também ser classificado quanto às seguintes fatores:

- **Processo de transferência de calor:** Nesse caso é considerado a maneira que o processo de transferência de calor é feito, podendo ser de maneira direta (fluido – fluido) ou de maneira indireta (fluido – material condutor – fluido);
- **Número de fluidos envolvidos:** Podendo ser de 2 fluidos, 3 fluidos ou N-fluidos ( $N > 3$ );
- **Tamanho (capacidade):** Aqui está relacionado à densidade de área da superfície de transferência de calor por unidade de volume do trocador ( $m^2/m^3$ ).
- **Característica de construção (formato):** Essa é a maneira mais comum de classificar um trocador de calor, sendo que esses podem ser tubulares, de placa, aletados ou regenerativos.
- **Arranjo dos fluidos:** Basicamente é uma característica relacionada ao número de passes entre os fluidos, podendo ser de somente um passe ou de multipasses.

A escolha do arranjo do fluxo correto depende de vários fatores considerados no projeto do equipamento;

- **Mecanismo de transferência de calor:** Os mecanismos básicos de transferência de calor em trocadores são por convecção monofásica, convecção bifásica e transferência de calor combinada, convecção e radiação, sendo que todas podem ser de transferência livre ou forçada. (SHAH; SEKULIC', 2003)

A Figura 2.1 representa uma troca térmica entre dois fluidos.

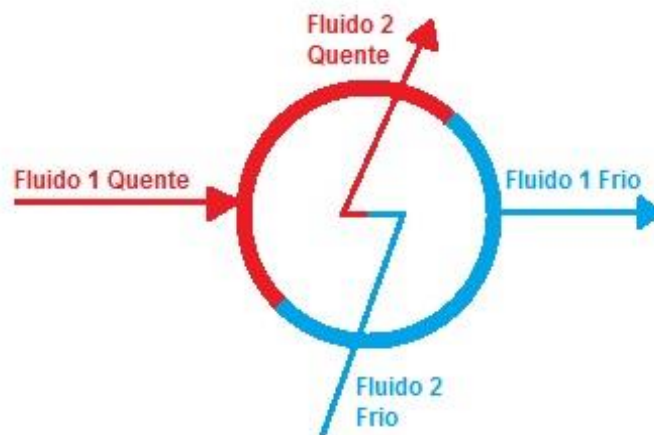


Figura 2.1 - Representação de uma troca térmica entre dois fluidos (Fonte: Adaptado de BARBOZA, 2009)

### 2.1.1. TROCADOR DE CALOR TUBULAR

Trocadores de calor tubulares são normalmente construídos com tubos circulares e possuem uma grande variação de construções, pois existem vários diâmetros de tubos, comprimentos e várias maneiras de arranjar esses tubos, além de poderem trabalhar com altas pressões em relação ao ambiente e grandes diferenças de pressões entre os fluidos envolvidos. São usados para troca de calor entre líquido-líquido, líquido-fase (condensação ou evaporação), gás-líquido e gás-gás, e principalmente quando há grandes temperaturas e/ou pressões envolvidas. Esses trocadores são classificados em Tubo Duplo, Tubo Espiral e Casco & Tubos (SHAH; SEKULIC', 2003).

### 2.1.2. TROCADOR DE CALOR TIPO CASCO & TUBOS

Azevedo (2005) cita que os trocadores de calor do tipo Casco & Tubos foram construídos desde o início do século XX, sendo as aplicações iniciais destinadas aos pré-

aquecedores de água e condensadores para centrais térmicas. Durante a década de 1920 esta tecnologia atingiu um estado de desenvolvimento grande devido à necessidade de trocadores de calor para a indústria de refino de petróleo usando áreas de até 500 m<sup>2</sup>. Nesta fase e até 1940 o seu desenho era normalmente subdimensionado, não existindo uma metodologia de fabricação. Em 1941 surgiu a primeira edição das normas TEMA - “*Tubular Exchanger Manufacturers Association*” que introduziram uma uniformização nas tolerâncias e qualidade, de modo a permitir condições de competitividade e segurança.

Durante as décadas de 1940 e 1950 desenvolveram-se estudos de transferência de calor de modo a dimensionar os trocadores de calor do tipo Casco & Tubos com maior eficiência térmica. Este tipo de trocador permite uma grande gama de pressões de operação e fluidos utilizados. Apenas na década de 1960 se atingiu um grau razoável de conhecimento sobre o comportamento de fluidos viscosos no escoamento do lado exterior dos tubos. Atualmente, a área de permuta de cada unidade pode atingir os 5000 m<sup>2</sup> (AZEVEDO, 2005).

Os trocadores de calor do tipo Casco & Tubos são comumente utilizados na indústria de petróleo e refino, suportando criogenia e altas temperaturas, altas pressões e altos vácuos e podem trabalhar com inúmeros tipos de fluidos, além de possuírem uma grande área de troca térmica. Entretanto, ocupam um volume considerável e necessitam de uma estrutura física robusta, sendo projetados segundo normas de vasos de pressões, mas utiliza-se de normas complementares para parte específicas do trocador, como a escolha da tampa, do casco e do carretel. Essa norma específica é a TEMA (BARBOZA, 2009).

Um trocador de calor deve obedecer também a alguns requisitos fundamentais em seu projeto, como trocar calor com eficiência, é claro, mas também permitir dilatações térmicas, ser de fácil limpeza e ter robustez mecânica (LIEBERMAN e LIEBERMAN, 2008).

Trocadores de calor do tipo Casco & Tubos são equipamentos que possuem um conjunto de tubos denominado de feixe tubular envolvidos por um casco, que é um reservatório, sendo que normalmente no feixe tubular ocorre o escoamento do fluido que será utilizado para transferir calor, enquanto no casco circula o fluido proveniente do processo (SILVA, 2013). A Figura 2.2 mostra a imagem de um trocador de calor do tipo Casco & Tubos e seus principais componentes.

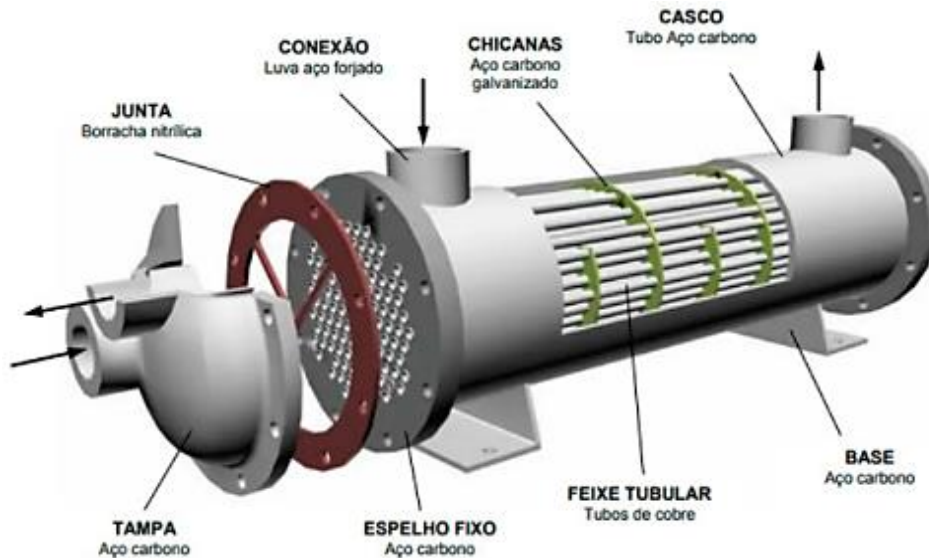


Figura 2.2 - Trocador de calor do tipo Casco & Tubos. (Fonte: WWMCONSULTORIA, 2022)

Conforme visualizado na Figura 2.2, as principais peças de um trocador deste tipo são (ESTEVEES, 2009):

- **Casco:** com conexões para entrada e saída do fluido, é o local onde se armazena o feixe tubular, a chicana e os tirantes;
- **Feixe tubular:** onde ocorre a troca de calor do fluido interno do tubo com o fluido do casco (externo);
- **Chicanas:** partes que irão dar sustentação ao feixe, diminuir os efeitos vibracionais, auxiliar na troca térmica e orientar o sentido do fluxo do fluido que inunda o casco;
- **Carretel/Tampas:** para contenção e orientação dos fluidos;
- **Espelho:** promove a fixação das extremidades dos tubos;
- **Juntas:** promove vedação entre as partes adjacentes.

A Figura 2.3 apresenta um esquema de um trocador de calor do tipo Casco & Tubos com o fluxo do fluido passando pelo casco. Se o escoamento do fluido exterior aos tubos ocorrer numa direção paralela aos tubos o equipamento apresentará um coeficiente de convecção baixo (apresentando baixa troca térmica). Para melhorar essa troca térmica os trocadores de calor desse tipo promovem o escoamento perpendicular aos tubos de uma forma simples, o que é possível utilizando os deflectores/chicanas (*chicanes ou baffles*), que obrigam o escoamento a passar em direções alternadas várias vezes por entre os tubos (AZEVEDO 2005).

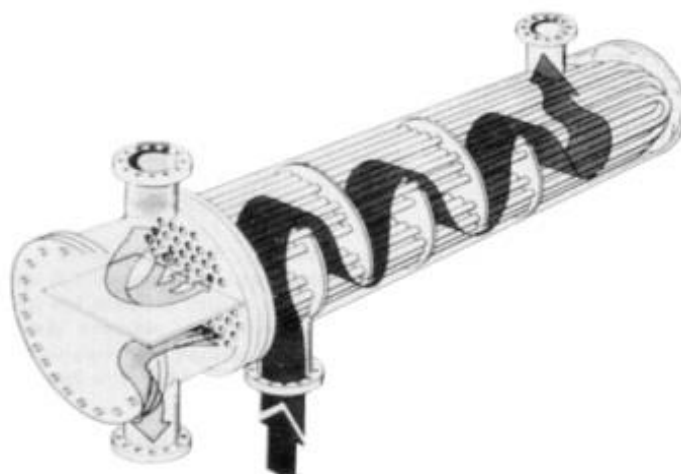


Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de um trocador de calor do tipo Casco & Tubos (Fonte: GREICIUNAS, 2019).

Azevedo (2005) cita que as principais vantagens deste tipo de construção são: a geometria cilíndrica permite suportar pressões de funcionamento elevadas, de até 300 bar no corpo e cerca de 1400 bar nos tubos; uma ampla gama de temperaturas de operação, desde os -100°C até 600°C; extrema robustez e concepção flexível, podendo ser construídos com diversos materiais e utilizar um grande número de fluidos. Como principal desvantagem, tem-se a necessidade de uma área de instalação relativamente grande, pois os trocadores são normalmente montados na horizontal, requerendo o dobro do comprimento para poder desmontar o feixe de tubos para execução de limpeza. Para pressões de funcionamento inferiores a 16 bar e temperaturas inferiores a 200°C, a construção torna-se mais dispendiosa do que trocadores de placas.

Como mencionado, alguns componentes possuem critérios específicos de construção que são regidos pela norma TEMA. Essa norma é de uma associação de fabricantes de trocadores tubulares que padronizaram os tipos de trocadores convencionais mais utilizados na indústria de processos. Nessa padronização cada trocador é classificado por uma sigla de três letras, sendo que a primeira letra faz referência ao tipo de carretel, a segunda letra ao tipo de casco e a terceira letra ao tipo de extremidade oposta ao carretel (tampa) (TELLES, 2007). A Figura 2.4 é uma imagem da nomenclatura de trocadores de calor Casco & Tubos de acordo com o arranjo construtivo segundo a norma TEMA (adaptado de TEMA, 2007).

Extremidades frontais		Cascos		Extremidades finais	
A		E		L	
	Carretel e tampa removíveis		Passo único		Espelho fixo Similar ao carretel A
B		F		M	
	Carretel tipo boleado (carretel integral)		Dois passos no casco com chicana longitudinal		Espelho fixo Similar ao carretel B
C		G		N	
	Carretel integrado ao feixe e tampas removíveis		Fluxo separado		Espelho fixo Similar ao carretel N
N		H		P	
	Carretel integrado ao casco e feixe com tampa removível		Fluxo separado duplo		Caixa flutuante com vedação externa
D		J		S	
	Carretel especial para altas pressões		Fluxo dividido		Espelho flutuante com anel bi-partido
		K		T	
			Refervedor		Espelho flutuante com flange
		X		U	
			Fluxo cruzado		Feixe tubular em U
				W	
					Espelho flutuante com vedação no casco

Figura 2.4 - Nomenclatura de trocadores de calor do tipo Casco & Tubos (Fonte: TEMA, 2007).

A norma TEMA (TEMA, 2007) classifica os trocadores de calor do tipo Casco & Tubos em três classes:

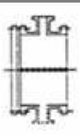
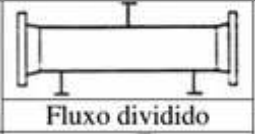
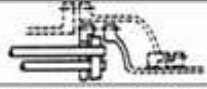
- **Classe R** – Para condições severas de processamento de petróleo e produtos químicos, serviços rigorosos, em que se deseja obter segurança e durabilidade;
- **Classe C** – Para condições moderadas de operação, tendo em vista a máxima economia e o mínimo tamanho, condizentes com as necessidades de serviço;
- **Classe B** – serviço em processos químicos.

Além da norma TEMA, existem outras normas que especificam outras partes desses trocadores de calor, como a N-466 e a N-253 da PETROBRAS e o código ASME (BARBOZA, 2009).

Os trocadores de calor utilizados nesse trabalho possuem a configuração **AJS**, ou seja, são formados por uma extremidade frontal **A** (carretel e tampa removível), um casco **J** (fluxo

dividido) e uma extremidade final S (espelho flutuante com anel bi-partido). A Tabela 2.1 mostra as três partes da configuração separadamente.

Tabela 2.1 - Parte de um trocador com classificação AJS, segundo norma TEMA (2007).

Extremidades Frontais		Casco	Extremidades Finais	
<b>A</b>		<b>J</b>  Fluxo dividido	<b>S</b>	 Espelho flutuante com anel bi-partido

Telles (2007) enumera alguns fatores relacionados a cada parte da classificação da norma TEMA, sendo que, um trocador com classificação AJS possui:

- **Trocador com extremidade frontal tipo A:** Construção cara, é comumente empregado para trabalhos severos, e tem possibilidade de limpeza do carretel e dos tubos sem que haja a retirada dos tubos do carretel;
- **Trocador com espelho flutuante:** Construção cara e permite trabalhos severos, mas não permite grandes pressões internas ao tubo, não possui restrição de diferenças de temperatura entre os fluidos, sendo o feixe tubular desmontável para manutenção, limpeza e retubagem;
- **Trocador com extremidade final tipo S:** Também com construção cara e permite trabalhos severos, com uma melhor eficiência térmica em comparação ao tipo T.

O material mais usado para a fabricação desses tipos de trocadores de calor é o aço carbono, mas dependendo das características do processo pode-se utilizar outros materiais como latão, aço inoxidável ou até titânio (SABINO, 2008).

### 2.1.2.1. Tubos

A espessura da parede dos tubos dos trocadores de calor é padronizada em termos da BWG (*Birmingham Wire Gage*), sendo que a dimensão do tubo é indicada pelo diâmetro externo e pela espessura da parede. Essa é dada pelo número BWG, que pode variar de 7 a 24, sendo 7 para espessura de parede mais grossa (4,57 mm) e 24 para a mais fina (0,56 mm).



Araújo (2002) cita que a escolha da espessura de parede dependerá das condições operacionais e das características dos fluidos, como pressão, e poder de corrosão dos fluidos. Normalmente esses tubos são lisos, mas conforme as características físicas do fluido que inunda o casco, esses tubos podem ser aletados. Outro fator que influencia na escolha do diâmetro do tubo é a incrustação que se forma no trocador, pois é de costume realizar a limpeza desses tubos e isso faz com que diâmetros menores do que 20 mm não sejam tão utilizados. Os diâmetros mais comuns são o de  $\frac{3}{4}$  de polegadas (19,05 mm) e de 1 polegada (25,4 mm). Um importante fator que também afeta a escolha do diâmetro do tubo é a perda de carga do fluido.

O comprimento dos tubos afeta o custo e a operação dos trocadores de calor, uma vez que, quanto maior for o comprimento dos tubos, menor será o número de tubos necessários, resultando em um diâmetro menor do casco e em um custo menor. Entretanto, existem limitações para essa regra, expressada com maior precisão através da relação entre o diâmetro do casco e o comprimento dos tubos, sendo de 1/5 até 1/15 (ARAÚJO 2002, FERREIRA, 2014).

A norma TEMA também normatiza quatro configurações de arranjos de tubos no feixe, sendo elas os arranjos triangular 30°, triangular 60°, quadrado 90° e quadrado rodado 45°. A distância de centro a centro entre tubos adjacentes é chamada de arranjo ou passo  $p$  (*pitch*), já a diferença entre o passo e o diâmetro externo do tubo é a abertura  $C'$  (*clearance*), sendo que normalmente o passo é de 1,25 a 1,5 vezes o diâmetro interno do tubo. A Figura 2.5 apresenta essas configurações. Os trocadores de calor utilizados nesse trabalho são configurados do tipo triangular (30°).

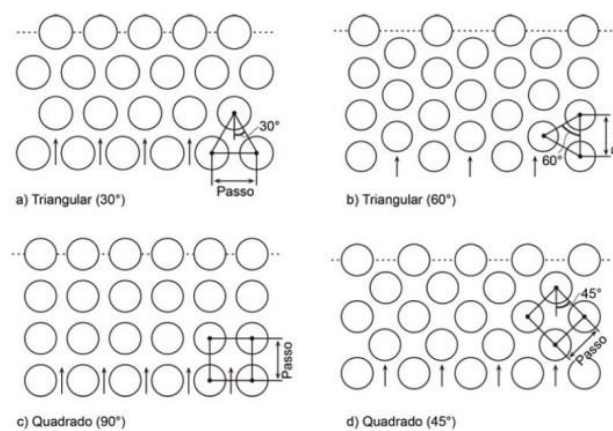


Figura 2.5 - Arranjos dos tubos em trocadores do tipo Casco & Tubos (Fonte: ARAÚJO, 2013)

### 2.1.2.2. Casco

O casco é um vaso de pressão onde se encontra inserido o feixe tubular, ou seja, um tubo de grande diâmetro com entrada e saída do fluido e quando inundado é o local onde ocorre a troca de calor entre os fluidos. O fluido do casco pode percorrê-lo somente uma vez (passe simples) ou por várias vezes (múltiplos passes), entretanto devido a dificuldades de construção o mais comum é o casco de passe simples (BARBOZA, 2009).

A construção do casco é padronizada. Até 24 polegadas (609,6 mm) de diâmetro utiliza-se tubos comerciais. Já acima disso usa-se chapas soldadas com espessura de pelo menos 3/8 de polegada (9,5 mm) (ARAUJO 2013).

### 2.1.2.3. Chicanas

As chicanas, possuem como característica principal fornecer sustentação aos tubos e direcionar o escoamento do fluido do lado do casco. Com isso pode-se propiciar uma melhor troca térmica, aumentando o coeficiente de convecção do lado do casco, pois as chicanas induzem turbulência e proporcionam a corrente cruzada nos tubos (MORAN et al., 2005).

As chicanas devem ser alternadamente segmentadas em cima e em baixo, à direita e à esquerda ou de outra maneira que permita a passagem do fluido, sendo recomendado que a espessura das mesmas seja o dobro da margem para corrosão considerada para o casco (TELLES, 2007). A Figura 2.6 mostra uma imagem da estrutura mecânica de um trocador de calor do tipo Casco & Tubo com as chicanas, o casco e os tubos.

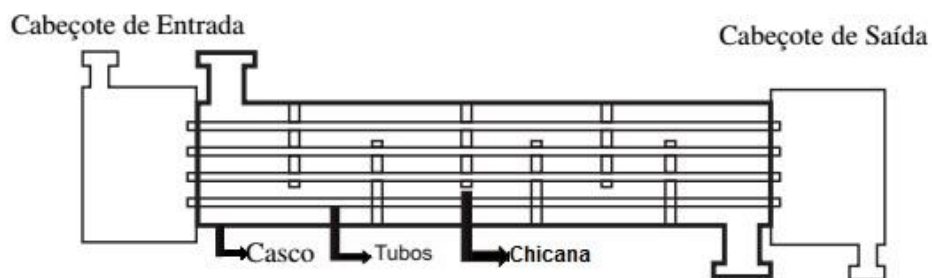


Figura 2.6 - Estrutura de um trocador de calor do tipo Casco & Tubos (Fonte: Adaptado de SILVA, 2010).

## 2.2. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO

Assim que um trocador de calor é colocado em trabalho, tem-se início o processo de incrustação e de deterioração de suas partes. Esta ocorrência está relacionada a fatores ligados às propriedades físico químicas dos fluidos, temperatura dos fluidos, pressão de trabalho e geometria do trocador (MADI, 2005).

Os principais mecanismos de deterioração em trocadores de calor do tipo Casco & Tubos são trincas longitudinais e circunferenciais, corrosões localizadas, como pites e alvéolos que se desenvolvem na parte interna e externa dos tubos, erosão, desgaste por atrito e, conseqüentemente, a perda de espessura de parede dos tubos (RAMOS; CARNEVAL, 2015).

Além desses mecanismos, a API (2003) como citado por Sabino (2008), indica também como mecanismos de deterioração: fragilização de revenido, fadiga, corrosão microbiana, corrosão seletiva, fragilização cáustica, corrosão galvânica, dentre outros. Sabino (2008) reforça que, para o caso dos trocadores de interesse deste trabalho, os principais efeitos causados por esses mecanismos são a perda de espessura generalizada e/ou localizada. Barboza (2009) também cita que a maioria dos problemas encontrados nos trocadores de calor estão relacionados à corrosão, depósitos e incrustações, e sempre entre estes fatores existe uma interligação. Por exemplo, durante o processo de corrosão existe o acúmulo de produtos da corrosão que se depositam iniciando um processo de depósito/incrustação, que podem em seguida inclusive frear a taxa de corrosão.

A deterioração do trocador de calor ao longo tempo gera perda de eficiência e falhas em seus componentes, afetando significativamente a sua funcionalidade, ou seja, o componente para de funcionar conforme foi projetado. Isso pode levar a falhas de componentes subsequentes com conseqüências graves e o aumento do risco de uma falha múltipla, quando vários componentes perdem sua funcionalidade. Uma das falhas mais comuns é o vazamento, que é também uma das principais causas de parada de um trocador. Esse tipo de falha ocorre quando há o rompimento do tubo devido a algum processo de deterioração e isso faz com que os fluidos se misturem, reduzindo a troca térmica e prejudicando os demais processos que seguem na linha de produção (BARBOZA, 2009). A Figura 2.7 mostra os principais defeitos encontrados em feixes de trocadores de calor.



Figura 2.7 - Apresentação esquemática dos principais danos em feixe de trocadores de calor (Fonte: SHULL, 2002).

### 2.2.1. INCRUSTAÇÃO

A incrustação é composta por sais insolúveis ou óxidos que aderem a uma superfície e crescem como uma camada cristalina. Esses sais se apresentam na forma de silicato de cálcio ou magnésio, carbonatos, fosfato de cálcio ou zinco, e tais formações estão diretamente associadas às condições de operação do trocador, como pressão de trabalho, e da qualidade do fluido circulante no trocador, como pH e quantidade de sais em suspensão (BARBOZA, 2009).

Existem várias formas de incrustações, que podem ser compostas por material que forma durante o processo cuja solubilidade aumenta com o aumento da temperatura, pode ser de material insolúvel em que a solubilidade diminui com a temperatura e pode ser matéria sólida oriundo da corrosão. A incrustação tem a característica de reduzir a taxa de transferência de calor entre os fluidos. A condução de um processo de limpeza consegue retirar as incrustações, entretanto, algumas são de difíceis remoção, aumentando o custo da limpeza (ARAÚJO, 2013).

Madi (2005) menciona em seu estudo um gasto de 2 a 3 milhões de dólares com despesas adicionais devido à incrustação. Esse valor é gasto com aditivos misturados ao petróleo para prevenção de incrustações, paradas programadas e não programadas. Esse mesmo autor ainda menciona que a incrustação é um problema tão considerável que existe a necessidade de parar a operação e limpar os trocadores, pois esse material incrustado afeta diretamente na vazão do petróleo e na troca térmica, acarretando em um custo maior de combustíveis a serem queimados nos fornos pois o petróleo chega com uma temperatura abaixo do necessário.

A Figura 2.8 apresenta uma imagem de uma seção de um tubo de um trocador de calor do tipo Casco & Tubos com incrustação.



Figura 2.8 - Imagem de incrustação em um tubo de um trocador de calor do tipo Caso & Tubos (Fonte: Autor da Obra).

### 2.2.2. DEPÓSITOS

Alguns autores não fazem distinção entre incrustações e depósitos, considerando tudo como sendo incrustações. Valle (2012), por exemplo, afirma que incrustação é um tipo de depósito que ocorre nas superfícies de trocadores de calor levando à perda de eficiência e consequente diminuição da recuperação energética. Já Souza (2007) diz que depósito é a sedimentação de partículas sólidas que estão em suspensão e podem ocorrer em associação com a incrustação, sendo que esses sólidos podem ser partículas de argila, compostos de ferro, matéria orgânica e produto de corrosão. A Figura 2.9 apresenta uma imagem de tubos de um feixe tubular com depósito de partículas sólidas.



Figura 2.9 - Imagem de depósitos em tubos de trocadores de calor do tipo Caso & Tubos (Fonte: Autor da Obra).

### 2.2.3. CORROSÃO

Segundo Doring (2018), corrosão é uma reação química ou eletroquímica entre um material, que geralmente é metálico, e o meio ambiente em que está inserido, levando à deterioração do material com consequente perda de suas propriedades. Com isso tem-se basicamente duas formas de corrosão. A eletroquímica, também conhecida como corrosão úmida que ocorre entre uma superfície metálica com um eletrólito capaz de conduzir corrente elétrica. Esse tipo de corrosão ocorre normalmente em ambientes aquosos, podendo ser natural, como um solo úmido, ou artificial, como na parte interna de um tubo metálico inundado com água. A outra forma de corrosão acontece em condições secas de altas temperaturas com um ambiente gasoso, de sais fundidos ou metais líquidos. Esse tipo de corrosão é baseado em reações químicas direta entre o metal e o meio e são restritas à superfície do material.

Ahmad (2006) diz que corrosão é um processo natural e constante de destruição dos materiais, possuindo várias definições, a saber:

- A corrosão é o desperdício de superfície que ocorre quando os metais são expostos a ambientes reativos;
- A corrosão é o resultado da interação entre um metal e ambientes que resulta em sua destruição gradual;
- A corrosão é um aspecto da decomposição de materiais por agentes químicos ou biológicos;
- A corrosão é uma metalurgia extrativa ao contrário. Por exemplo, o ferro é feito de hematita por aquecimento com carbono. O ferro corrói e reverte à ferrugem, completando assim o seu ciclo de vida. A hematita e a ferrugem têm a mesma composição;
- A corrosão é a deterioração dos materiais como resultado da reação com o meio ambiente;
- A corrosão é o ataque destrutivo de um metal por reação química ou eletroquímica com o meio ambiente.

Conforme a ABRACO (2022), pode-se dizer então que “a corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associado a esforços mecânicos.” Sendo que existem várias formas de manifestação, podendo ser:

- **Corrosão Uniforme:** Ocorre quando a corrosão ataca toda a superfície de maneira igualitária, sendo comum em metais que não formam camadas protetoras como resultado do ataque;
- **Corrosão por Placas:** Ocorre quando a corrosão forma placas na superfície do metal que se desprendem progressivamente, e aparece normalmente em metais que formam inicialmente uma camada protetora ao ataque, mas que com o tempo se desprende e expõe o novo metal ao ataque;
- **Corrosão Alveolar:** Ocorre quando o metal se desgasta de forma localizada, devido à corrosão, e com formato de cratera, sendo comum em metais que formam camadas semiprotetoras ou quando se tem corrosão sob depósito;
- **Corrosão por Pite:** É um tipo de desgaste corrosivo que ocorre de maneira bem localizada e de alta intensidade, sendo normalmente a profundidade bem maior que o diâmetro. Esse tipo de corrosão ocorre normalmente em metais que formam uma camada inicialmente passiva e que, sob a ação de agentes agressores, perdem essa camada passiva tornando o local ativo, possibilitando uma corrosão intensa;
- **Corrosão Intergranular ou Intercristalina:** Esse tipo de corrosão ataca os contornos de grão do metal, ocorrendo por exemplo em aços inoxidáveis austeníticos sensitizados quando expostos a meios corrosivos;
- **Corrosão Transgranular ou Transcristalina:** Esse tipo de ataque corrosivo ocorre sob forma de trincas que se propagam pelo interior dos grãos do material, como no caso da corrosão sob tensão de aços inoxidáveis austeníticos (ABRACO, 2022).

A Figura 2.10 ilustra exemplos das formas de corrosão citadas e outras mais.



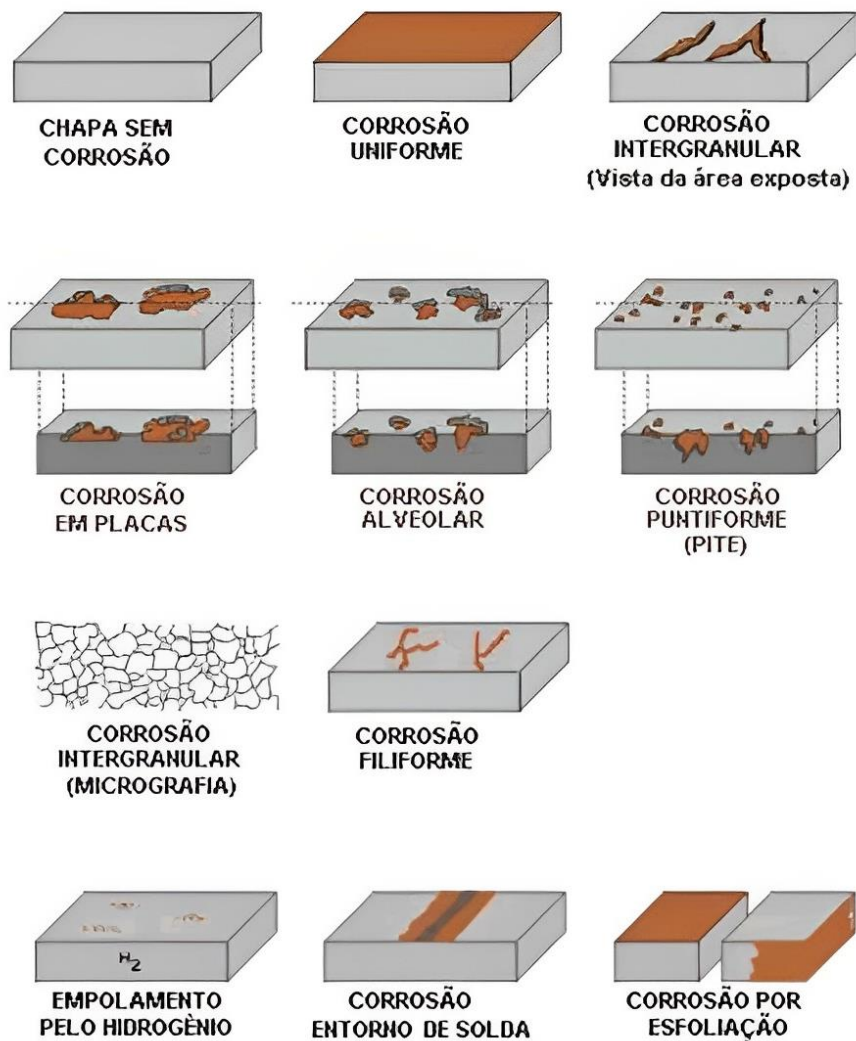


Figura 2.10 - Formas de corrosão (Fonte: ABRACO, 2022).

A ABRACO (2022), cita também as corrosões associadas ao escoamento de fluidos, como:

- **Corrosão-Erosão:** A erosão é um desgaste abrasivo que ocorre na superfície do metal, e tem a capacidade de remover a camada protetora formada pela corrosão, expondo assim o metal continuamente aos agentes corrosivos e consequentemente aumentando a taxa de desgaste;
- **Corrosão por Cavitação:** A cavitação é um processo de desgaste que ocorre em superfícies metálicas devido a ondas de choque oriundas do colapso de bolhas gasosas (bolhas de vapor do produto) e, assim como na erosão, ela remove a camada protetora formada pela corrosão e expõe o metal continuamente aos agentes corrosivos, acelerando assim a taxa de corrosão;



- **Corrosão por Turbulência:** Esse processo corrosivo está associado à turbulência do fluido passante, ocorrendo normalmente quando há a redução da área de fluxo. Essa turbulência propicia a formação de bolhas de ar que se chocam com a superfície metálica. Esse processo erosivo é denominado de impingimento, sendo essa corrosão diferente da cavitação por formar bolhas de ar e não bolhas de vapor do produto. Além disso, a forma comum desse desgaste são alvéolos em forma de ferradura.

### 2.3. TÉCNICAS PARA LIMPEZA DE FEIXES TUBULARES

Durante o processo de trabalho, vários detritos são acumulados no trocador de calor, tanto dentro como fora dos tubos. Esses detritos, geralmente formados por depósitos de sais, oxidação, coque, areia, pó de coque, camadas de graxa, corpo de microrganismos e outros, prejudicam diretamente a eficiência do trocador, sendo necessária uma limpeza de seus componentes. Os principais processos de limpeza neste caso são (SENAI, 2008):

- **Limpeza por Água em Contracorrente:** Esse processo consiste em inverter o fluxo de água nos tubos com o equipamento ainda em uso, promovendo a remoção de detritos que são drenados do trocador, sendo normalmente utilizado em condensadores e resfriadores que utilizam água salgada não tratada com fluido refrigerante;
- **Limpeza por Vapor:** Esse método é utilizado para a remoção de graxas e depósitos presentes tanto nos tubos como no casco, e para realizar esse método o trocador deve ser desativado e desmontado e em seguida injeta-se vapor nos componentes que é retirado por um dreno próprio;
- **Limpeza Química:** Essa limpeza consiste em introduzir uma substância ácida junto de um inibidor de corrosão e fazê-la circular pelo trocador, que em um circuito fechado tem a função de desagregar os resíduos e de impedir o ataque corrosivo, sendo que ao final introduz-se um neutralizante e água em abundância;
- **Limpeza Mecânica:** Para esse tipo de limpeza necessita-se do desmonte do trocador para que os sedimentos, graxas e demais resíduos sejam removidos com arames, escovas e jatos de água, e caso seja necessário os tubos são desobstruídos com perfuratrizes.

Segundo Bott (1995), a remoção de depósitos pode ser feita com água e quando incrustados é necessário a utilização de água com alta pressão, hidrojateamento, e até mesmo lanças. Junto com a água pode-se utilizar detergentes para melhorar o processo de limpeza e materiais abrasivos que serão impelidos em alta velocidade junto ao hidrojato. Entretanto, é necessário cautela na utilização de abrasivos, pois estes podem causar danos ao pessoal envolvido no trabalho e ao equipamento. Ainda segundo Bott (1995), para trocadores de calor do tipo Casco & Tubos é recomendada a técnica mecânica com jato de água com pressão que pode variar de 40 a 150 bar, dependendo do grau e tipo de incrustação encontrados nos tubos.

Após a parada para inspeção e manutenção dos trocadores de calor, há necessidade de submetê-los a teste de pressão a fim de verificar a resistência mecânica das juntas soldadas, da mandrilagem dos tubos nos espelhos e a estanqueidade dos dispositivos de vedação. Os testes de pressão podem ser efetuados com água (teste hidrostático). Quando isso não for possível, poderá ser feito o teste pneumático. As pressões de teste são definidas pelo código ASME. O casco e o feixe deverão ser testados separadamente.

A Figura 2.11 mostra um operador executando a limpeza de um feixe tubular por hidrojateamento como técnica muito comum na limpeza de feixes tubulares de trocadores do tipo Casco & Tubos.



Figura 2.11 - Operador realizando a limpeza de um feixe tubular de trocador do tipo Casco & Tubos (Fonte: Autor da Obra).

## 2.4. ENSAIO NÃO DESTRUTIVO - END

Ensaaios não destrutivos (END) são técnicas de inspeção utilizadas para avaliar a integridade física de materiais e equipamentos sem danificá-los, ou seja, sem interferir em seu uso posterior. Essa técnica é normalmente utilizada no processo de fabricação, construção, montagem e manutenção, sendo uma das principais ferramentas de controle de qualidade, na redução de custos e na preservação da vida e do meio ambiente, sendo amplamente utilizada na indústria petroquímica, química, aeroespacial, siderúrgica, naval, eletromecânica e outras. Para realizar esse tipo de inspeção e obter resultados fidedignos é necessário ter uma equipe treinada, qualificada e certificada, equipamentos calibrados e procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecidos (ABENDI, 2022).

A principal característica das técnicas ENDS é a de mostrar informações sobre as condições físicas, descontinuidades e defeitos, e monitorar a taxa de degradação de equipamentos e materiais a partir de uma indicação. Para tanto, é necessário compreender a diferença de uma indicação, de uma descontinuidade e de um defeito, sendo:

- **Indicação:** Evidência que requer interpretação para compreender o seu significado;
- **Descontinuidade:** Interrupção da estrutura típica de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas.
- **Defeito:** Descontinuidade que, por sua natureza, tipo, dimensões, localização ou efeito acumulado, torna a peça imprópria para uso, por não satisfazer os requisitos mínimos de aceitação da norma aplicável.

Com isso, pode-se dizer que o objeto ideal deve ser isento de descontinuidades, algo de difícil ocorrência já que objetos reais passam por processos de fabricações e sofrem com diversos esforços, o que contribui para o surgimento de descontinuidades. Caso essa descontinuidade exceda o padrão de aceitação das normas ou especificações, ela se torna um defeito e com isso o objeto é rejeitado e considerado impróprio para uso.

Existem inúmeras técnicas de ensaios não destrutivos para inspeção, sendo que a ABENDI (2022) considera como principais: Correntes Parasitas, Emissão Acústica, Radiografia, Radioscopia, Gamagrafia, Ensaio Visual, Estanqueidade, Líquido Penetrante, Partículas Magnéticas, Ultrassom e Termografia.

A escolha de uma técnica de inspeção se baseia em vários fatores, como tipo de material a ser testado, processo de fabricação envolvido, geometria do objeto, tipos de discontinuidades mais prováveis, podendo ser trincas, perda de espessura, inclusões, poros e outros, sensibilidade e resolução desejada e também nos custos envolvidos no trabalho.

Um feixe tubular de trocador de calor do tipo Casco & Tubos possui o desafio de ser inspecionado constantemente, com acesso somente externo ao equipamento e interno aos tubos e com a necessidade de se inspecionar as duas extremidades, isso somado a diferentes tipos de materiais e formatos de feixes. A inspeção completa do trocador de calor, considerando o casco e o feixe, é complexa e exige várias técnicas de inspeção. Sendo assim, a escolha das técnicas corretas interfere diretamente na eficiência da parada de inspeção e nos custos de operação, já que o equipamento não pode ser inspecionado em funcionamento gerando assim altos custos de manutenção. Uma inspeção mais abrangente utiliza de técnicas conjugadas, normalmente uma de maior velocidade de inspeção com menor resolução/precisão, chamada de screening (varredura), e uma outra técnica de dimensionamento com maior precisão, porém de menor velocidade (RAMOS; CARNEVAL, 2015).

Ramos e Carneval (2015) citam que a seleção da técnica para inspeção de um feixe tubular pode se desenvolver por três caminhos. O primeiro depende do tipo de material a ser inspecionado, e normalmente é utilizado quando não há histórico de inspeção no feixe e se divide basicamente em materiais ferromagnéticos e não ferromagnéticos, dando origem à separação das técnicas eletromagnéticas e ultrassônicas. O segundo caminho depende do tipo de defeito que se está buscando e, para isso, deve-se entender quais são os defeitos mais comuns em trocadores de calor como corrosão localizada interna e externa ao tubo, pites e alvéolos, e trincas longitudinais e circunferências. Já o terceiro caminho se baseia no tipo de defeito que está sendo dimensionado, normalmente utilizado quando há falhas recorrentes, com localização conhecida e/ou onde foi utilizado uma técnica de varredura e detectou-se a presença de um defeito.

Existem várias técnicas de ensaios não destrutivos que podem ser utilizadas na inspeção de trocadores de calor, podendo-se citar segundo Ramos e Carneval (2015):

- IRIS (Internal Rotary Inspection System): Sistema de Inspeção por Rotação Interna;
- Corrente Parasita, podendo ser o Array ou com Saturação Magnética;
- RFT (Remote Field Testing): Ensaio por Campo Remoto;
- NFT (Near Field Testing): Ensaio por Campo Próximo;

- MFL (Magnetic Flux Leakage): Fuga de Fluxo Magnético;
- RPA: Reflectometria de Pulso Acústico;
- RPU: Reflectometria de Pulso Ultrassônico;
- RPA + RPU.

## **2.5. CONCEITOS BÁSICOS PARA O ENTENDIMENTO DO ENSAIO POR RFT**

Para entender do ensaio por RFT, deve-se compreender alguns conceitos básicos do eletromagnetismo.

### **2.5.1. CORRENTE DE FOUCAULT**

O fenômeno da corrente parasita foi descoberto em 1851 pelo físico francês Leon Foucault, e é por essa razão que esse fenômeno também é chamado de Corrente de Foucault. Usando um disco de cobre que se movia com um campo magnético forte, Foucault mostrou que as correntes parasitas são geradas quando um material se move dentro de um campo magnético, ou seja, a corrente de Foucault é o nome dado à corrente elétrica induzida dentro de um material condutor, quando sujeito a um campo magnético variável (OLYMPUS, 2022).

Os testes por indução magnética (que utilizam o princípio da corrente de Foucault) tem sua origem na descoberta da indução eletromagnética de Michael Faraday em 1831. Faraday foi químico na Inglaterra durante o início de 1800 e é reconhecido pela descoberta da indução eletromagnética, rotações eletromagnéticas, efeito magneto-óptico, diamagnetismo e de outros fenômenos relacionados. Em 1879, outro cientista chamado Hughes registrou mudanças nas propriedades de uma bobina quando a colocada em contato com metais de diferentes condutividades e permeabilidades. No entanto, só após a Segunda Guerra Mundial esses efeitos foram colocados em prática para testes de materiais. Muito trabalho foi feito nos anos 50 e 60, particularmente nas indústrias de aeronaves e nuclear. (OLYMPUS, 2022).

Quando uma corrente alternada é aplicada a um condutor, como em um fio de cobre, um campo magnético se desenvolve dentro e ao redor do condutor. Este campo magnético se expande à medida que a corrente alternada atinge um máximo e entra em colapso à medida que a corrente é reduzida a zero. Se outro condutor elétrico for colocado próximo a este campo magnético variável, uma corrente será induzida neste segundo condutor. Este processo de geração de corrente elétrica em um condutor, colocando o condutor em um campo magnético

variável, é chamado de indução eletromagnética ou apenas indução. Chama-se indução porque se diz que a corrente é induzida no condutor pelo campo magnético (OLYMPUS, 2022). A Figura 2.12 mostra um esquema da formação da corrente parasita.

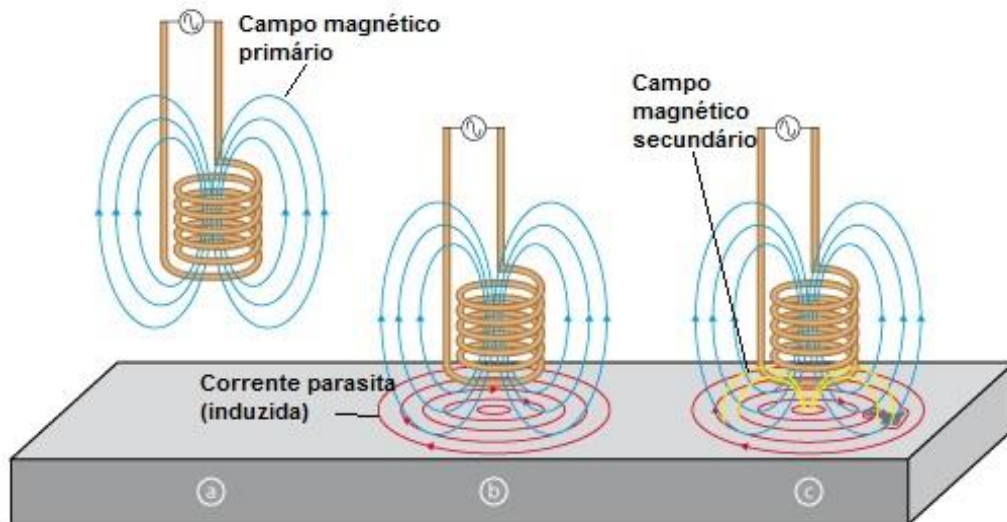


Figura 2.12 - Esquema da formação da corrente parasita a) Campo magnético primário. b) Corrente parasita. c) Campo magnético secundário. (Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2022).

Como mostra a Figura 2.12, uma corrente alternada é aplicada na bobina gerando assim um campo magnético primário. Conforme essa bobina se aproxima de um material condutor ela induz na superfície desse material uma corrente elétrica, que é a corrente induzida (corrente de Foucault ou corrente parasita). Essa corrente induzida flui em loops fechados e perpendiculares ao fluxo magnético, e por sua vez a corrente induzida produz o seu próprio campo magnético (campo magnético secundário) que interage com o campo magnético primário da bobina.

Ao se medir a resistência e a reatância indutiva da bobina devido a interação entre os campos magnéticos, consegue-se obter informações sobre o material como a condutividade elétrica, a permeabilidade magnética, o volume de material que corta o campo magnético das bobinas e a integridade do material, como descontinuidades. Essa interação está relacionada com a distância da bobina com material, chamada de Lift-off (distância de separação entre a sonda e a peça). Conforme altera-se o Lift-off altera-se também a indutância mútua dos circuitos (OLYMPUS, 2022).

### 2.5.2. RESISTÊNCIA, REATÂNCIA E IMPEDÂNCIA ELÉTRICAS

A resistência elétrica mede a capacidade de um determinado componente de resistir ao fluxo de corrente e sua unidade de medida é o Ohm ( $\Omega$ ). Existem duas maneiras básicas de calcular a resistência. Uma delas é considerando as propriedades físicas do material, conforme a seguinte equação (STROSKI, 2017):

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

Onde  $\rho$  é a resistividade elétrica do material ( $\Omega/m$ ),  $l$  é o comprimento em metros e  $A$  é a área da seção transversal do material condutor em  $m^2$ .

A outra forma é aplicando a lei de Ohm em um circuito elétrico, conforme a seguinte equação:

$$V = R \cdot I \quad (2)$$

Onde  $V$  é a tensão em Volts (V) aplicada,  $R$  é a resistência em Ohms ( $\Omega$ ) e  $I$  é a corrente elétrica em amperes (A).

Já a capacitância elétrica mede a capacidade que um capacitor possui de armazenar energia e pode ser expressa conforme a seguinte equação (STROSKI, 2017):

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3)$$

Onde  $C$  é a capacitância em Faradays (F),  $Q$  é a carga elétrica armazenada em Coulombs (C) e  $V$  é a tensão elétrica em Volts (V).

Define-se indutância elétrica como sendo a capacidade que um indutor tem de resistir a variação de corrente elétrica, ou seja, é a capacidade de armazenar energia em um campo magnético e é expressa em Henry (H). Um indutor é basicamente um fio enrolado em espiras e que pode conter um núcleo para aumentar o campo magnético e a indutância, e é também conhecido como bobinas ou solenoides. A seguinte equação mostra a forma de calcular a indutância de um solenoide (STROSKI, 2017):

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (4)$$

Onde  $L$  é a indutância em Henry (H),  $\mu$  é a permeabilidade magnética em Henry por metro (H/m),  $N$  é o número de voltas da espira,  $A$  é a área da seção transversal em metros quadrados ( $m^2$ ) e  $l$  é o comprimento em metros (m).

Em circuitos de corrente alternada, o valor das resistências de seus componentes passivos (resistor, capacitor e indutor) é chamado de impedância ( $Z$ ). Para explicar o conceito de reatância e impedância deve-se primeiro considerar um circuito elétrico genérico constituído por resistores ( $R$ ), capacitores ( $C$ ) e indutores ( $L$ ) em série e percorridos por uma corrente elétrica alternada, representado pela Figura 2.13:

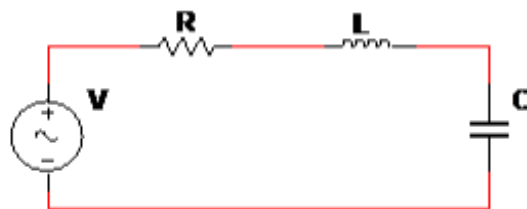


Figura 2.13 - Circuito RLC em série (Fonte: FORMIGONI, 2012).

E pode-se usar, com base na lei de Ohm, a seguinte relação, conforme a seguinte equação:

$$V = Z \cdot I \quad (5)$$

Onde  $V$  é a tensão em Volts (V),  $Z$  é a impedância em Ohms ( $\Omega$ ) e  $I$  é a corrente do circuito em amperes (A), sendo que  $V$ ,  $Z$  e  $I$  são quantidades complexas.

Sendo assim, cada componente do circuito RLC (resistor-indutor-capacitor) possui uma impedância complexa associada, onde a parte real é chamada de Resistência ( $R$ ), que está ligada ao resistor, e as partes imaginárias são chamadas de Reatâncias ( $X$ ) e estão associadas ao indutor ( $X_L$  – Reatância Indutiva) e ao capacitor ( $X_C$  – Reatância Capacitiva), todos expressos em Ohms ( $\Omega$ ). Sendo assim a impedância resultante ( $Z_R$ ) de um circuito RLC em série é a resultante vetorial das impedâncias de seus componentes e pode ser representada pelo plano de impedância (diagrama de Argand), conforme a Figura 2.14 e conforme as seguintes equações (FORMIGONI, 2012):



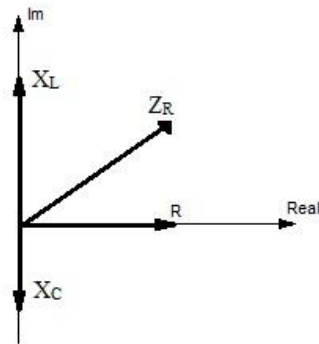


Figura 2.14 - Diagrama de Argand (Fonte: Autor da Obra).

$$Z_R = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (6)$$

Onde:

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (6.1)$$

$$X_L = j\omega L \quad (6.2)$$

Sendo que  $\omega$  é a frequência angular em rads/s, C é a capacitância em Faradays (F) e L é a indutância em Henry (H). Ou seja, a impedância representa a oposição total a corrente elétrica alternada em uma determinada frequência.

Formigoni (2012) diz que o circuito elétrico que representa os fenômenos elétricos de um ensaio por correntes parasitas, pode ser representado por um circuito RL (resistor-indutor), que é representado pela Figura 2.15 e conforme as seguintes equações:

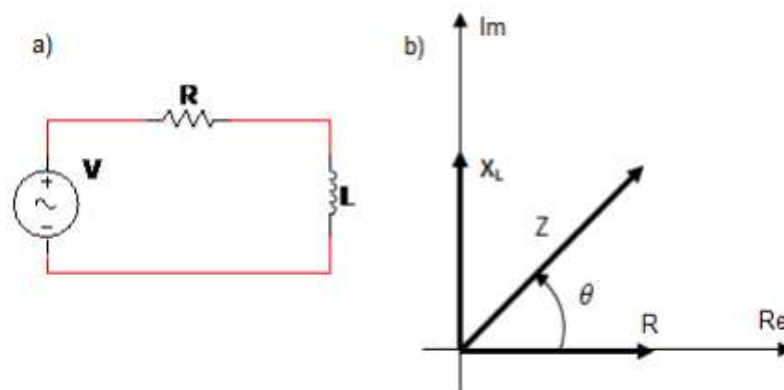


Figura 2.15 - a) Circuito elétrico RL de um ensaio por corrente parasita. b) Plano de tensão do circuito (Fonte: FORMIGONI, 2012).

Aplicando os conceitos anteriores nesse circuito tem-se:

$$|Z| = \sqrt{X_L^2 + R^2} \quad (7)$$

$$X_L = |Z|\sin\theta \quad (7.1)$$

$$R = |Z|\cos\theta \quad (7.2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\text{IMAG}(Z)}{\text{REAL}(Z)} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{X_L}{R} \right) \quad (7.3)$$

Sendo que  $\theta$  é o ângulo de fase do sinal, também conhecido como fator de potência. O ensaio por correntes parasitas utiliza desse parâmetro e da impedância  $|Z|$  para caracterizar uma descontinuidade no material que está sendo ensaiado (KRZYWOSZ; ECKERT, 1999).

### 2.5.3. CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Condutividade elétrica é a facilidade de um material em conduzir corrente elétrica e está diretamente associada à quantidade de elétrons livres e a fração de ligação atômica da estrutura do material facilitando assim a sua movimentação, quando submetido à uma tensão elétrica. Todos os materiais possuem alguma condutividade elétrica assim como uma resistência ao fluxo de elétrons. Com isso pode-se classificar os materiais em condutores, semicondutores e isolantes (MATAREZI, 2009).

A condutividade é uma grandeza inversamente proporcional à resistividade, sendo que resistividade elétrica é a capacidade de um determinado material em resistir ao fluxo de corrente elétrica. A condutividade é expressa em %IACS (*International Annealed Copper Standard*). Isso significa que a condutividade do cobre recozido a 20° C é 100 % e ela é tomada como padrão, já no Sistema Internacional a unidade é o S/m (Siemens por metro) ou 1/  $\Omega \cdot m$  (PEREIRA, 2007).

As características do material são quem ditam qual a sua condutividade, como a sua composição química, tratamentos térmicos, endurecimentos, encruamentos, e outros fatores que podem vir a alterar a condutividade e por consequência a corrente parasita que atua no material,

pois quanto maior for a condutividade maior é o fluxo de corrente parasita na superfície do material (BUCKLEY, 1994)

#### **2.5.4. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA**

Permeabilidade magnética ( $\mu$ ) é a facilidade com que o material é magnetizado, ou seja, é a capacidade que um material possui em conduzir linhas de fluxo magnéticos. Essa capacidade está relacionada com a indução fornecida ao material e a alteração correspondente na força de magnetização, ou seja, quanto maior a permeabilidade magnética maior o fluxo de correntes parasitas no material. Já a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) é um número adimensional que indica quantas vezes a permeabilidade magnética de um material é maior que a do vácuo, que é igual a 1 (MATAREZI, 2009).

Pode-se classificar um material como sendo ferromagnético quando atraído por ímãs e possui um  $\mu_r$  bem acima de 1, sendo dependente da força de magnetização, como ferro, níquel, cobalto e outros. Os materiais paramagnéticos são materiais que possuem um valor de  $\mu_r$  próximo a 1 e que são praticamente independentes da força de magnetização e levemente atraídos por um ímã, como alumínio, cromo, estanho e outros. Já os diamagnéticos são materiais onde  $\mu_r$  é levemente menor que 1, sendo independente da força de magnetização e são levemente repelidos por um ímã (ABNT NBR 8859, 2005, DCTA/IFI, 2006b apud MATAREZI, 2009).

A permeabilidade magnética  $\mu$  pode ser expressa conforme a seguinte equação:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (8)$$

Sendo B a indução magnética e H a intensidade do campo magnético

#### **2.5.5. PROFUNDIDADE PADRÃO DE PENETRAÇÃO (PPP)**

Como exemplificado na Figura 2.16, as correntes parasitas circulam em ciclos fechados em um plano perpendicular ao campo magnético primário induzido pela bobina. Essas correntes são normalmente paralelas ao enrolamento da bobina e o campo magnético induzido pela bobina é que delimita o fluxo da corrente parasita, sendo que a concentração das mesmas se concentra com maior intensidade na superfície do material e decresce de maneira exponencial conforme aumenta a profundidade no objeto, sendo essa queda chamada de efeito pelicular. O

efeito pelicular é uma consequência direta da quantidade de corrente parasita presente no objeto. Conforme a corrente parasita se intensifica, aumenta-se a fluxo do campo magnético secundário que interage com o fluxo do campo magnético primário, e essa interação reduz a rede de fluxo magnético no objeto causando uma queda no fluxo de corrente conforme aumenta-se a profundidade (IOWA STATE UNIVERSITY, 2022). A Figura 2.16 exemplifica o efeito pelicular.

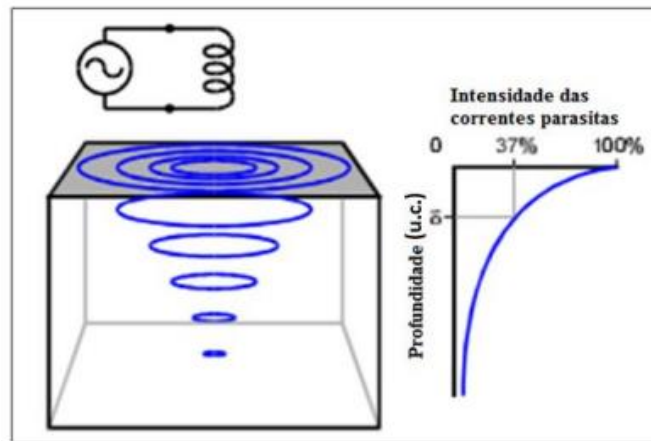


Figura 2.16 - Efeito pelicular (Fonte: Adaptado de BUCKLEY, 1994)

Fatores como o aumento da frequência da corrente de excitação nas bobinas, da condutividade elétrica e da permeabilidade magnética do material, reduzem a profundidade de penetração da corrente induzida no material. A profundidade em que a densidade de corrente induzida é de cerca de 37 % à densidade de corrente da superfície, ou  $1/e$ , é chamada de Profundidade Padrão de Penetração – PPP ( $\delta$ ) conforme mostra a Figura 2.16 (IOWA STATE UNIVERSITY, 2022). A seguinte equação mostra como calcular a PPP e a Figura 2.17 mostra a sua variação e a densidade de corrente parasita conforme altera-se a frequência, a condutividade e a permeabilidade do objeto.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (9)$$

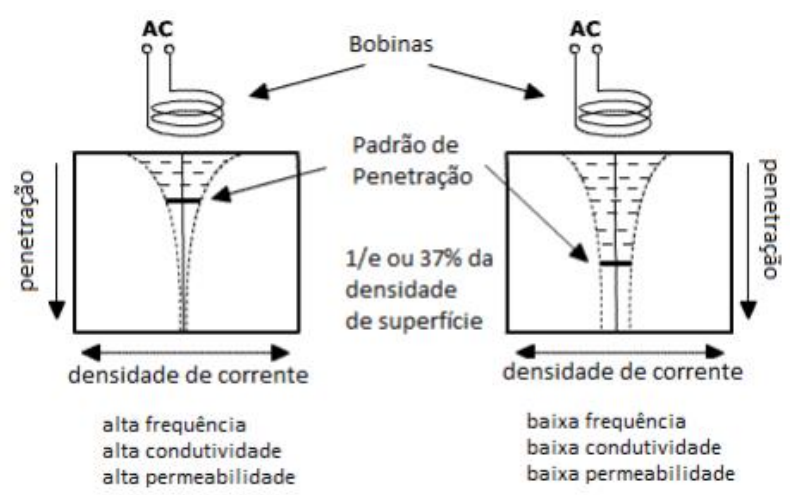


Figura 2.17 - Profundidade de penetração da corrente induzida (corrente parasita) (Adaptado de Soares, 2005)

Onde  $\delta$  é a profundidade padrão de penetração em mm,  $f$  é a frequência da corrente alternada da bobina em Hz,  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material inspecionado em H/mm e  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material inspecionado em %IACS (BUCKLEY, 1994).

Embora a corrente induzida penetre mais que a PPP conforme vista na Figura 2.17, ela reduz abruptamente com a profundidade. Em 2PPP a densidade de correntes parasitas cai para 13,5 % e em 3PPP cai para 5 % em relação à densidade da superfície (IOWA STATE UNIVERSITY, 2022). É de suma importância conhecer as dimensões das correntes parasitas no local onde se busca uma descontinuidade pois a sensibilidade da inspeção depende da densidade de correntes parasitas no local em que se encontra essa descontinuidade. Sendo assim, é necessário utilizar frequências em que se posicione a PPP na profundidade esperada do defeito, pois isso assegura que a densidade de correntes parasitas seja grande o suficiente para que ocorra uma indicação do defeito (PEREIRA, 2007).

### 2.5.6. PLANO DE IMPEDÂNCIA

O diagrama de impedância é uma maneira útil de exibir os resultados de um ensaio por corrente parasita (AGUILAR, 2014). Quando o campo magnético gerado pela corrente parasita da peça interage com o campo magnético da bobina, ocorre uma alteração na resistência e na indutância dessa bobina e essa alteração pode ser visualizada em um plano de impedância, conforme mostra a Figura 2.18 (MACHADO, 2014).



Figura 2.18 - Plano de impedância (Fonte: MACHADO, 2014).

Quando uma sonda (bobina) é balanceada no ar, ou seja, tem a sua impedância ajustada no ar, e se aproxima de um material com propriedades magnéticas diferentes do ar, ocorrerá uma alteração nos componentes resistivos da impedância devido as correntes parasitas geradas no material ao retirar energia da bobina e também ocorrerá uma alteração na indutância da bobina devido a interação entre o campo magnético gerado pela corrente parasita e o campo magnético da bobina (AGUILAR, 2014).

Por exemplo, na Figura 2.18 - Plano de impedância (Fonte: MACHADO, 2014). a origem do sinal é o ponto sinalizado como “Ar”. Quando a sonda é aproximada de um material magnético como o aço, ocorre uma variação na indutância e na resistência da bobina receptora devido a alterações no campo magnético, movimentando diagrama de impedância. Ao se afastar do material, o diagrama de impedância volta a origem do balanceamento, sendo o “Ar”.

Sendo assim, quando há alguma descontinuidade no material que está sendo inspecionado, ocorre uma variação no fluxo da corrente parasita, que por consequência altera a resistência e o campo magnético da sonda, ocasionando assim uma alteração no plano de impedância.

### 2.5.7. LIMITAÇÕES DA CORRENTE PARASITA

Como em todo ensaio não destrutivo, o ensaio por correntes parasitas também possui algumas características intrínsecas ao ensaio, podendo-se, utilizando a Figura 2.19, citar:



Figura 2.19 - Vista qualitativa da intensidade e localização das correntes parasitas geradas por uma bobina  
(Fonte: SANTOS, 2013 apud MACHADO, 2014).

**Efeito *Lift-off*:** Esse efeito está relacionado com o distanciamento da sonda com a peça, e a alteração da distância entre sonda e peça gera alteração na impedância elétrica, podendo ser superior à variação gerada por uma descontinuidade e mascarando assim um possível defeito (BERNARDO, 2012)

**Efeito de Pele (película):** É um fenômeno onde a profundidade de penetração das correntes em um condutor diminui com o aumento da frequência da corrente, sendo que quanto maior for a frequência mais superficial e fino se torna o fluxo de corrente (ABNT NBR 8859:2005 apud MATAREZI, 2009).

**Condutividade elétrica:** O material deve ser obrigatoriamente condutor de corrente elétrica para que se consiga produzir correntes parasitas (MACHADO, 2014).

**Fator de enchimento (*fill factor*):** Segundo a ABNT NBR 8859 (2005), citada por Matarezi (2009), fator de enchimento é a relação entre a área da seção transversal da peça e a área da seção transversal efetiva da bobina envolvente primária.

**Efeito de borda (*edge effect*):** Ao se aproximar uma sonda na borda da peça, ocorre uma distorção na corrente induzida e por consequência no plano de impedância, podendo assim mascarar a indicação de alguma descontinuidade (BERNARDO, 2012)

**Acoplamento magnético:** O acoplamento entre a sonda e a peça é realizada por meio do campo eletromagnético induzido, esse acoplamento é definido pela distância sonda-peça (*lift off*) e o fator de enchimento (MATAREZI, 2009).

### 2.5.8. INSPEÇÃO EM TUBOS - SONDA

Quando se necessita inspecionar a integridade de uma tubulação com corrosões, trincas, erosão e perda de espessura, existem algumas técnicas capazes de realizar essa inspeção como os métodos de testes de corrente parasita (ECT - Eddy Current Test), campo remoto (RFT - Remote Field Test) e campo próximo (NFT - Near Field Test).

As sondas utilizadas em ensaios de tubulações são constituídas de bobinas encapsuladas nas dimensões do tubo a ser ensaiado. A sonda pode ter um arranjo absoluto, com somente uma

bobina, ou um arranjo diferencial, com duas bobinas. Com isso o campo magnético da bobina induz as correntes parasitas ao redor da tubulação de modo que toda a seção reta da amostra sob a bobina é inspecionada de uma só vez. A Figura 2.20 ilustra uma sonda tubular absoluta e uma diferencial.

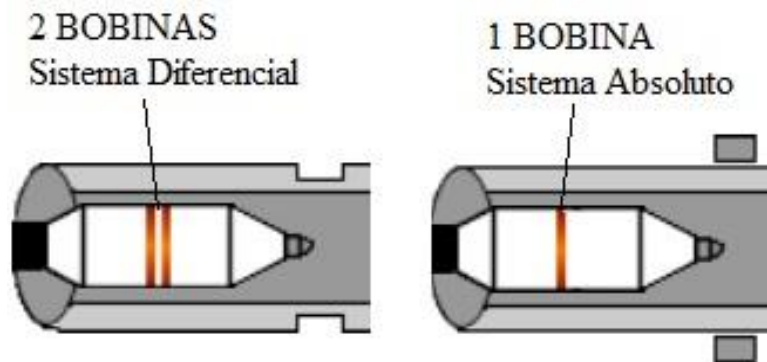


Figura 2.20 - Configurações de sondas para ensaios de correntes parasitas em tubulações (Fonte: adaptador de IOWA STATE UNIVERSITY, 2022).

Dizer que uma sonda é absoluta, significa dizer que ela possui somente uma bobina e que as alterações no campo magnético sofridas em decorrência da alteração da corrente parasita ocasionada pela presença de descontinuidades no tubo, são mensuradas por essa mesma bobina. Ou seja, o sinal a ser interpretado vem em decorrência das perturbações absolutas da impedância dessa única bobina. Já para o caso diferencial, tem-se duas bobinas atuando diretamente no material e, nesse caso, o sinal a ser interpretado será a diferença entre as perturbações absolutas da impedância de cada bobina, ocorrendo uma auto comparação. As duas configurações podem ser utilizadas na detecção de descontinuidades localizadas internamente ou externamente ao tubo. Sondas absolutas conseguem detectar falhas, medir condutividades, espessuras e são sensíveis ao *lift-off*, enquanto as sondas diferenciais são sensíveis a descontinuidades e insensíveis a variações de propriedades e de *lift-off* (IOWA STATE UNIVERSITY, 2022).

Os dois tipos de bobinas geram sinais que podem ser interpretados pela variação do plano de impedância, entretanto para uma sonda diferencial, o sinal a ser interpretado se assemelha com uma figura de *Lissajous*. Essas figuras são obtidas com sinais harmônicos em um osciloscópio onde tem-se dois canais de entrada, um horizontal e outro vertical, e as variáveis de amplitude, fase e frequência que podem ser alteradas e assim formar inúmeros desenhos. Uma sonda diferencial gera um sinal semelhante com uma componente na vertical e outra na horizontal (FORMIGONI, 2012).



A Figura 2.21 mostra um esquema de duas sondas, uma absoluta e outra diferencial, passando pelas mesmas discontinuidades em um tubo de ensaio. É possível verificar que o plano de impedância da sonda absoluta gera um sinal como se fosse uma linha, em decorrência da alteração da resistência e da indutância da bobina. Já para a sonda diferencial é possível verificar que cada discontinuidade forma um loop no formato de um ‘8’, seno que isso ocorre devido à diferença das perturbações de resistência e impedância de cada bobina. Conhecendo as características desses sinais como amplitude e fase, é possível obter informações sobre as discontinuidades (IOWA STATE UNIVERSITY, 2022).

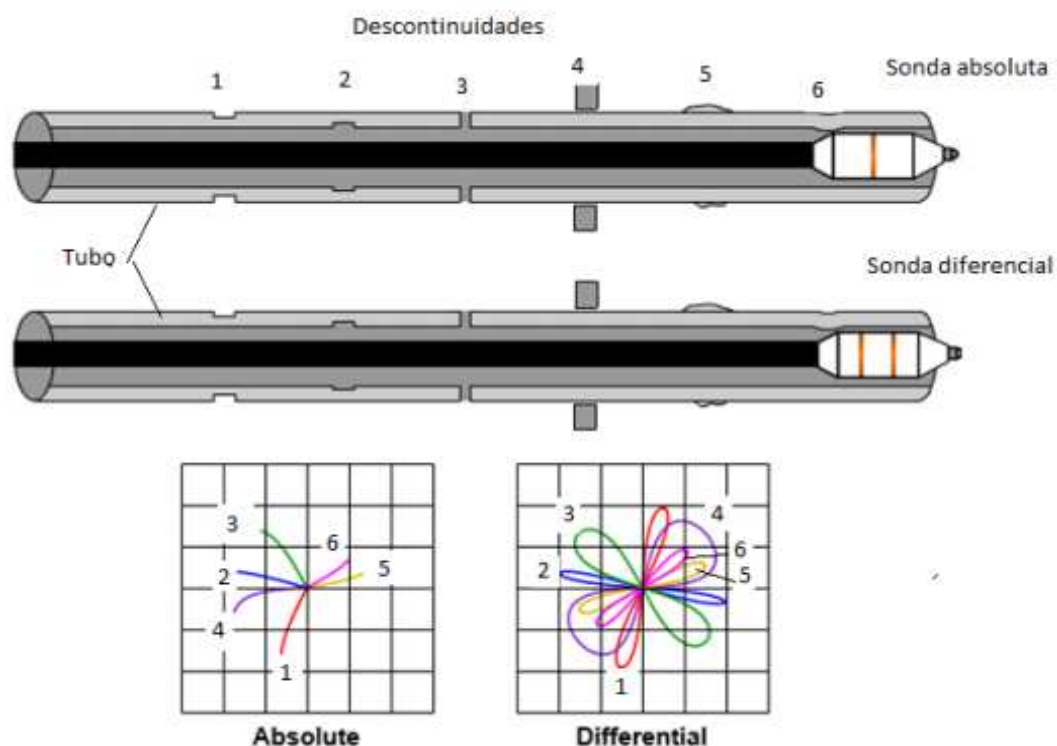


Figura 2.21 - Esquema de um ensaio em tubo pela técnica de corrente parasita com uma sonda absoluta e uma sonda diferencial (Fonte: Adaptado de IOWA STATE UNIVERSITY, 2022).

## 2.6. CAMPO REMOTO (REMOTE FIELD TESTING – RFT)

Remote Field Testing (RFT), traduzido como Ensaio por Campo Remoto, é uma técnica de ensaio não destrutiva que utiliza a tecnologia dos testes de correntes parasitas (ECT – Eddy Current Testing) e as características da região de campo remoto das correntes parasitas para detectar descontinuidades. Descoberta pelo departamento de desenvolvimento da Shell Company em 1950, a técnica era utilizada para detectar a variação da espessura de tubos de óleo com diâmetros entre 170 e 203 mm e espessuras de parede entre 9,5 e 12,7 mm. Entretanto,

devido às limitações da tecnologia da época, na dificuldade de interpretação dos resultados e na necessidade de profissionais treinados para a realização da técnica, a evolução dessa tecnologia ocorreu de forma lenta. Foi somente em 1978 que a empresa voltou a mostrar resultados em função das curvas de variações de amplitude e deslocamento de fase (HUANG E WANG, 2013).

Nos anos seguintes vários trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos. Em 1984, Schmidt propõe a hipótese do acoplamento de energia ao fenômeno do teste, sendo confirmada por Atherton em 1987. Em 1986 um trabalho em conjunto da American Gas Association e da Universidade de Nanquim de Aeronáutica e Astronáutica com métodos numéricos mostra a distribuição do campo eletromagnético na região do campo remoto. Houve também a tentativa de simular o RFT em 3D, mas novamente a tecnologia da época se torna um entrave para a evolução da técnica, e somente com a evolução da eletrônica nos anos 90 é que se consegue obter resultados satisfatórios na área da simulação numérica e na modelagem 3D (HUANG E WANG, 2013).

Atualmente o RFT é utilizado na inspeção de tubulação de materiais ferromagnéticos para detectar descontinuidades internas ou externas. Além disso, o ensaio oferece uma boa sensibilidade na detecção de descontinuidades volumétricas resultantes de corrosão, erosão, desgastes abrasivos e de outras formas de perda de massa (RAMOS, CARNEVAL, 2015).

### 2.6.1. TERMOS, DEFINIÇÕES E EQUIPAMENTO

Utilizando-se da ABNT NBR 15246 (2005) *Ensaio não destrutivo – Correntes parasitas – Ensaio por campo remoto em tubos ferromagnéticos instalados em trocadores de calor* e da ASTM (2019) *Standard Practice for In Situ Examination of Ferromagnetic Heat-Exchanger Tubes Using Remote Field Testing*, pode-se enunciar:

**Campo Remoto:** Campo eletromagnético induzido por um dispositivo excitador, que percorre através da parede do tubo e é detectado pelo dispositivo detector a uma distância de aproximadamente três vezes o diâmetro do tubo;

**Detector:** Uma ou mais bobinas ou elementos utilizados para detectar e/ou medir o campo magnético, também chamado de receptor;

**Diagrama de Fase e Amplitude:** Também conhecido como plano de impedância, é a representação em duas dimensões da voltagem de saída, sendo o ângulo a fase com relação ao sinal de referência e o raio a amplitude do sinal;

**Diagrama Fase e Amplitude versus Tempo (*Strip Chart*):** Diagrama que plota as coordenadas extraídas dos pontos no diagrama de fase e amplitude *versus* tempo ou posição axial;

**Ensaio por Campo Remoto:** Ensaio não destrutivo que mede a variação do campo remoto para detectar e caracterizar uma descontinuidade;

**Excitador:** dispositivo que gera um campo magnético variável no tempo, no caso, uma bobina energizada com uma corrente alternada;

**Ponto Nominal:** Ponto no diagrama de fase e amplitude (plano de impedância), que representa as características do tubo de referência;

**Ponto Zero:** Ponto no diagrama de fase e amplitude (plano de impedância) que representa a ausência de voltagem de saída;

**Sistema de Ensaio por Campo Remoto:** instrumentação eletrônica, sondas, componentes e cabos necessários para a execução do ensaio.

**Taxa de Amostragem:** taxa na qual os arquivos são digitalizados para apresentação na tela e gravação em pontos por segundo;

**Tubo de Referência:** Tubo ou seção de tubo com as mesmas especificações do tubo que será ensaiado, utilizado como referência na interpretação de resultados;

**Tubo Padrão:** Tubo com descontinuidades artificiais ou naturais, usada para calibração do sistema e caracterização da descontinuidade;

A Figura 2.22 mostra um diagrama de fase e amplitude (A e B) e o diagrama de fase e amplitude versus tempo (C), todos com um sinal de uma descontinuidade. Já a Figura 2.23 mostra um sistema de ensaio por RFT com o equipamento da *EDDYFI – Ectane 2*, sonda para ensaio RFT, um simulador de feixe tubular de tubos com reais e um computador com software da Magnifi.

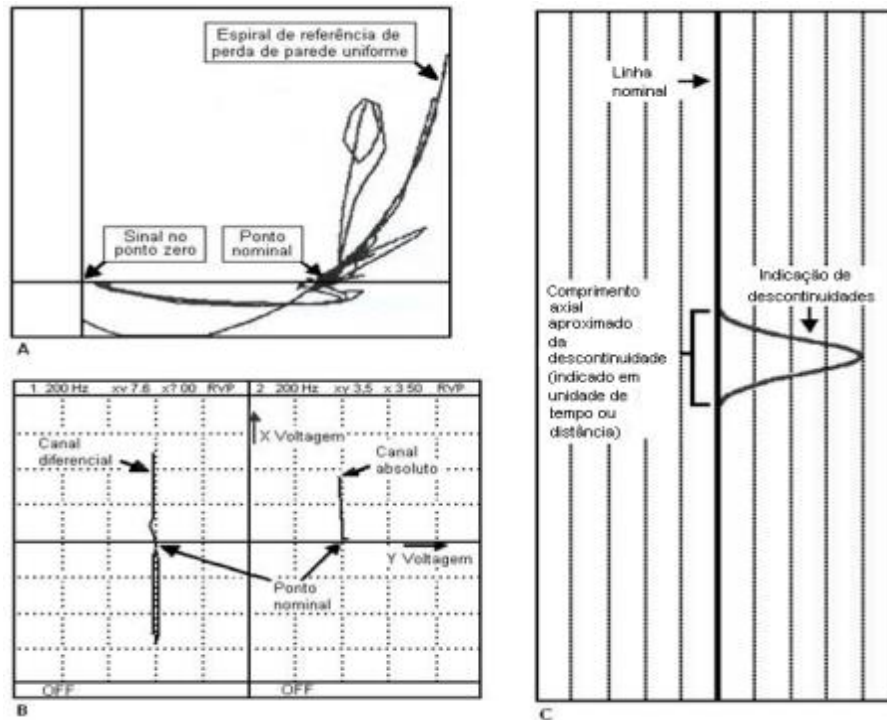


Figura 2.22 - Diagramas típicos fase-amplitude (A e B) e registro gráfico típico com descontinuidades (C) (Fonte: ABNT NBR 15246, 2005).



Figura 2.23 - Equipamento da EDDYFI – Ectane 2(1), computador com software da Magnifi (2), simulador de feixe tubular com tubos reais (3) e sonda para ensaio RFT(4) (Fonte: Autor da Obra).

## 2.6.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A técnica de RFT consiste na transmissão e recepção do campo magnético percorrido através da parede do tubo ensaiado. Uma sonda RFT possui uma bobina excitadora que deve ser energizada com uma corrente alternada de baixa frequência, e essa bobina irá gerar o campo

magnético que se propagará axialmente pelo tubo até ser recebido por uma (absoluta) ou duas (diferenciais) bobinas receptoras que devem estar a uma distância maior que duas vezes o diâmetro externo do tubo ensaiado (AL-QADEEB, 2005). A Figura 2.24 ilustra uma sonda de RFT, e vale lembrar que a quantidade de bobina excitadoras e receptoras pode variar conforme a aplicação almejada e o fabricante.

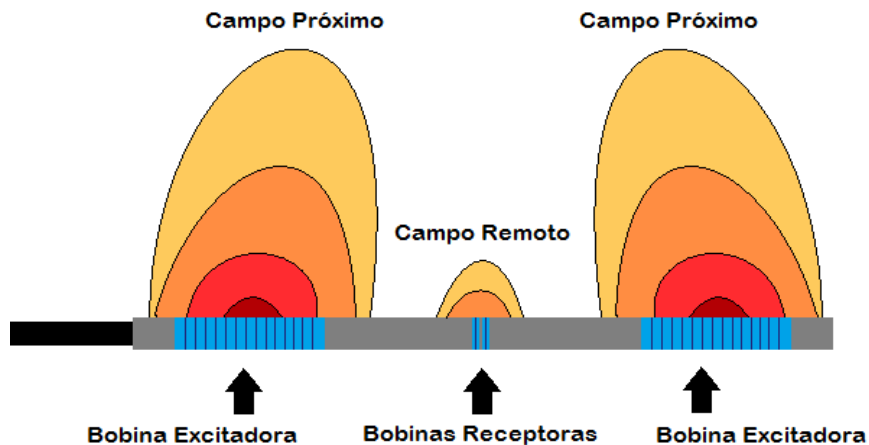


Figura 2.24 - Esquema de uma sonda para RFT com duas bobinas excitadoras e duas receptoras (Fonte: Autor da Obra).

Quando as bobinas excitadoras são energizadas por uma corrente alternada com baixa frequência dois campos magnéticos são produzidos, um próximo à bobina excitadora chamado de campo próximo ou campo indireto que é facilmente atenuado pela distância e outro chamado de campo remoto ou campo indireto que se propaga pelo tubo e está distante da bobina excitadora (TUBE INSPECTION, 2006).

O campo magnético gerado pela bobina induz correntes parasitas circunferenciais fortes que se estendem axialmente, bem como radialmente na parede do tubo. Essa corrente parasita produz o seu próprio campo magnético que se opõe ao campo magnético da bobina, mas devido à resistência na parede do tubo e ao acoplamento indutivo imperfeito, o campo magnético das correntes parasitas não contrabalança totalmente o campo magnético excitante, tornando-se presente e se estendendo ao longo do eixo do tubo. A interação entre os dois campos é bastante complexa, mas o fator importante é que o campo magnético da bobina excitadora é dominante perto da bobina excitadora (campo próximo) e o campo da corrente parasita se torna dominante a uma distância de pelo menos duas vezes o diâmetro externo do tubo da bobina excitadora. A Figura 2.25 mostra esquematicamente por elementos finitos os campos magnéticos gerados e o posicionamento das bobinas.

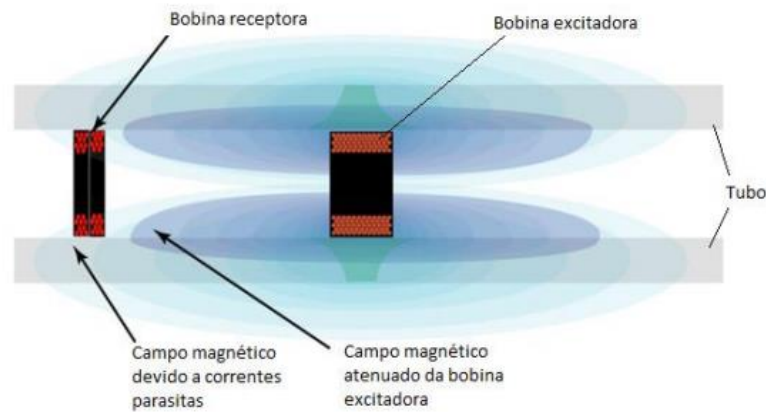


Figura 2.25 - Elementos finitos dos campos magnéticos gerados e o posicionamento das bobinas (Fonte: Adaptado de RUSSELL NDE SYSTEMS INC, 2022).

Como pode ser visto pela Figura 2.25, o campo magnético percorre a parede do tubo da bobina excitadora para a bobina receptora, e, quando ocorre uma diminuição da espessura da parede ou há uma descontinuidade no caminho, o sinal recebido chega com um atraso menor e uma atenuação menor que a calibrada. Isso resulta em uma maior fase e maior amplitude do sinal. Utilizando o plano de impedância pode-se traçar a fase e a amplitude conforme traciona-se a sonda pelo tubo e com base em padrões conhecidos detectar e dimensionar a perda do metal (AL-QADEEB, 2005). A Figura 2.26 ilustra uma mudança no fluxo magnético detectado pela bobina receptora e a Figura 2.27 ilustra de maneira mais ampla as bobinas excitadoras e receptoras, as linhas dos campos magnéticos próximo e remoto e o sinal de respostas absoluto e diferencial.

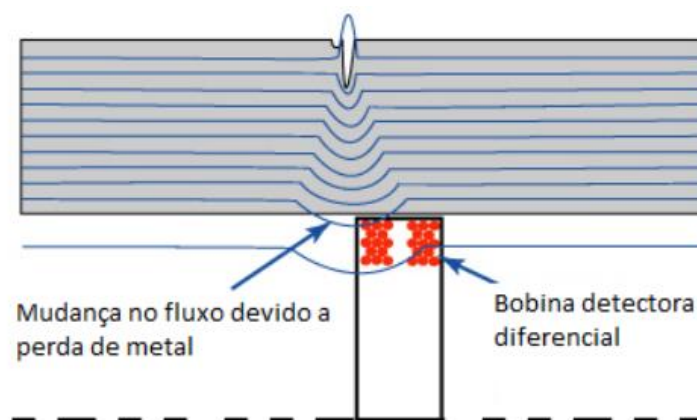


Figura 2.26 - Esquema apresentado a mudança de fluxo devido à perda de metal em um tubo (Fonte: Adaptado de NDE-ED, 2019).

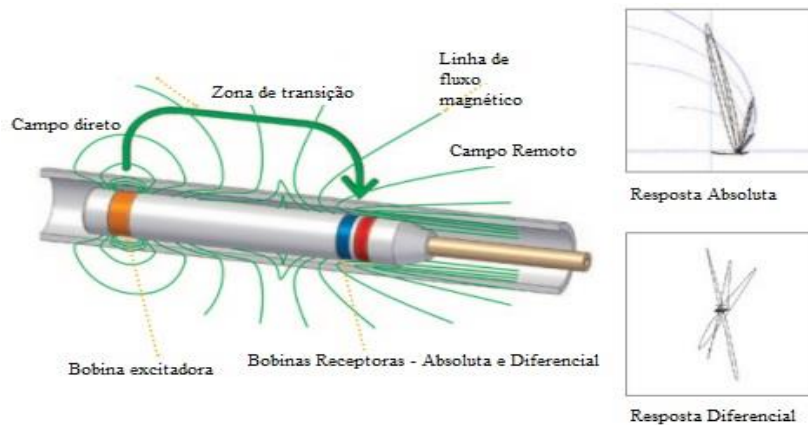


Figura 2.27 - Ilustração de uma sonda com o campo magnético e as respostas no plano de impedância (Fonte: Adaptado de TUBE INSPECTION, 2006).

O campo magnético produzido pela bobina excitadora se propaga axialmente ao longo de duas direções opostas e em cada direção com dois caminhos de acoplamento magnético diferentes. O acoplamento magnético aqui referido é devido a interação do campo magnético induzido pela bobina excitadora e pela bobina receptora, e esses dois caminhos produzem um acoplamento direto e um acoplamento indireto. O acoplamento direto ocorre dentro do tubo e devido à forte permeabilidade da parede da tubulação ferromagnética e das correntes parasitas circunferenciais induzidas na parede interna do tubo essa energia se atenua de maneira exponencial. Já o acoplamento indireto descreve que o campo magnético excita a corrente parasita circunferencial, e a energia magnética se difunde para fora da tubulação e se propaga ao longo da tubulação. A energia magnética gera novamente a corrente parasita na parede do tubo, penetra na parede do tubo de forma axial e chega à bobina de detecção. Esse caminho é chamado de caminho indireto de acoplamento de energia (HUANG e WANG, 2013). A Figura 2.28 ilustra a posição do acoplamento magnético direto e indireto entre as bobinas do RFT.

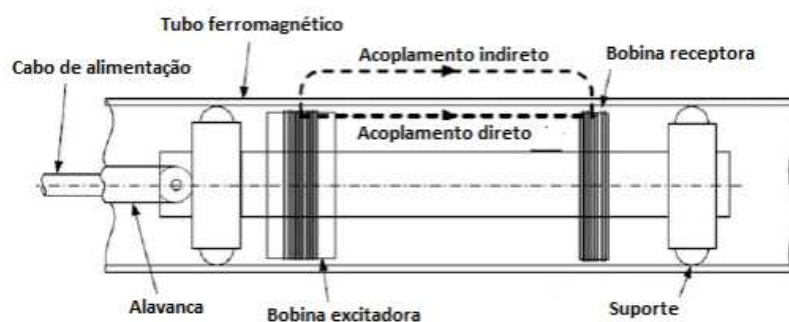


Figura 2.28 - Acoplamento magnético direto e indireto entre as bobinas do RFT (Fonte: Adaptado de Huang e Wang, 2013).

A energia diretamente acoplada domina o tubo na região da bobina excitadora e diminui rapidamente ao longo do eixo axial do tubo, e essa região dominante é chamada de campo próximo. Já com a energia indiretamente acoplada ocorre o inverso, e quanto mais se distancia da bobina excitadora mais dominante ela se torna, sendo essa região chamada de campo remoto. Existe também a região de transição, que é uma determinada distância entre as bobinas excitadoras e receptoras no eixo axial do tubo que define o limite entre os dois campos. Essa posição no tubo é determinada por parâmetros tais como a espessura da parede do tubo, sua permeabilidade magnética, condutividade elétrica e a frequência de excitação, e esta posição é usualmente entre 1 e 2 diâmetros da bobina de excitação (RUSSELL; MACKINTOSH; A SHATAT, 2004).

A Figura 2.29 mostra a variação da amplitude interna e externa dos campos magnéticos em função da distância. É possível verificar que a 1 diâmetro de distância (zona de transição) ocorre a inversão de dominância entre os campos e a 2 diâmetros de distância um decaimento constante dos campos com o campo remoto dominante. Nota-se também que a bobina receptora se encontra entre 2 a 3 diâmetros de distância da bobina excitadora, ou seja, local onde o campo remoto é dominante.

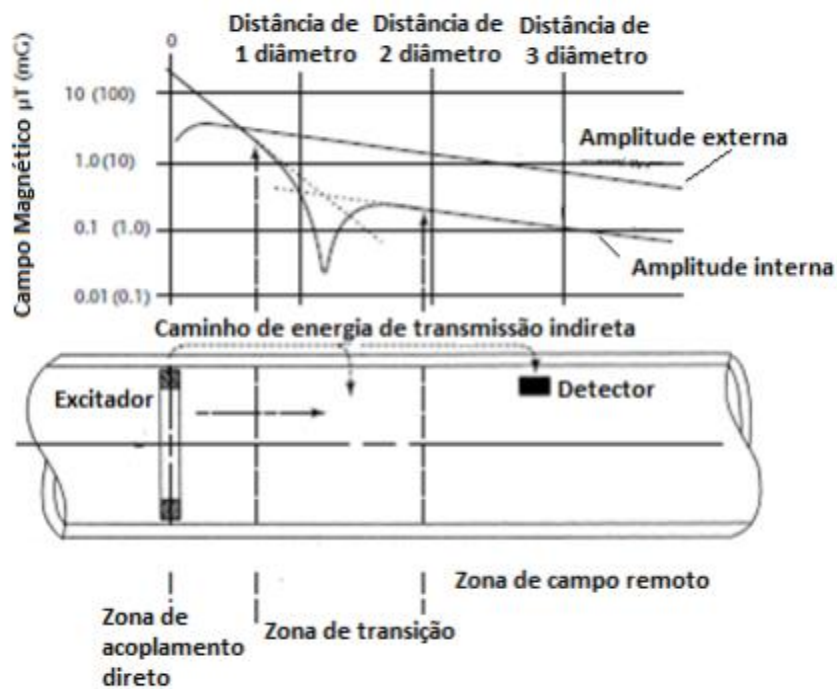


Figura 2.29 - Amplitude do campo magnético em função da distância da bobina excitadora (Adaptado de RUSSELL; MACKINTOSH; A SHATAT, 2004)



Outro parâmetro que sofre uma variação acentuada na região de transição é a fase do sinal detectado. A Figura 2.30 mostra que a fase sofre uma alteração significativa na região de transição e varia linearmente com a distância axial da bobina receptora, podendo-se notar também que a energia magnética no campo remoto vem principalmente do acoplamento indireto. Ou seja, a energia magnética começa a partir da bobina de excitação, penetra na parede do tubo duas vezes e carrega a informação estrutural, por exemplo descontinuidades da parede do tubo, e essa informação é a base da inspeção RFT (NDE-ED, 2019)

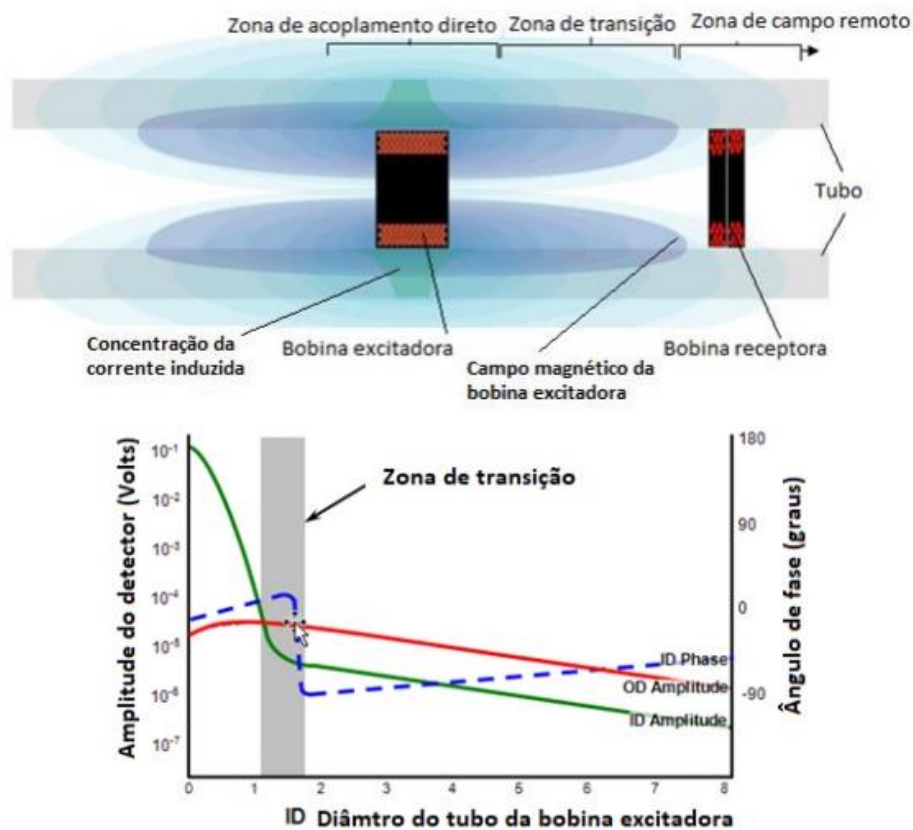


Figura 2.30 - Ilustração das zonas de campo próximo, transição e remoto com o diagrama da variação da amplitude e fase do sinal detectado em relação à distância da bobina excitadora (Fonte: NDE-ED, 2019).

Utilizando da Figura 2.30 pode-se interpretar:

**Zona de Acoplamento Direto:** Região do campo próximo, é o local onde o campo magnético da bobina excitadora está interagindo com a parede do tubo, produzindo um campo concentrado de correntes induzidas. Esta região não contribui para a inspeção do RFT devido a problemas com níveis de ruído bastante altos e ao intenso campo magnético variável da bobina excitadora.

**Zona de Transição:** É a região entre o acoplamento direto e indireto. Nesta zona existe uma grande interação entre o campo magnético da bobina excitadora e o campo induzido pelas correntes parasitas. A interação dos dois campos opostos é mais forte perto do diâmetro interno do tubo (ID) e bastante sutil no diâmetro externo do tubo (OD). A intensidade da interação que ocorre entre o campo da bobina excitadora e o campo induzido pela corrente parasita nessa região tende a mudar abruptamente no diâmetro interno (ID) devido à interação dos campos com diferentes características direcionais. Verifica-se uma variação abrupta na fase do sinal recebido em função da distância entre as bobinas. Quando as duas bobinas são diretamente acopladas e não há interferência de um campo secundário, suas correntes estão em fase, como visto na posição zero. Na zona de transição, pode se observar que a fase se desloca rapidamente, indicando a localização em que o campo magnético das correntes parasitas se torna dominante e o início do campo remoto, após a zona de transição.

**Zona do Campo Remoto:** A zona do campo remoto é a região onde o acoplamento direto entre as bobinas excitadora e a receptora é insignificante. O acoplamento ocorre indiretamente através da geração de correntes parasitas e seu campo magnético resultante. A zona de campo remoto começa a ocorrer a aproximadamente dois diâmetros do tubo da bobina excitadora. A amplitude da intensidade do campo magnético no diâmetro externo (OD) realmente excede a do diâmetro interno (ID) após uma distância axial de aproximadamente 2 vezes o diâmetro do tubo. Isso torna o RFT sensível a alterações no material que ocorrem no diâmetro externo, bem como no diâmetro interno do tubo.

### 2.6.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

O Ensaio por RFT pode ser utilizado em qualquer especificação de material de aço carbono convencional, incluindo tubos de trocadores de calor que operam com fluidos fósseis operando em baixas frequências de trabalho, 40 a 500 Hz, com uma velocidade de ensaio ou velocidade de tracionamento de 150 mm/s. Dependendo do acesso ao equipamento, das configurações, da quantidade de descontinuidades e outros fatores que influenciam o teste, duas pessoas conseguem ensaiar de 200 a 500 tubos em uma jornada de 8 horas de trabalho com tubos de 9 metros de comprimento (RUSSELL; MACKINTOSH; A SHATAT, 2004).

A acurácia, ou seja, o quão próximo o valor medido pelo ensaio está do valor real para a detecção de perda de espessura generalizada em tubos retos é em torno de 10 % da espessura da parede, já para descontinuidades pontuais ou que se encontram em tubos curvos a acurácia é de cerca de 20 %, isso devido a mudanças nas propriedades magnéticas do tubo e do efeito

escudo de objetos externos. A técnica é também igualmente sensível para descontinuidades localizadas internamente e externamente ao tubo, entretanto não é possível distinguir se a descontinuidade é externa ou interna. A técnica não exige alto fator de preenchimento (*fill factor*) mas deve-se lembrar que um fator de preenchimento baixo irá diminuir a sensibilidade para pequenas descontinuidades, e a centralização da sonda também não é um fator relevante como em outras técnicas como é no caso do ensaio por IRIS (RUSSELL; MACKINTOSH; A SHATAT, 2004).

De acordo com a fabricante de equipamentos *EDDYFI* (2022), o Ensaio por RFT é uma técnica aplicada a tubos ferromagnéticos aletados ou não, possui excelente capacidade de detecção de corrosão interna e externa com capacidade de dimensionamento da corrosão, consegue também detectar com limitações, inclusive dimensionais, descontinuidades pontuais (pitting) e trincas axiais, entretanto é incapaz de detectar trincas circunferenciais e de obter dados químico-físicos dos tubos.

#### **2.6.4. LIMITAÇÕES DA TÉCNICA RFT**

Ramos e Carneval (2015) enumeram as limitações dessa técnica com base em suas principais características: ela somente inspeciona materiais ferromagnéticos; não detecta danos nas regiões dos espelhos e chicanas dos feixes tubulares; detecta com melhor acurácia descontinuidades grandes; necessita de tubo padrão para calibração que varia para cada equipamento e que deve ser produzido segundo especificações da ASTM; a interpretação do sinal exige experiência do operador; não detecta trincas circunferenciais e não diferencia a posição da descontinuidade em interna ou externa.

A ABNT NBR 15246 (2005) cita também várias interferências que podem ocorrer durante o ensaio, como variações nas propriedades dos materiais, impurezas, segregações, variações na permeabilidade, tensões residuais e magnetismo residual nos tubos. Objetos ferromagnéticos e condutores próximos ou encostados ao tubo podem reduzir a sensibilidade e a precisão na caracterização da descontinuidade na sua proximidade. Tubos vizinhos com espaçamento muito próximo ou mesmo encostando no tubo ensaiado também podem gerar indicações semelhantes a de uma descontinuidade. Efeitos da geometria dos tubos como mudanças da espessura da parede devido ao processo de fabricação pode produzir um sinal semelhante a de uma perda de espessura generalizada, e o operador deve estar atento às indicações de ruído, saturação ou distorção de sinal, e às demais características do instrumento que está sendo usado.

### 2.6.5. CALIBRAÇÃO

Como mencionado, o ensaio por RFT necessita de calibração assim como vários outros ensaios não destrutivos. É a calibração que estabelece os critérios de aceitação e rejeição das descontinuidades encontradas durante o ensaio, pois a calibração fornece ao sistema os parâmetros que deverão ser utilizados como comparativo entre os sinais reais do tubo inspecionado com o sinal de um tubo padrão com descontinuidades fornecidas (SOARES, 2005).

A inspeção de tubos por correntes induzidas requer a utilização de sistemas de testes que mostrem os resultados pelo sistema vetor-ponto, representado pelo diagrama de fase e amplitude. Neste caso, a impedância da sonda de teste é continuamente apresentada na tela de um equipamento operando em modo XY, que representa o plano complexo de impedâncias. O Artigo 17 do código ASME (2019), em sua seção V, apresenta os critérios de caracterização por análise de fase das figuras de Lissajous, resultantes de indicações geradas pelas descontinuidades encontradas. Todo o processo é baseado em comparações entre as inclinações reais, referentes a descontinuidades detectadas durante a inspeção, com aquelas obtidas na etapa de calibração, a partir de descontinuidades de referência.

A Figura 2.31 mostra esquematicamente um padrão de calibração contendo descontinuidades de referência conforme ASTM SE-2096/SE-2096M (2019). Este tubo deve ter as características físicas, químicas e metalúrgicas próximas daqueles que serão inspecionados e serve para calibrar o sistema RFT, sendo importante frisar que a espessura da parede do tubo padrão de calibração deve ser igual à espessura de parede do tubo que será inspecionado.

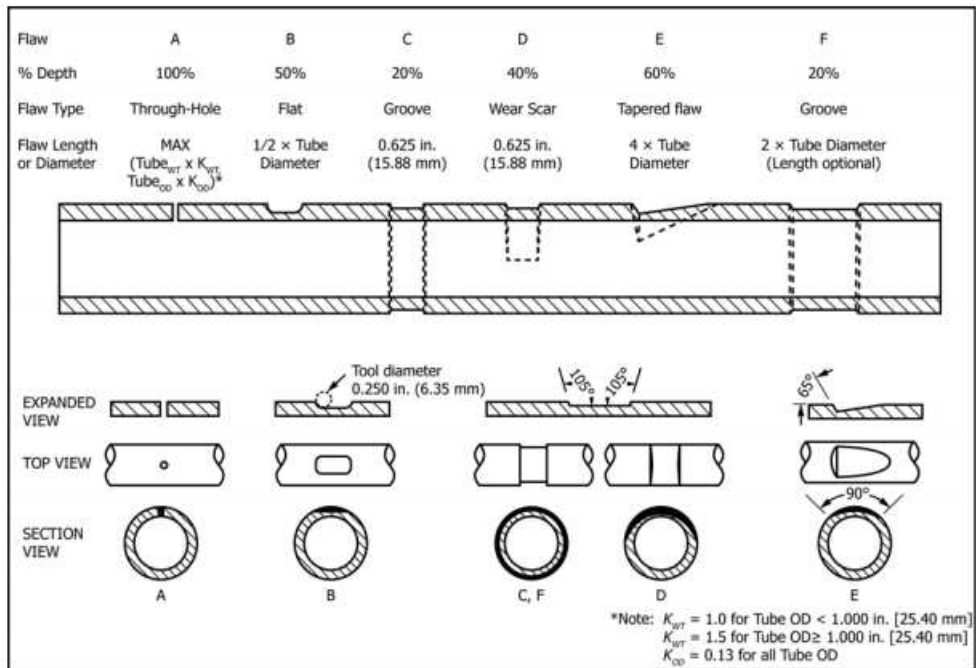


Figura 2.31 - Desenho técnico de um tubo padrão para calibração do sistema RFT (Fonte: ASTM, 2019).

Entretanto, existe mais de uma maneira de selecionar as descontinuidades presentes no tubo padrão. A calibração serve para informar ao sistema do RFT qual sinal será reproduzido no diagrama de fase e amplitude e utilizando os dados desse sinal desenvolver uma curva de calibração, ou seja, o tipo de mecanismo de danos que se espera encontrar também deve ser cuidadosamente considerado ao desenvolver ou selecionar um padrão de referência. Para obter dados quantitativos precisos, as condições de descontinuidade artificial geralmente são usadas nos padrões que se aproximam das condições que podem ser encontradas no feixe de tubulação.

A fabricante de equipamentos *EDDYFI* (2019) informa em seu manual do equipamento *Ectane 2*, que o tubo padrão para caracterização de descontinuidade do sistema, conforme Figura 2. 32, deve conter:

- A. 1 entalhe externo com 60 % de profundidade;
- B. 1 entalhe externo com 40 % de profundidade;
- C. 1 suporte externo de metal simulando a chicana (Placa de Suporte);
- D. 4 furos de fundo plano com 20 % de profundidade e distribuídos radialmente a 90°;
- E. 1 furo de fundo plano com 60 % de profundidade;
- F. 1 furo passante;

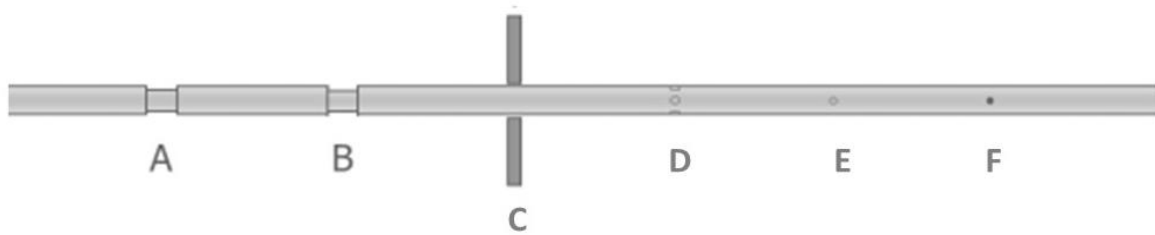


Figura 2. 32 - Tubo padrão para caracterização de descontinuidade (Fonte: EDDYFI, 2022)

No APÊNDICE A encontra-se o desenho técnico desse tubo padrão, sendo que para cada furo foi considerado um diâmetro de 6 mm.

Para realizar a calibração do sistema RFT deve-se seguir uma série de orientações que se encontram no manual do fabricante. Nesta pesquisa utilizou-se do equipamento ECTANE 2 da *EDDYFI* (2019) juntamente com os requerimentos do Artigo 17 do código ASME (2019), em sua seção V e os requerimentos sugeridos pela norma ASTM SE-2096/SE-2096M (2019).

Para que a calibração do sistema esteja de acordo, os parâmetros de calibração devem ser:

No canal Diferencial:

- Para o furo passante: Fase de 90° e amplitude de 1 Volt;
- Furos de 20 %: Defasados entre 60° e 70° com relação ao furo passante;
- Placa de suporte: sinal traçado na transversal entre o segundo e quarto quadrante do plano de voltagem.

No canal Absoluto:

- Placa de suporte: Sinal com amplitude de 1 volt, paralelo ao eixo horizontal e com origem no ponto nominal teórico de operação (ponto [1, 0]);
- Ranhuras: Fase dos sinais defasados cerca de 1° para cada 1 % de diferença na perda de espessura.

#### 2.6.6. TIPOS DE SONDAS

Não existe uma vasta variedade de sondas para a realização do ensaio por RFT, sendo que a principal diferença entre elas está na quantidade e na distribuição das bobinas. Basicamente uma sonda deve ter uma bobina excitadora, que é a bobina que será energizada com a corrente alternada e irá gerar o campo magnético, e uma bobina receptora, que é a bobina que se situa a pelo menos 2 vezes o diâmetro do tubo axialmente e recebe o campo magnético emitido pelas correntes induzidas (RUSSELL; MACKINTOSH; A SHATAT, 2004). Sendo

assim, a fabricação da sonda está condicionada ao fabricante, que pode variar na quantidade de bobinas excitadoras e receptoras e variar de forma consciente a distância entre elas, respeitando a zona de campo remoto.

Devido a esses fatores e à baixa quantidade de fabricantes de sonda no mercado, pode-se dividir os tipos de sonda em relação a quantidade de bobinas excitadoras, segundo a fabricante de equipamentos Olympus® (2022) como:

- **Single Exciter/Single Driver:** Sonda mais simples de uso geral, possui uma boa resposta para defeitos de perda de parede e erosão, possui o canal absoluto e o diferencial e é cega para descontinuidades pontuais próximas à chicana. Ela possui uma bobina excitadora e duas bobinas receptoras, sendo que a subtração entre os sinais das bobinas receptoras produz o canal diferencial (Figura 2.33);
- **Dual Exciter/Dual Driver:** Sonda otimizada para o canal diferencial, possui melhor respostas para descontinuidades pontuais, possui os canais absoluto e diferencial, e essa sonda possui duas bobinas excitadoras localizadas nas extremidades e duas bobinas receptoras centrais (Figura 2.34);
- **Dual Pickup:** Possui 4 bobinas receptoras, um par por extremidade e uma bobina excitadora, combina as vantagens das sondas single e dual exciter, e como possui mais canais a análise do sinal é mais complexa e exige operadores mais experientes (Figura 2.35).

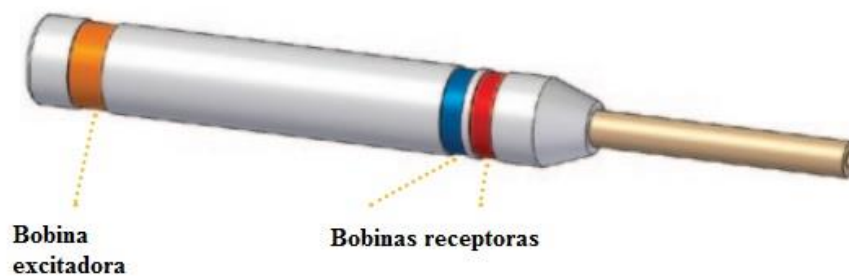


Figura 2.33 - Sonda Single Driver (Fonte: Adaptado de Olympus®, 2022)

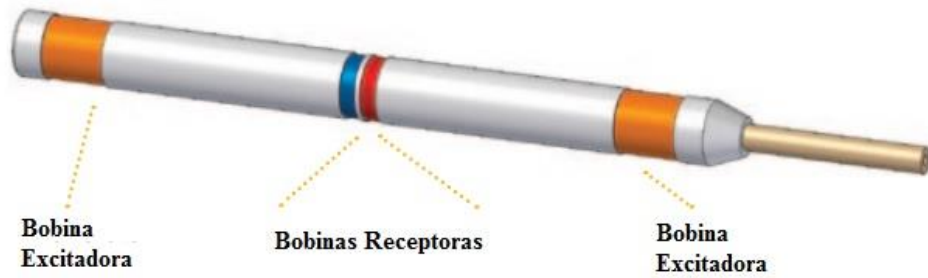


Figura 2.34 - Sonda Dual Driver (Fonte: Adaptado de Olympus®, 2022)

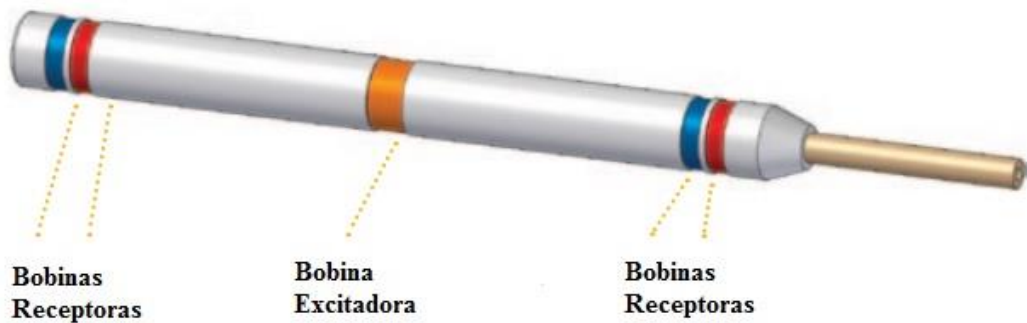


Figura 2.35 - Sonda Dual Pickup (Fonte: Adaptado de Olympus®, 2022)

Segundo a ABNT NBR 15246 (2005), uma sonda deve ter:

- O maior fator de enchimento possível, desde que permita a passagem da sonda pelo tubo, passando por incrustações, amassamentos, mudanças de diâmetros e outras obstruções e mantendo-a o mais centralizada possível;
- Deve ser selecionada conforme as discontinuidades a serem detectadas e conforme as dimensões do tubo;
- Detectores absolutos são normalmente utilizados para caracterizar e localizar perda de metal gradual e de grande volume. Já detectores diferenciais, são normalmente utilizados para caracterizar e localizar perda de metal gradual e grande volume, assim como para maximizar a resposta de discontinuidades pontuais e mudanças abruptas ao longo do comprimento do tubo. Detectores ordenados utilizam uma configuração de múltiplos elementos sensores, sendo cada elemento sensível a uma determinada seção circunferencial do tubo. Os elementos devem ser orientados com seus eixos alinhados axialmente ou radialmente em relação ao tubo;



- A resposta dos detectores representa uma média das respostas de todos os defeitos contidos em uma determinada área;
- As sondas podem ter múltiplos excitadores e detectores em várias configurações. Essas configurações podem reduzir interferências de placas de suporte e outros objetos condutores.

A Figura 2.36 exemplifica o texto acima:

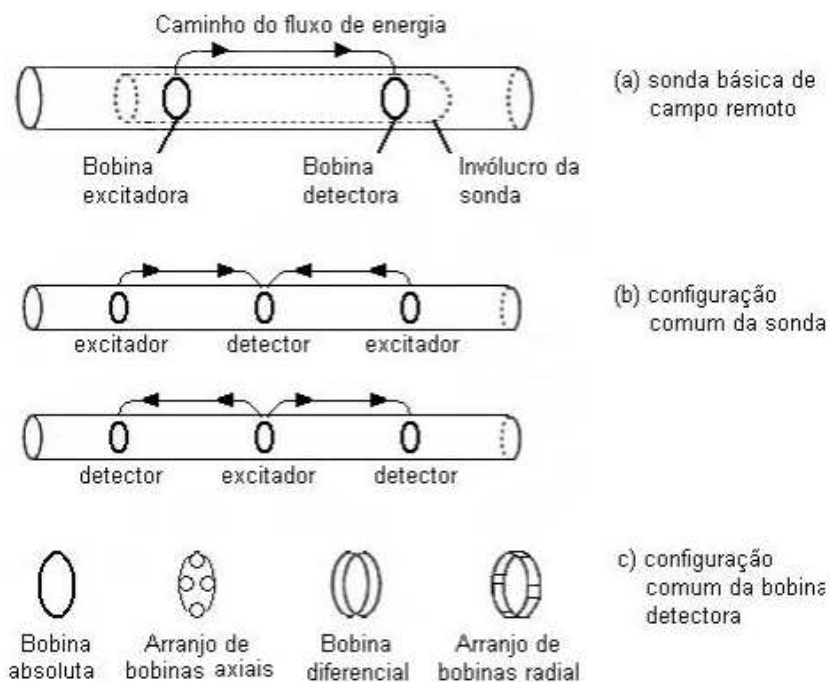


Figura 2.36 - Configurações de sondas para o Ensaio por RFT (Fonte: ABNT NBR 15246, 2005).

### 2.6.7. SINAL RESPOSTA DO RFT

O ensaio por RFT possui um sinal resposta em diagrama de tensão no tempo, conhecido como *strip chart*, e duas outras maneiras de visualizações de relação entre amplitude em volts e ângulo de fase em graus, conhecidos como plano de impedância, onde um diagrama mostra o sinal resposta do canal Absoluto, também conhecido como plano de tensão, e o outro diagrama mostra o sinal resposta do canal Diferencial, conhecido como *Lissajous*.

É possível retirar as seguintes informações desses sinais: porcentagem de perda de espessura da descontinuidade (S %); o ângulo de fase ( $^{\circ}$ ); a amplitude (V); extensão circunferencial (Ext.) e longitudinal (L) da descontinuidade e a sua conicidade (T); sendo que

essas informações estão indicadas na Figura 2.37, que mostra um sinal resposta típico do ensaio por RFT.

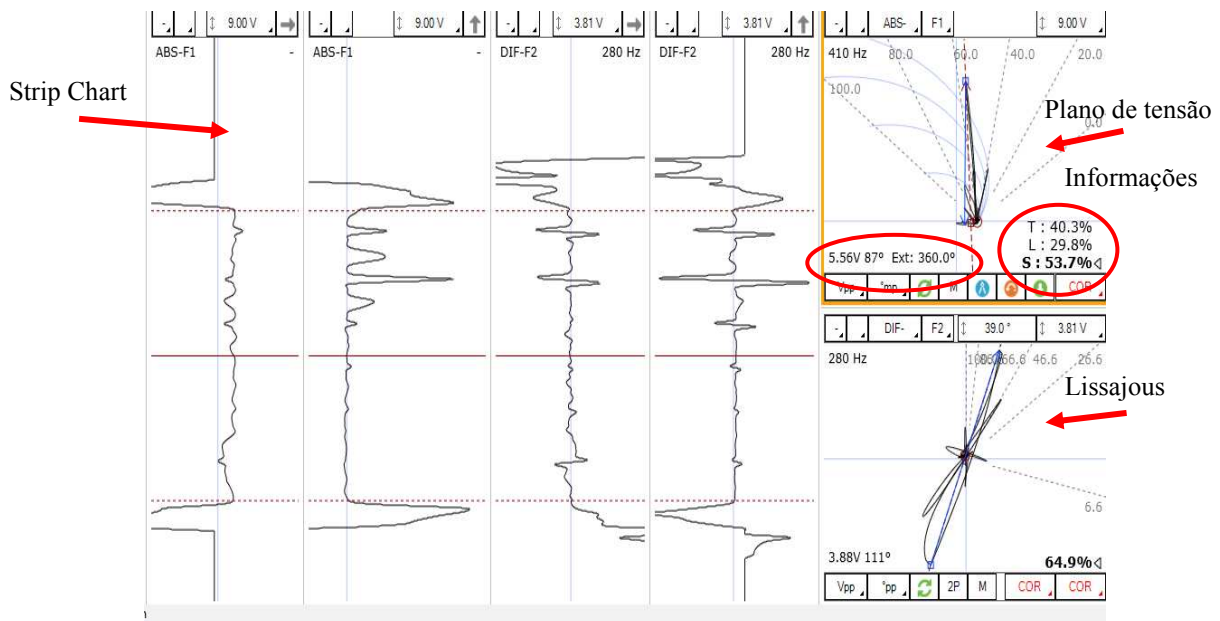


Figura 2.37 - Sinal resposta do ensaio por RFT, software MAGNIFI 4.6R13 da EDDYFI (Fonte: Autor da Obra).

Essa configuração de informação está vinculada ao software e equipamentos utilizados, neste caso o software utilizado é o MAGNIFI 4.6R13<sup>®</sup> da fabricante *EDDYFI*. Assim, outros equipamentos e softwares poderão informar parâmetros diferentes.

## 2.7. ESTUDOS COM O RFT

Existem poucos estudos sobre a aplicabilidade do ensaio por RFT em feixes tubulares, principalmente quando se trata de comparar o RFT com outras técnicas, sendo eletromagnéticas ou não, como no caso do IRIS, que é uma técnica por ultrassom.

Entretanto, existem várias maneiras de se comparar duas ou mais técnicas. Uma delas é considerando o tipo de material que a técnica pode ser usada. Técnicas como o Campo Remoto (RFT), Campo Próximo (NFT ou NFA caso seja Array) ou mesmo a técnica por Corrente Parasita com Saturação Parcial (PSEC) não podem ser utilizadas em materiais não ferromagnéticos por necessitarem da formação de um campo eletromagnético, ao contrário do IRIS, que pode ser utilizado em todos os tipos de materiais e inclusive em tubos aletados. A Tabela 2.2 mostra um comparativo realizado pela fabricante de equipamentos EDDYFI entre as principais técnicas utilizadas para a inspeção de feixes tubulares considerando o tipo de material do tubo e se possui aletas ou não. As técnicas comparadas foram: ECT – Eddy Current

Testing; ECA – Eddy Current Array; IRIS – Internal Rotary Inspection System; RFT – Remote Field Testing; NFT – Near Field Testing; NFA – Near Field Array; MFL – Magnaflux Field Leakage; SPEC – Saturation Partial Eddy Current.

Tabela 2.2- Comparativo da aplicabilidade de técnicas END em tubos em função do tipo de material de construção

Material	Tipo	ECT	ECA	IRIS	RFT	NFT	NFA	MFL	SPEC
Não Ferromagnético	Tubo	P	P	P	NP	NP	NP	NP	NP
	Tubo Aletado	P	P	P	NP	NP	NP	NP	NP
Baixo	Tubo	NP	NP	P	P	P	P	P	P
Ferromagnético	Tubo Aletado	NP	NP	P	P	P	P	P	P
	Tubo	NP	NP	P	P	P	P	P	P
Ferromagnético	Tubo Aletado	NP	NP	AL	P	P	P	P	P
	Integralmente								
	Tubo Aletado de Alumínio	NP	NP	P	NP	P	P	P	P

P – Permitido; NP – Não Permitido; AL- Aceitável, porém limitado.

Fonte (Adaptado de EDDYFI, 2022)

Como pode ser verificado na Tabela 2.2, a técnica que mais possui liberdade de ensaio considerando o tipo de material do tubo a ser ensaiado é o IRIS. Essa técnica trabalha com emissão e recepção de ondas ultrassônicas, ou seja, o tipo de material a ser ensaiado não é um empecilho para a técnica, desde que haja um acoplante entre a sonda e o material, no caso água, para que a onda ultrassônica possa ser transmitida. Já o RFT necessita obrigatoriamente que o material a ser inspecionado seja eletromagnético.

A EDDYFI realizou outros comparativos entre técnicas de ensaio END para tubos de feixes tubulares. A Tabela 2.3 mostra um comparativo entre as técnicas relacionando a capacidade de detecção de acordo com o tipo de defeito na tubulação. Já a Tabela 2.4 mostra um comparativo entre as técnicas relacionando a capacidade de dimensionamento desse defeito na tubulação.

Tabela 2.3 - Comparativo entre técnicas END relacionando a capacidade de detecção de defeito de acordo com o tipo de defeito.

Defeito	ECT	ECA	IRIS	RFT	NFT	NFA	MFL	SPEC
Pitting Interno	P	P	P	AL	AL	P	P	P
Pitting Externo	P	P	P	AL		NP	AL	AL
Trinca Axial	AL	P	NP	AL	AL	AL	NP	AL
Trinca Circunferencial	AL	P	NP	NP	NP	AL	AL	AL
Corrosão Interna	P	P	P	P	P	P	P	P
Corrosão Externa	P	P	P	P	NP	NP	AL	AL
Dados do tubo	AL	P	P	AL	NP	NP	AL	AL

P – Permitido; NP – Não Permitido; AL- Aceitável, porém limitado.

Fonte (Adaptado de EDDYFI, 2022)

Como pode ser verificado pela Tabela 2.3, a técnica por RFT consegue detectar de maneira aceitável, porém com limitações, os pites externos e internos ao tubo, trincas axiais e algumas informações do tubo, mas não detecta trincas circunferenciais. Entretanto, consegue detectar corrosões internas e externas ao tubo. Já o IRIS consegue detectar pites externos e internos ao tubo, as corrosões internas e externas, mas não consegue detectar as trincas axiais e circunferenciais.

Na Tabela 2.4 verifica-se que em questões de dimensionamento, o RFT consegue com melhor precisão dimensionar somente as corrosões, internas e externas, e de maneira menos precisa dimensionar pites, enquanto que o IRIS consegue de forma precisa dimensionar pites e corrosões. As trincas possuem problemas dimensionais nas duas técnicas.

Algo a mais que pode ser verificado é a incapacidade das demais técnicas em dimensionar os defeitos, sendo o Eddy Current Array (ECA) a melhor técnica em questões de detecção e dimensionamento, mas essa técnica não pode ser usada em materiais ferromagnéticos, que é o material do feixe tubular estudado nesse trabalho.

Tabela 2.4 - Comparativo entre técnicas END relacionando a capacidade de dimensionamento do defeito.

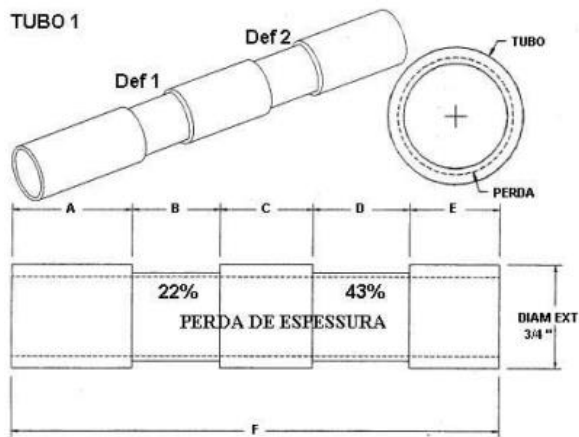
Defeito	ECT	ECA	IRIS	RFT	NFT	NFA	MFL	SPEC
Pitting Interno	AL	P	P	AL	NP	NP	NP	NP
Pitting Externo	P	P	P	AL	NP	NP	NP	NP
Trinca Axial	AL	P	NP	NP	NP	AL	NP	NP
Trinca Circunferencial	NP	P	NP	NP	NP	AL	NP	NP
Corrosão Interna	AL	P	P	P	P	P	NP	NP
Corrosão Externa	P	P	P	P	NP	NP	NP	NP
Dados do tubo	AL	AL	P	NP	NP	NP	NP	NP

P – Permitido; NP – Não Permitido; AL- Aceitável, porém limitado.

Fonte (Adaptado de EDDYFI, 2022)

Figueredo (2003) realizou um estudo com o objetivo de avaliar a possibilidade de utilizar as técnicas IRIS e RFT de forma conjugadas, com o IRIS complementando a inspeção realizada pelo RFT, para assim conseguir aumentar a amostragem de inspeção em trocadores de calor e caldeiras, durante eventuais paradas de manutenção.

Neste caso, Figueredo (2003) realizou ensaios comparativos em 4 tubos de aço carbono, sendo que 2 tubos (T1 e T2) possuem um diâmetro externo nominal de 19,05 mm e uma espessura de parede nominal de 2,11 mm, e os outros 2 tubos (T3 e T4) possuem diâmetro externo nominal de 25,40 mm e espessura de parede nominal de 2,11 mm. Os tubos 1 e 3 possuem descontinuidades do tipo ranhura (groove) e os tubos 2 e 4 possuem descontinuidades do tipo entalhe. Por meio das imagens na Figura 2.38, Figura 2.39, Figura 2.40 e Figura 2.41 tem-se os tubos e as descontinuidades fabricadas em cada um deles, assim como as medidas das mesmas tomadas com o paquímetro e as imagens dos sinais de cada descontinuidade no IRIS e no RFT.



**Paquímetro**

A	B	C	D	E	F
255,40mm	126,60mm	202,00mm	126,50mm	204,00mm	914,50mm

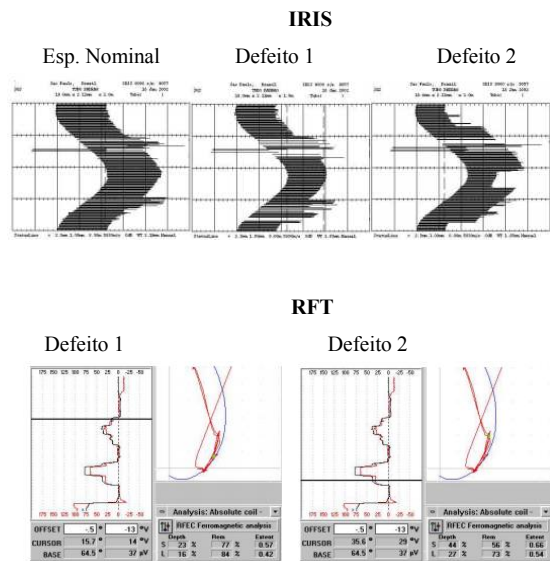
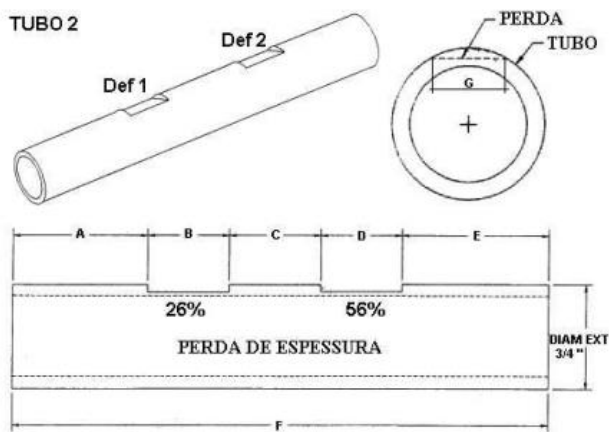


Figura 2.38 - Croqui do Tubo 1 com defeitos do tipo ranhura, medições com paquímetro e representações do ensaio por IRIS e RFT (Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, 2003).



**Paquímetro**

A	B	C	D	E	F	G - Def1	G - Def2
254,00mm	126,10mm	202,00mm	126,60mm	203,00mm	911,70mm	8,60mm	11,15mm

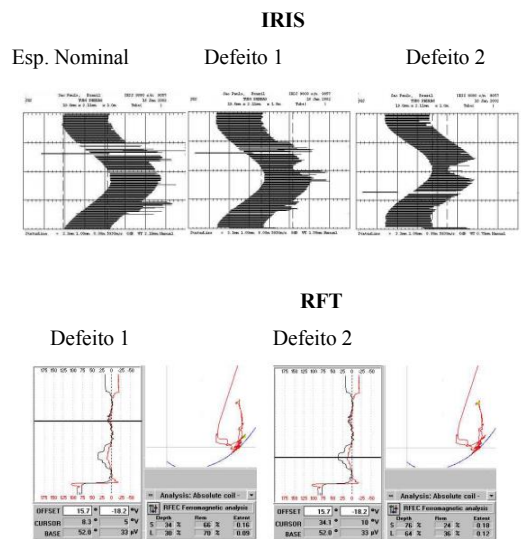


Figura 2.39 - Croqui do Tubo 2 com defeitos do tipo entalhe, medições com paquímetro e representações do ensaio por IRIS e RFT (Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, 2003).

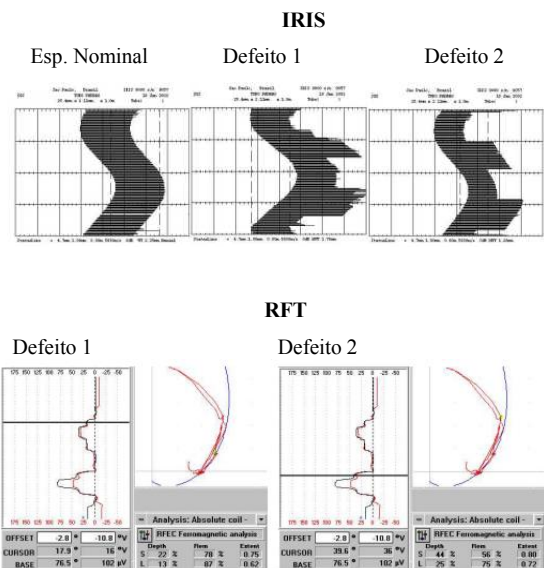
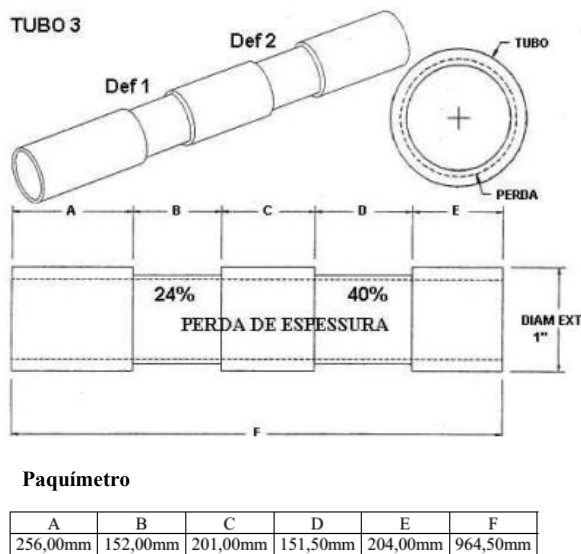


Figura 2.40 - Croqui do Tubo 3 com defeitos do tipo ranhura, medições com paquímetro e representações do ensaio por IRIS e RFT (Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, 2003).

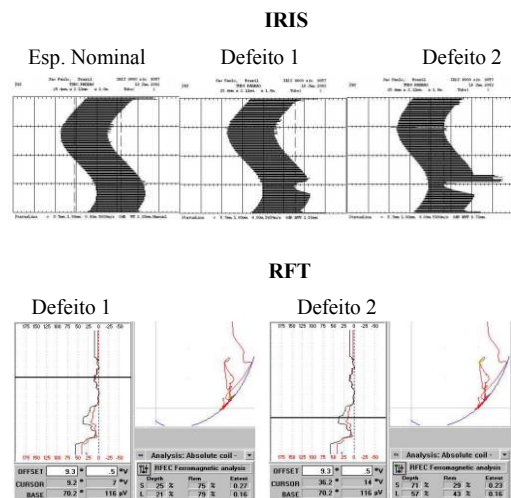
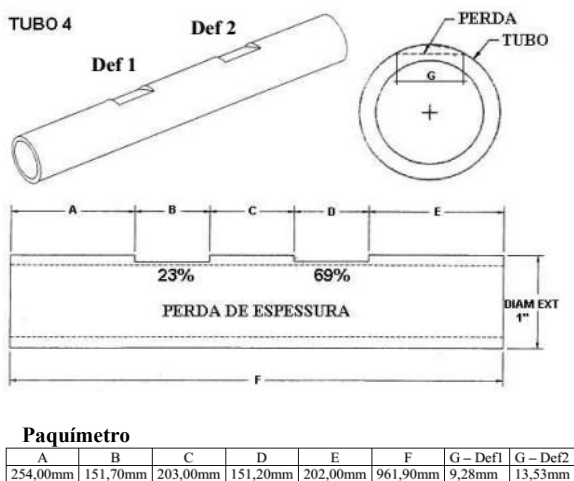


Figura 2.41 - Croqui do Tubo 4 com defeitos do tipo entalhe, medições com paquímetro e representações do ensaio por IRIS e RFT (Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, 2003).

Após selecionar e identificar os defeitos dos tubos, Figueredo (2003) realizou os ensaios de medição de perda de espessura em cada descontinuidade, utilizando-se de um paquímetro, um Ferroscope 204 para o ensaio de RFT e um sistema IRIS 9000 B-Scan para o ensaio de IRIS, e por fim comparou os resultados. A Tabela 2.5 mostra o comparativo da porcentagem de perda de espessura entre os resultados de cada ensaio.

Tabela 2.5 - Tabela comparativa com os valores de perda de espessura obtidas com um paquímetro, com a técnica por IRIS e com a técnica por RFT.

Tubos	Defeito	Perda Paquímetro	Perda IRIS	Perda RFT	Tipo de defeito
T-1	Def1	22 %	26 %	23 %	Ranhura
T-1	Def2	43 %	43 %	44 %	Ranhura
T-2	Def1	26 %	29 %	30 %	Entalhe
T-2	Def2	56 %	66 %	64 %	Entalhe
T-3	Def1	24 %	21 %	22 %	Ranhura
T-3	Def2	40 %	43 %	44 %	Ranhura
T-4	Def1	23 %	32 %	21 %	Entalhe
T-4	Def2	69 %	68 %	57 %	Entalhe

(Fonte: FIGUEREDO, 2003).

Os resultados de Figueredo (2003) mostraram-se próximos e, apesar de algumas discrepâncias, ambas as técnicas foram capazes de detectar e avaliar esses tipos de descontinuidades. O autor conclui que é possível definir um plano de trabalho utilizando-se das duas técnicas, IRIS e RFT, conjugadas. É sugerido utilizar inicialmente o RFT como técnica de varredura por ser mais rápido e prático. Já o IRIS seria utilizado nos tubos que apresentassem indicações acentuadas no RFT, para caracterização e dimensionamento das descontinuidades.

Araujo e Silva (2009) também realizaram um comparativo entre as técnicas IRIS e RFT. Neste caso, os ensaios foram feitos em um trocador de calor com tubos de aço carbono ASTM A 214, com diâmetro externo nominal de 19,05 mm e espessura de parede nominal de 2,11 mm. Esses autores conseguiram encontrar a mesma descontinuidade, na mesma posição longitudinal de um determinado tubo e dimensioná-la. O ensaio por IRIS a detectou e dimensionou como sendo uma perda de espessura localizada com 57 % da espessura nominal e o RFT a detectou e dimensionou com sendo 61 % de perda de espessura nominal. Araujo e Silva (2009) ainda comentam a necessidade de muita limpeza nos tubos para a realização do IRIS, enquanto o RFT permite limpezas mais grosseiras. Eles concluem que o uso conjugado das técnicas traz um aumento da efetividade de inspeção, e mencionam a necessidade de profissionais qualificados e de equipamentos com tecnologias atualizadas, assim como uma estrutura de suporte técnico adequada para a elaboração de procedimentos, supervisão dos serviços de campo e interpretação e análise dos resultados.

Os autores Araujo e Silva (2009), assim como Figueredo (2003), propõem a utilização do RFT como técnica de varredura e o IRIS como técnica de dimensionamento. Ramos e



Carneval (2015) propõem ideias similares com o uso de técnicas de ensaios não destrutivos conjugadas.

## CAPÍTULO III

### MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA GERAL

#### 3.1. ENSAIO POR CAMPO REMOTO - RFT

Foram utilizados os seguintes equipamentos para o ensaio por RFT:

- Um módulo ECTANE 2<sup>®</sup> da fabricante de equipamentos *EDDYFI* ([www.EDDYFI.com](http://www.EDDYFI.com));
- Uma sonda Dual Driver da fabricante *EDDYFI* para RFT com 13 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento com cabo de 20 m;
- Um computador portátil para a utilização do software MAGNIFI 4.6R13 da fabricante *EDDYFI* para controle do módulo ECTANE 2.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 encontram-se as imagens com os equipamentos mencionados:



Figura 3.1 - Módulo Ectane 2 e computador com software Magnifi 4.6R13 para comando e realização do ensaio por RFT (Fonte: Autor da Obra)



Figura 3.2 – Sonda Dual Driver para ensaios por RFT (Fonte: EDDYFI TECNOLOGIES®, 2019)

Antes da utilização do equipamento da EDDYFI, realizou-se, de forma remota, um curso base de aprendizado de uso do software e da técnica com dois especialistas da empresa EDDYFI e com duração de 2 horas. Foi realizado também um estudo das normas relacionadas ao RFT e do manual do fabricante.

Para auxiliar o tracionamento da sonda RFT (manter a velocidade de tracionamento constante, inverter o sentido de tracionamento, e variar a força de tracionamento), foi fabricado um tracionador com roldanas ajustáveis, um motor de passe da fabricante MOTION® - WS23-0150-30-4 e uma chave seletora para inversão de sentido de tracionamento. A Figura 3.3 ilustra o tracionador construído.

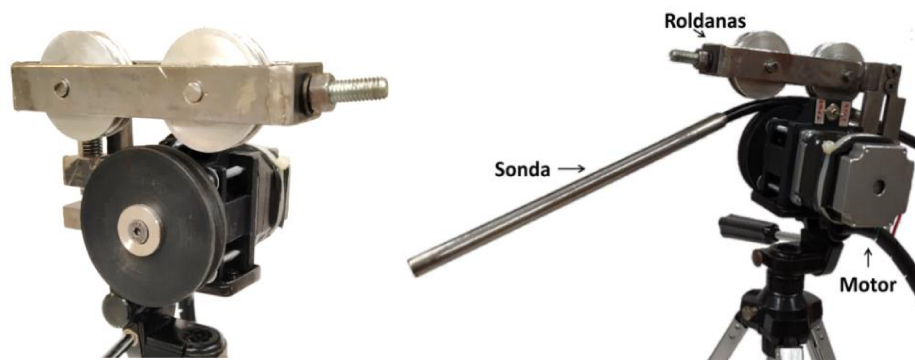


Figura 3.3 - Tracionador para auxílio do ensaio por RFT (Fonte: Autor da Obra).

Para comandar o tracionador, foi fabricado um módulo de comando com um Driver MOTION® WD -2404 para alterar a velocidade entre 0 mm/s a 800 mm/s, uma fonte de energia de 12V CC para alimentar o sistema e uma placa controladora de velocidade e torque, conforme ilustra a Figura 3.4:



Figura 3.4 - Módulo controlador do tracionador (Fonte: Autor da Obra).

O ensaio por RFT foi realizado introduzindo a sonda até o final do tubo, e com o auxílio do tracionador puxou-se a sonda enquanto o software fez a aquisição do sinal. Após realizar o ensaio em todos os tubos realizou-se a análise do sinal resposta, detectando e caracterizando as descontinuidades presentes.

### **3.2. ENSAIO POR SISTEMA DE INSPEÇÃO POR ROTAÇÃO INTERNA - IRIS**

Para o ensaio IRIS foram utilizados:

- Um módulo ECTANE 2 da fabricante de equipamentos *EDDYFI* ([www.EDDYFI.com](http://www.EDDYFI.com)), conforme Figura 3.1;
- Um computador portátil para a utilização do software MAGNIFI 4.6R13 da fabricante *EDDYFI* para controle do módulo ECTANE 2, conforme Figura 3.1;
- Um conjunto de sonda IRIS com centralizador para tubos de 13 mm da *EDDYFI*;
- Um conjunto de mangueiras e conduítes para ensaio IRIS da *EDDYFI*;
- Uma bomba d'água para ensaio IRIS.

As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram o conjunto sonda-centralizador IRIS, os conduítes, mangueiras e bomba d'água.



Figura 3.5 - Conjunto sonda-centralizador para ensaio por IRIS (Fonte: EDDYFI TECNOLOGIES, 2019)



Figura 3.6 - Conduítes, mangueiras e bomba d'água usados para o ensaio por IRIS (Fonte: Autor da Obra).

A Figura 3.7 mostra todos os equipamentos para a realização de um ensaio por IRIS.



Figura 3.7 - Conjunto de equipamentos necessários para realizar um ensaio por IRIS (Fonte: Autor da Obra).

Para realizar uma parte inicial com ensaios por IRIS, foi realizado, de forma presencial, um treinamento básico de 8 horas com um inspetor de END nas dependências do Laboratório de Acústica e Vibração da Universidade Federal de Uberlândia. O treinamento ensinou a montar o equipamento, a calibrar e realizar o ensaio de maneira básica em condições laboratoriais.

Para realizar os ensaios em campo, o inspetor insere a sonda até o final do tubo, inunda o tubo com água e inicia o tracionamento da sonda manualmente. Enquanto o operador traciona a sonda, ele realiza a inspeção e relata as descontinuidades encontradas em tempo real, não havendo pós processamento dos dados.

### 3.3. TUBOS E FEIXE TUBULAR

Para realizar os testes preliminares, inclusive o comparativo entre o IRIS e o RFT, foram utilizados:

- Um tubo idêntico ao tubo padrão com descontinuidades conhecidas, conforme Figura 3.8;

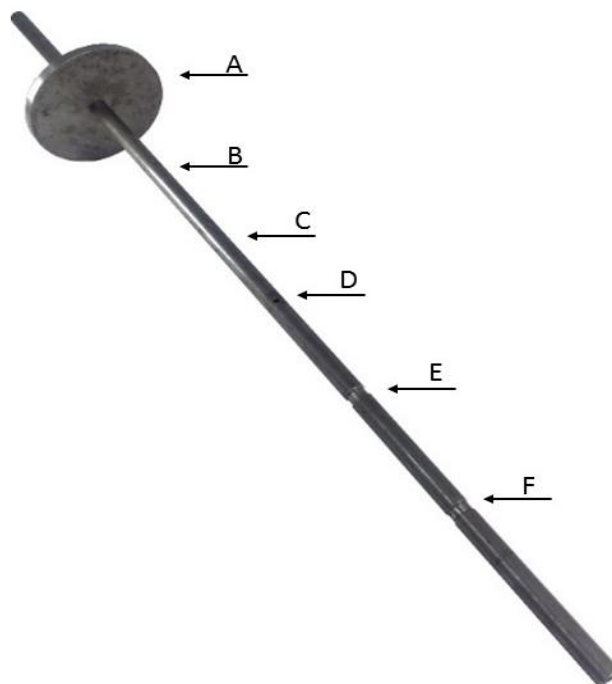


Figura 3.8 - Tubo com descontinuidades conhecidas semelhante ao tubo padrão para caracterização de descontinuidade (Fonte: Autor da Obra).

Sendo que:

- A. Suporte externo de metal simulando a chicana (Placa de Suporte) com diâmetro externo de 100 mm, espessura de 12,7 mm e furo central com diâmetro de 19,05 mm.
- B. 4 Furos de fundo plano com 0,42 mm de profundidade, distribuídos radialmente a 90° e com diâmetro de 6 mm;
- C. 1 Furo de fundo plano com 1,26 mm de profundidade e com diâmetro de 6 mm;
- D. 1 Furo passante com diâmetro de 6 mm;
- E. 1 Entalhe externo com diâmetro externo de 16,11 mm e 10 mm de comprimento;
- F. 1 Entalhe externo com diâmetro externo de 17,09 mm e 10 mm de comprimento.

Para realizar o comparativo inicial entre IRIS e RFT, foram utilizados tubos de ensaios fornecidos pela Petrobrás. Esses tubos possuem descontinuidades de formatos variáveis com profundidade, espessura e volume desconhecidos, sendo a espessura de parede nominal dos tubos de 2,11 mm e diâmetro externo nominal de 19,05 mm. Esses tubos serão mostrados no próximo capítulo.

Para realizar o comparativo entre IRIS e RFT em tubos de feixes tubulares reais, foram utilizados dois feixes tubulares, conforme Figura 3.9. Esses feixes foram retirados de dois trocadores do tipo Casco & Tubos fornecidos por uma empresa de refino e processamento de petróleo brasileiro.

Os feixes foram retirados após completarem 6 anos consecutivos de trabalho, e os trocadores que alojavam os feixes eram do tipo condensadores de topo atmosférico e trocavam calor entre um hidrocarboneto leve no lado do casco e água de refrigeração do lado dos tubos (interno aos mesmos).

Cada um dos feixes tubulares possui 1024 tubos com 6 metros de comprimento, sendo que cada tubo possui espessura de parede nominal de 2,11 mm e diâmetro externo de 19,05 mm, suportados por 2 espelhos situados em cada extremidade e 12 chicanas distribuídas ao longo do comprimento. Cada feixe possui uma massa de aproximadamente 7.200 Kg. O feixe à esquerda da Figura 3.9 possui a TAG 01-E-10B e o feixe à direita possui a TAG 01-E-10F.





Figura 3.9 - Feixe tubular utilizado no comparativo de campo Entre IRIS e RFT (Fonte: Autor da Obra).

### **3.3.1. HIDROJATEAMENTO**

Para realizar os ensaios não destrutivos nos feixes tubulares, foi necessário primeiramente realizar a limpeza dos tubos. O método escolhido foi o hidrojateamento com alta pressão, método mais utilizado pelas empresas de óleo e gás para a remoção de graxas, incrustações, depósitos e corrosão.

A limpeza por hidrojateamento dos feixes tubulares foi realizada pela empresa A LIMPAR – LOGÍSTICA AMBIENTAL, que tem sede em Uberlândia – MG. O equipamento de hidrojato de alta pressão utilizado é do fabricante LEMASA, modelo L-300/4. A Figura 3.10 mostra o equipamento de limpeza utilizado.





Figura 3.10 - Motor e painel de controle da bomba de hidrojato de alta pressão utilizado da fabricante LEMASA, modelo L-300/4 (Fonte: Autor da Obra).

Foi utilizado um bico rotativo da LEMASA, versão CYCLONE CY12 22K, para a limpeza interna dos tubos, sendo ele projetado com 4 furos de pressão laterais a 90° e outros 5 furos a 45° do seu eixo, totalizando 9 furos de pressão, conforme Figura 3.11.

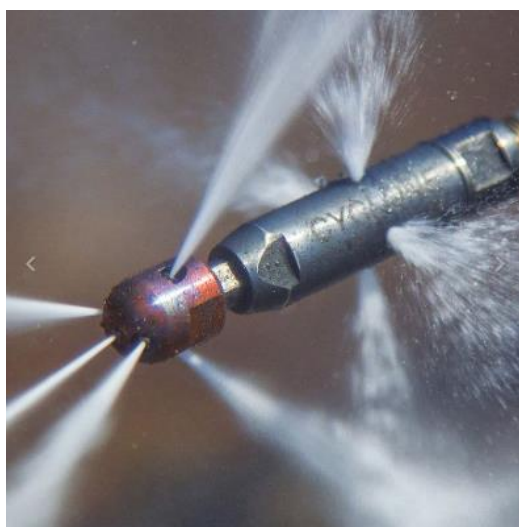


Figura 3.11 - Bico rotativo de alta pressão para limpeza com hidrojato, CYCLONE CY12 22K, LEMASA (Fonte: LEMASA, 2022).

Os feixes tubulares ficaram armazenados em ambiente aberto e sob a ação do tempo na refinaria, e na Universidade Federal de Uberlândia. Isso causou um aumento na taxa de corrosão e conseqüente deterioração do trocador. Essa deterioração avançada dificultou o processo de limpeza e causou danos ao bico rotativo, que necessitou ser substituído por 3 vezes, gerando um atraso de 21 dias no processo de limpeza.

Consequentemente, isto também dificultou a realização dos ensaios não destrutivos por IRIS e por RFT.

### 3.3.1.1. Hidrojateamento no feixe tubular 01-E-10B

Para o feixe 01-E-10B, dos 1024 tubos, conseguiu-se realizar o hidrojateamento em 935 tubos. Os 89 tubos não limpos estavam empenados e/ou bloqueados com excesso de óxido devido ao seu condicionamento, e com isso não foi possível realizar a limpeza. Os mesmos foram plugueados após a limpeza do feixe. A Figura 3.12 ilustra os tubos plugueados em vermelho.

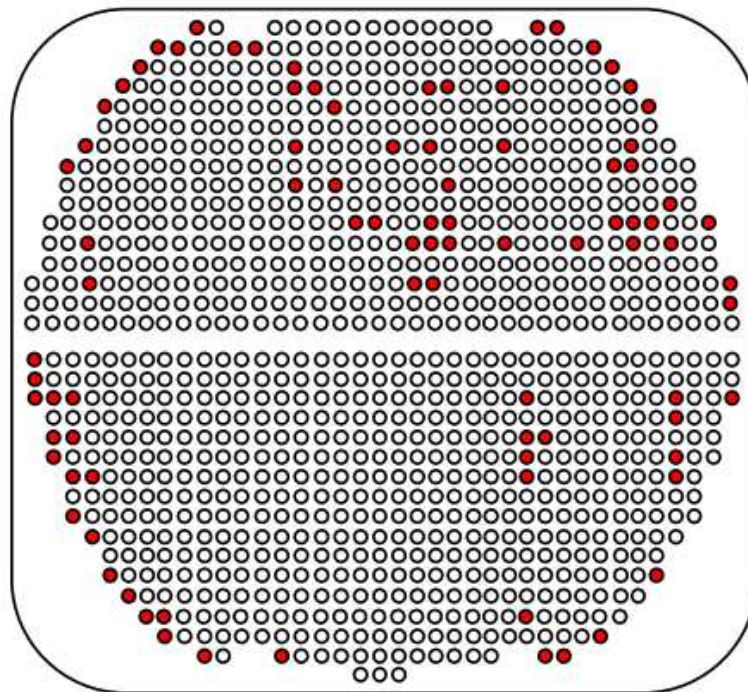


Figura 3.12 - Tubos plugueados (em vermelho) no feixe 01-E-10B (Fonte: Auto da Obra).

Esse feixe teve a pressão de trabalho, ou de limpeza, variada a fim de testar a capacidade do RFT em fazer ensaios com limpezas menos severas. Para pressões mais baixas, selecionou-se então 174 tubos para limpeza com uma pressão de 7.000 PSI. A Figura 3.13 mostra a região com limpeza de baixa pressão. Os 761 tubos restantes foram limpos com uma pressão de 15.000 PSI. A Tabela 3.1 resume o hidrojateamento do feixe 01-E-10B.

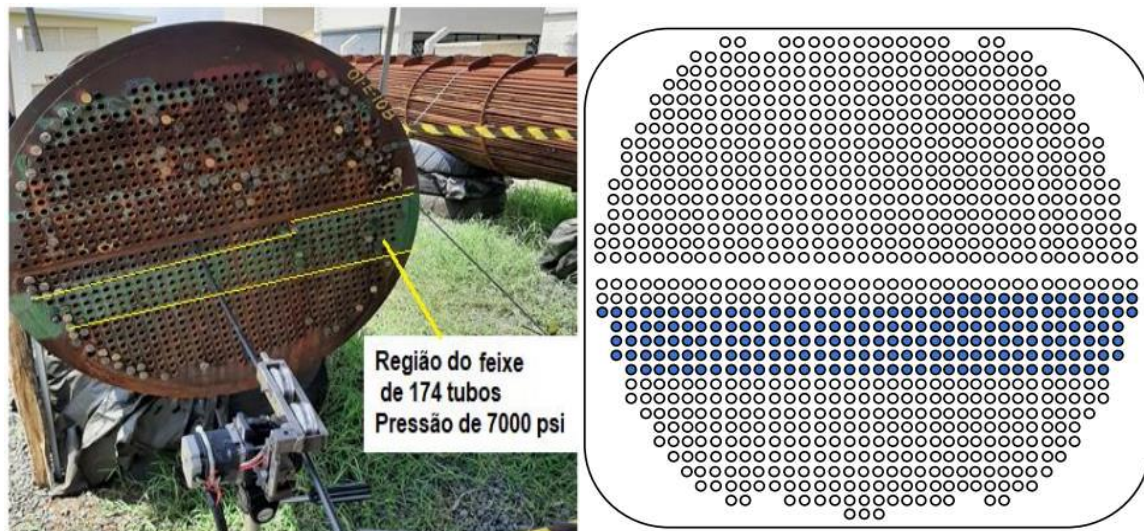


Figura 3.13 - Feixe 01-E-10B em condição de ensaio (a esquerda) e com a região de limpeza com 7.000 PSI (a direita) (Fonte: Autor da Obra).

Tabela 3.1 - Resumo dos tubos limpos com hidrojateamento para o feixe 01-E-10B.

Nº total de tubos	Tubos plugueados	Tubos limpos com 7.000 PSI	Tubos Limpos com 15.000 PSI	Total de tubos limpos
1024	89	174	761	935

### 3.3.1.2. Hidrojateamento no feixe tubular 01-E-10F

Para o feixe 01-E-10F, não houve variação de pressão de limpeza. Sendo assim, o hidrojateamento foi realizado com uma pressão de 15.000 PSI em todos os tubos possíveis do feixe. Novamente, devido a empenamentos e entupimentos, dos 1024 tubos, foram plugueados 51 deles. A Figura 3.14 mostra em vermelho os tubos plugueados nesse caso. A Tabela 3.2 resume o hidrojateamento do feixe tubular 01-E-10F.

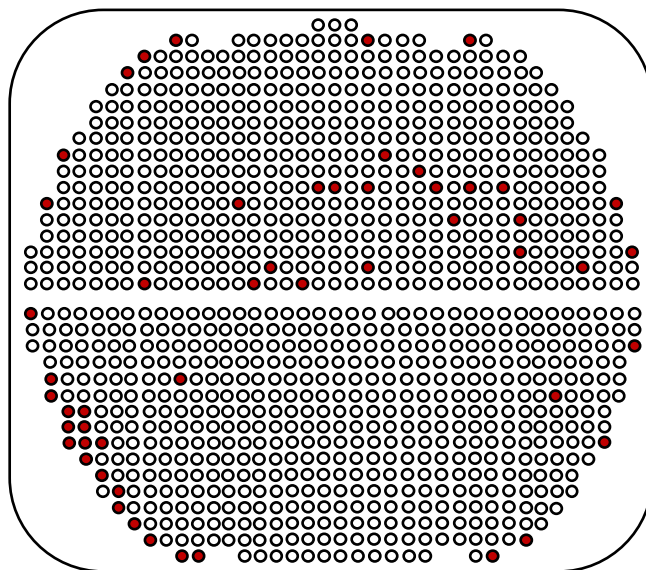


Figura 3.14 - Tubos plugueados (em vermelho) no feixe 01-E-10F (Fonte: Auto da Obra).

Tabela 3.2 - Resumo dos tubos limpos com hidrojateamento para o feixe 01-E-10F.

Nº total de tubos	Tubos plugueados	Tubos Limpos com 15.000 PSI	Total de tubos limpos
1024	51	937	973

### 3.4. ENSAIO POR ESCÂNER 3D

Para realizar a medição da espessura de parede remanescente nas seções retiradas do feixe tubular, utilizou-se de um escâner de mão HandySCAN 3D Block Series da Creafom 3D ([www.creaform3d.com](http://www.creaform3d.com)) com resolução de 0,025 mm conforme informação do site. A medição neste caso foi realizada por um profissional treinado pela fabricante na Universidade Federal de Uberlândia, seguindo as boas práticas recomendadas. A Figura 3.15 ilustra o escâner 3D utilizado.





Figura 3.15 - Escâner 3D de mão HandySCAN 3D Block Series da Creaform 3D (Fonte: CREAFORM3D)

Para realizar o escaneamento 3D, inspetor posiciona a peça a ser escaneada no suporte e movimenta o escâner por todo o entorno da peça, fazendo com que o equipamento visualize a peça e envie o sinal para o software, que conforme recebe o sinal, cria a imagem da peça de forma digitalizada.

### 3.5. METODOLOGIA GERAL

Para realizar o comparativo entre as duas técnicas de END, fez-se necessário compreender o funcionamento prático da técnica de RFT. Dessa forma, foram realizados testes para encontrar os parâmetros da técnica como velocidade de ensaio e frequência de operação da sonda, para avaliar efeitos causados por interferências externas como da placa de suporte, efeito da borda, influência do sinal de um entalhe externo em sua vizinhança, o efeito da menor distância entre duas descontinuidades e para avaliar a repetibilidade. Somente após compreender esses fenômenos que se realizou o comparativo com a técnica IRIS. O comparativo foi realizado utilizando a perda de espessura fornecida pelas duas técnicas.

A técnica IRIS foi considerada a técnica padrão. Neste sentido, para que o resultado da comparação seja considerado adequado, o resultado obtido pelo RFT desse ser o mais próximo possível ao do IRIS. Esses resultados são definidos como sendo a espessura remanescente ou a porcentagem de perda de espessura do tubo.

São apresentados a seguir a sequência do procedimento metodológico utilizado neste trabalho para o entendimento do RFT e a sequência de realização dos ensaios de comparação entre as duas técnicas:

1 – Revisão bibliográfica sobre as técnicas RFT e IRIS, bem como sobre o equipamento a ser ensaiado (trocaador de calor do tipo Casco & Tubos).

2 – Realização de um curso junto ao fornecedor do equipamento RFT e estudos para o entendimento do software utilizado nas análises com base no manual do equipamento, bem como em informações obtidas na Internet.

3 – Construção do tubo padrão de caracterização de descontinuidades. Este tubo foi utilizado para a calibração do software/sonda para a realização dos ensaios RFT, bem como nos ensaios com a técnica IRIS. As dimensões das descontinuidades foram baseadas nas informações do fornecedor do equipamento (EDDYFI) e do código ASME (2019). Foi construído também o tracionador da sonda RFT.

4 – Calibração da sonda RFT utilizando software da EDDYFI. Esta calibração seguiu os parâmetros recomendados pelo fabricante juntamente com os requerimentos do Artigo 17 do código ASME (2019), em sua seção V e os requerimentos sugeridos pela norma ASTM SE-2096/SE-2096M (2019). Já a calibração da sonda IRIS foi realizada conforme orientações do especialista e inspetor de END que foram repassadas durante o curso sobre manuseio e ensaio IRIS.

5 – Ensaios Preliminares.

5.1 – Ensaios realizados no tubo de referência variando a velocidade de ensaio (velocidade da sonda dentro do tubo). O objetivo foi buscar uma velocidade de ensaio adequada que não interferisse nos valores medidos da fase e amplitude do sinal adquirido.

5.2 – Ensaios realizados no tubo de referência variando a frequência de excitação da sonda para entender a variação dessa frequência em relação a posição dos sinais das descontinuidades nos canais diferencial e absoluto do software do equipamento.

5.3 – Ensaios realizados no tubo de referência variando a distância da placa de simulação da chicana em relação a uma descontinuidade (por exemplo, em relação ao furo do tubo padrão).

5.4 – Análise dos efeitos das bordas realizado com ensaios no tubo de referência variando a posição da placa de simulação da chicana em relação a borda do tubo de referência.

5.5 – Análise do sinal no canal absoluto do entalhe externo (groove) com finalidade de entendimento do sinal de ranhuras devido as suas bordas.

5.6 – Ensaios em tubos semelhantes ao tubo de referência com descontinuidades conhecidas variando as suas distâncias, tendo como finalidade detectar a menor distância entre duas descontinuidades em que o sinal seja detectado e compreendido nos canais diferencial e absoluto.

5.7 – Ensaios de repetibilidade dos sinais. Foi utilizado o tubo de referência para esses ensaios variando a frequência de excitação da sonda. A partir dos ensaios realizados até este ponto foi possível escrever um procedimento de ensaio para a técnica RFT, bem como entender, com base no manual do software/equipamento, o procedimento de análise dos sinais. Este procedimento de ensaio encontra-se no Apêndice E.

6 – Ensaios Comparativos entre IRIS e RFT em laboratório.

6.1 – Foram realizados ensaios comparativos entre IRIS e RFT utilizando o tubo padrão.

6.2 – Foram realizados ensaios comparativos entre IRIS e RFT utilizando tubos com descontinuidades conhecidas fornecidas pela Petrobrás.

7 – Ensaios Comparativos entre IRIS e RFT em dois feixes tubulares fornecidos pela Petrobrás. Antes da realização dos ensaios os feixes foram limpos com duas pressões diferentes.

8 – Ensaios em descontinuidades retiradas dos feixes tubulares com a técnica Escâner 3D com a finalidade de comparar com as técnicas RFT e IRIS.

9 – Análise do tipo de corrosão nos feixes tubulares utilizando os dados do Escâner 3D.

As informações básicas dos parâmetros requeridos pelo software (catálogo) para os ensaios preliminares com RFT foram:

- Frequências de excitação: 320 Hz no canal DIF (Diferencial) e 320 Hz no canal ABS (Absoluto);
- Amplitude: 10 V;
- Frequência de aquisição: 800 Hz;
- Velocidade de tracionamento da sonda: 300 mm/s;
- Ganho no canal ABS: 46 dB;
- Ganho no canal DIF: 46 dB;
- Filtro (cutoff): 12 Hz no canal ABS;
- Filtro (cutoff): 12 Hz no canal DIF;

Estas condições foram obtidas após uma série de ensaios realizados no tubo padrão e nos tubos do trocador. Conforme os ensaios foram sendo realizados, vários desses parâmetros foram alterados com o objetivo de buscar a melhor condição de ensaio em casos específicos.

## CAPÍTULO IV

### ENSAIOS PRELIMINARES PARA ENTENDIMENTO DA TÉCNICA RFT

#### 4.1. VELOCIDADE DO ENSAIO

Esse estudo foi realizado para verificar as variações na leitura do sinal de aquisição em relação à variação da velocidade de arraste da sonda, como a fase e a amplitude do sinal. Isto se justifica, uma vez que as operações em campo podem ter variações de velocidades de aquisição, devido a sujeiras em tubos, empenamentos e até mesmo considerando operações de tracionamento manual.

Para realizar o ensaio foram considerados os parâmetros de calibração referentes ao sinal de um furo passante, sendo que este deve gerar um sinal de 1,00 V a 90° no plano de impedância Diferencial e acusar uma perda de espessura de 100 %. Sendo assim, a velocidade ideal deve ser aquela que gere os mesmos sinais após a calibração do sistema. A Figura 4.1 mostra a imagem de um sinal do canal diferencial de um furo passante no tubo padrão para caracterização de descontinuidade após o sistema ser calibrado.

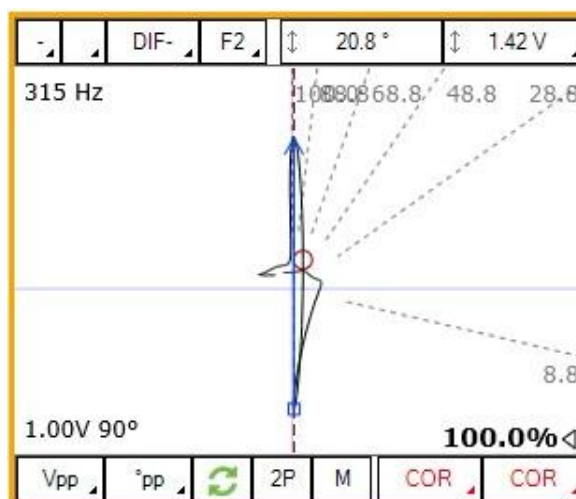


Figura 4.1 - Sinal no canal Diferencial de um furo passante (Fonte: Autor da Obra).

O estudo da influência da velocidade de arraste foi realizado com os seguintes parâmetros de calibração e ensaio:



- Frequência de aquisição fixa em 800 Hz;
- Frequência de excitação da sonda no canal diferencial em 320 Hz;
- Velocidade de tracionamento em 300 mm/s;
- Tubo padrão para caracterização de descontinuidade conforme APÊNDICE A;

As velocidades de arraste da sonda ensaiadas foram: 134, 218, 230, 300, 568 e 764 mm/s. Sendo que, para controlar essas velocidades foi utilizado um tracionador de sonda conforme Figura 3.3. Com isso realizou-se o tracionamento da sonda pelo tubo com as respectivas velocidades e a cada passada da sonda analisou-se o sinal do furo, gerando assim os resultados mostrados na Figura 4.2.

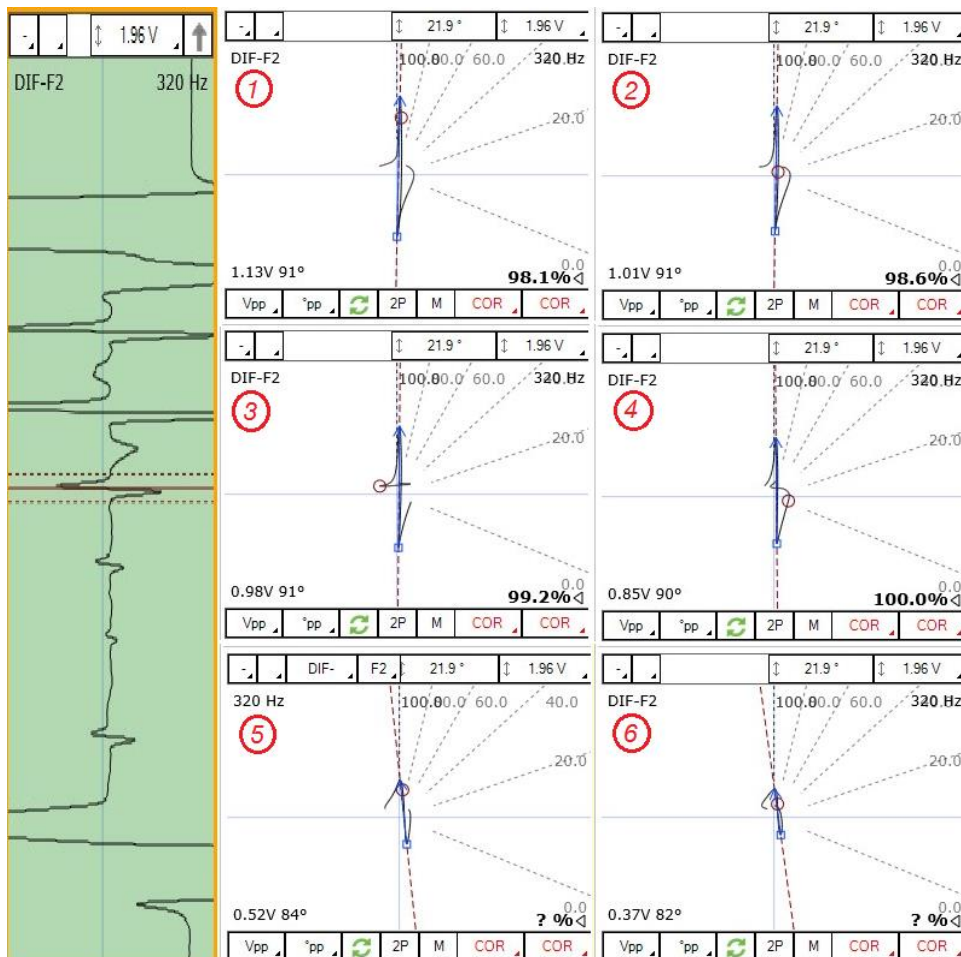


Figura 4.2 - Sequência de experimentos relacionando amplitude do sinal no canal diferencial e velocidade de arraste da sonda no ensaio RFT com sinal de um furo passante no tubo. 1) 134 mm/s, 2) 218 mm/s, 3) 230 mm/s, 4) 300 mm/s, 5) 568 mm/s e 6) 764 mm/s (Fonte: Autor da Obra)

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram os gráficos da velocidade de tracionamento da sonda em função da amplitude e do ângulo de fase do sinal medido.

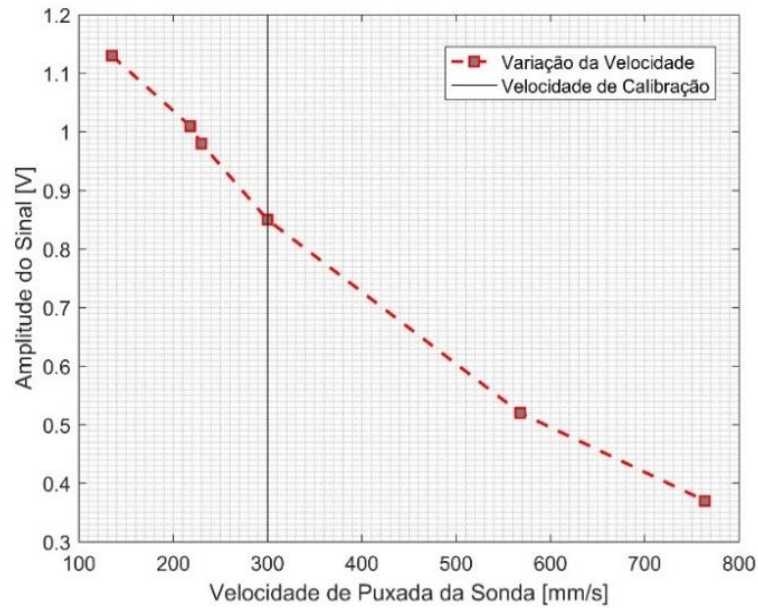


Figura 4.3 - Gráficos de efeito da velocidade de arraste da sonda RFT sobre a amplitude do sinal em um furo passante no tubo padrão (Fonte: Autor da Obra).

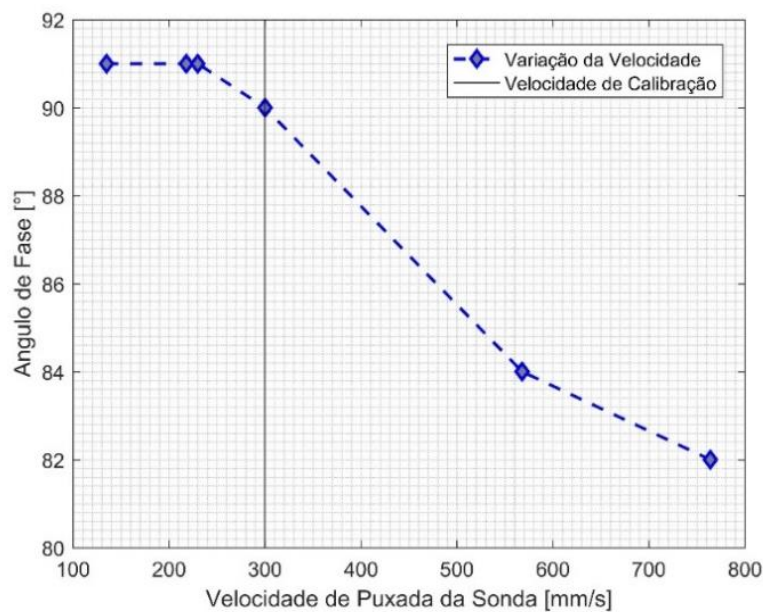


Figura 4.4 - Gráficos de efeito da velocidade de arraste da sonda RFT sobre o ângulo de fase do sinal em um furo passante no tubo padrão (Fonte: Autor da Obra).

Pode-se perceber pela Figura 4.2 que, para baixas velocidades de tracionamento da sonda, a maior variação ocorre na amplitude do sinal enquanto a fase pouco varia. Pode-se verificar também que até a velocidade de 300 mm/s, que é a velocidade de calibração, o sistema reconhece e interpreta corretamente o furo passante, mostrando que para baixas velocidades consegue-se manter a resolução do sistema. Já para velocidades superiores, como visto nos itens 5 e 6 da figura, a fase e a amplitude perdem resolução ao ponto de não haver reconhecimento

da descontinuidade. Elas se posicionam fora dos parâmetros de calibração de 1,00 V e 90°, e o formato do sinal é distorcido e conseqüentemente ocorre a impossibilidade de leitura da perda de espessura pelo software.

Constatou-se que, para variações estritamente pequenas com relação à velocidade utilizada na calibração, a variação de leitura de perda de espessura é quase insignificante, pois a fase dos defeitos pouco muda. A amplitude do sinal é influenciada pela velocidade da sonda; possuindo uma relação inversamente proporcional entre velocidade e amplitude, como visto na Figura 4.3. Com relação ao ângulo de fase, observou-se que desacelerar a puxada da sonda praticamente não influenciou na orientação do sinal. Por outro lado, uma puxada com velocidade maior do que a de calibração resultou em diminuição do ângulo de fase e eventualmente na ausência de leitura de perda de espessura, conforme visto na Figura 4.4.

A partir desses resultados pode-se concluir que o cenário ideal para a realização do ensaio RFT é utilizar uma velocidade constante e próxima da de calibração, sendo que o principal parâmetro de análise do software é o ângulo de fase. Mesmo com amplitudes menores que a da calibração (1,0 V a 90°), o software foi capaz de reconhecer a perda de espessura do furo passante, utilizando somente do ângulo de fase na posição correta (90°).

Os resultados com o uso repetitivo do tracionador demonstraram que é possível manter uma velocidade constante e satisfatória para a análise. Assim, o tracionador se mostrou útil e necessário para a realização dos ensaios, por facilitar e garantir a constância da velocidade de arraste da sonda.

## **4.2. FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO DA SONDA**

Nesse ensaio foi avaliado a influência da frequência de excitação da sonda na aquisição do sinal. Inicialmente utilizou-se uma frequência de excitação sugerida pela fabricante *EDDYFI*, sendo de 380 Hz para os dois canais (Absoluto e Diferencial), e com essa frequência fez-se a calibração do sistema. Entretanto, verificou-se que apesar do software concluir que o sistema está calibrado com a utilização da frequência de 380 Hz, alguns parâmetros ficaram fora dos parâmetros sugeridos pela norma apresentadas no capítulo 2.6.5. sobre calibração, pelos quais deve-se obter 1° para cada 1 % de diferença na perda de espessura para o canal absoluto. Ou seja, como no canal absoluto, analisou-se a defasagem entre os entalhes externos de 40 % e de 60 %, sendo que a melhor avaliação ocorre com a defasagem entre os ângulos de fase dessas duas descontinuidades estando o mais próximo de 20°. Já considerando o canal

diferencial, o melhor resultado ocorre quando a defasagem entre o furo passante e os 4 furos de fundo plano esteja entre 60° e 70°.

Sendo assim, utilizando-se do tubo de calibração, variou-se a frequência de excitação de duas maneiras: uma mantendo a frequência para os dois canais e outra com frequências diferentes em cada canal. Fez-se isso até encontrar as frequências que melhor se encaixam nas condições de calibração da norma. A Tabela 4.1 mostra as frequências de excitações utilizadas. A Tabela 4.2 mostra os resultados encontrados com a variação da frequência em cada canal no ensaio RFT.

Tabela 4.1 - Frequências de excitação para o ensaio RFT

Ensaio	Canal	Frequência
1	ABS	380 Hz
	DIF	
2	ABS	400 Hz
	DIF	
3	ABS	405 Hz
	DIF	315 Hz
4	ABS	400 Hz
	DIF	280 Hz
5	ABS	410 Hz
	DIF	260 Hz

Tabela 4.2 - Otimização da frequência de excitação da sonda RFT para adequação ao tubo de calibração

Frequência	ABS	DIF
	Fase entre 40 % - 60 %	Fase entre 100 % - 20 %
380 Hz	18°	76°
400 Hz	19°	79°
<b>ABS → 405 Hz</b>	<b>20°</b>	<b>67°</b>
<b>DIF → 315 Hz</b>		
ABS → 400 Hz	19°	61°
DIF → 280 Hz		
ABS → 410 Hz	20°	57°
DIF → 260 Hz		

Como pode ser visto, o melhor cenário está em utilizar frequências diferentes para cada canal. Verifica-se que o uso de 405 Hz para o canal Absoluto e 315 Hz para o canal diferencial resultou em resultados mais próximos do correto. O uso de uma única frequência de excitação foi descartado visando à obtenção de uma calibração mais precisa e dentro dos parâmetros desejados. Entretanto, deve-se lembrar que as frequências de excitação estão relacionadas com a permeabilidade magnética do material. Sendo assim, é comum que a frequência de calibração seja diferente da frequência de operação, pois o tubo de calibração possui propriedades físicas e químicas diferentes dos tubos reais a serem ensaiados. Para isso deve-se encontrar a frequência de trabalho no momento de realizar os ensaios em campo. Essa frequência de operação é encontrada em função da rotação do sinal no plano de tensão após a normalização do sinal. Caso a rotação ultrapasse  $30^\circ$ , deve-se então procurar uma nova frequência de operação, e esse passo é uma recomendação da fabricante do equipamento.

Esse estudo mostra que a correta frequência de ensaio é necessária para que o sinal a ser analisado seja desenvolvido no local correto do plano de voltagem e que suas alterações são de extrema importância para a correta interpretação dos resultados do ensaio RFT. Após a frequência adequada ter sido encontrada, ela foi utilizada nos demais ensaios RFT em termos comparativos com o IRIS (tomado como ensaio de referência).

### **4.3. INFLUÊNCIA DA PLACA DE SUPORTE**

A placa de suporte é a simulação de uma chicana no tubo de calibração, como pode ser visualizado no desenho do tubo padrão conforme APÊNDICE A. Como os tubos são inseridos no feixe tubular com interferência nas chicanas, essas possuem a capacidade de alterar a permeabilidade magnética no local de interferência entre chicana e tubo. Essa mudança na permeabilidade altera o sinal recebido pela sonda RFT, o que gera uma área de sombra para detecção e compreensão de descontinuidades sob a chicana e também a alguns centímetros antes e depois da mesma, como ilustrado na Figura 4.5.

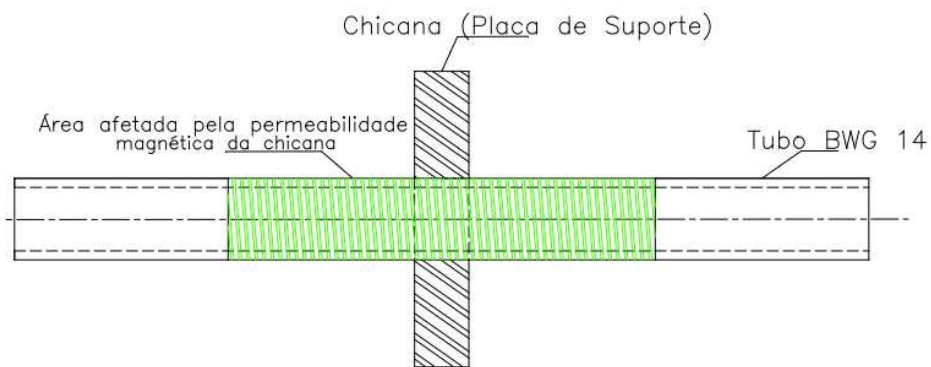


Figura 4.5 - Área de sombra de detecção de descontinuidade devido à influência da chicana. (Fonte: Autor da Obra).

Sendo assim, surgiu a necessidade de realizar ensaios para descobrir qual a menor distância entre a chicana e uma descontinuidade para que essa possa ser detectada e compreendida. Para isso utilizou-se da placa de suporte do tubo de calibração e um furo passante. Inicialmente a placa de suporte utilizada foi posicionada sobre o furo, depois próxima à borda do furo e por fim afastada constantemente da borda do furo até que fosse obtida uma leitura completa do furo passante, registrando assim um sinal de 100 % de perda de espessura e 90° de ângulo de fase. Os dados de leitura do furo no canal diferencial foram registrados para cada distância em que a placa foi posicionada. A Figura 4.6 ilustra a montagem utilizada.

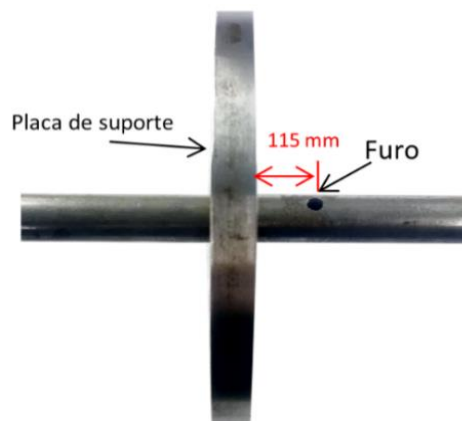


Figura 4.6 - Posicionamento da placa de suporte próxima à borda do furo passante do tubo de calibração (Fonte: Autor da Obra).

Os dados obtidos encontram-se na Figura 4.7 e Figura 4.8. Como é possível verificar, somente a partir de 115 mm de distanciamento entre a placa e o furo passante é que foi possível interpretar o sinal corretamente e considerá-lo uma descontinuidade. Com 115 mm de distância conseguiu-se registrar o sinal com 100 % de perda de espessura e com o ângulo de fase de 90°.

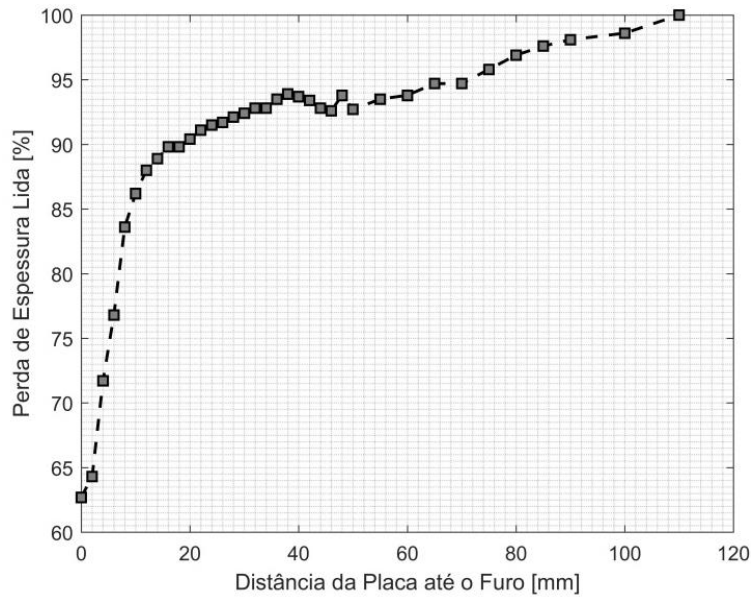


Figura 4.7 - Gráficos de efeito da proximidade da placa de suporte sobre a variação na leitura de perda de espessura do sinal no ensaio RFT (Fonte: Autor da Obra).

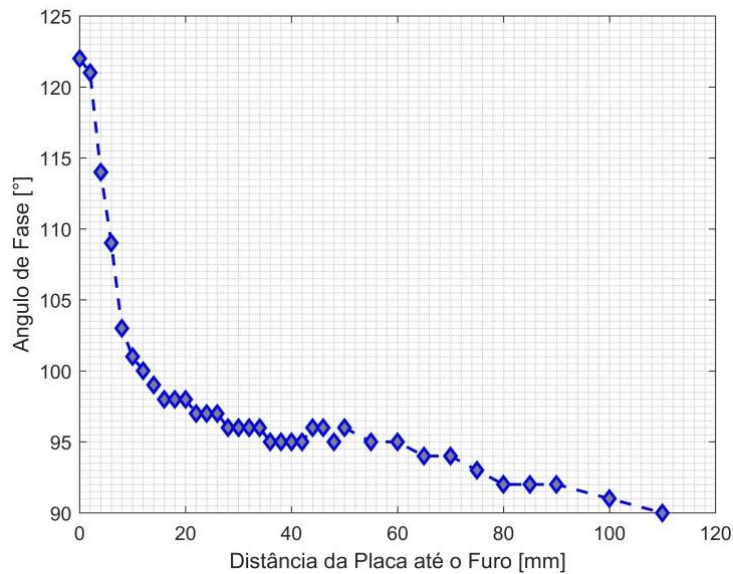


Figura 4.8 - Gráficos de efeito da proximidade da placa de suporte sobre a variação na leitura do ângulo de fase do sinal no ensaio RFT (Fonte: Autor da Obra).

Com isso constatou-se a necessidade da utilização do canal MIX pelo software da MAGNIFI. Esse canal possui a capacidade de interpretar o sinal da chicana e retirá-lo do sinal recebido, e assim é possível visualizar as discontinuidades próximas à chicana. Entretanto para a compreensão desse canal faz-se necessário mais estudos de uso do software e da técnica.



#### 4.4. EFEITO DA BORDA

Outra percepção que se teve durante os ensaios foi a incapacidade de detectar e compreender discontinuidades perto da borda do tubo, o que está relacionado à configuração das bobinas na sonda. Como existe uma distância de pelo menos duas vezes e meio o diâmetro externo do tubo entre a bobina excitadora e as bobinas receptoras, percebeu-se que, enquanto a bobina excitadora não estiver contida dentro do tubo, não há sinal de resposta para a bobina receptora, causando novamente uma área de sombra para detecção e compreensão de discontinuidades. A Figura 4.9 ilustra a área de sombra da borda do tubo neste caso.

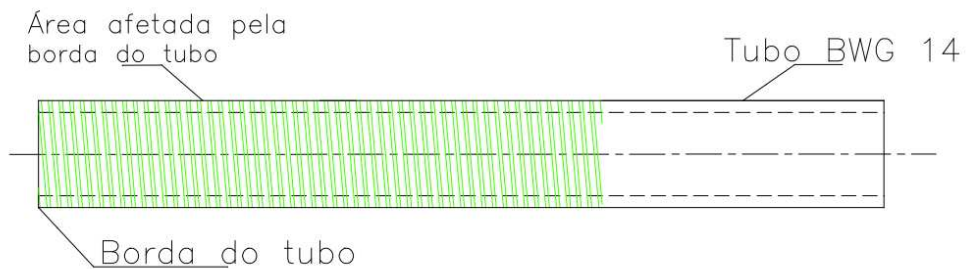


Figura 4.9 - Área de sombra da borda tubo causado pelo distanciamento das bobinas. (Fonte: Autor da Obra).

Sendo assim, fez-se necessário estudar qual a menor distância até a borda para obter um sinal detectável e compreensivo. Para esse ensaio utilizou-se a placa de suporte por ser móvel. Inicialmente a placa foi posicionada na borda do tubo e realizou-se a passagem da sonda no tubo. Em sequência posicionou-se a placa em várias distâncias além da borda até que se obtivesse o sinal da placa de suporte conforme o sinal da calibração, sendo que esse sinal possui uma amplitude de 0,67 V e um ângulo de fase de 39°, conforme Figura 4.10. Os resultados dos ensaios com a variação da posição da placa de suporte em relação à borda do tubo encontram-se na Tabela 4.3.



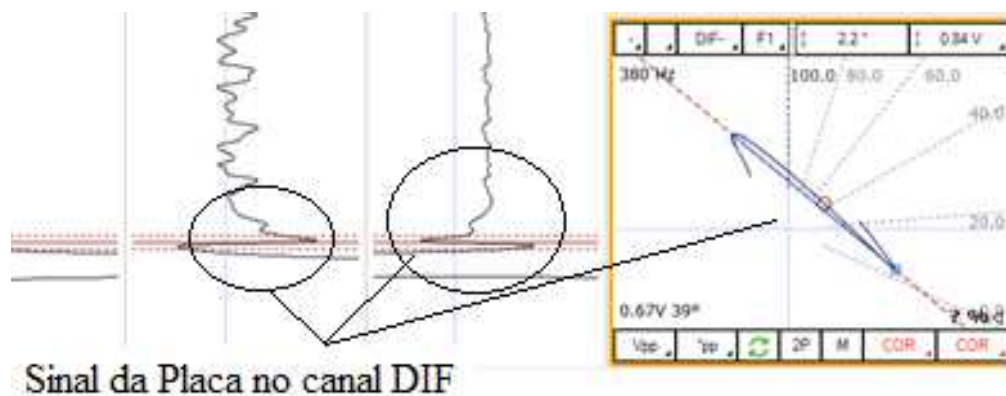


Figura 4.10 - Sinal da placa de suporte conforme calibração do sistema (Fonte: Autor da Obra).

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios com variação na posição da placa de suporte

Ensaio	Posição da placa no Tubo em relação à borda (mm)	Ângulo do DIF registrado (graus)	Amplitude no DIF registrada (V)
1	0	9	0,15
2	10	12	0,17
3	20	10	0,17
4	30	17	0,17
5	40	18	0,18
6	50	23	0,20
7	60	25	0,19
8	70	26	0,21
9	80	27	0,22
10	90	33	0,60
11	100	39	0,67
12	110	39	0,70
13	120	40	0,65
14	130	41	0,69
15	140	40	0,70

Utilizando-se dos dados obtidos conforme a Tabela 4.3, pôde-se desenvolver os gráficos representados pela Figura 4.11 e Figura 4.12. Como é possível analisar, somente a partir de aproximadamente 100 mm de distância da borda do tubo é que se faz possível detectar e compreender o sinal da placa de suporte. Conforme sinal referenciado na calibração, antes dessa

distância o sinal é perturbado devido ao tamanho da sonda e da posição das bobinas excitadoras e receptoras dentro da sonda.

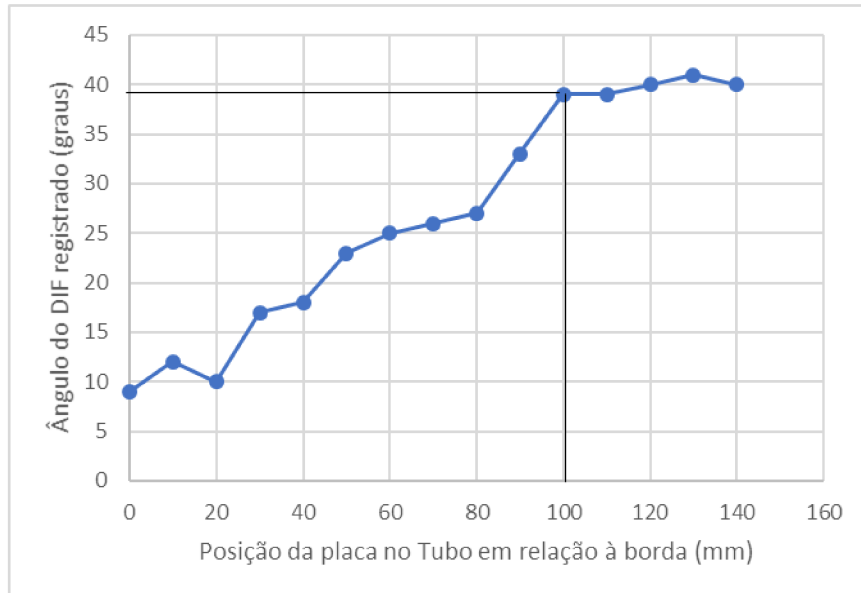


Figura 4.11 - Gráfico do ângulo de fase registrado em função da posição da placa de suporte em relação à borda do tubo (Fonte: Autor da Obra).

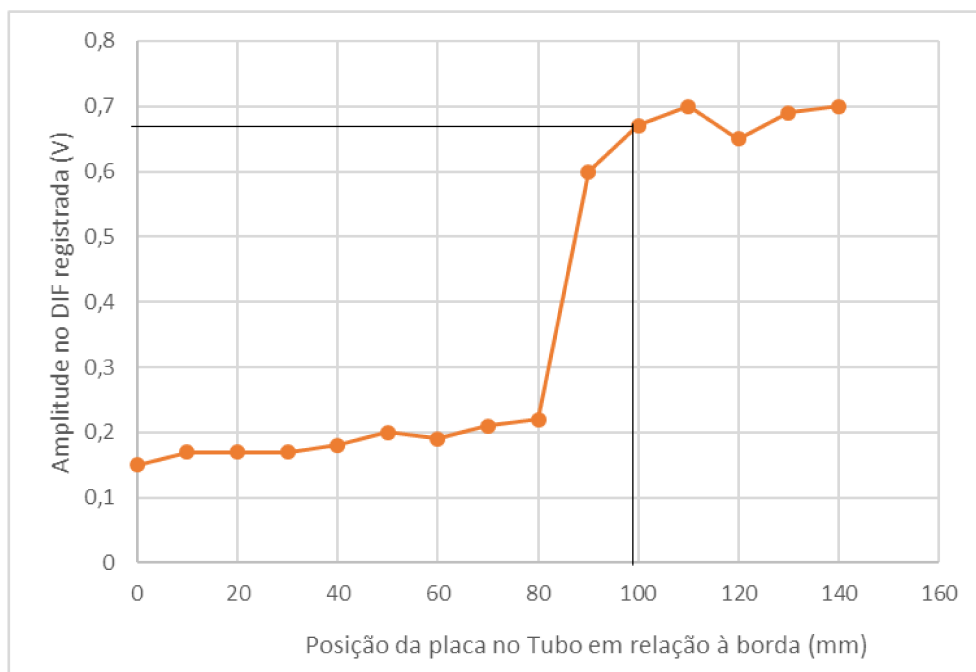


Figura 4.12 - Gráfico da amplitude registrado em função da posição da placa de suporte em relação à borda do tubo (Fonte: Autor da Obra).

Isso mostra que descontinuidades presentes na região de sombra da borda do tubo sofrem interferência em relação ao tamanho da sonda, apresentando sinais distorcidos que não representam um defeito.

#### 4.5. INFLUÊNCIA DO ENTALHE EXTERNO NA SUA VIZINHANÇA

Outra análise que se fez necessária foi a interpretação do sinal de um entalhe externo ao tubo. Verificou-se que o sinal possui dois picos laterais ao pico principal, causando assim uma zona de influência maior que o comprimento do entalhe. A Figura 4.13 mostra esses dois picos de influência.

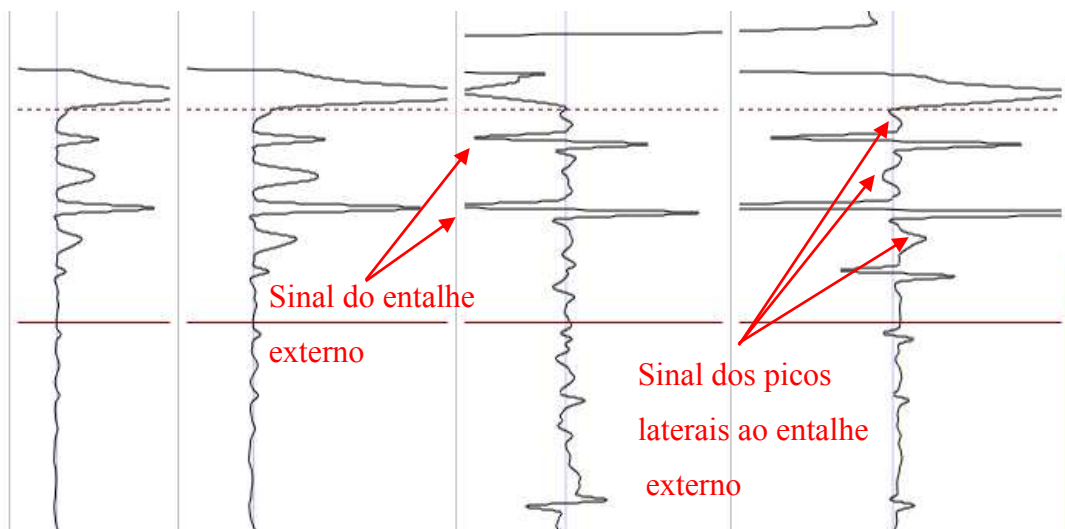


Figura 4.13 - Imagem dos sinais laterais ao sinal do entalhe externo (Fonte: Autor da Obra).

Sendo assim, fez-se necessário a compreensão desse sinal e o comprimento de influência desse sinal. Para isso foi utilizado as ferramentas existentes no próprio software da MAGNIFI. Sabe-se que o entalhe possui um comprimento de 10 mm conforme desenho do APÊNDICE A. Utilizando-se do tracionador para manter a velocidade constante em 300 mm/s e do cursor do *strip chart*, foi possível medir o tamanho do um sinal gerado após o ensaio. A Figura 4.14 mostra resultado obtido.

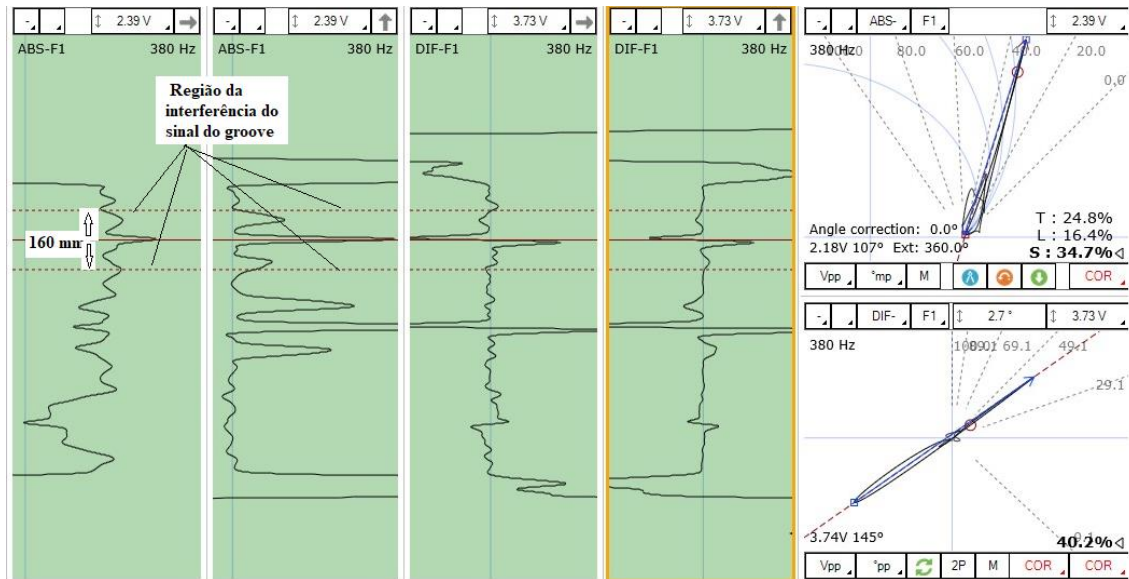


Figura 4.14 - Interferência do tamanho do entalhe externo ao tubo nas laterais de seu sinal (Fonte: Autor da Obra).

Verifica-se pela Figura 4.14 que o tamanho da interferência no sinal do entalhe externo, que possui um comprimento de 10 mm no tubo de ensaio, é representado por uma distância de 160 mm. Este fato demonstra que outras descontinuidades existentes próximas aos entalhes externos podem ser mascaradas. Isto ocorre devido à configuração das bobinas da sonda. O pico principal é o sinal da resposta total gerado pela passagem das duas bobinas excitadoras. Já os picos laterais e menores são referentes a passagem das bobinas excitadas separadamente.

#### 4.6. MENOR DISTÂNCIA ENTRE DUAS DESCONTINUIDADES

Esse estudo foi realizado para descobrir qual a menor distância entre duas descontinuidades para que o sinal seja detectado e compreendido. Para isso foi utilizado como parâmetro o sinal de um furo passante com diâmetro de 5 mm. Foram realizados ensaios com furos distanciados entre centros com 70 mm, 20 mm, 16 mm, 13 mm e 6 mm. Após realizar a passagem da sonda fez-se a análise do ensaio, ou seja, buscou-se sinais que forneçam 1,00 V de amplitude, 90° de ângulo de fase, 100 % de perda de espessura, e com isso uma distância que melhor distingue os sinais de um furo passante. A Figura 4.15 mostra o sinal de dois furos passantes a 70 mm de distância entre centros. Como pode ser verificado, os sinais dos dois furos são distintos e nítidos, podendo assim se caracterizar cada sinal como uma descontinuidade.

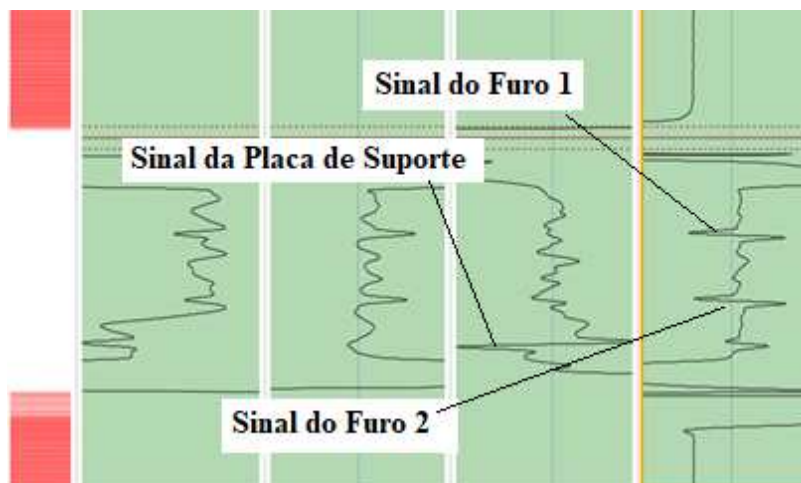


Figura 4.15 - Sinal de dois furos passantes distanciados em 70 mm entre centro (Fonte: Autor da Obra).

A Figura 4.16 mostra agora os sinais dos furos passantes distanciados a 20 mm e 16 mm entre centros. O sinal no canal diferencial se assemelha muito ao de um furo passante, conforme representado pela Figura 4.1 nos testes de velocidade do ensaio. Outra característica observada é a perda de espessura acusada de 93,8 % e o ângulo de fase de 93°. Como esses valores encontram-se dentro dos limites de resolução do ensaio, estes representam também um furo passante. Somente a amplitude do sinal que ficou fora dos parâmetros necessários, e o sinal do *strip chart* é nítido para as duas distâncias. Entretanto a 16 mm tem-se novamente uma sobreposição de sinal e conseqüente sobreposição da leitura.

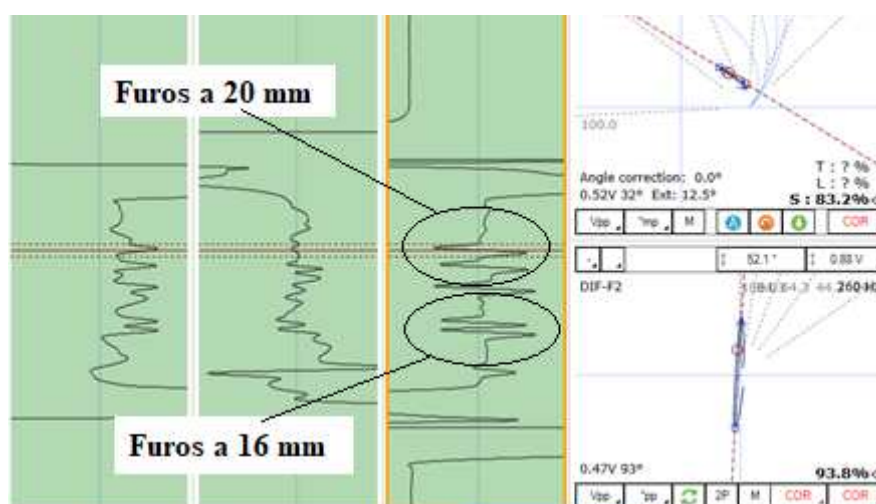


Figura 4.16 - Sinal de dois furos passantes distanciados em 20 mm e 16 mm entre centro (Fonte: Autor da Obra).

Por fim, a Figura 4.17 mostra o sinal dos furos passantes distanciados em 13 mm e 6 mm entre centros. É possível verificar que, apesar de haver sinal no *strip charts*, percebe-se que o sinal a 13 mm de distância possui uma clara sobreposição e com baixa nitidez visual. A 6 mm

de distância o software indicou tratar-se apenas um furo passante, gerando apenas um sinal equivalente para as duas descontinuidades. Além disso, não foi possível retirar nenhum parâmetro desses sinais, ou seja, não houve a constatação de uma descontinuidade no local. Com isso pode-se inferir que a menor distância entre dois furos para detecção clara (distinção entre sinais e parâmetros) é em torno de 16 mm.

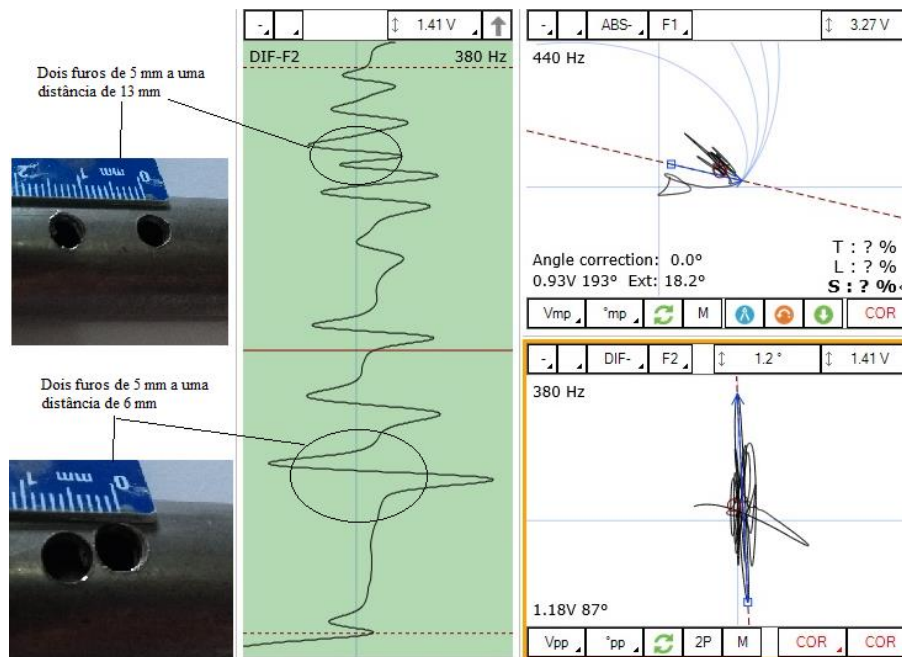


Figura 4.17 - Sinal de dois furos passantes distanciados em 13 mm e 6 mm entre centros (Fonte: Autor da Obra).

## 4.7. ENSAIO DE REPETIBILIDADE

Para determinar a repetibilidade do ensaio RFT com o equipamento da EDDYFI foram realizados 3 ensaios em 3 condições de frequência de excitação: 260, 380 e 440 Hz para os dois canais. Em seguida utilizou-se outro tubo, idêntico ao padrão, para realizar os ensaios de repetibilidade para avaliar a perda de espessura de cada descontinuidade. O objetivo aqui foi de acertar a profundidade das descontinuidades e assim verificar a repetibilidade do ensaio. Para isso foram analisados os sinais da amplitude, ângulo de fase e perda de profundidade de cada descontinuidade do tubo. Para cada condição de frequência de excitação foi realizado a calibração do equipamento em um tubo padrão. Após realizar os ensaios, fez-se uma comparação entre as diferenças nos resultados para assim verificar se há ou não repetibilidade. Nas Tabelas 4.4 a 4.6 estão os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 260 Hz.

Ensaio 260 Hz	Defeito	DIF			ABS		
		S [%]	Amp. [V]	Ang. [°]	S [%]	Amp. [V]	Ang. [°]
1	GR 40 %	34,7	3,26	128,0	39,9	1,78	107,0
	GR 60 %	46,8	6,90	118,0	59,9	3,85	97,0
	HOLE	97,7	1,03	91,0	-	-	-
	FBH 60 %	33,5	0,33	129,0	18,4	0,39	118,0
	4xFBH 20 %	25,0	0,23	140,0	5,1	0,20	125,0
2	GR 40 %	34,8	3,22	128,0	39,9	1,78	107,0
	GR 60 %	47,0	6,95	118,0	59,4	3,85	97,0
	HOLE	97,7	1,03	91,0	-	-	-
	FBH 60 %	33,9	0,32	129,0	17,4	0,40	118,0
	4xFBH 20 %	25,2	0,23	140,0	3,0	0,23	126,0
3	GR 40 %	34,9	3,24	128,0	40,2	1,76	107,0
	GR 60 %	47,1	6,94	118,0	60,2	3,88	97,0
	HOLE	97,7	0,80	91,0	-	-	-
	FBH 60 %	33,9	0,23	129,0	14,4	0,37	120,0
	4xFBH 20 %	26,2	0,23	138,0	3,4	0,23	125,0

GR 40 %: Entalhe externo de 40 % de perda de espessura; GR 60 %: Entalhe externo de 60 % de perda de espessura; Hole: Furo passante; FBH 60 %: Furo de fundo plano de 60 % de perda de espessura; 4xFBH 20 %: 4 furos de fundo plano distribuídos radialmente com 20 % de perda de espessura em cada furo.

Pode-se perceber ao analisar a Tabela 4.4 que a variação dos parâmetros é pequena. Analisando o furo passante (HOLE), por exemplo, percebe-se que em nenhum dos três ensaios foi possível fazer a leitura dos parâmetros no canal Absoluto, mostrando que ocorrências de falhas de parâmetros também se repetem. A Figura 4.18 é mostra graficamente a variação dos parâmetros do entalhe externo de 40 % (GR 40 %) nos três ensaios para o canal Absoluto. Como é possível verificar pela variação da perda de espessura (S %), a amplitude (Amp. V) e o ângulo de fase (Ang. °) são quase nulos.

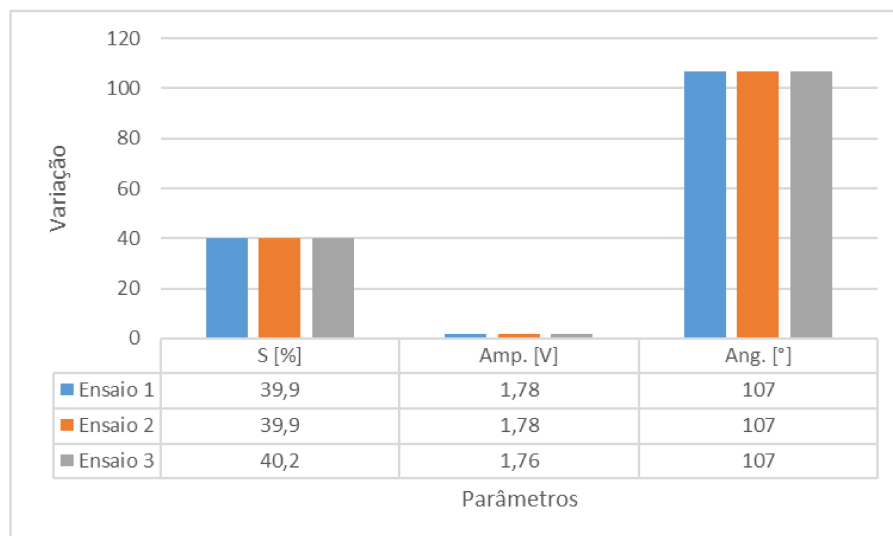


Figura 4.18 - Gráfico da variação dos parâmetros do entalhe externo de 40 % (GR 40 %) para o ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 260 Hz. S[%] perda de espessura, Amp.[V] amplitude, Ang.[°] ângulo de fase (Fonte: Autor da Obra).

Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 380 Hz.

Ensaio 380 Hz	Defeito	DIF			ABS		
		S [%]	Amp. [V]	Ang. [°]	S [%]	Amp. [V]	Ang. [°]
1	GR 40 %	39,5	3,79	144,0	39,4	2,17	103,0
	GR 60 %	56,0	8,35	126,0	59,9	4,82	86,0
	HOLE	93,6	1,28	95,0	96,4	0,68	55,0
	FBH 60 %	38,6	0,30	145,0	29,6	0,43	112,0
	4xFBH 20 %	27,5	0,25	161,0	11,5	0,26	127,0
2	GR 40 %	39,5	3,81	144,0	39,5	2,16	103,0
	GR 60 %	55,9	8,05	126,0	60,3	4,82	85,0
	HOLE	94,4	1,31	94,0	95,9	0,68	55,0
	FBH 60 %	34,2	0,55	151,0	25,7	0,42	115,0
	4xFBH 20 %	20,3	0,29	174,0	5,6	0,28	132,0
3	GR 40 %	39,6	3,76	144,0	39,5	2,15	103,0
	GR 60 %	56,0	8,20	126,0	60,0	4,83	86,0
	HOLE	94,1	1,31	94,0	96,5	0,69	54,0
	FBH 60 %	38,7	0,47	145,0	29,6	0,42	111,0
	4xFBH 20 %	27,9	0,26	160,0	10,2	0,28	128,0

GR 40 %: Entalhe externo de 40 % de perda de espessura; GR 60 %: Entalhe externo de 60 % de perda de espessura; Hole: Furo passante; FBH 60 %: Furo de fundo plano de 60 % de perda de espessura; 4xFBH 20 %: 4 furos de fundo plano distribuídos radialmente com 20 % de perda de espessura em cada furo.



Para mostrar que há também repetibilidade no ensaio realizado com 380 Hz, pode-se utilizar do parâmetro GR 60 % no canal Absoluto, que é um entalhe externo com perda de espessura de 60 %. Para isso a Figura 4.19 mostra que a variação também é pequena e que há repetibilidade no ensaio. Isso pode também ser visto analisando a Tabela 4.5 anterior, onde é perceptível que a variação dos resultados é pequena.

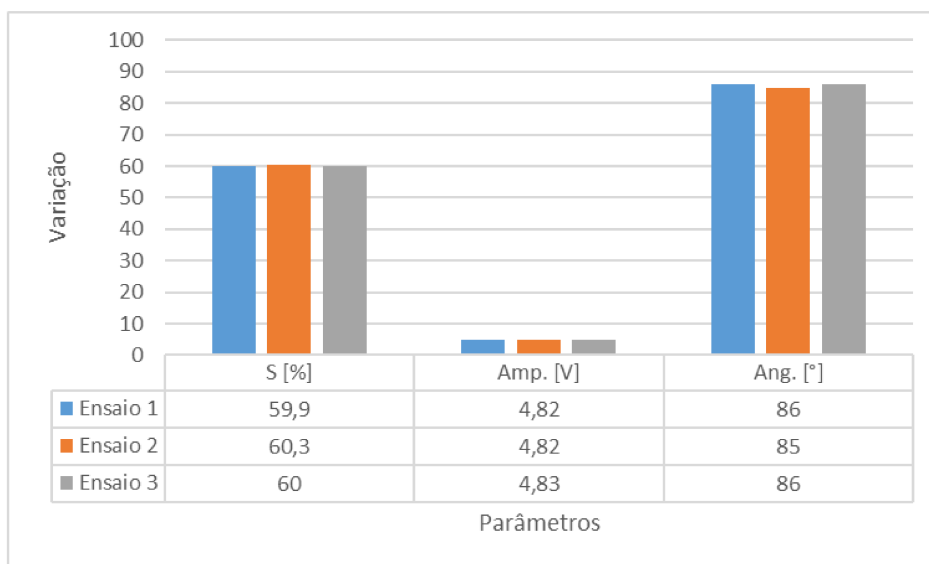


Figura 4.19 - Gráfico da variação dos parâmetros do entalhe externo de 60 % (GR 60 %) para o ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 380 Hz. S[%] perda de espessura, Amp.[V] amplitude, Ang.[°] ângulo de fase (Fonte: Autor da Obra).

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de repetibilidade com frequência de excitação de 440 Hz.

Ensaio 440 Hz	Defeito	DIF			ABS		
		S [%]	Amp. [V]	Ang. [°]	S [%]	Amp. [V]	Ang. [°]
1	GR 40 %	46,1	2,52	149,0	39,8	2,46	100,0
	GR 60 %	65,5	5,45	128,0	60,5	5,55	79,0
	HOLE	98,9	0,71	91,0	100,0	0,70	38,0
	FBH 60 %	50,9	0,20	144,0	28,3	0,44	112,0
	4xFBH 20 %	29,0	0,18	168,0	14,7	0,30	125,0
2	GR 40 %	46,0	2,50	149,0	39,9	2,46	100,0
	GR 60 %	65,7	5,43	128,0	60,6	5,58	79,0
	HOLE	98,9	0,70	91,0	100,0	0,68	38,0
	FBH 60 %	49,3	0,21	145,0	23,0	0,46	117,0
	4xFBH 20 %	28,3	0,17	169,0	9,7	0,33	131,0

Continuação.

Ensaio 440 Hz	Defeito	DIF			ABS		
		S [%]	Amp. [V]	Ang. [°]	S [%]	Amp. [V]	Ang. [°]
3	GR 40 %	46,1	2,52	149,0	39,0	2,19	103,0
	GR 60 %	65,5	5,42	128,0	60,6	4,84	82,0
	HOLE	98,9	0,72	91,0	93,7	0,62	42,0
	FBH 60 %	50,7	0,16	144,0	20,0	0,38	119,0
	4xFBH 20 %	29,2	0,17	168,0	5,2	0,30	131,0

GR 40 %: Entalhe externo de 40 % de perda de espessura; GR 60%: Entalhe externo de 60 % de perda de espessura; Hole: Furo passante; FBH 60 %: Furo de fundo plano de 60 % de perda de espessura; 4xFBH 20 %: 4 furos de fundo plano distribuídos radialmente com 20 % de perda de espessura em cada furo.

Por fim, assim como nos demais ensaios, o ensaio com frequência de excitação de 440 Hz resultou também em elevada repetibilidade. Utilizando-se da Tabela 4.6 é possível verificar que os ensaios seguem com valores de respostas próximos. Isso pode ser visto também pela a Figura 4.20 que representa os resultados obtidos pelo furo passante (HOLE) analisados no canal Diferencial. Nesse caso não houve variação no resultado para nenhum dos ensaios, mostrando que ocorre repetibilidade.

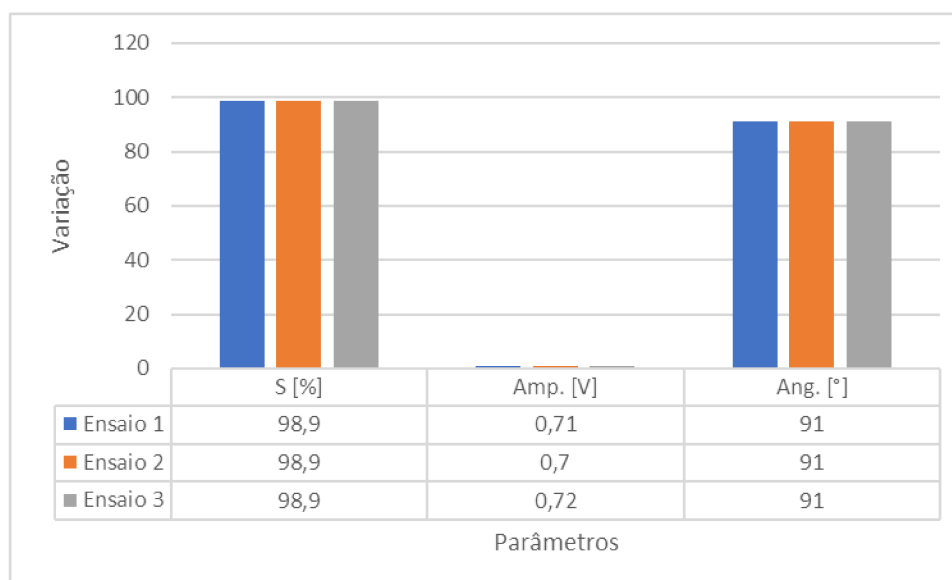


Figura 4.20 - Gráfico da variação dos parâmetros do furo passante (HOLE) para o ensaio de repetibilidade. S[%] perda de espessura com frequência de excitação de 440 Hz, Amp.[V] amplitude, Ang.[°] ângulo de fase (Fonte: Autor da Obra).

Pode-se dizer então que o ensaio possui repetibilidade mesmo variando as frequências de excitação, pois o ensaio manteve resultados bastante próximos para as três frequências de estudo, e inclusive variando o tipo de descontinuidade. No caso, todas as descontinuidades resultaram em valores de perda de espessura, de fase e de amplitude próximos.

#### 4.8. COMPARATIVO ENTRE IRIS E RFT EM TUBOS DE ENSAIO

Um dos contrastes entre as técnicas IRIS e RFT é a forma de visualizar as indicações de descontinuidades nos softwares. Um dos motivos de usarem o IRIS de maneira mais ampla é justamente sua capacidade de gerar imagens de planificação do tubo em vários planos de visualizações como A-Scan, B-Scan, C-Scan e D-Scan. A Figura 4.21 mostra um exemplo com todas essas vistas.

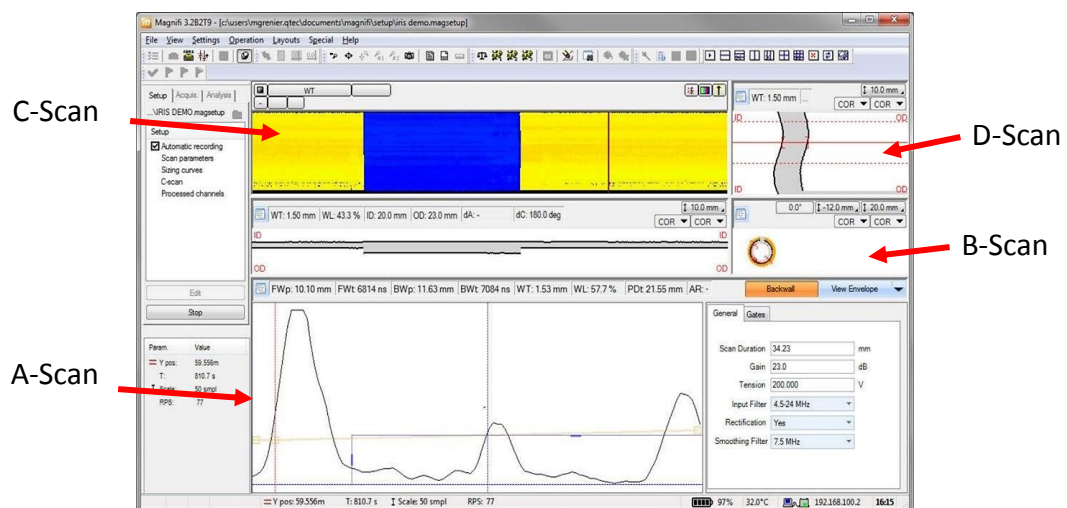
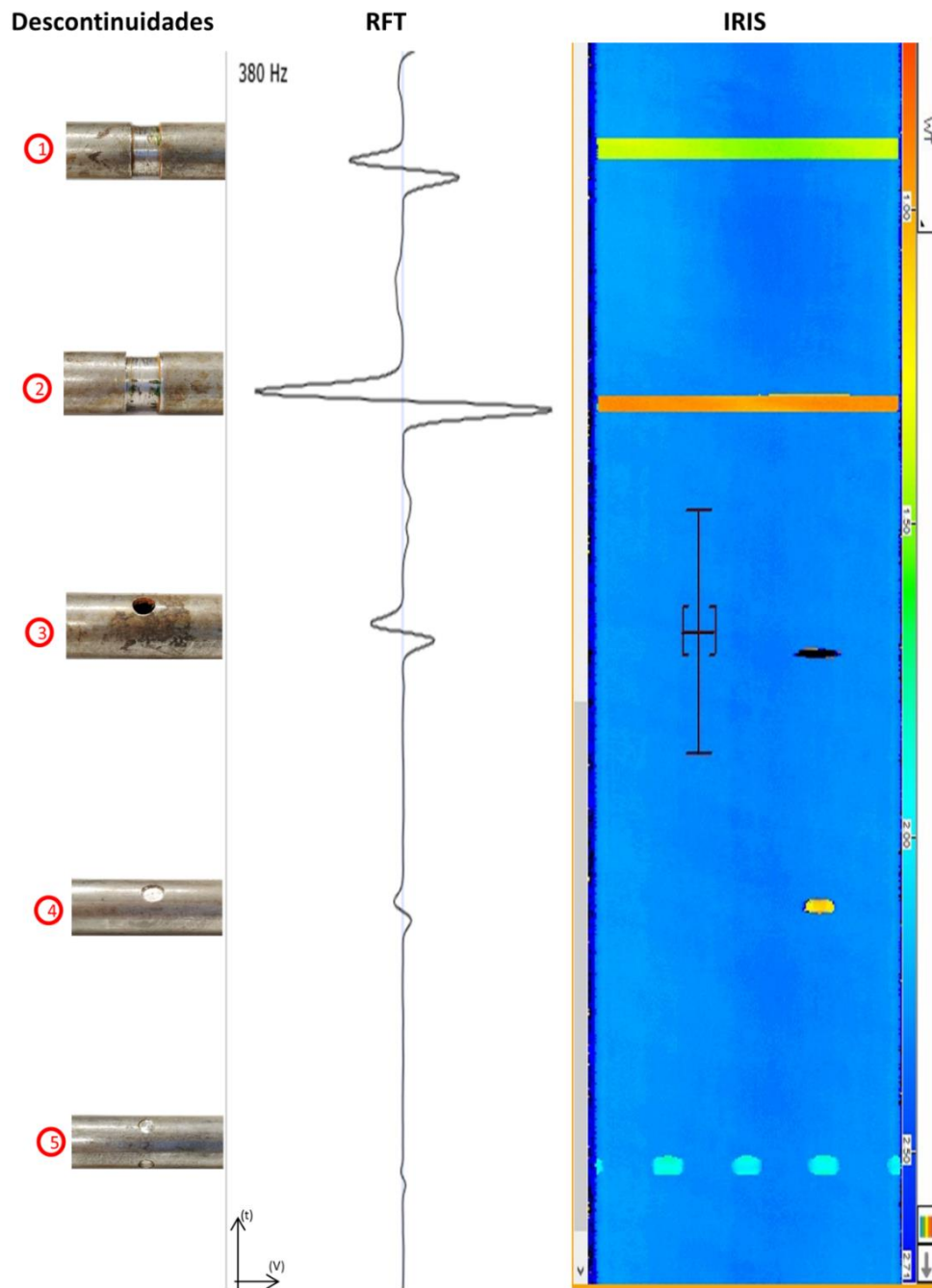


Figura 4.21 - Vistas A-Scan, B-Scan, C-Scan e D-Scan de um ensaio por IRIS (Fonte: ORNELAS, 2017).

Sendo assim, o primeiro teste comparativo realizado serviu para confrontar de maneira visual todos os sinais das respostas do tubo padrão pelo RFT com os sinais das resposta do IRIS. Neste caso foi utilizado o tubo padrão de referência de caracterização de descontinuidade por possuir descontinuidades conhecidas, como profundidade e largura. Antes de iniciar os ensaios as duas técnicas foram calibradas, e em seguida realizou-se os ensaios de IRIS e RFT no tubo padrão. Com os resultados obtidos relacionou-se os sinais do C-Scan do IRIS com o *Strip Chart* do RFT e suas respectivas descontinuidades. A Figura 4.22 mostra o comparativo. A Figura 4.23 faz uma comparação visual entre o sinal resposta no plano de voltagem e de *Lissajous* do RFT com o B-Scan e o D-Scan do IRIS e suas respectivas descontinuidades.



1 – Groove de 40 % de perda de espessura

2 – Groove de 60 % de perda de espessura

3 – Furo passante (100 % de perda de espessura)

4 – Furo não passante de fundo plano de 60 % de perda de espessura

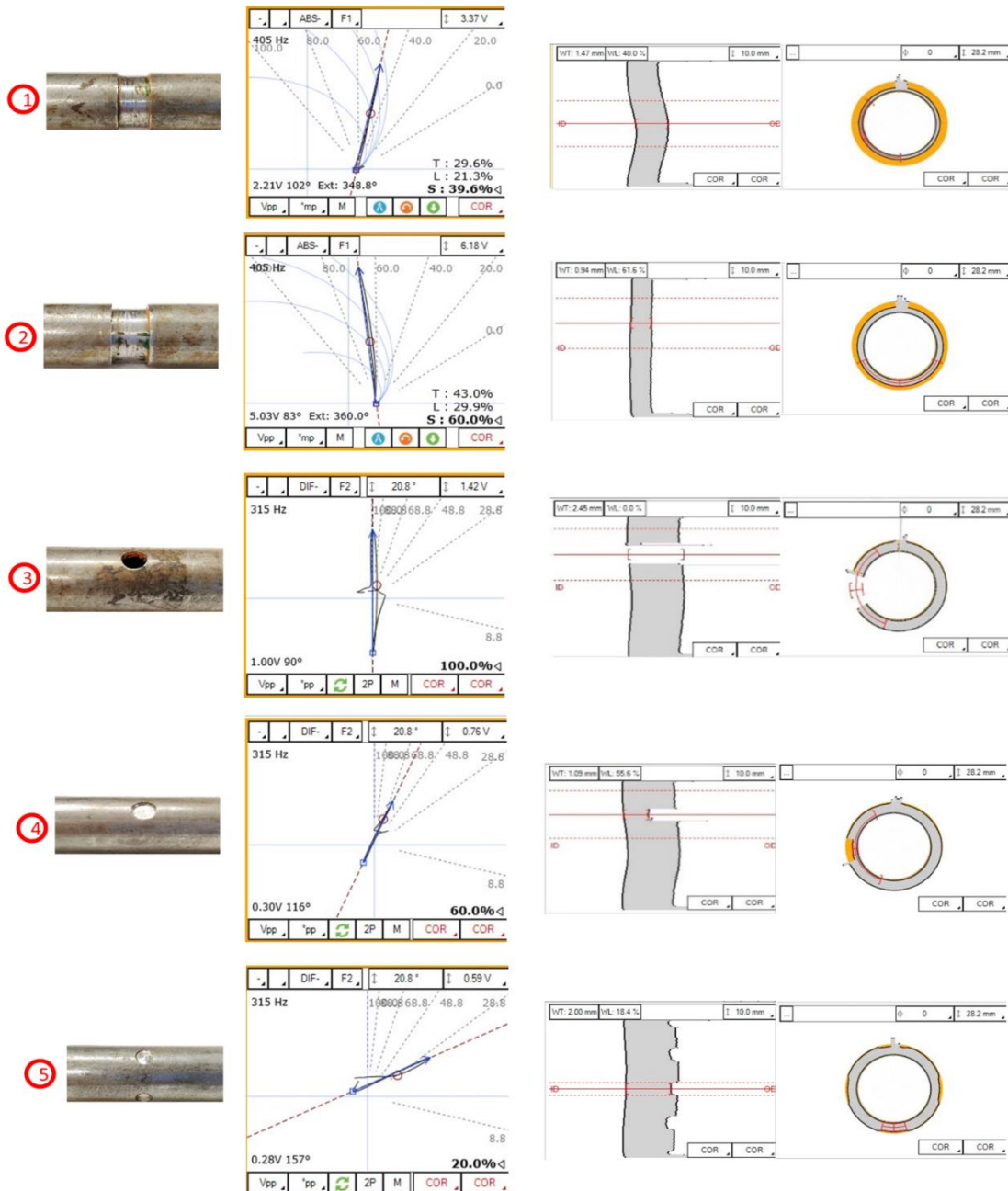
5 – Quatro furos não passantes de fundo plano e radialmente distribuídos de 20 % de perda de espessura

Figura 4.22 - Comparativo visual entre os resultados dos ensaios RFT e IRIS (C-Scan) utilizando o tubo padrão (Fonte: Autor da Obra).

## Descontinuidades

## RFT

## IRIS



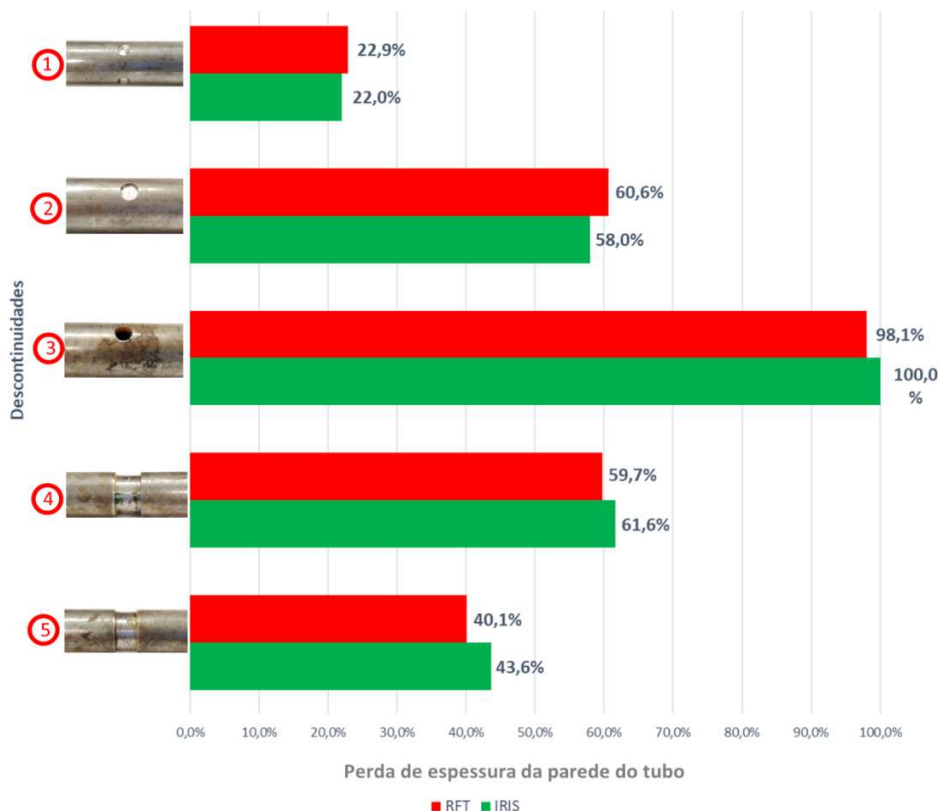
- |   |  |
|---|--|
| 1 – Groove de 40 % de perda de espessura        | 4 – Furo não passante de fundo plano de 60 % de perda de espessura                                     |
| 2 – Groove de 60 % de perda de espessura        | 5 – Quatro furos não passantes de fundo plano e radialmente distribuidos de 20 % de perda de espessura |
| 3 – Furo passante (100 % de perda de espessura) |  |

Figura 4.23 - Comparativo visual do plano de voltagem e de Lissajous do RFT com a planificação do tubo no IRIS (B-Scan e D-Scan) utilizando o tubo padrão (Fonte: Autor da Obra).

Ao analisar essas figuras, percebe-se que o IRIS é uma técnica visualmente mais intuitiva de se trabalhar quando comparada ao RFT. O IRIS expõe os resultados em vários planos e em gradientes de cores com a capacidade de caracterizar e planificar o formato geométrico da descontinuidade. Outra característica do IRIS é conseguir informar se a

descontinuidade é posicionada internamente ou externamente ao tubo. Já o RFT expõe o resultado em diagrama de tensão no tempo e em planos de impedâncias e não consegue informar se a descontinuidade está junto à superfície interna ou externa do tubo.

A técnica IRIS informa a espessura remanescente (em mm) de cada descontinuidade ao redor da circunferência analisada. Já o RFT informa a porcentagem de perda de espessura levando em conta todas as descontinuidades ao redor da circunferência (resultado médio). Assim, realizou-se um comparativo de perda de espessura das descontinuidades do tubo padrão. A Figura 4.24 mostra o gráfico comparativo das porcentagens de perda da espessura da parede do tubo padrão obtidas pelas duas técnicas (Entre IRIS e RFT).



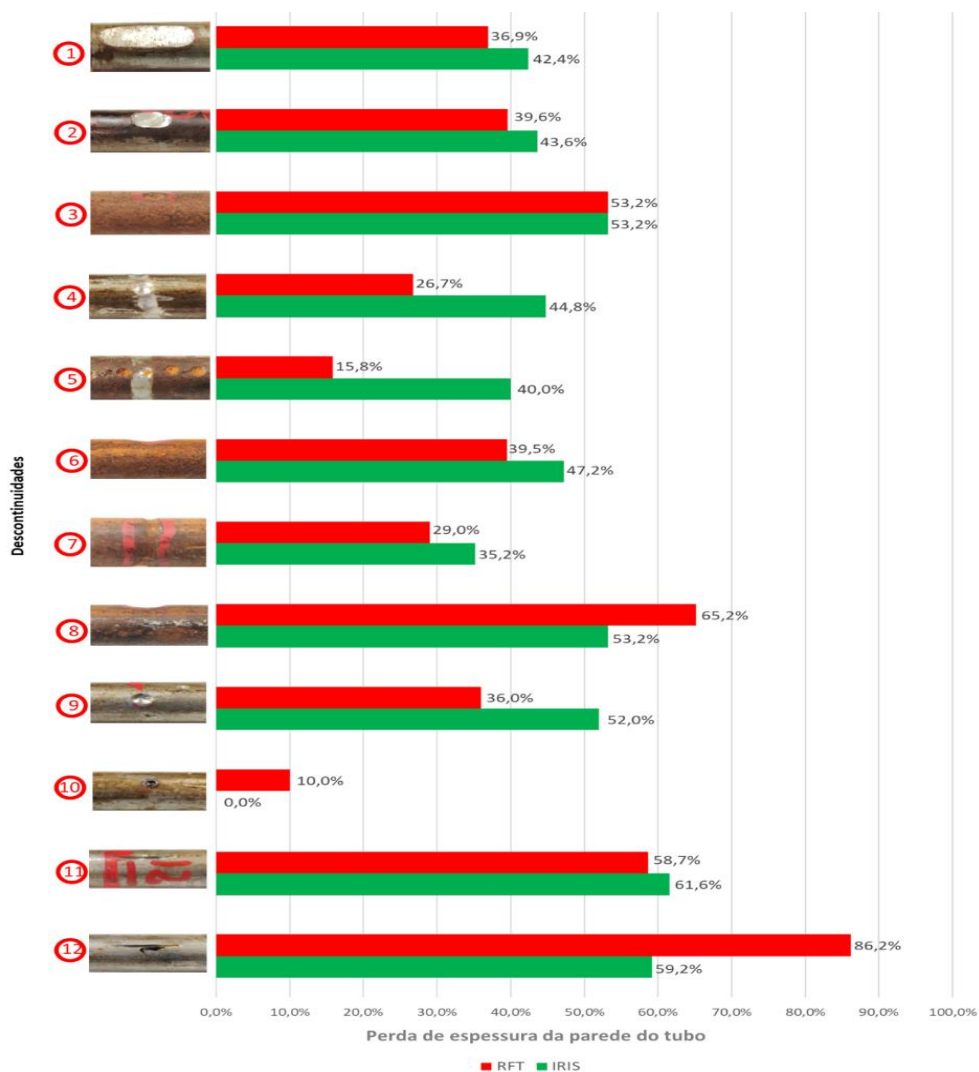
- |  |   |
|--|---|
| 1 – Quatro furos não passantes de fundo plano e radialmente distribuídos de 20 % de perda de espessura | 3 – Furo passante (100 % de perda de espessura) |
| 2 – Furo não passante de fundo plano de 60 % de perda de espessura                                     | 4 – Groove de 60 % de perda de espessura        |
|  | 5 – Groove de 40 % de perda de espessura        |

Figura 4.24 - Gráfico comparativo da porcentagem de perda de espessura obtida com IRIS e RFT no tubo padrão (Fonte: Autor da Obra).

Nota-se que, apesar do RFT não ser, a priori, uma técnica visualmente intuitiva, seus resultados em termos de perda de espessura se assemelham bastante aos resultados do IRIS. É possível verificar que tanto para descontinuidades mais acentuadas, como os entalhes externo de 60 % e 40 %, quanto para descontinuidades pontuais, furos passantes e não passante com 60

% e 20 % apenas de perda de espessura, o RFT foi capaz de encontrar as discontinuidades e dimensioná-las de forma equivalente ao IRIS.

Após compreender os sinais respostas e interpretar as informações geradas pela técnica por RFT, fez-se um comparativo utilizando tubos com discontinuidades de geometrias desconhecidas. Nesse comparativo foi considerado somente o parâmetro sobre a porcentagem de perda de espessura da discontinuidade. Foi considerado também que o IRIS é a técnica padrão, ou seja, quanto mais próximo o resultado do RFT for do IRIS, melhor será considerada a técnica por RFT. A Figura 4.25 mostra os resultados obtidos neste caso.



- 1 – Rebaixo longitudinal de maior comprimento
- 2 – Rebaixo longitudinal de menor comprimento
- 3 – Rebaixo de fundo plano
- 4 – Pites em série radial

- 5 – Pites em série longitudinal
- 6 – Rebaixo superficial leve
- 7 – Entalhe externo radial
- 8 – Rebaixo superficial médio

- 9 – Pite de fundo cônico
- 10 – Pite isolado
- 11 – Rasgo longitudinal de maior largura
- 12 – Rasgo longitudinal de menor largura

Figura 4.25 - Gráfico comparativo da porcentagem de perda de espessura obtida com IRIS e RFT em tubos com discontinuidades de dimensões desconhecidas fornecidos por uma empresa do setor de óleo e gás (Fonte: Autor da Obra).



Ao observar os resultados da Figura 2.25, percebe-se que para descontinuidades de maior tamanho e com geometria bem definida o desempenho do RFT se aproximou mais daquele do IRIS, havendo uma diferença pequena com um erro relativo em torno de 8 % para mais ou para menos. Já para descontinuidades com geometrias pouco definidas, como no caso de pites em série longitudinal, radial, ou cônico e o rasgo longitudinal de menor largura, o RFT apresentou resultados distantes dos que foram reconhecidos pelo IRIS, o que parece se relacionar à forma geométrica das descontinuidades.

A Figura 4.26 mostra mais um comparativo visual entre as duas técnicas, onde são comparados os sinais do IRIS e do RFT das descontinuidades 5, 11 e 12 da Figura 4.25. Percebe-se que para os rasgos longitudinais, as duas técnicas foram capazes de gerar um sinal e reconhecer a descontinuidade. Já para pite em série percebe-se que somente o IRIS consegue gerar um sinal e reconhecer tais descontinuidades incluindo a perda de espessura da parede no local. Neste caso, no RFT o sinal se confunde com o ruído da técnica, dificultando o reconhecimento da descontinuidade e consequentemente da perda de espessura da parede.

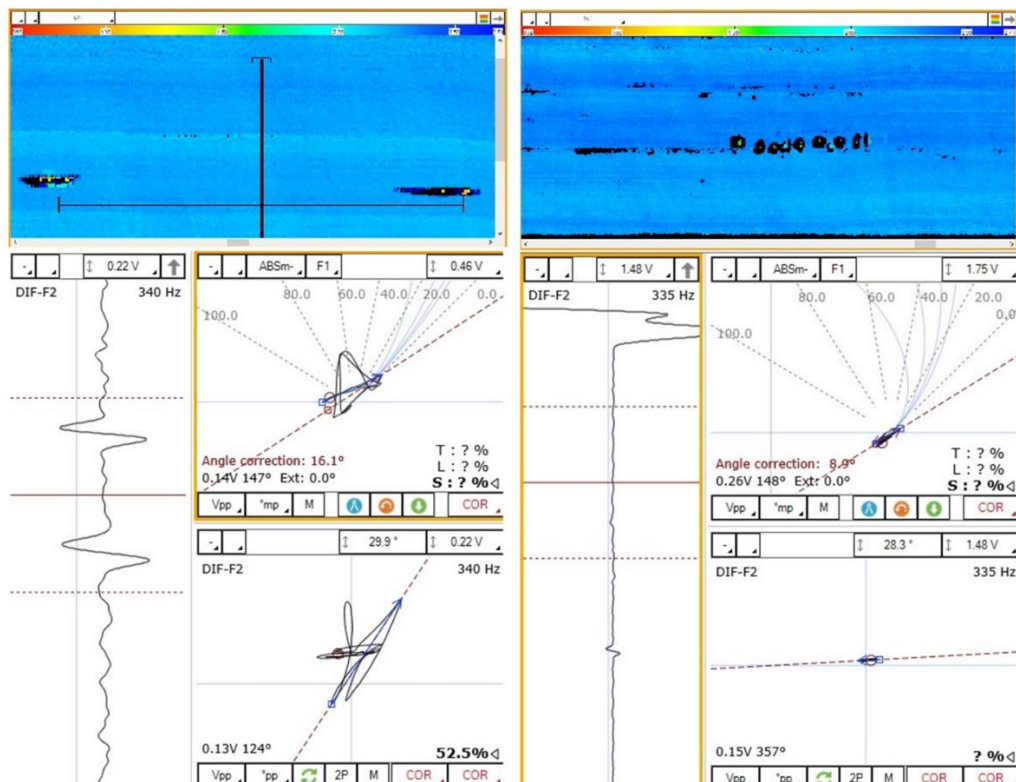


Figura 4.26 - Comparativo visual entre os resultados dos ensaios RFT (abaixo) e IRIS (acima) para descontinuidades do tipo rasgo longitudinal (à esquerda) e pite em série (à direita) (Fonte: Autor da Obra).

Essa dificuldade em gerar um sinal e caracterizar esse sinal como uma descontinuidade, mostra que a técnica por RFT apresenta grande dependência da experiência do operador em



identificar e interpretar as particularidades do sinal. Isso também pode ser visto no IRIS, mas com menor intensidade, por exemplo, na Figura 4.25, o inspetor por IRIS não consegue determinar uma corrosão pontual pequena devido a dificuldades em interpretar e determinar os parâmetros do ensaio.

#### **4.9. COMENTÁRIOS FINAIS**

O intuito de realizar os ensaios preliminares foi de melhorar o entendimento do ensaio por RFT e da influência de seus parâmetros de operação, como velocidade de arraste, frequência de excitação, influência da placa de suporte na leitura e interpretação de seus resultados, efeitos da configuração das bobinas da sonda avaliando os efeitos nas bordas dos tubos, na leitura de uma descontinuidade e nas distâncias entre descontinuidades, assim como um teste de repetibilidade. Visou-se ainda avaliar seu desempenho frente ao ensaio IRIS diante de variados tipos de descontinuidades.

O cenário ideal para a realizar o ensaio RFT é calibrar o sistema a uma dada velocidade de varredura e então reduzir sensivelmente seu nível para a realização dos ensaios em si com o intuito de garantir a amplitude e ângulo de fase adequada das leituras e uma melhor detecção das descontinuidades, inclusive com o uso de um tracionador com regulagem e controle constante da velocidade.

O melhor conjunto de frequências de excitação emitidas pela sonda RFT foi de 400 Hz para o canal absoluto e 280 Hz para o diferencial, ainda que essa seja uma configuração exclusiva para cada trocador e que precisa ser confirmada no momento do ensaio;

A menor distância que uma descontinuidade deve estar da placa do suporte do trocador de calor pra que a mesma seja encontrada na leitura do canal diferencial e do canal absoluto do RFT foi de 115 mm, e o canal MIX é necessário para encontrar descontinuidades próximas à placa de suporte, mesmo que não tenha sido utilizado para esses ensaios.

A influência da configuração das bobinas emissoras e receptoras da sonda é perceptível quando, há a necessidade de interpretar e reconhecer descontinuidades próximas às bordas dos tubos, em descontinuidades próximas e no sinal resposta de um entalhe;

O ensaio de repetibilidade mostrou-se satisfatório, pois o ensaio obteve sinais respostas semelhantes em várias frequências de excitações diferentes, mostrando que há repetibilidade no ensaio.

Em termos de execução, o RFT apresentou-se mais rápido e prático por não necessitar de água e pelo equipamento depender de menos acessórios, sendo operar o ensaio em cada tubo de 6 metros em menos de um minuto.

Em termos de leitura e análise dos resultados, apesar do RFT oferecer maiores dificuldades na interpretação dos dados, foi possível verificar que, para descontinuidades de maiores dimensões, a performance com RFT se assemelha à com o IRIS. Já para descontinuidades menores ocorreu uma maior dificuldade na leitura com o RFT.

## CAPÍTULO V

### COMPARATIVO ENTRE IRIS E RFT EM FEIXES TUBULARES

#### 5.1 INTRODUÇÃO

Após realizar os ensaios e comparativos em tubos com descontinuidades fabricadas, conforme capítulo IV, foi possível compreender o funcionamento da técnica de ensaio não destrutivo por RFT e como proceder com o comparativo desta técnica com o IRIS. A partir desse entendimento partiu-se para o comparativo utilizando-se dos feixes tubulares tagueados como 01-E-10B e 01-E-10F. Os ensaios foram realizados de três formas, a saber: ensaio com o RFT, ensaio com o IRIS e por fim um ensaio com Escâner 3D, onde neste último, foram selecionadas algumas regiões para análise comparativa entre as três técnicas.

O primeiro comparativo entre as duas técnicas IRIS e RFT foi feita de forma global, ou seja, em termos de perdas de espessuras gerais observadas em cada feixe tubular, de modo a não se ter uma identificação de quais tubos foram ensaiados e comparados pelas duas técnicas.

O segundo comparativo foi realizado de forma pontual, ou seja, considerando a mesma posição longitudinal do tubo. A posição no tubo e a descontinuidade foram definidas pelo ensaio por IRIS, conforme a maior perda de espessura encontrada e relatada. Essa descontinuidade foi então encontrada nos resultados do ensaio por RFT e assim comparada à perda de espessura relatada nessa posição. Durante esse comparativo avaliou-se também a influência do inspetor nos resultados do ensaio. Nesse caso, utilizou-se três inspetores (dois com maior nível de experiência e um terceiro recém treinado) com o mesmo procedimento de análise (conforme manual da EDDYFI) para analisar os mesmos dados e tentar buscar as mesmas descontinuidades, sendo que essa análise foi realizada somente no feixe 01-E-10B.

Avaliou-se também a correlação entre os dados de inspeção de cada técnica. Podemos conceituar correlação como sendo a semelhança ou a equivalência entre os dados avaliados, sendo calculada conforme a seguinte equação (MICROSOFT, 2022):

$$\frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (10)$$

Sendo assim, quanto maior a correlação mais equivalentes são os dados de cada inspeção.

Por último, selecionou-se alguns tubos situados na periferia (regiões mais externas por facilidade de extração de amostras) do feixe tubular para análise de precisão via escaneamento 3D. Assim foi possível obter uma terceira medida (contraprova) da mesma continuidade para confrontar com o comparativo entre IRIS e RFT. Com isso foi possível realizar um teste de hipótese para verificar se os resultados obtidos pelo RFT têm representatividade equivalente aos resultados obtidos pelo IRIS. Em complemento, as topografias obtidas por meio do escâner 3D foram utilizadas para caracterizar o tipo de corrosão existente nos trocadores de calor inspecionados.

## **5.2. ENSAIO POR CAMPO REMOTO – RFT**

### **5.2.1. PARÂMETROS DE ENSAIO**

Antes de realizar o ensaio não destrutivo por RFT, realizou-se a calibração do equipamento através do tubo padrão de referência de caracterização de descontinuidade. A calibração foi realizada conforme orientações contidas no manual do fabricante do equipamento, com ressalvas do Artigo 17 do código ASME (2019), em sua seção V e requerimentos sugeridos pela norma ASTM SE-2096/SE-2096M (2019). O desenho do tubo padrão encontra-se no APÊNDICE A. Para manter a velocidade de tracionamento constante, utilizou-se do tracionador (Figura 3.3 da seção 3.1) produzido exclusivamente para o ensaio por RFT. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios com o RFT foi o ECTANE 2 da EDDYFI, com conexão para PC para interface com o usuário e uma sonda rígida Dual Drive (Sonda RFT Dual Driver PRBT-RFT-DDST ABS/DIF), conforme Figura 3.1 e Figura 3.2 da seção 3.1.1.

Os ensaios por RFT foram feitos sob as seguintes condições (obtidas após uma vários ensaios realizados nos tubos dos trocadores e no tubo padrão):

- Frequência de excitação: 680 Hz no canal DIF (Diferencial) e 500 Hz no canal ABS (Absoluto);
- Amplitude: 10 V;
- Frequência de aquisição: 1000 Hz;
- Velocidade de tracionamento da sonda: 300 mm/s;
- Ganho no canal ABS: 46 dB;

- Ganho no canal DIF: 46 dB;
- Filtro (cutoff): 12 Hz no canal ABS;
- Filtro (cutoff): 12 Hz no canal DIF.

### 5.2.2. ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR 01-E-10B

Após a preparação do ensaio RFT, selecionou-se os tubos nos feixes para inspeção. Apesar da limpeza realizada com hidrojateamento de alta pressão, em vários tubos não foi possível realizar o ensaio por RFT. A presença de incrustações muito aderidas na entrada de vários tubos e principalmente empenamentos impediram a inserção da sonda. Isso está relacionado à geometria da sonda e às condições estruturais do feixe tubular. Pequenos empenamentos nos tubos não permitiam a passagem da sonda. Além disso, a alta degradação e corrosão do feixe contribuíram também para o entupimento e consequente plugueamento de vários tubos mesmo após a limpeza. Excluídos os tubos problemáticos, conseguiu-se ensaiar 484 tubos, conforme indicado em vermelho na Figura 5.1

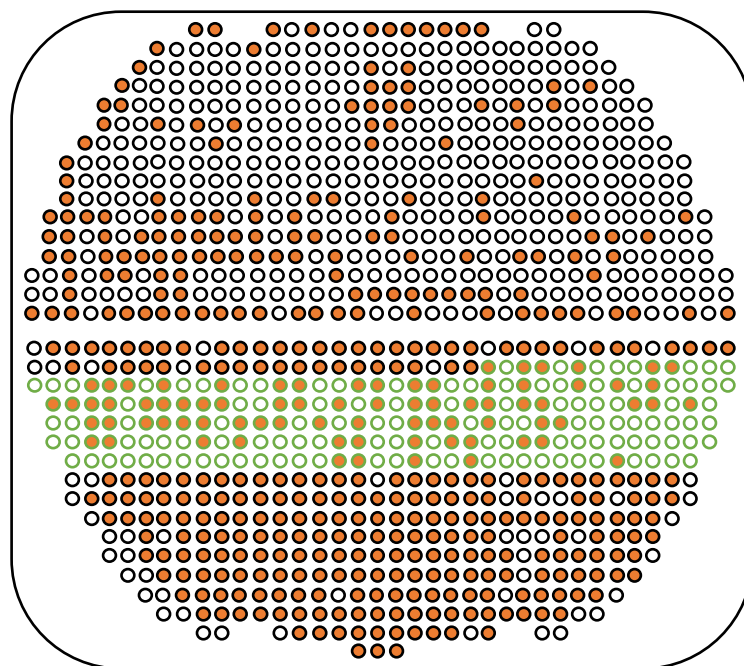


Figura 5.1 - Tubos inspecionados por RFT no feixe 01-E-10B (em laranja) - total de 484 tubos com 77 tubos inspecionados com limpeza de baixa pressão (contorno em verde). (Fonte: Autor da Obra).

A primeira análise a ser feita neste feixe está relacionada a variação da pressão de limpeza dos tubos. A região com limpeza de baixa pressão (7 000 psi representado em verde), mostra que dos 174 tubos, somente em 77 foi possível realizar o ensaio, isto é, em 44,2% dos

tubos limpos. Isso indica que a limpeza deve ocorrer acima de 7 000 psi para a realização do ensaio RFT. Já na região de limpeza com 15 000 psi, o RFT conseguiu ser aplicado em 407 tubos, sendo que os 442 tubos restantes não foram ensaiados devido a problemas de empenamento, alta taxa de corrosão e incrustação que a limpeza não conseguiu desobstruir.

A segunda análise feita foi para encontrar a maior descontinuidade, ou maior perda de espessura, e a posição dessa descontinuidade ao longo dos 6 metros de comprimento de cada tubo. A Figura 5.2 mostra o valor da máxima perda de espessura de parede em porcentagem de cada tubo inspecionado em função da sua posição ao longo do comprimento do feixe 01-E-10B após o ensaio RFT. Os resultados dessa análise encontram-se no APÊNDICE B conforme a Tabela B1 – Resultados do ensaio por RFT de maior descontinuidade e posição no Feixe 01-E-10B.

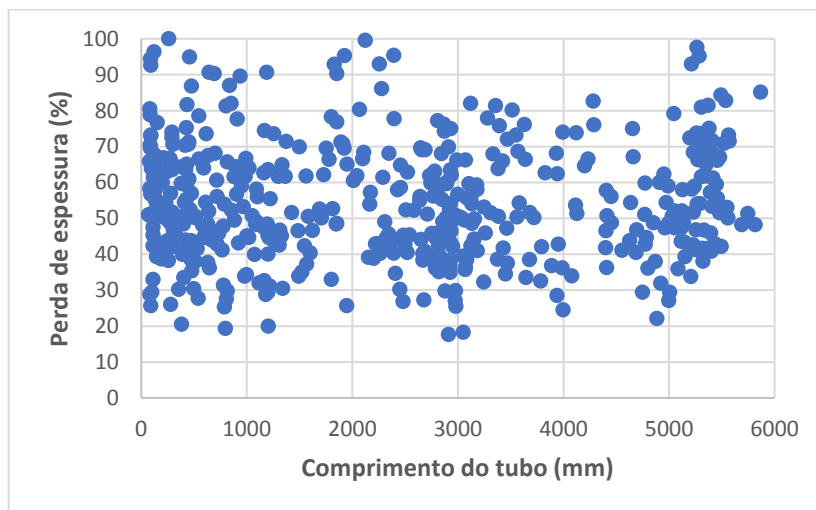


Figura 5.2 – Valor da perda em porcentagem de espessura versus posição longitudinal da maior perda de espessura encontrada no do feixe tubular 01-E-10B pela técnica por RFT (Fonte: Autor da Obra).

Verifica-se a existência de tubos com perda de espessura igual e próximo a 100 %. Encontrou-se 31 tubos com perda de espessura acima de 80 %, demonstrando que o feixe estava bastante deteriorado, algo até esperado, pois se tratava de um feixe descartado pela empresa de refino após ter trabalhado por 6 anos consecutivos. Outra observação a se fazer é em relação à dispersão das descontinuidades, já que toda a extensão do feixe tubular se encontra com descontinuidades que foram caracterizadas como defeitos, pois apresentam elevada perda de espessura. A Figura 5.3 mostra esses resultados de forma discretizada. O valor central possui uma variação de  $\pm 5$  %, para assim contabilizar todos os tubos dessa faixa. Verifica-se que a maior incidência de perda de espessura ficou em torno de 50 % de perda (total de 120 tubos). É importante destacar que, apesar da condição de degradação do feixe, foi verificado a

existência de 90 tubos, do total de 484 tubos analisados, com perda de espessura menor que 40 %, o que corresponde a uma espessura remanescente acima de 1,27 mm, sendo que a espessura nominal do tubo é de 2,11 mm. É possível perceber também uma quantidade de tubos (total de 83) com perda de espessura acima de 70 %, o que mostra a diversidade de descontinuidades e consequentes defeitos presentes nesse feixe tubular.

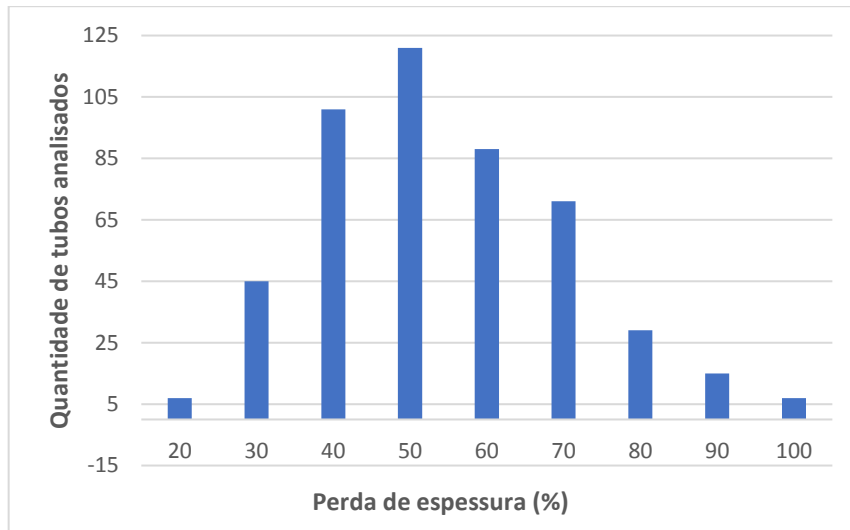


Figura 5.3 – Quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda na espessura de parede para o feixe 01-E-10B com o ensaio por RFT.

#### 5.2.2.1. Ensaio de Repetibilidade no Feixe Tubular 01-E-10B

Assim como realizado nos tubos com descontinuidades fabricadas em laboratório, realizou-se também um ensaio de repetibilidade com descontinuidades em tubos reais. Para realizar esse ensaio selecionou-se o tubo 16/38 (tubo 38 da fileira 16) do feixe tubular 01-E-10B. Foram então selecionadas sete descontinuidades nesse tubo para que fossem utilizadas para avaliação de repetibilidade, sendo uma dessas descontinuidades um furo passante feito propositalmente no tubo, e com isso realizou-se sete ensaios por RFT nesse tubo. A Figura 5.4 ilustra um sinal resposta do ensaio por RFT do tubo 16/38 com as setes descontinuidades selecionadas com ênfase no furo passante.

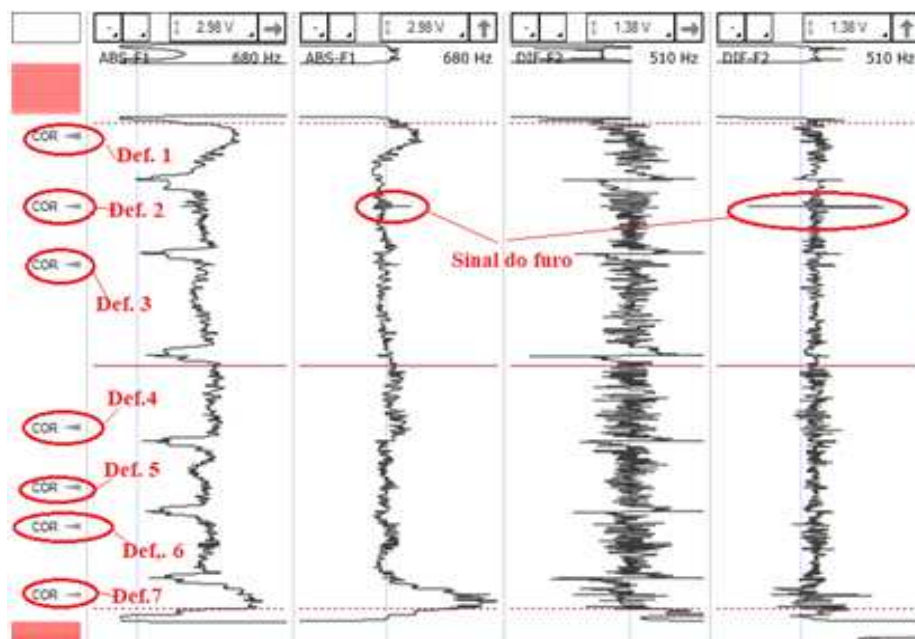


Figura 5.4 - Sinal resposta do ensaio por RFT do tubo 16/38 do feixe tubular 01-E-10B com as setes descontinuidades para o ensaio de repetibilidade (Fonte: Autor da Obra).

Os setes sinais foram então analisados utilizando os procedimentos de análise desenvolvida a partir do manual do equipamento, considerando a mesma normalização de sinal para os setes sinais (mesmo inspetor), evitando assim a influência do inspetor na normalização do sinal. Após avaliação dos sinais obteve-se a média e o desvio padrão de cada descontinuidade, como apresentado na Tabela 5.1, sendo que a descontinuidade número 2 é o furo passante.

Tabela 5.1 - Média e desvio padrão das medições do ensaio de repetibilidade do tubo 16/38 do feixe tubular 01-E-10B.

Descontinuidade	Posição (mm)	Canal DIF		Canal ABS	
		Média (%)	Desvio (%)	Média (%)	Desvio (%)
1	5.850	39,77	2,83	36,8	1,5
2 (furo passante)	5.300	97,99	2,35	98,1	0,8
3	4.440	30,47	0,35	32,6	3,7
4	3.470	44,13	3,17	51,6	2,5
5	1.630	30,01	0,90	42,1	0,9
6	1.420	34,93	2,18	36,3	2,1
7	250	55,59	0,92	61,8	0,8



A diferença entre os resultados dos canais está relacionada à funcionalidade de cada um. O canal Diferencial é calibrado para pequenas descontinuidades e localizadas, enquanto, o canal Absoluto é calibrado para descontinuidades maiores, tipo entalhes/ranhuras, por isso a diferença entre os valores, sendo que na análise foram sempre considerados os maiores valores entre os canais.

Como pode ser verificado pela Tabela 5.1, o máximo desvio padrão no canal Absoluto foi de 3,7 %, o que representa 0,08 mm de espessura. Já para o canal Diferencial, o máximo desvio padrão foi de 3,16 %, o que representa 0,06 mm de espessura. Essa pequena variação no desvio padrão reforça que a técnica RFT possui boa repetibilidade.

### 5.2.3. ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR 01-E-10F

Assim como no feixe tubular anterior, o feixe 01-E-10F também teve problemas de entupimentos e empenamentos após o processo de limpeza com alta pressão. Os motivos são os mesmos: incrustações nas entradas dos tubos e bloqueio da passagem da sonda devido a empenamentos, assim como alta taxa de degradação e corrosão. Sendo assim, conseguiu-se ensaiar 659 tubos, conforme mostra a Figura 5.5

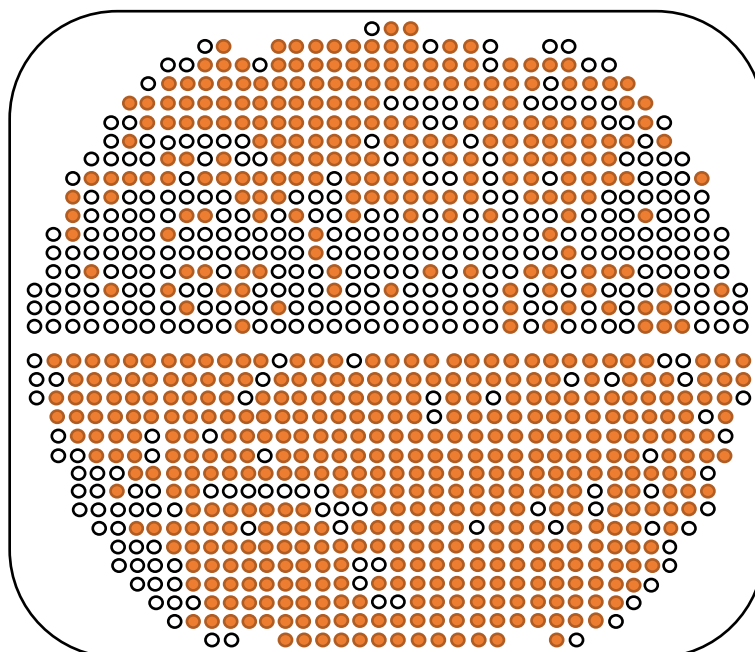


Figura 5.5 - Tubos inspecionados por RFT no feixe 01-E-10F (em laranja) - total de 659 tubos (Fonte: Autor da Obra).

Ao contrário do feixe tubular anterior, esse feixe foi inteiramente limpo com uma pressão de 15 000 psi, o que resultou em 175 tubos a mais aptos à passagem da sonda RFT. Isso

mostra novamente que para realizar ensaios por RFT, a limpeza com hidro-jato deve ocorrer com altas pressões. O valor dessa pressão vai depender do estado de degradação que se encontram os tubos.

Com a análise dos resultados obtidos encontrou-se a maior perda de espessura em cada tubo. A Figura 5.6 representa as porcentagens de perda de espessura em função da sua localização longitudinal no trocador de calor. Os resultados dessa análise encontram-se no APÊNDICE B conforme a Tabela B2 – Resultados do ensaio por RFT de maior descontinuidade e posição no Feixe 01-E-10F.

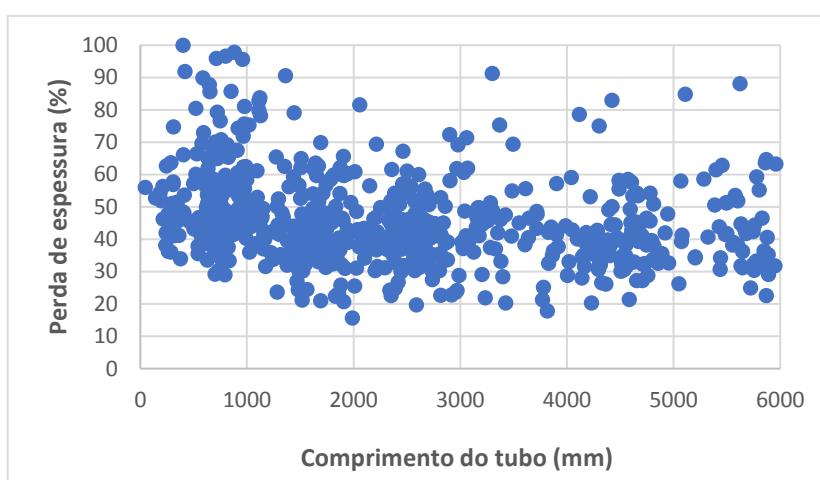


Figura 5.6 - Valor em porcentagem da perda de espessura e posição longitudinal da maior perda de espessura encontrada no feixe tubular 01-E-10F pela técnica por RFT (Fonte: Autor da Obra).

Como pode ser visto, o feixe possui descontinuidades com vários percentuais de perda de espessura, inclusive com 100 % de perda. Percebe-se uma grande quantidade de tubos com perda de espessura variando de 30 % a 60 %, assim como tubos com baixa perda de espessura. Isso fica melhor evidenciado pela Figura 5.7, que mostra de forma discretizada os resultados de perda de espessura do ensaio por RFT. Os valores centrais variam em  $\pm 5$  % do valor central para enquadrar os valores do intervalo discretizados. A maioria dos tubos deste feixe encontra-se com perda de espessura em torno dos 40 %, representando um total de 238 tubos. Em comparação com o feixe tubular 01-E-10B, o feixe 01-E-10F encontra-se em melhor estado, com 19 tubos apresentando perda de espessura acima de 80 % e 57 tubos deles com perda de espessura menor que 30 %.

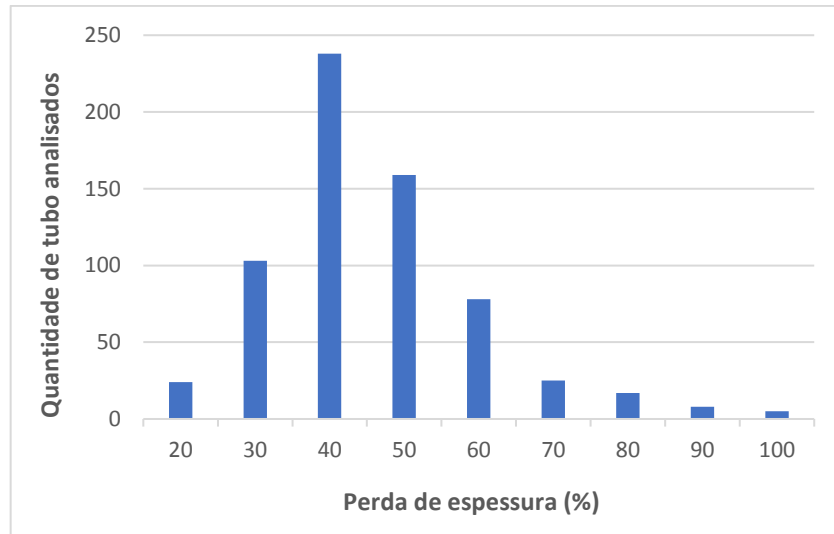


Figura 5.7 – Quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda na espessura de parede para o feixe 01-E-10F com o ensaio por RFT (Fonte: Autor da Obra).

### 5.2.3.1. Ensaio de Repetibilidade no Feixe Tubular 01-E-10F

Para realizar o ensaio de repetibilidade nesse feixe, utilizou o tubo 38 da fileira 18, e foram selecionadas também sete descontinuidades deste tubo, que foi então ensaiado sete vezes. A Figura 5.8 mostra um sinal resposta dos ensaios com as setes descontinuidades selecionadas, e nesse caso o tubo não possui furo passante.

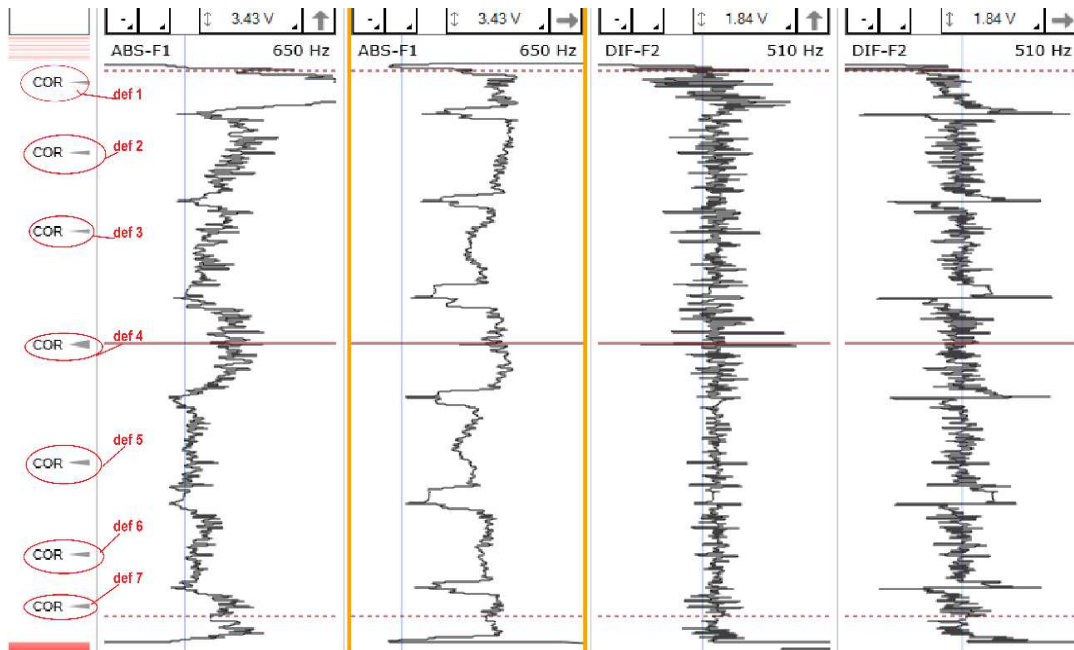


Figura 5.8 - Sinal resposta do ensaio por RFT do tubo 16/38 do feixe tubular 01-E-10F com as setes descontinuidades para o ensaio de repetibilidade (Fonte: Autor da Obra).

Os setes sinais foram então analisados utilizando os procedimentos de análise indicado pela EDDYFI com o mesmo inspetor e considerando a mesma normalização de sinal para os setes sinais, evitando assim a influência do inspetor na normalização do sinal. Após analisar os setes sinais obteve-se a média e o desvio padrão de cada descontinuidade, como apresentado na

Tabela 5.2 - Média e desvio padrão das medições do ensaio de repetibilidade do tubo 16/38 do feixe tubular 01-E-10F.

Descontinuidade	Posição (mm)	Canal DIF		Canal ABS	
		Média (%)	Desvio (%)	Média (%)	Desvio (%)
1	5.600	78,24	3,96	70,97	1,27
2	5.300	42,20	0,44	44,24	1,11
3	4.400	57,81	0,89	60,47	2,18
4	3.000	96,74	3,11	87,44	1,56
5	1.650	36,17	0,36	41,90	2,68
6	700	30,37	0,33	41,34	1,40
7	400	45,69	2,97	55,50	2,31

Como pode ser verificado, o maior desvio padrão para o canal Diferencial foi de 3,96 % de perda de espessura, equivalente a 0,08 mm na variação da leitura de espessura. Já para o canal Absoluto, o maior desvio padrão foi de 2,68 %, resultando em uma variação de leitura de 0,05 mm. Esses resultados se assemelham aos que foram obtidos para o feixe tubular 01-E-10B, mostrando mais uma vez que a técnica RFT possui boa repetibilidade.

## 5.3. ENSAIO IRIS

### 5.3.1. PARÂMETROS DE ENSAIO

O ensaio IRIS nos trocadores de calor foi realizado pela empresa Qualyend Engenharia e Inspeção, utilizando os seguintes equipamentos e parâmetros:

- Procedimento: PT-CQ-IRIS-05;
- Norma: ABNT NBR 16342/2015 1ª Ed.;
- Tubo padrão: Ø19,05x 2,11mm - A.C.;
- Centralizador: 14,5 mm;
- Sonda: EDDYFI P-757;

- Ganho Primário: 28 dB;
- Espelho da turbina: 45 graus;
- Turbina: 12 mm;
- Equipamento: IRIS 07 PAT.381;
- Transdutor: Normal;
- Velocidade sônica: 5.920 m/s;
- Frequência do transdutor: 15 MHz;
- Resolução: 0,1 mm ou 5 % da espessura do tubo de 2,11 mm.

O sistema IRIS foi calibrado em um tubo padrão com espessura de parede de 2,11 mm e com características metalúrgicas e dimensionais do feixe tubular ensaiado, sendo ainda confrontado a sua calibração com a realização do ensaio dimensional utilizando-se de um paquímetro digital. O procedimento de ensaio e análise dos resultados foram os mesmos que a empresa utiliza em prestação de serviço na Petrobrás.

### **5.3.2. ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR 01-E-10B**

Como esse feixe possui duas pressões de hidrojateamento distintas, a primeira análise a ser realizada é a quantidade de tubos ensaiados pela técnica por IRIS, ao contrário do RFT que conseguiu ensaiar 484 tubos, o IRIS conseguiu ensaiar 270 tubos, sendo que na região de baixa pressão (7 000 psi) conseguiu-se ensaiar apenas 10 tubos, esse fato reforça a necessidade de realizar um hidrojateamento correto e com as pressões recomendadas pelas normas, assim como reforça a primícia de que é possível realizar ensaios por RFT em tubos limpos com pressões mais baixas.

Porém o ensaio por IRIS também foi prejudicado pela alta deterioração do feixe tubular, os tubos empenados e altamente incrustados não permitiram a passagem da sonda, reduzindo assim significativamente a quantidade de tubos ensaiados. A Figura 5.9 ilustra os tubos ensaiados.

É importante destacar também que, as posições longitudinais das máximas perdas de espessuras encontradas pelo IRIS não são as mesmas posições encontradas pelo RFT.

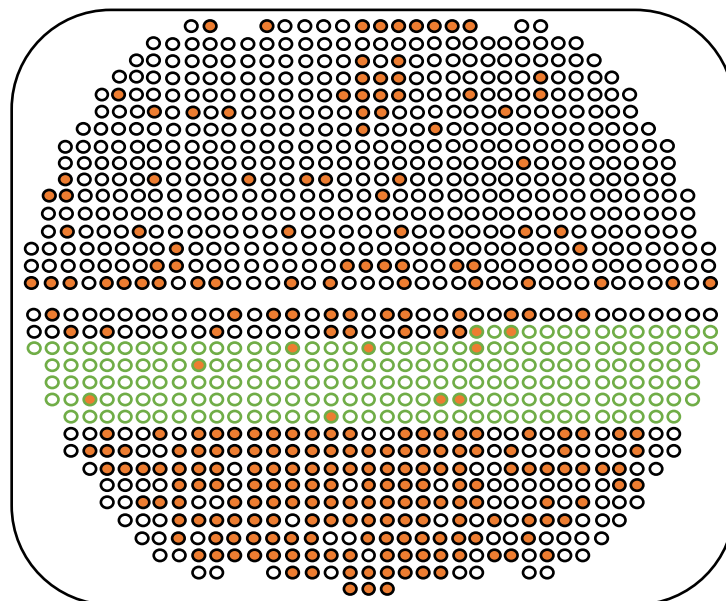


Figura 5.9 - Tubos inspecionados por IRIS no feixe 01-E-10B (em laranja), total de 270 tubos, onde 10 tubos foram inspecionados com limpeza de baixa pressão (contorno em verde). (Fonte: Autor da Obra).

A empresa realizou os ensaios por IRIS e buscou detectar a maior perda de espessura no tubo ensaiado do feixe tubular, os resultados do ensaio encontram-se no ANEXO A, na Tabela A1 – Resultados do Ensaio por IRIS no Feixe Tubular 01-E-10F Realizado Pela Empresa Qualyend.

A Figura 5.10 mostra a porcentagem de perda de espessura em função da posição de cada descontinuidade ao longo dos 6 metros de tubo do trocador, percebe-se que todo o feixe tubular possui descontinuidade e de várias espessuras, com perdas acima de 80 % incluindo um furo passante, assim como a existência de apenas um tubo com menos de 30 %.

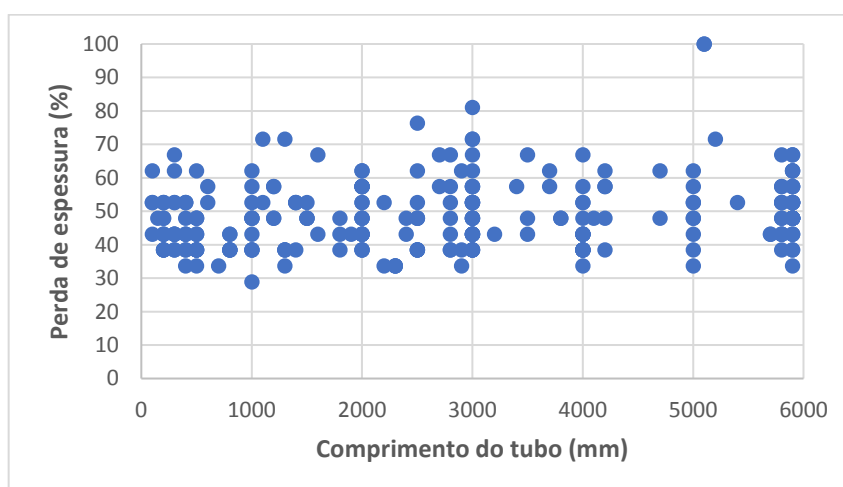


Figura 5.10 - Valor em porcentagem da perda de espessura e posição longitudinal de cada descontinuidade encontrada no feixe tubular 01-E-10B pela técnica IRIS (Fonte: Autor da Obra).

Outra curiosidade é o padrão da posição longitudinal das discontinuidades, o método de ensaio por IRIS consiste em subdividir o conduíte de 6 metros em 12 parte iguais de 50 cm de comprimento em cada divisão, quando o inspetor encontra uma discontinuidade ele infere a posição longitudinal analisando a subdivisão do conduíte, isso forneceu ao ensaio um padrão nas posições longitudinais.

A Figura 5.11 mostra de forma discretizada a incidência/ quantidade de tubos em função da porcentagem de perdas de espessura com variação de  $\pm 5\%$  no valor central para enquadrar os valores do intervalo discretizados, verifica-se que 72,2 % dos tubos, 195 tubos dos 270 tubos ensaiados, estão na faixa de perda de espessura entre 40 % e 50 %. Isso pode estar relacionado ao hábito do inspetor em relatar a discontinuidade que ultrapassa os limites permitidos, ou seja, que condene o tubo antes mesmo de ensaiá-lo por completo, essa habilidade fornece agilidade e rapidez na inspeção.

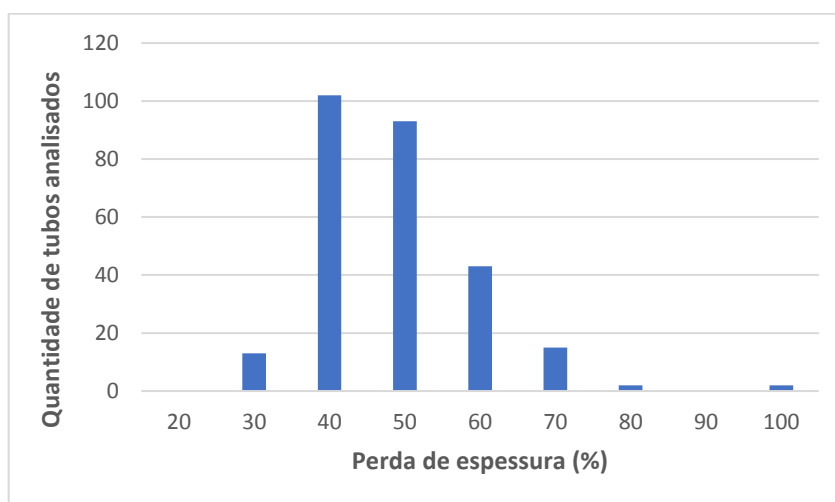


Figura 5.11 - Quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda na espessura de parede para o feixe 01-E-10B com a técnica IRIS (Fonte: Autor da Obra).

### 5.3.3. ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR 01-E-10F

Neste feixe já foi possível realizar o ensaio por IRIS em 624 tubos, representando 61 % do total de tubos do equipamento. Esse número se aproxima do total de tubos ensaiados pelo RFT, que foi de 659 tubos. Mas novamente o ensaio foi prejudicado pela alta deterioração do feixe tubular, com tubos empenados e incrustados que bloquearam a passagem da sonda. A Figura 5.12 ilustra os tubos ensaiados. Os resultados desse ensaio encontram-se no ANEXO A na Tabela A2

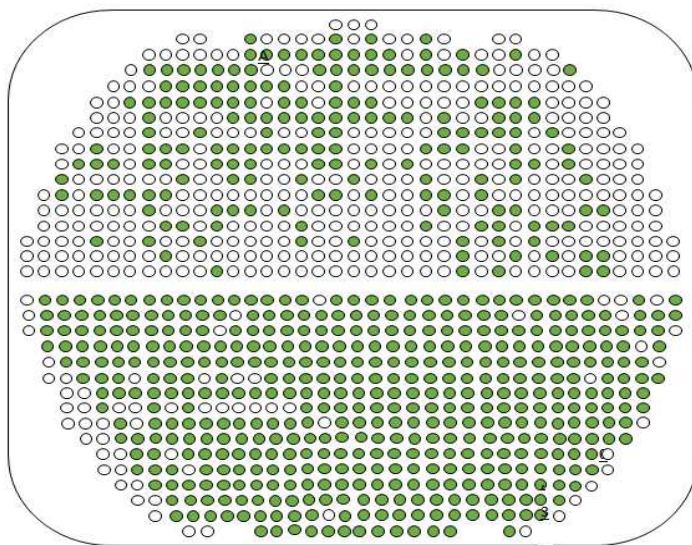


Figura 5.12 - Tubos inspecionados por IRIS no feixe 01-E-10F (em verde) - total de 624 tubos (Fonte: Autor da Obra).

A Figura 5.13 mostra a máxima perda de espessura encontrada pela empresa em cada tubo e posicionado ao longo dos 6 metros de comprimento do equipamento. É possível notar que o feixe possui descontinuidades ao longo de todo o seu comprimento, e encontrou-se 14 tubos com perdas de espessura abaixo de 30 % e apenas 1 tubo com mais de 80 %.

Deve-se destacar que as posições longitudinais das máximas perdas de espessuras encontradas pelo IRIS não são necessariamente as mesmas posições encontradas pelo RFT. Isso se deve pelas diferentes maneiras de determinar a posição da descontinuidade no trocador, o IRIS utiliza do método de subdivisões do conduíte e o RFT utiliza da posição informada pelo software.

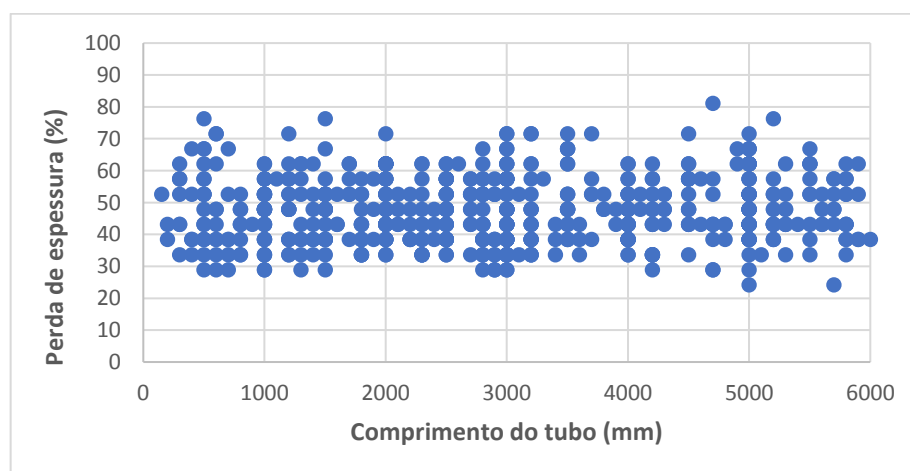


Figura 5.13 - Valor em porcentagem da perda de espessura e posição longitudinal de cada descontinuidade encontrada no feixe tubular 01-E-10F pela técnica IRIS (Fonte: Autor da Obra).



A Figura 5.14 mostra a quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda de espessura de forma discretizada, com uma variação de  $\pm 5\%$  do valor central para enquadrar os valores do intervalo discretizados. Essa forma de discretização ajuda na organização dos dados e na maneira de visualizá-los, pois assim é possível abranger todos os valores encontrados. Verifica-se que, assim como no feixe 01-E-10B, esse feixe também possui a maior incidência de perda de espessura na faixa de 40 % a 50 %, isto é, 404 tubos dos 624 tubos ensaiados, representando 64,7 % dos analisados.

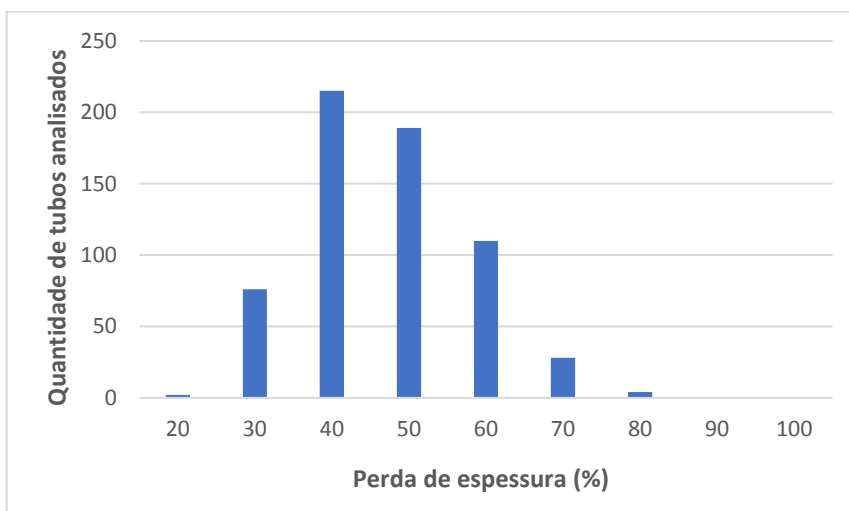


Figura 5.14 - Quantidade/incidência de tubos em função da porcentagem de perda na espessura de parede para o feixe 01-E-10F com a técnica IRIS (Fonte: Autor da Obra).

## 5.4. COMPARATIVO GLOBAL ENTRE IRIS E RFT

Esse comparativo foi realizado entre as duas técnicas não destrutivas com os resultados dos ensaios nos feixes de forma global. Em outras palavras, a comparação ocorreu sem levar em conta quais foram os tubos ensaiados e analisados, não comparando tubo a tubo com cada técnica. Inclusive a máxima perda de espessura encontrada por cada técnica pode não se coincidir na mesma posição longitudinal do tubo. Esse comparativo foi realizado para avaliar a distribuição dos tubos analisados em função da perda de espessura entre as duas técnicas não destrutivas.

### 5.4.1. – COMPARATIVO GLOBAL ENTRE IRIS E RFT NO FEIXE 01-E-10B

A Figura 5.15 mostra o comparativo global entre as duas técnicas não destrutivas para os tubos analisados em função da perda de espessura do feixe tubular 01-E-10B, considerando a mesma faixa de espessura com uma variação de 5 % do valor central para enquadrar os valores

do intervalo discretizados. Nota-se claramente que, apesar da diferença de tubos ensaiados por cada técnica (484 tubos para o RFT e 270 tubos para o IRIS), as duas técnicas apresentaram a maior concentração de perda de espessura na mesma faixa, de 40 % a 60 % de perda. Percebe-se também que somente a técnica por RFT conseguiu detectar perdas de espessura pequenas, como 20 %. Entretanto, as duas técnicas detectaram o furo passante.

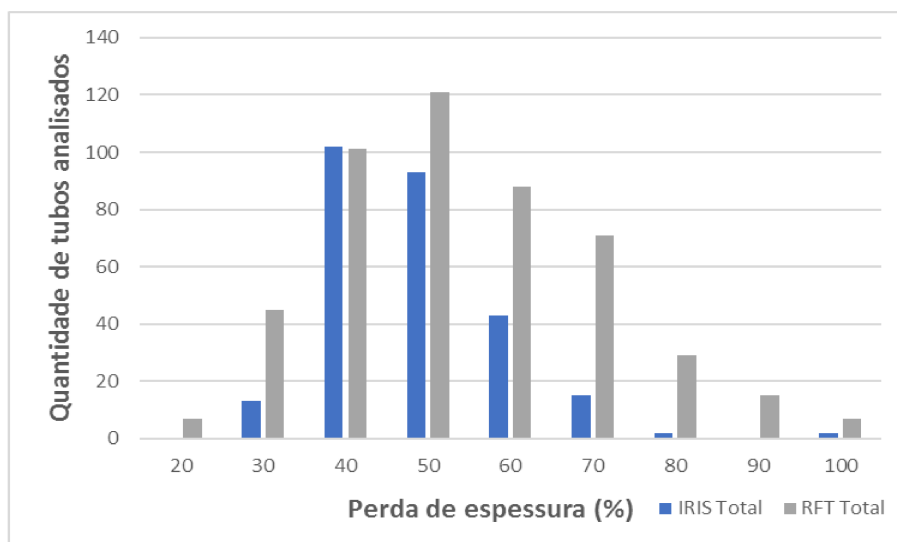


Figura 5.15 - Resultado comparativo global (Entre IRIS e RFT) do feixe 01-E-10B com a quantidade de tubos analisados em função da porcentagem de perda de espessura (Fonte: Autor da Obra).

#### 5.4.2. – COMPARATIVO GLOBAL ENTRE IRIS E RFT NO FEIXE 01-E-10F

A Figura 5.16 mostra o comparativo dos resultados entre o IRIS e o RFT para o feixe 01-E-10F, considerando a mesma faixa de espessura com uma variação de 5 % do valor principal apresentado para enquadrar os valores do intervalo discretizados. Verifica-se novamente uma tendência de equivalência entre as duas técnicas. Nesse caso a quantidade de tubos ensaiados foram próximas, 624 tubos com IRIS e 659 tubos com o RFT. Nota-se uma concentração de perdas de espessuras na faixa de 30 % a 60 % com as duas técnicas. Entretanto, percebe-se que somente o RFT foi capaz de encontrar perdas de espessuras de 90 % e 100 %.

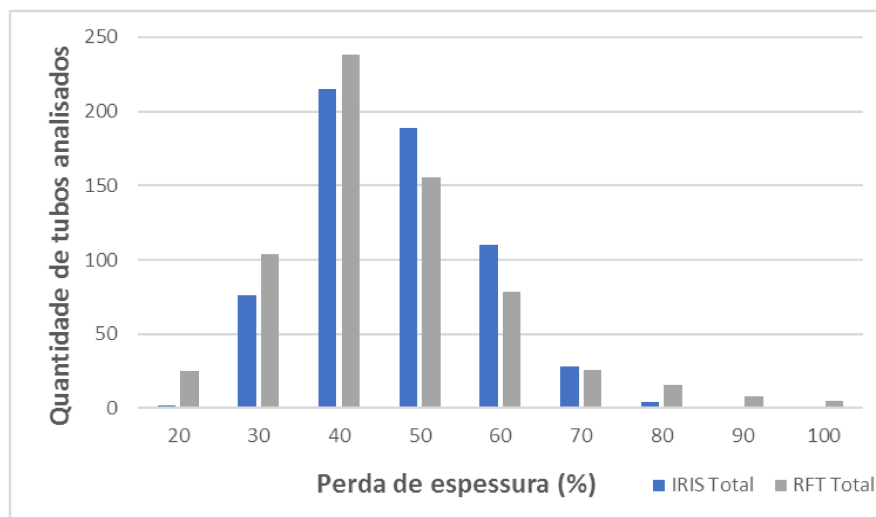


Figura 5.16 - Resultado comparativo global (Entre IRIS e RFT) do feixe 01-E-10F com a quantidade de tubos analisados em função da porcentagem de perda de espessura (Fonte: Autor da Obra).

## 5.5. COMPARATIVO ENTRE IRIS E RFT NA MESMA POSIÇÃO DOS TUBOS

Com o objetivo de comparar as duas técnicas de maneira pontual, realizou-se um comparativo entre as discontinuidades encontradas pelas duas técnicas não destrutivas. Nesse caso, utilizou-se os resultados encontrados pelo IRIS como referência de localização, e a partir daí buscou-se a mesma discontinuidade nos sinais das respostas do RFT.

O ensaio IRIS foi realizado pela empresa Qualyend seguindo o procedimento utilizado nos ensaios em campo nas empresas de petróleo e gás, onde a posição da discontinuidade ao longo do tubo é tomada de forma discretizada por meio de indicações de 500 em 500 mm marcadas ao longo do conduíte/guia da sonda. Assim, por ser a anotação do IRIS uma indicação de posição aproximada, o procedimento utilizado para o caso do ensaio RFT foi o de buscar a maior perda de espessura na região próxima à indicada no ensaio IRIS com margem de mais ou menos 200 mm. Além disso, avaliou-se a influência do inspetor e as dificuldades encontradas durante a análise dos resultados para o feixe 01-E-10B. Para tanto, foram utilizados três inspetores diferentes (dois com maior experiência e um terceiro recém treinado), cada um trabalhando de forma isolada, para analisar os mesmos dados e tentar encontrar as mesmas discontinuidades, e assim comparar os resultados encontrados pelos três. O procedimento utilizado pelos três inspetores foi o mesmo indicado no manual da EDDYFI.

### **5.5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS ENTRE IRIS E RFT NO FEIXE 01-E-10B**

Dos 270 tubos ensaiados pelo IRIS, foi possível realizar o comparativo com o RFT em 236 tubos. Os 34 tubos descartados tiveram indicações de descontinuidades pelo IRIS posicionadas dentro da área de interferência da chicana, onde o RFT possui dificuldades para detectar descontinuidades, já que o canal Mix ficou fora do escopo deste trabalho por demandar treinamento específico. Assim, com base nas descontinuidades indicadas pelo IRIS, os três inspetores buscaram a maior perda de espessura entre os canais Absoluto e Diferencial no RFT. É importante lembrar que o procedimento de análise foi o mesmo para os três inspetores. Os resultados dessa análise encontram-se no APÊNDICE C, na Tabela C1 – Resultados Comparativo Do Ensaio Entre IRIS e RFT No Feixe 01-E-10B Na Mesma Posição. O objetivo foi verificar, ao utilizar um mesmo procedimento adequado, a variabilidade da técnica RFT, que parece ser fortemente dependente da experiência do inspetor.

Deve-se considerar que cada inspetor possui experiências e habilidades diferentes um do outro. Considera-se que o inspetor 1 possui a melhor habilidade de inspeção e análise, o inspetor 2 possui um nível intermediário e o inspetor 3 é recém treinado, com menor habilidade de inspeção e análise.

#### **5.5.1.1. IRIS versus RFT – Inspetor 1**

O primeiro comparativo relaciona a porcentagem de perda de espessura da descontinuidade encontrada por cada técnica não destrutiva em função da posição longitudinal no tubo do feixe tubular, sendo considerado a mesma posição para cada par de descontinuidade comparada. A Figura 5.17 resume graficamente os resultados.

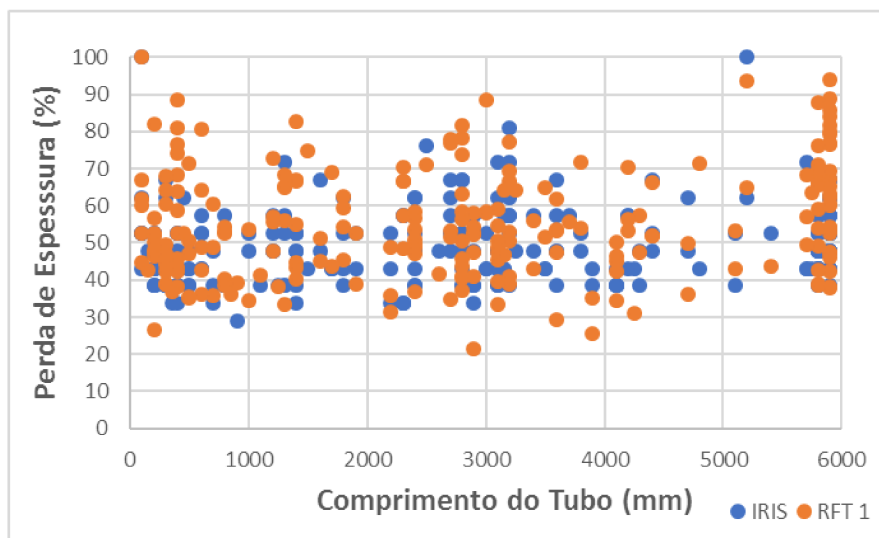


Figura 5.17 - Perda de espessura das discontinuidades encontradas pelo IRIS e pelo RFT em função da posição longitudinal no trocador – inspetor 1 – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra).

Percebe-se que há bastante diferença entre os pares de discontinuidades comparadas. Mas tendo em vista a grande quantidade de pontos apresentados e consequente dificuldade para uma análise comparativa detalhada dos dois ensaios, optou-se pela análise da diferença dos valores medidos pelas duas técnicas para cada posição de discontinuidade. A Figura 5.18 apresenta a diferença em porcentagem de perda de espessura dos resultados obtidos com RFT pelo inspetor 1 em relação ao obtido pelo IRIS em função da posição longitudinal no tubo.

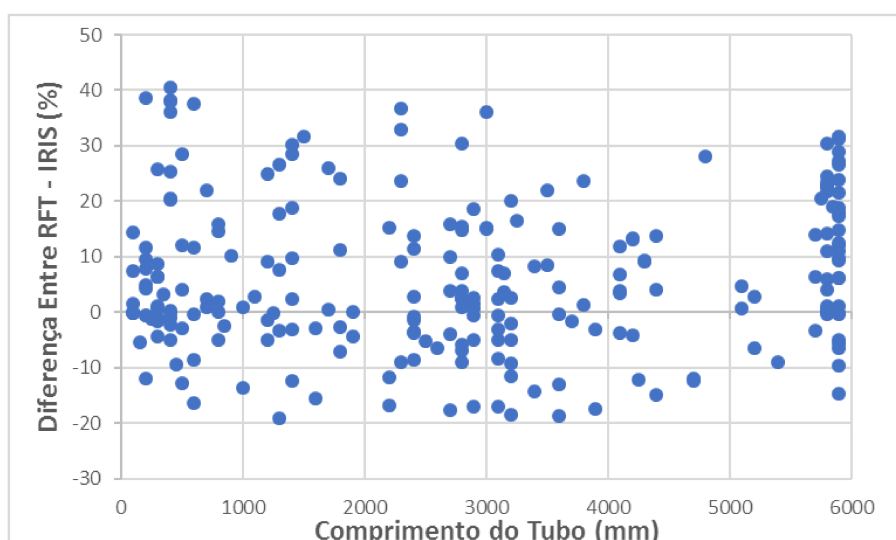


Figura 5.18 - Diferença de perda de espessura entre o RFT (inspetor 1) e IRIS em função da posição no tubo – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra).

Quanto mais próximo a zero a indicação se posicionar, menor será a diferença entre as porcentagens de perda de espessura encontradas pelas duas técnicas. Percebe-se uma

concentração de indicações entre +10 % (valores do RFT foram maiores) e -10 % (valores do IRIS foram maiores). Essas indicações representam 56,8 % dos 236 tubos ensaiados, significando que 134 das descontinuidades variaram em 10 % do que foi indicado pelo IRIS ao utilizar o RFT.

Outros 23 tubos, que representam 9,7 % dos tubos ensaiados, resultaram em uma diferença entre -10 % e -20 %, ou seja, são descontinuidades em que os valores do IRIS se apresentaram maiores e variando entre 0,21 mm e 0,42 mm de espessura na parede dos tubos. Enquanto as demais 79 indicações, que representam 33,4 % dos tubos ensaiados, resultaram em uma diferença entre 10 % e 40 %, mostrando que os valores encontrados pelo RFT são maiores com uma variação na espessura da parede dos tubos entre 0,21 mm e 0,84 mm.

### 5.5.1.2. IRIS versus RFT – Inspetor 2

A Figura 5.19 resume o comparativo dos resultados IRIS e RFT obtidos pelo inspetor 2.

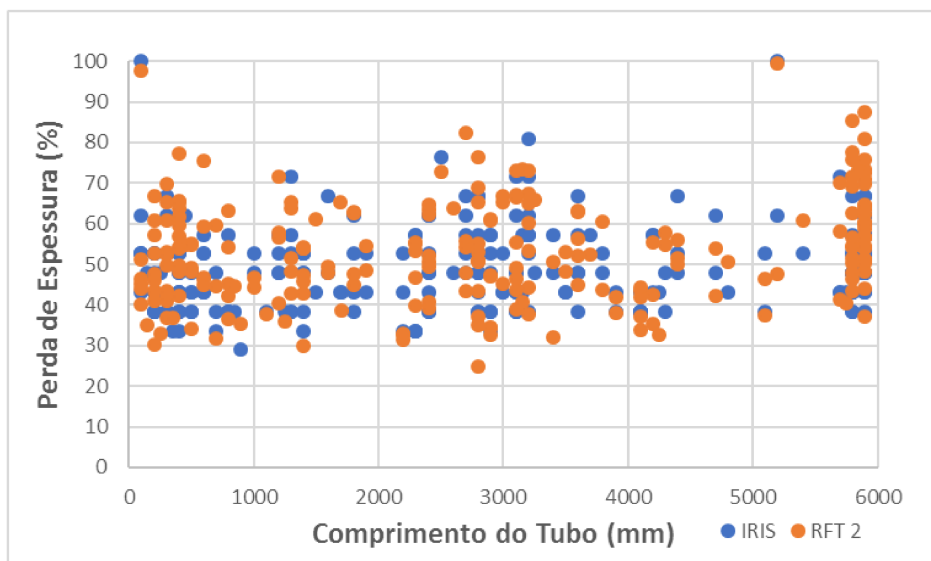


Figura 5.19 - Perda de espessura das descontinuidades encontradas pelo IRIS e pelo RFT em função da posição longitudinal no trocador – inspetor 2 – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra).

A Figura 5.20 apresenta a diferença em porcentagem de perda de espessura dos resultados obtidos com RFT pelo inspetor 2 e com o IRIS. Percebe-se que a maioria dos pontos analisados ficaram acima do zero, totalizando 144 descontinuidades em que o RFT apresentou maior perda de espessura nas descontinuidades. Apenas 92 descontinuidades tiveram perdas de espessuras mais acentuadas pela técnica IRIS. Por outro lado, 146 descontinuidades, o que representa 61,8 % dos tubos, exibiram diferenças entre -10 % e 10 %.

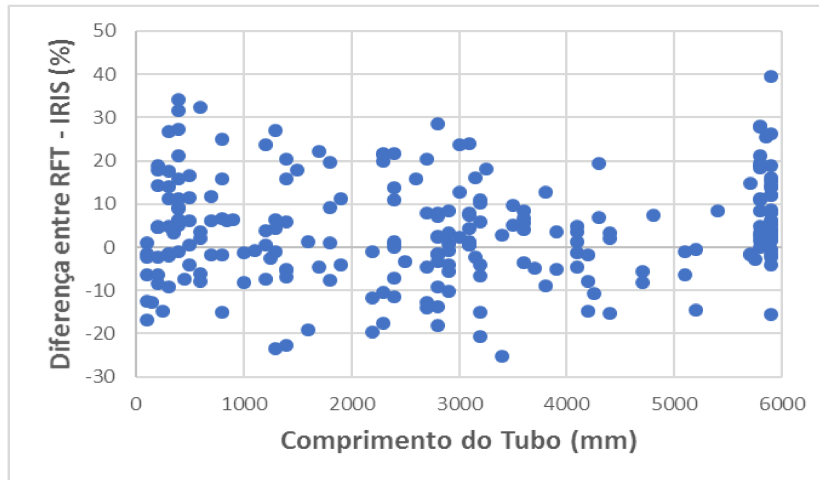


Figura 5.20 - Diferença de perda de espessura entre o RFT (inspetor 2) e IRIS em função da posição no tubo – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra).

### 5.5.1.3. IRIS versus RFT – Inspetor 3

A Figura 5.21 resume o comparativo para o inspetor 3.

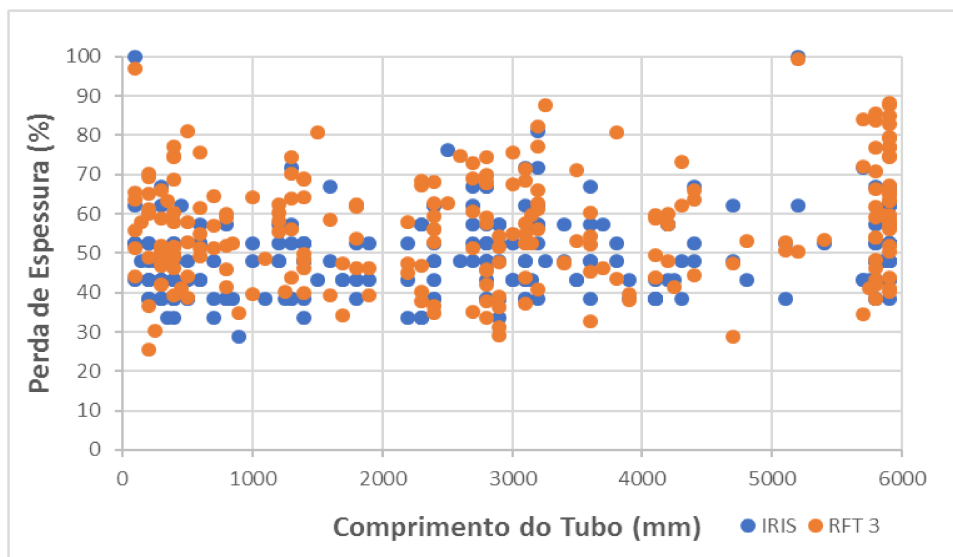


Figura 5.21 - Perda de espessura das discontinuidades encontradas pelo IRIS e pelo RFT em função da posição longitudinal no trocador – inspetor 3 – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra).

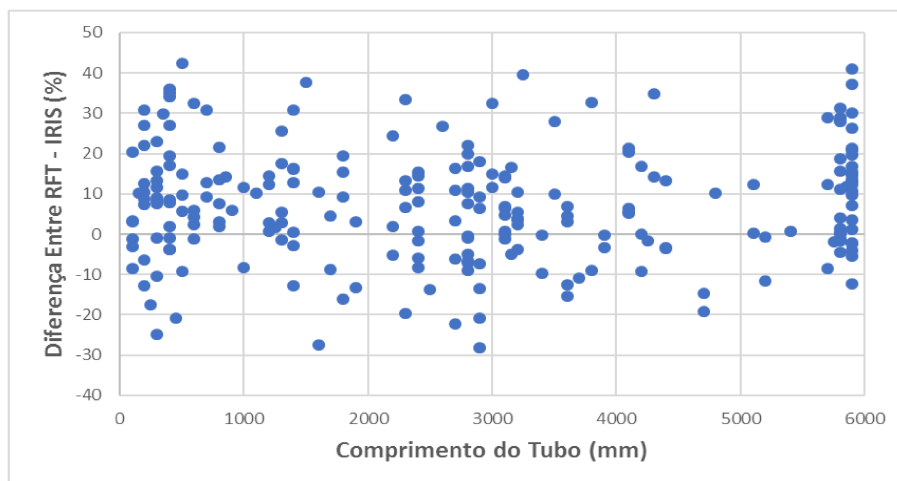


Figura 5.22 - Diferença de perda de espessura entre o RFT (inspetor 3) e IRIS em função da posição no trocador – feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra).

Percebe-se na Figura 5.22 que a análise do inspetor 3 com o RFT também obteve a maioria das indicações entre -10 % e +10 %. Essas indicações representam 47,8 % ou 113 descontinuidades que variaram em 10 % de diferença do IRIS, o que representa uma diferença de 0,21 mm na espessura dos tubos.

Assim como no caso dos outros dois inspetores (mais experientes), nota-se que o inspetor 3 (recém treinado) também encontrou perdas de espessuras mais acentuadas no RFT do que fora identificado com o IRIS. Do total de 236 tubos, 165 tubos tiveram perdas de espessura maiores no ensaio por RFT, compreendendo 69,9 % dos tubos. Enquanto apenas 30,1 % das descontinuidades, ou 71 tubos, exibiram perdas de espessura mais acentuadas pelo ensaio IRIS.

O RFT indicou com os três inspetores perdas de espessura mais acentuadas nas descontinuidades em comparação com o IRIS. Essas diferenças podem ser relacionadas ao procedimento de análise do sinal, à inexperiência de um inspetor em relação ao outro, e à resolução/incerteza de medidas do IRIS e/ou do RFT. Para tirar esta dúvida é necessário a realização de medições nos tubos analisados por uma terceira técnica mais precisa, o que consta na próxima fase deste trabalho.

A fim de visualizar os dados de outra maneira e de mostrar que a forma de analisar os dados pode ser replicada e ensinada, fez-se uma análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos com relação às médias considerando um nível de confiança de 95 %. A Figura 5. 23(a) mostra um gráfico boxplot dos resultados obtidos pelos três inspetores. Percebe-se que os resultados, inclusive a mediana, se coincidem na mesma faixa de valores, mostrando que os três inspetores encontraram a maior parte dos resultados de forma equivalente. De acordo com a



Figura 5.23 (b) os resultados indicam coincidência entre as médias obtidas pelos inspetores 1 e 3, com pequena variação em relação ao inspetor 2. Contudo, observa-se que o valor médio da corrosão aferida pelo inspetor 2 encontra-se muito próximo à região de fronteira de aceitação entre as médias, isso pode ser corroborado por meio da Tabela 5.3. Essa diferença pode ser visualizada na Tabela 5.4 com os valores de *p-value* da análise de variância

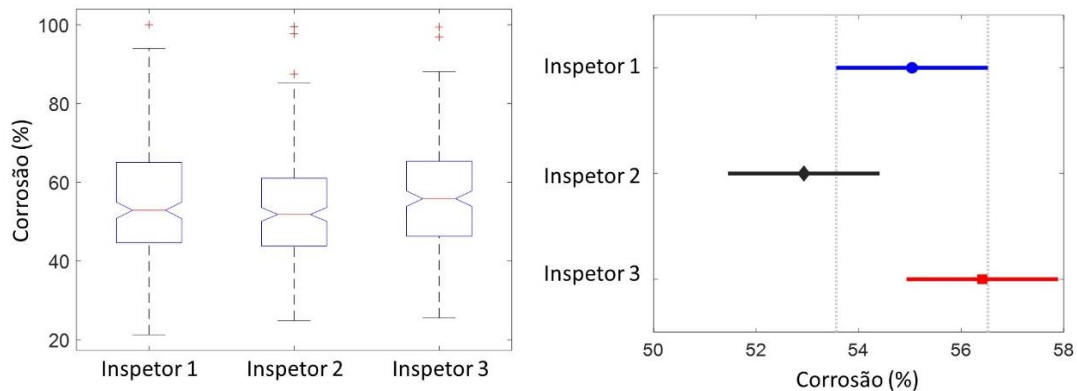


Figura 5. 23 - (Esquerda) Boxplot dos dados de corrosão (perda de espessura) por inspetor; (Direita) Comparativo das médias dos dados de corrosão (perda de espessura) para um nível de confiança de 95 %.

Tabela 5.3 - Valores de mediana, média e desvio padrão dos resultados dos inspetores 1, 2 e 3.

	Inspetor 1	Inspetor 2	Inspetor 3
Mediana	52,90 %	51,85 %	55,85 %
Média	55,04 %	52,93 %	56,41 %
Desvio padrão	14,50 %	12,74 %	13,83 %

Tabela 5.4 - Valores de p-value para análise de variância com nível de significância de 5 %.

ANOVA	Inspetor 2	Inspetor 3
Inspetor 1	0.0937	0.2940
Inspetor 2	---	0.0047

De forma geral, ao nível de confiança de 95 % as três metodologias de aferição da corrosão via END's produziram valores médios similares entre si. Isso habilita a metodologia RFT como método de aferição com precisão equivalente aos métodos ora utilizados. Confirmando que a metodologia de análise dos resultados pelo ensaio RFT pode ser feita utilizando ferramentas de estatísticas e replicada.

#### 5.5.1.4. Comparativo Entre IRIS e RFT do Feixe Tubular 01-E-10B

Considerando os resultados obtidos pelos três inspetores do ensaio por RFT e dos resultados obtido pelo ensaio por IRIS realizado pela empresa QualyEnd, fez-se três comparativos. O primeiro comparativo foi realizado entre os resultados dos três inspetores por RFT, no segundo adicionou-se os resultados por IRIS e, por fim, comparou-se as diferenças de perdas de espessura entre o IRIS e o RFT, este realizado pelos três inspetores.

A Figura 5.24 mostra a quantidade de tubos em função da perda de espessura do ensaio por RFT para cada inspetor discretizada em torno de seu valor central, onde a soma da quantidade de tubos com perda de espessura em torno desse valor varia em  $\pm 5\%$  do valor central para enquadrar os valores do intervalo discretizados. Verifica-se que todas as três análises obtiveram a maior quantidade de tubos com perda de espessura em torno de 50 %, sendo a maior quantidade de tubos indicada pelo inspetor 2. A maior diferença em quantidade de tubos na mesma faixa de perda de espessura ocorreu em 60 % e, no caso, entre o inspetor 1 e 2, com 18 tubos de diferença. A Tabela 5.5 mostra a correlação entre os resultados obtidos pelos três inspetores.

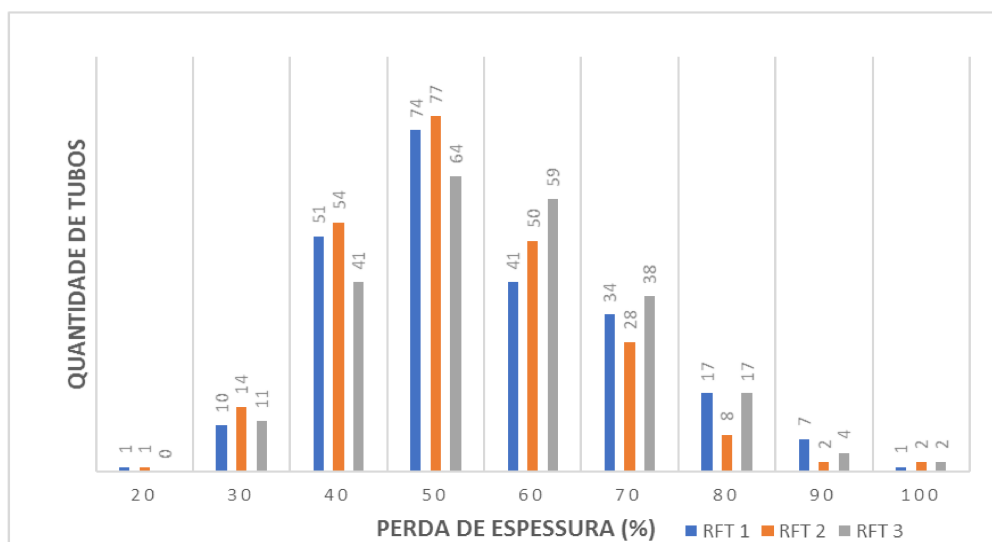


Figura 5.24 – Comparação do ensaio por RFT entre os três inspetores na mesma faixa de perda de espessura do Feixe 01-E-10B (RFT 1 – inspetor 1; RFT 2 – inspetor 2; RFT 3 – inspetor 3) (Fonte: Autor da Obra).

Tabela 5.5 - Correlação entre os resultados do ensaio por RFT entre os três inspetores.

	Inspetor 1 versus 2	Inspetor 1 versus 3	Inspetor 2 versus 3
Correlação Entre Resultados	60,28 %	55,90 %	57,86 %

Percebe-se então uma tendência nos resultados com pelo menos 55,90 % de correlação (mas chegando a 60,28 %) entre os resultados dos três inspetores, mostrando assim que a metodologia de análise desenvolvida para o RFT estava alinhada entre os três inspetores (mesmo com uma menor experiência para o inspetor 3) e que as pequenas diferenças nos resultados estão provavelmente relacionadas a subjetividades na execução do procedimento de análise.

A Figura 5.25 mostra agora um comparativo entre os resultados de perda de espessura em porcentagem baseado nos resultados dos três inspetores com o RFT em relação aos resultados do IRIS. Os resultados estão discretizados em torno de seu valor central onde a soma da quantidade de tubos com perda de espessura em torno de cada valor de perda de espessura varia em  $\pm 5\%$  do valor central para enquadrar os valores do intervalo discretizados.

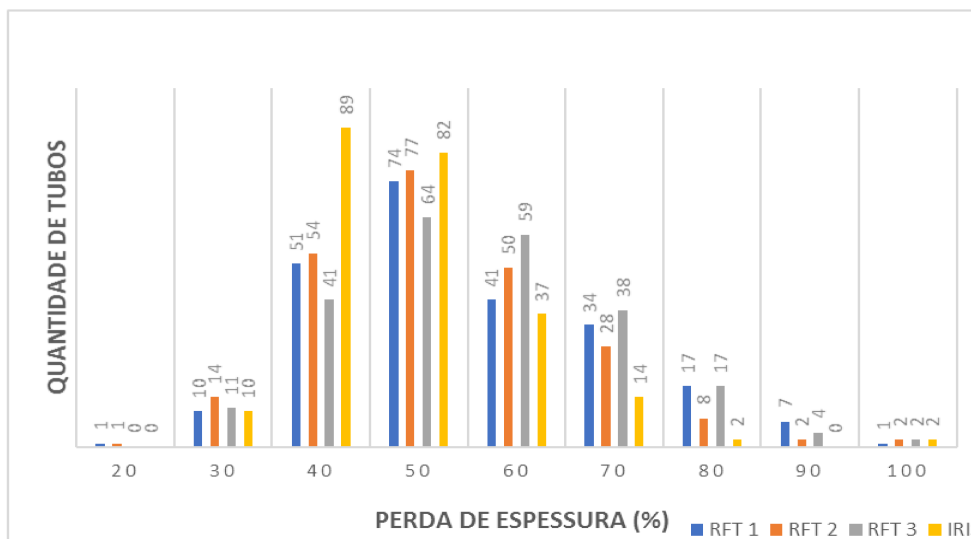


Figura 5.25 - Comparação do ensaio por RFT entre os três inspetores com o ensaio por IRIS na mesma faixa de perda de espessura para o Feixe 01-E-10B (RFT 1 – inspetor 1; RFT – 2 – inspetor 2; RFT 3 – inspetor 3) (Fonte: Autor da Obra).

Como pode ser visto pela Figura 5.25, a maior quantidade de tubos para o IRIS está na faixa de perda de espessura de 40 % seguido da faixa de 50 %, sendo inclusive maior que a quantidade de tubos captados pelo RFT nas mesmas faixas. Porém isso ocorreu somente nessas duas faixas de perda de espessura. Nas demais a quantidade de tubos referidos pelo RFT foi maior. Entretanto, assim como no RFT, a maior quantidade de discontinuidades do ensaio por IRIS está nas faixas de perdas de espessuras de 40 %, 50 % e 60 %, sendo equivalente a 88,1 % do total, ou 208 tubos, com discontinuidades nessas faixas.

Ao considerar o ensaio por IRIS como a técnica padrão, pode-se verificar a diferença entre a perda de espessura de cada discontinuidade em relação ao RFT, lembrando que quanto

mais perto do zero essa diferença ficar mais próximo do IRIS é a perda de espessura detectada pelo RFT. Se esse valor for positivo significa que o RFT obteve valores maiores e se o valor for negativo significa que o IRIS obteve maior perda de espessura. A Figura 5.26 ilustra a quantidade de tubos em função da diferença entre os dois ensaios, sendo que os valores estão discretizados em torno de seu valor central onde a soma da quantidade de tubos com perda de espessura em torno desse valor varia em  $\pm 5\%$  do valor central para enquadrar os valores do intervalo discretizados.

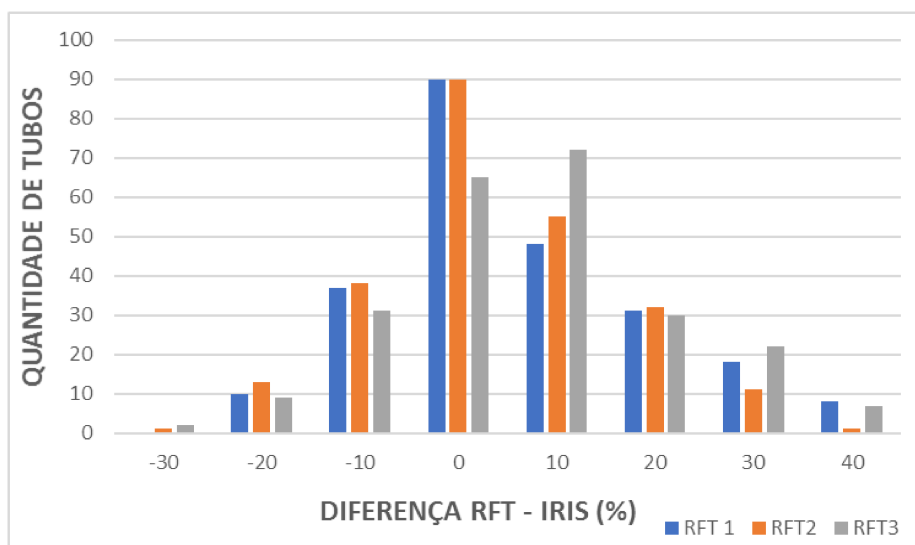


Figura 5.26 - Quantidade de tubos em função da diferença entre os resultados dos inspetores com RFT e do ensaio com IRIS (RFT 1 - IRIS; RFT 2 - IRIS; RFT 3 - IRIS) (Fonte: Autor da Obra).

Como pode ser visto na Figura 5.26, a maior quantidade de tubos com a diferença entre o RFT e o IRIS se concentra em torno do zero. Isso significa que as discontinuidades encontradas pelas duas técnicas estavam com valores de porcentagens de perda de espessura próximas. A segunda maior quantidade de tubos está na faixa de 10 % de diferença entre as técnicas. É perceptível também que as diferenças são mais positivas que negativas, mostrando assim que o ensaio por RFT apresentou perdas de espessuras mais profundas que o IRIS, como no caso do inspetor 3 que apresentou 165 discontinuidades com perdas de espessuras maiores que as identificadas pelo IRIS.

A Figura 5.27 apresenta a média e o desvio padrão da diferença entre os três inspetores e o ensaio IRIS nas mesmas posições das discontinuidades encontradas pelo IRIS, sendo de  $6,0 \pm 13,4\%$ ,  $3,9 \pm 11,8\%$  e  $7,4 \pm 13,7\%$  para o inspetor 1, 2 e 3 respectivamente.

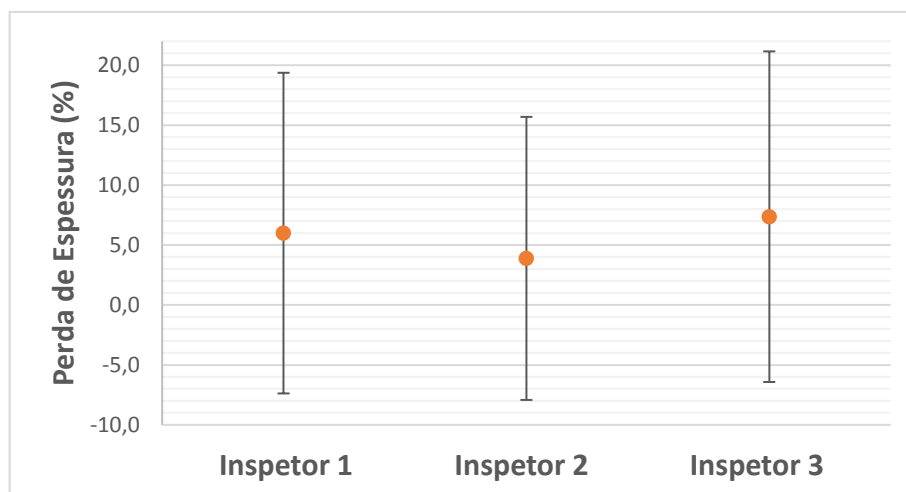


Figura 5.27 - Média e desvio padrão das diferenças de perda de espessuras entre os valores de RFT e IRIS para os três inspetores no Feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra).

A média global, ou seja, considerando todos os ensaios realizados pelos 3 inspetores, da diferença de perda de espessura entre o RFT e o IRIS foi de 5,75 % (0,12 mm) com desvio padrão de 13,10 % (0,28 mm). Isso significa que na média o RFT apresenta perdas de espessuras de 5,75 % mais profundas que o IRIS com uma variação de 13,10 % para mais ou para menos. A condição ideal seria com a diferença entre as duas técnicas resultando em zero, onde as discontinuidades encontradas pelo IRIS possuiriam a mesma perda de espessura apontada pelo RFT.

Ao tomar o ensaio por IRIS como ensaio padrão e considerar o valor da diferença entre os resultados das duas técnicas (RFT – IRIS) como referência, ao se aplicar uma variação (dispersão) em torno dessa referência em função dos valores do RFT, tem-se as porcentagens de acerto conforme a Tabela 5.6 e a Figura 5.28

Tabela 5.6 - Porcentagem média de acerto do RFT em função da variação (dispersão) adotada e tomando o IRIS como ensaio padrão para o feixe 01-E-10B.

Variação (%)	Inspetor Porcentagem de acerto (%)			Média de Acerto (%)	Desvio Padrão (%)
	1	2	3		
5	38,1	27,5	39	34,9	6,4
10	56,8	47,9	61,9	55,5	7,1
15	72	70,3	77,5	73,3	3,8
20	82,6	80,5	87,7	83,6	3,7

Ou seja:

- Para uma variação de 5% (perda de espessura  $\pm 0,10$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto do RFT foi de 34,9%;
- Para uma variação de 10% (perda de espessura  $\pm 0,21$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto do RFT foi de 55,5%;
- Para uma variação de 15% (perda de espessura  $\pm 0,31$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto do RFT foi de 73,9%;
- Para uma variação de 20% (perda de espessura  $\pm 0,42$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto do RFT foi de 83,6%.

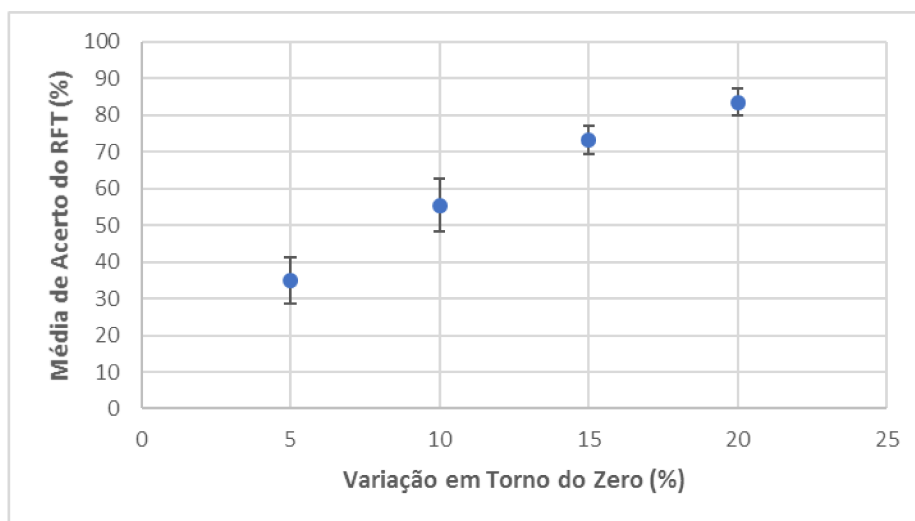


Figura 5.28 - Média e desvio padrão de acerto dos 3 inspetores de RFT em função da variação em torno do zero (determinado pelo ensaio de referência IRIS) do Feixe 01-E-10B (Fonte: Autor da Obra)

A fim de comparar os resultados entre as duas técnicas (IRIS e RFT), realizou-se uma análise de variância com um nível de significância de 5 % entre os resultados do inspetor 1 (de maior experiência e melhor índice de acerto) e os resultados do IRIS. A Figura 5.29(a) mostra um gráfico de boxplot dos dois resultados. Percebe-se uma diferença entre as médias dos conjuntos de dados obtidos por cada técnica. Os resultados do IRIS encontram-se na faixa de 43 % a 53 %, enquanto os dados do RFT encontram-se na faixa de 44% a 65 %. Essa diferença é evidenciada na Figura 5.29(b), onde se nota que as médias das duas técnicas não se coincidem. Entretanto essa diferença é menor que 10 %, estando dentro da faixa de erro esperado pelas duas técnicas.

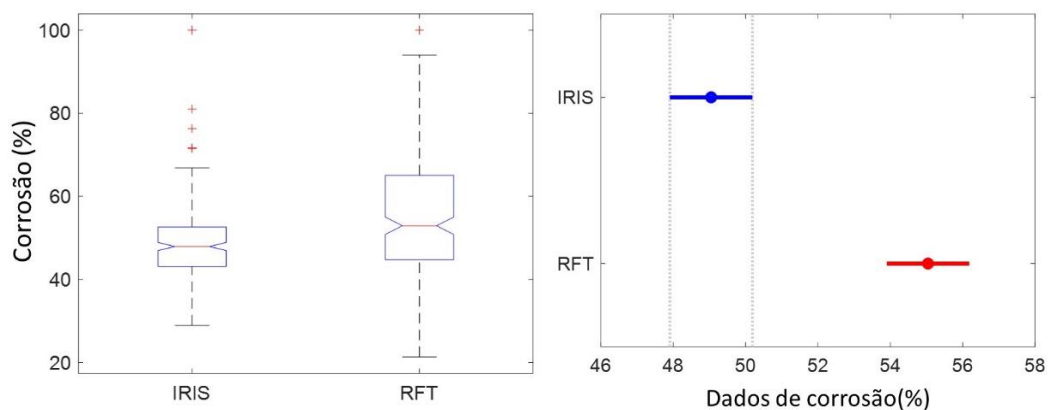


Figura 5.29 – (Esquerda) Boxplot dos dados de corrosão entre técnicas IRIS e RFT; (Direita) Comparativo das médias dos dados de corrosão (perda de espessura) obtidos pelas técnicas IRIS e RFT para um nível de confiança de 95%.

Tabela 5.7 - Valores de mediana, média e desvio padrão dos resultados do IRIS e do RFT (inspetor 1).

	IRIS	RFT
Mediana	47,90 %	52,90 %
Média	49,04 %	55,04 %
Desvio Padrão	10,47 %	14,50 %

Sendo assim, em termos globais, considerando que as duas técnicas não avaliaram necessariamente a mesma descontinuidade e, que a diferença está dentro do erro das duas técnicas, pode-se considerar que a técnica por RFT é equivalente à técnica por IRIS no que tange a precisão de obtenção dos resultados em termos de perda de espessura do feixe tubular avaliado.

Na técnica por IRIS a referência para determinar a perda de espessura é a espessura do tubo no local da descontinuidade, o que acarreta uma melhor precisão dimensional dos resultados. Já a técnica por RFT, considera sempre a dimensão nominal da espessura do tubo no *setup* do ensaio, que nesse caso é de 2,11 mm tendo uma variação máxima de + 0,40 mm que corresponde a aproximadamente 18,96 % da espessura nominal. Isso implica em uma dificuldade de determinar perda de espessura menor que 18,96 %, pois não é simples reconhecer no RFT se o sinal é decorrente de uma descontinuidade ou da variação de espessura do tubo.

### 5.5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS ENTRE IRIS E RFT NO FEIXE 01-E-10F

O ensaio por IRIS realizado neste feixe resultou em 624 tubos avaliados. Deste total foi possível comparar 538 tubos com o RFT, considerando a mesma posição longitudinal em cada um dos tubos caso a caso. Os demais 86 tubos obtiveram indicações de descontinuidades próximas às ou sob as chicanas. Como já mencionado essa é uma região de interferência entre os sinais do tubo e da chicana, e para análise desse sinal seria necessário aplicar uma outra técnica (canal MIX) não explorada neste trabalho. Sendo assim, optou-se por descartar essas indicações das análises.

Realizou-se então as mesmas análises realizadas no feixe anterior, sendo uma busca e análise das descontinuidades no RFT como indicadas pelo IRIS. A técnica de escolha do valor da perda de espessura foi a mesma do feixe anterior, ou seja, selecionou-se a maior perda de espessura encontrada entre os canais Absoluto e Diferencial. Os resultados dessa análise encontram-se no APÊNDICE C, na Tabela C2 – Resultados Comparativo Do Ensaio Entre IRIS e RFT No Feixe 01-E-10F Na Mesma Posição.

O primeiro comparativo foi realizado com base na porcentagem de perda de espessura de cada descontinuidade captada pelos dois ensaios em função da mesma posição longitudinal no tubo. A Figura 5.30 mostra que as descontinuidades se revelaram dispersas em todo o comprimento do feixe tubular 01-E-10F, com perdas de espessuras variando de 17 % a 81 %.

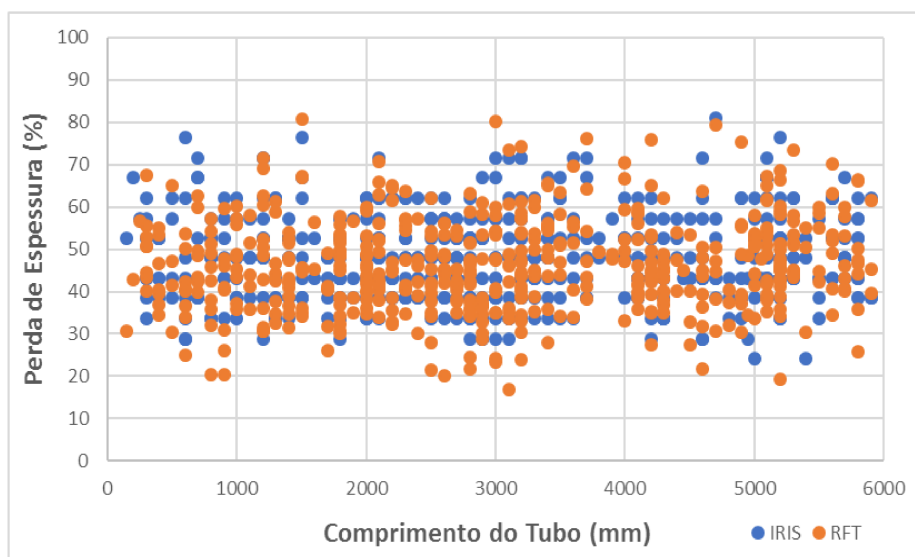


Figura 5.30 - Perda de espessura das descontinuidades encontrada pelo IRIS e pelo RFT em função da posição longitudinal no tubo analisado – inspetor 1 – feixe 01-E-10F (Fonte: Autor da Obra).

Para melhorar o comparativo, a Figura 5.31 mostra a diferença em porcentagem da perda de espessura em função do comprimento do trocador a cada par de descontinuidades



comparado. Assim como no comparativo anterior, quanto mais próximo de zero for o valor da diferença mais próxima é a perda de espessura do par de descontinuidades comparado. Os valores positivos mostram a captura de valores de perda de espessura pela técnica RFT superiores à técnica IRIS e vice e versa no caso de valores negativos.

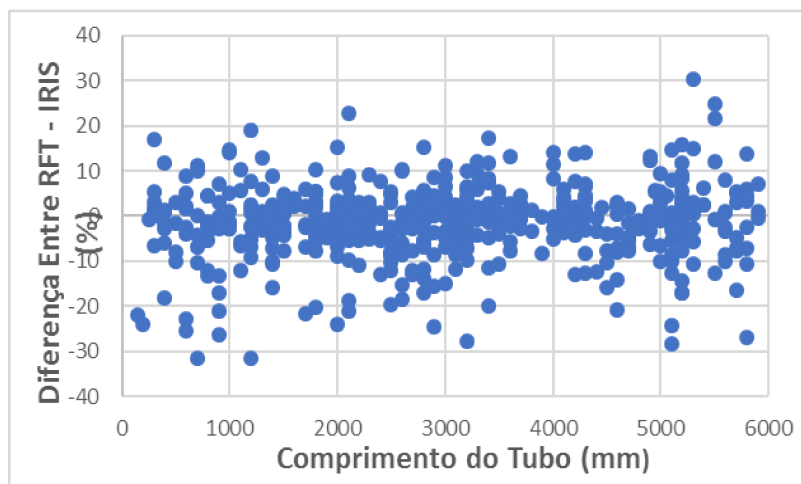


Figura 5.31 - Diferença de perda de espessura entre o RFT e o IRIS em função da posição no tubo – inspetor 1 – feixe 01-E-10F (Fonte: Autor da Obra).

Percebe-se pela Figura 5.31 que há uma concentração de valores entre -10 % e 10 %, sendo equivalente a 444 descontinuidades, ou seja, 82,5 % das descontinuidades comparadas possui uma diferença em perda de espessura de no máximo 10 % entre o RFT e o IRIS. 45,9 % das descontinuidades tiveram maior perda de espessura a partir da técnica, 53,2 % obtiveram maior perda de espessura a partir da técnica IRIS e 0,9 %, ou 5 descontinuidades, obtiveram diferenças igual a zero, significando que apresentaram a mesma perda de espessura para as duas técnicas. Esses valores foram obtidos através da diferença entre os resultados do RFT e do IRIS.

A Figura 5.32 mostra um comparativo entre os resultados de perda de espessura via técnica por RFT junto com os resultados da técnica por IRIS. Os resultados estão discretizados em torno de seu valor central onde a soma da quantidade de tubos com perda de espessura em torno desse valor varia em  $\pm 5$  % para enquadrar os valores do intervalo discretizados.

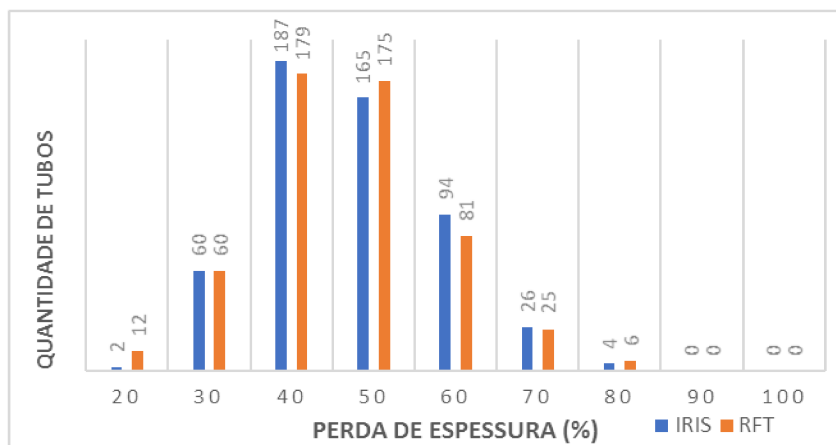


Figura 5.32 - Comparação do ensaio por RFT (inspetor 1) com o ensaio por IRIS na mesma faixa de perda de espessura do Feixe 01-E-10F (Fonte: Autor da Obra).

Percebe-se pela Figura 5.32 que as duas técnicas não destrutivas indicaram quantidades de tubos próximas em termos de uma mesma faixa de perda de espessura. A análise entre os resultados das duas técnicas mostra que há 70,50 % de correlação entre elas. A média global da diferença de perda de espessura ficou em -1,31 % (-0,03 mm) com um desvio padrão de  $\pm 8,08$  % ( $\pm 0,17$  mm). O valor negativo evidencia que os resultados obtidos pelo ensaio IRIS mostraram valores de perda de espessura mais acentuados que o RFT.

Ao tomar o ensaio via IRIS como padrão e considerar o valor da diferença entre os resultados das duas técnicas (RFT - IRIS) como referência e uma variabilidade (dispersão) em torno da referência zero em função dos valores do RFT, tem-se as porcentagens de acerto conforme a Figura 5.33 e a Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Porcentagem de acerto do RFT em função da variabilidade (dispersão) adotada e tomando o IRIS como ensaio padrão para o feixe 01-E-10F.

Variabilidade (%)	Quantidade de Tubos Total de 538	Porcentagem de Acerto (%)
5	320	59,4
10	441	82,0
15	495	92,0
20	515	95,7

Ou seja:

- Para uma variabilidade de 5% (perda de espessura  $\pm 0,11$ mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto do RFT foi de 59,4%;

- Para uma variabilidade de 10% (perda de espessura  $\pm 0,211$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto do RFT foi de 82%;
- Para uma variabilidade de 15% (perda de espessura  $\pm 0,32$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto do RFT foi de 92%;
- Para uma variabilidade de 20% (perda de espessura  $\pm 0,42$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto do RFT foi de 95,7%.

Percebe-se pela Figura 5.33 que quanto maior a variabilidade (dispersão) adotada entre o IRIS e o RFT, maiores são os acertos do RFT, sempre considerando a técnica de inspeção por IRIS como padrão.

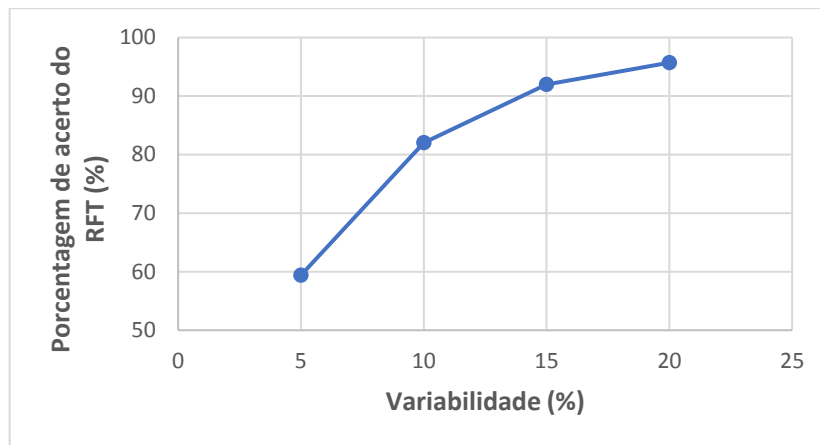


Figura 5.33 - Porcentagem de acertos do RFT em função da variação da diferença entre IRIS e RFT para o feixe 01-E-10F. (Fonte: Autor da Obra)

## 5.6. COMENTÁRIOS FINAIS

Percebeu-se nos ensaios realizados nos feixes tubulares que apesar do RFT parecer permitir uma limpeza por hidrojateamento com pressões menores que o IRIS, não foi possível nesse trabalho justificar essa tendência com as pressões utilizadas (7.000Psi e 15.000Psi). Acredita-se que para isso seja necessário ter uma faixa de pressão maior e que seja dependente da quantidade de incrustações presentes nos tubos. Isto deverá ser realizado em trabalhos futuros.

Ao se comparar as duas técnicas não destrutivas de forma global verifica-se que, apesar da diferença na quantidade de tubos ensaiados para cada técnica, as duas foram capazes de reconhecer discontinuidades em diferentes faixas percentuais de perda de espessura, desde a mais superficial a furos. Na análise dos dados foi possível verificar que as duas técnicas

possuem distribuições semelhantes, mostrando que elas são técnicas equivalentes no que diz respeito à indicação e caracterização de descontinuidades. A maioria das descontinuidades ficou entre 40 e 60 % de perda de espessura.

No comparativo realizado entre os três inspetores no feixe 01-E-10B para a avaliação da metodologia de análise dos resultados com RFT, verificou-se que as médias entre os resultados de perda de espessura foram semelhantes, não havendo sutilezas significativas no resultado da análise por inspetor, sendo essa hipótese confirmada por meio de uma ANOVA.

No comparativo pontual, com as mesmas descontinuidades avaliadas com as duas técnicas (IRIS e RFT), constatou-se que, apesar de haver diferenças entre os métodos de medição de descontinuidades, elas são capazes de identificar e caracterizar descontinuidades semelhantes. Isso é visível pela porcentagem de resultados na mesma faixa de perda de espessura e com a análise de variância, onde constatou-se que não há diferenças significativas nas médias dos resultados entre as duas técnicas, mostrando assim a equivalência entre as técnicas.

Um resultado relevante que vale mencionar em relação a assertividade das técnicas é que, quanto maior a profundidade da descontinuidade maior é a convergência da taxa de corrosão entre as técnicas IRIS e RFT. Essa afirmação pode ser verificada nos resultados dos três inspetores e nos dois feixes tubulares, mostrando assim que a técnica RFT, apesar de ter sido capaz de identificar todas as descontinuidades, possui melhor acurácia para descontinuidades grandes (maior perda de volume).

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE IRIS E RFT VERSUS ESCANEAMENTO 3D

#### 6.1. INTRODUÇÃO

A fim de corroborar a comparação dos resultados obtidos entre o IRIS e o RFT, realizou-se um terceiro ensaio com uma resolução menor que das técnicas não destrutivas estudadas. O objetivo foi ter uma nova medida, apesar de destrutiva, das perdas de espessuras que melhor represente a realidade das descontinuidades e assim obter uma comparação mais adequada entre o IRIS e o RFT.

Sendo assim, o equipamento de medição utilizado neste caso foi um escâner 3D a laser de mão “HandySCAN 3D Bleck Series da Creaform 3D” ([www.creaform3d.com](http://www.creaform3d.com)) com resolução de  $\pm 0,025$  mm. A medição foi realizada em laboratório na Universidade Federal de Uberlândia por um profissional do Laprosolda/UFU treinado pela fabricante.

Para realizar esse ensaio destrutivo, foram selecionadas 16 locais de perdas de espessuras em 16 tubos, sendo 10 tubos retirados do feixe 01-E-10F e 6 tubos do feixe 01-E-10B. Esses tubos com suas descontinuidades foram selecionados conforme resultados obtidos pelo IRIS e por se posicionarem externamente ao feixe tubular, facilitando assim o corte e retirada para análise.

Com a posição longitudinal de cada descontinuidade determinada pelo IRIS e confirmada pelo RFT, no caso pelo inspetor 1, realizou-se o seccionamento desses tubos (corte com disco abrasivo alguns centímetros antes e depois da descontinuidade) e em seguida o corte na longitudinal de cada tubo, para assim ter acesso também interno à descontinuidade. Em seguida fez-se uma limpeza química com um removedor de ferrugem e uma limpeza mecânica com uma escova de aço em cada amostra. A Figura 6.1 ilustra um exemplo de tubo cortado longitudinalmente e limpo.

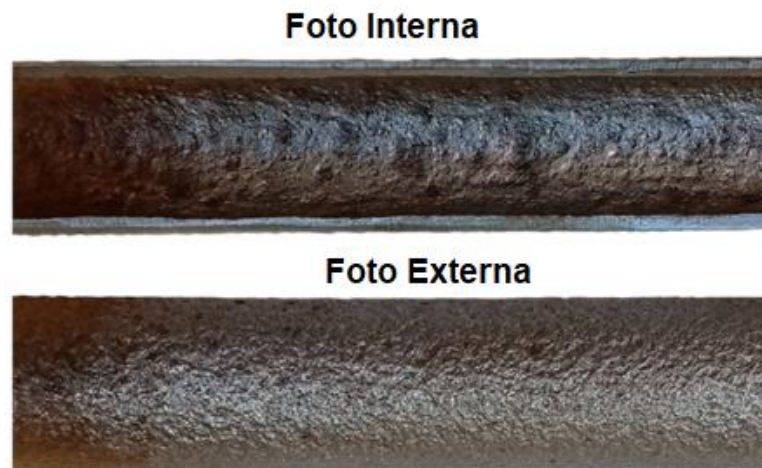


Figura 6.1 - Exemplo do aspecto de um tubo cortado na região de descontinuidade indicada pelo IRIS/RFT  
(Fonte: Autor da Obra).

Após realizar todos os cortes e limpeza, fez-se o escaneamento 3D de todas as seções. E seguida, com a utilização do software VXelements® da própria fabricante do escâner, realizou-se as medições de perda de espessura em cada descontinuidade selecionada. Esse software cria uma malha de pontos na parte interna e externa da parede do tubo e permite localizar as menores distância entre as malhas, resultando assim em um mapa de espessura. A Figura 6.2 ilustra a seção de um tubo cortado e limpo, escaneado (tanto em vista interna como externa, e enfim com o mapa de espessura com indicação dos cinco pontos de menor dimensão. No APÊNDICE D encontram-se as imagens dos 16 tubos estudados, incluindo as cinco menores espessuras encontradas no mapa de espessura. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 6.1. A Tabela 6.2 apresenta a perda de espessura de cada principal descontinuidade (menor espessura) com os três ensaios (Escâner, IRIRS e RFT), bem como a diferença entre elas, e a média e o desvio padrão dessas diferenças.

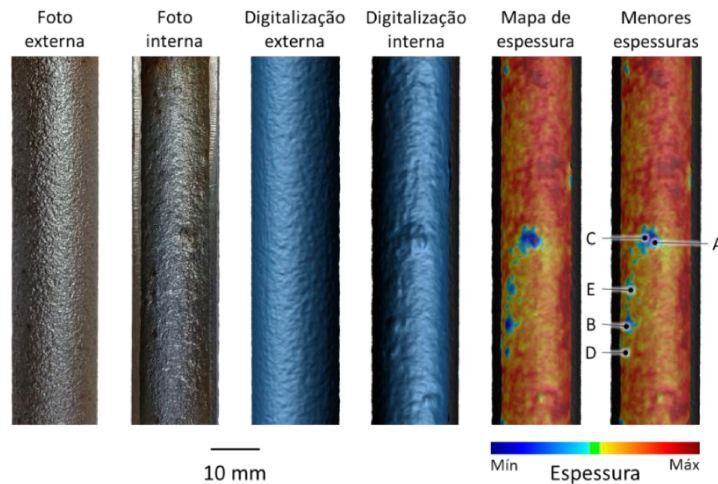


Figura 6.2 - Imagens de um tubo cortado e limpo (à esquerda), imagens após escaneamento 3D (central) e imagens do mapa de espessura (à direita) (Fonte: Autor da Obra).

Tabela 6.1 – Menores espessuras encontradas pelo ensaio por Escaneamento 3D nos 16 tubos analisados.

Tubo	Codificação (linha/coluna- trocaador)	Medida A [mm]	Medida B [mm]	Medida C [mm]	Medida D [mm]	Medida F [mm]
1	02/03-F	0,976	1,033	1,049	1,091	1,251
2	03/22-F	1,360	1,389	1,408	1,439	1,445
3	04/26-F	1,262	1,340	1,430	1,490	1,496
4	19/38-F	1,410	1,571	1,595	1,597	1,626
5	23/36-F	1,142	1,287	1,292	1,421	1,487
6	25/34-F	1,061	1,289	1,355	1,415	1,447
7	26/33-F	0,898	0,935	1,008	1,014	1,045
8	28/29-F	0,818	1,266	1,296	1,317	1,355
9	29/29-F	0,887	0,978	1,027	1,080	1,125
10	30/27-F	1,089	1,338	1,399	1,402	1,411
11	01/08-B	1,095	1,269	1,537	1,546	1,608
12	01/10-B	1,448	1,453	1,473	1,477	1,495
13	01/12-B	1,560	1,594	1,637	1,645	1,700
14	01/14-B	1,231	1,266	1,338	1,377	1,450
15	05/02-B	1,177	1,217	1,276	1,288	1,369
16	10/01-B	0,850	0,908	0,929	0,931	0,973

Tabela 6.2 - Valores das perdas de espessura da descontinuidade principal (menor espessura) de cada tubo obtidos pelos três ensaios realizados nos tubos dos feixes 01-E-10F e 01-E-10B

Tubo	Codificação (linha/coluna- trocaador)	Perda de espessura [mm]			Diferenças [mm]		
		Escâner	IRIS	RFT	Escâner - IRIS	Escâner - RFT	IRIS - RFT
1	02/03-F	1,13	1,01	0,93	0,12	0,2	0,08
2	03/22-F	0,75	0,71	0,59	0,04	0,16	0,12
3	04/26-F	0,85	0,61	0,53	0,24	0,32	0,08
4	19/38-F	0,70	0,81	0,69	-0,11	0,01	0,12
5	23/36-F	0,97	0,91	0,88	0,06	0,09	0,03
6	25/34-F	1,05	1,11	1,05	-0,06	0	0,06
7	26/33-F	1,21	1,31	1,55	-0,1	-0,34	-0,24
8	28/29-F	1,29	1,01	0,92	0,28	0,37	0,09
9	29/29-F	1,22	0,91	0,87	0,31	0,35	0,04
10	30/27-F	1,02	1,11	1,05	-0,09	-0,03	0,06
11	01/08-B	1,02	1,01	0,99	0	0,02	0,02
12	01/10-B	0,66	0,91	0,97	-0,25	-0,31	-0,06
13	01/12-B	0,55	0,91	0,68	-0,36	-0,13	0,23
14	01/14-B	0,88	0,91	0,79	-0,03	0,09	0,12
15	05/02-B	0,93	1,21	0,91	-0,28	0,02	0,3
16	10/01-B	1,26	1,11	0,95	0,15	0,31	0,16
	Média	-	-	-	-0,005	0,071	0,076
	Desvio Padrão	-	-	-	0,196	0,215	0,119

A Figura 6.3 apresenta graficamente as perdas de espessuras encontradas por cada tipo de ensaio. Como pode ser visto, há um comportamento semelhante entre as medidas realizadas nos 16 tubos, mostrando assim uma semelhança entre as técnicas. Uma análise mais detalhada mostra que há 54,67 % de correlação entre o IRIS e o Escâner 3D, 56,45 % entre o RFT e o Escâner 3D e 86,79 % de correlação entre o IRIS e o RFT.



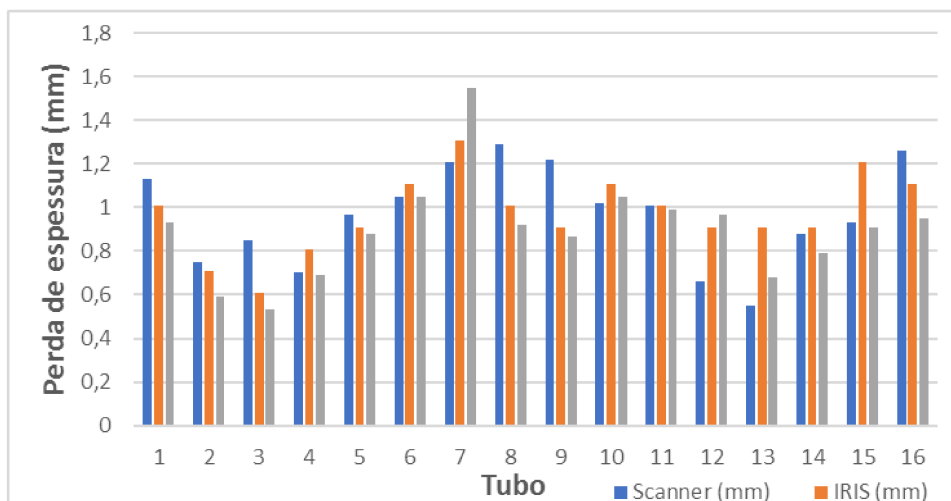


Figura 6.3 - Perda de espessura das 16 amostras dos tubos ensaiados com RFT, IRIS e Escâner 3D (Fonte: Autor da Obra).

A Figura 6.4 mostra graficamente a diferença entre os valores de perda de espessura entre cada técnica, sendo que quanto mais próximo do valor zero mais próximo da igualdade estão as perdas de espessuras detectadas entre as técnicas. Percebe-se que a maior diferença entre o Escâner e o IRIS foi de -0,36 mm, o que mostra que o IRIS apresentou uma perda maior. Entre o Escâner e o RFT foi de 0,37 mm, mostrando que o Escâner apresentou maior perda de espessura. Já entre o IRIS e o RFT a maior diferença foi de 0,30 mm, sendo o IRIS com a perda mais acentuada.

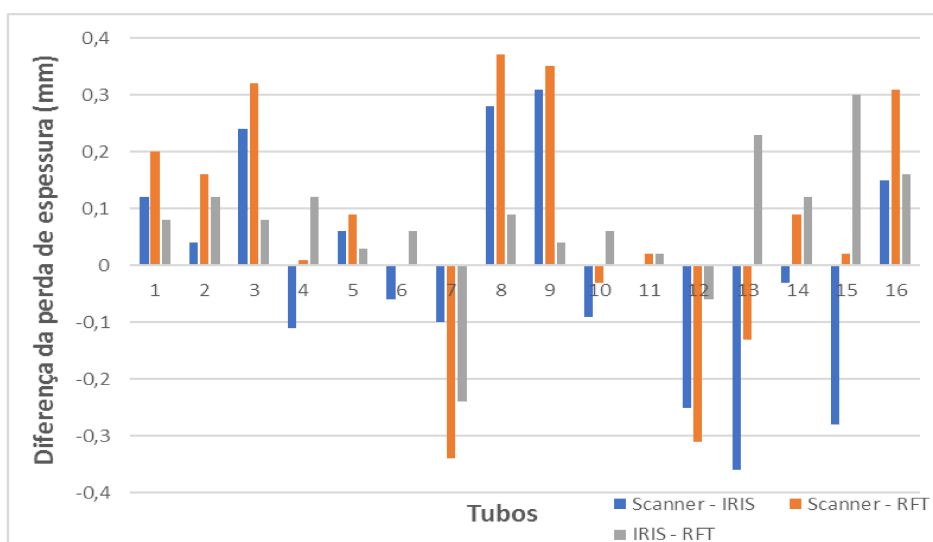


Figura 6.4 - Diferença da perda de espessura entre Escâner, IRIS e RFT (Fonte: Autor da Obra).

Outra maneira de visualizar essas diferenças é pela média e desvio padrão delas, sendo que, quanto mais próximo do zero a média for, mais próximas são as medidas e das

descontinuidades. Como mostra a Figura 6.5, a maior média ocorreu na diferença entre o IRIS e o RFT, com um valor de  $0,076 \pm 0,119$  mm, representando  $3,60 \pm 5,63$  % da parede do tubo. Já entre o Escâner e o RFT a média da diferença foi de  $0,071 \pm 0,215$  mm, o que representa  $3,36 \pm 10,18$  % da parede do tubo. Já entre o Escâner e o IRIS a média da diferença foi de  $0,005 \pm 0,196$ , sendo a menor média com um valor de  $0,23 \pm 9,28$  % da parede do tubo.

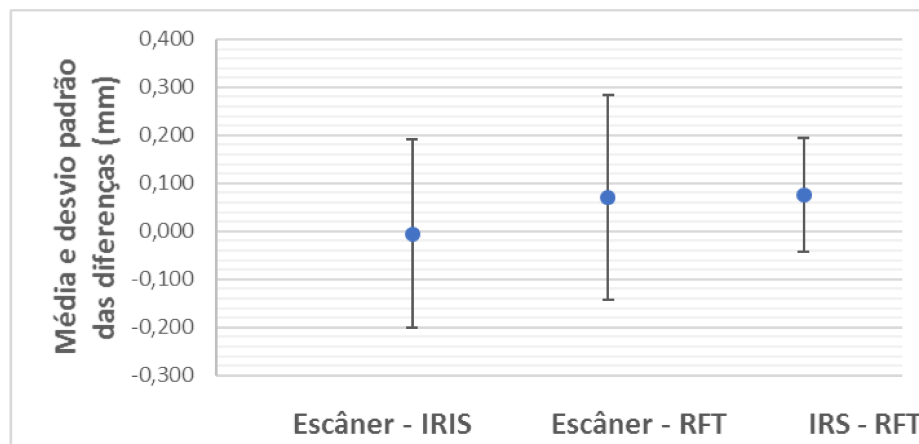


Figura 6.5 - Média e desvio padrão das diferenças de perda de espessura entre os ensaios.

As variações observadas são função da incerteza das medidas inseridas nos sistemas de medição como um todo (equipamentos e inspetores). Considerando as medidas do ensaio Escâner 3D a mais realista e uma determinada variabilidade (dispersão) em torno de um valor de referência (no caso zero) para os ensaios RFT e IRIS, tem-se as seguintes porcentagens de acerto, conforme Tabela 6.3:

Tabela 6.3 - Porcentagem de acerto do IRIS e RFT em função da variabilidade em torno do zero a partir do Escâner 3D

variabilidade (%)	Porcentagem de acerto do IRIS (%)	Porcentagem de acerto do RFT (%)
5	50	43,8
10	62,5	62,6
15	93,8	87,5
20	100	100

- Para uma variabilidade de 5% de perda de espessura ( $\pm 0,11$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto foi de 50 % para o IRIS e de 43,8 % para o RFT;
- Para uma variabilidade de 10% de perda de espessura ( $\pm 0,211$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto foi de 62,5% para o IRIS e de 62,6 para o RFT;

- Para uma variabilidade de 15% de perda de espessura ( $\pm 0,32$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto foi de 93,8% para o IRIS e de 87,5 para o RFT;
- Para uma variabilidade de 20% de perda de espessura ( $\pm 0,42$  mm) em torno do zero a porcentagem média de acerto foi de 100% para os dois ensaios.

Para avaliar melhor os resultados, fez-se uma análise de variância dos resultados obtidos pelas três técnicas (IRIS, RFT e Escâner 3D). Considerando que todos os resultados são da mesma descontinuidade e com um nível de significância de 95 %, percebe-se pelo gráfico de boxplot da Figura 6.6(esquerda) que os resultados, inclusive a mediana, estão na mesma faixa de corrosão (perda de espessura), entre 38 % e 56 %. Isso mostra que os resultados obtidos são equivalentes.

Já na Figura 6.6(direita) confirma-se a hipótese de que não há diferenças significativas na média dos três grupos (ensaios), mostrando que na média as técnicas são estatisticamente iguais. Isso significa que, se consideramos os resultados do Escâner 3D como sendo referência da realidade e considerarmos que a média das técnicas IRIS e RFT estão inseridas na média do Escâner 3D, pode-se afirmar que o IRIS e o RFT são equivalentes na capacidade de detecção e caracterização da perda de espessura de uma descontinuidade.

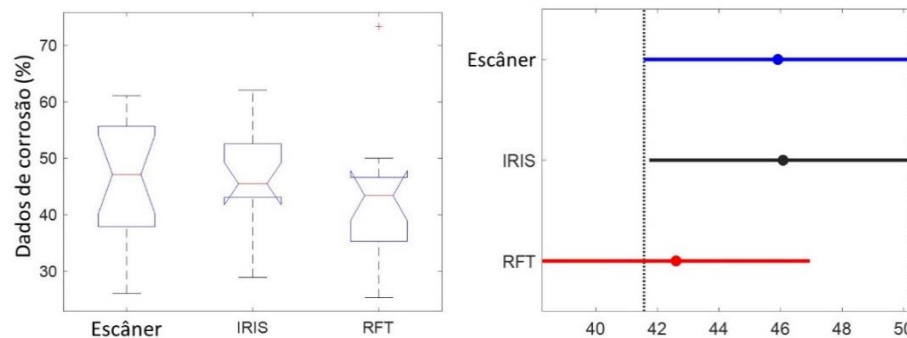


Figura 6.6 - Esquerda) Boxplot dos dados de corrosão (perda de espessura) a partir das técnicas IRIS, RFT e Escâner 3D; (Direita) Comparativo das médias dos dados de corrosão (perda de espessura) a partir das técnicas IRIS, RFT e Escâner 3D para um nível de confiança de 95%.

Tabela 6.4 - Valores de mediana, média e desvio padrão dos resultados do Escâner 3D, IRIS e RFT

	Escâner 3D	IRIS	RFT
Mediana	47,20 %	45,50 %	43,40 %
Média	45,90 %	46,08 %	42,60 %
Desvio Padrão	10,71 %	8,46 %	11,07 %

## 6.2. ANÁLISE DE CORROSÃO

Como complemento à compreensão dos resultados obtidos ao longo do trabalho, realizou-se uma análise de caracterização da corrosão nas 16 amostras inspecionadas com o escâner 3D. Inicialmente fez-se uma análise visual dos tubos cortados antes da limpeza química.

A Figura 6.7 mostra um exemplo de seção de um tubo cortado indicando os aspectos da corrosão. É possível verificar uma quantidade significativa de óxido distribuída em toda a amostra, tanto na parte externa como interna do tubo, o que indica que a corrosão seja do tipo generalizada.



Figura 6.7 - Imagem típica do óxido na parte interna e externa dos tubos (Fonte: Autor da Obra).

Após a limpeza química e o escaneamento 3D das amostras, foi possível obter uma indicação do tipo de corrosão com base nas medidas da perda de espessura e no formato da área de corrosão observada nas imagens escaneadas. A Figura 6.8 mostra a maneira de caracterização das corrosões e das discontinuidades. Para isso foram utilizados de três análises visuais: uma nas seções reais do tubo cortado, outra nas imagens digitalizadas (interno/externo) desse tubo e por último, no mapa de cores resultante das imagens digitalizadas. No caso, como exemplo, é representado uma corrosão generalizada na parte externa e corrosão generalizada na parte interna com um alvéolo, caracterizada pela literatura corrente como uma corrosão de pouca profundidade, onde o diâmetro do alvéolo é maior que a sua profundidade.

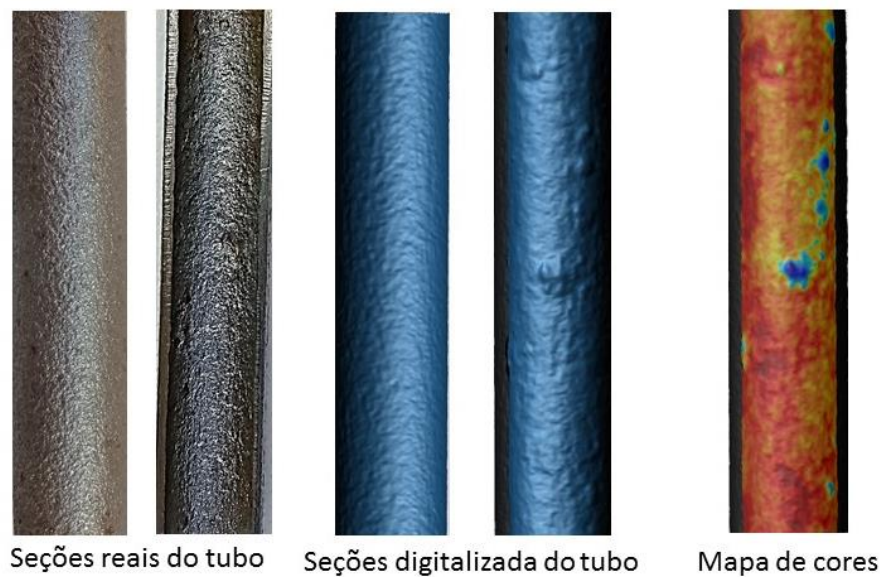


Figura 6.8 – Seção estudada para exemplificar a análise de caracterização da corrosão nos tubos (Fonte: Autor da Obra).

A caracterização do formato da corrosão gera dificuldades de interpretação, pois a diferença entre um alvéolo e uma placa é uma simples relação entre diâmetro e profundidade. Já a diferença entre corrosão localizada e generalizada (ou uniforme) está na dispersão e quantidade de alvéolos e pites na região analisada.

Das 16 amostras analisadas, conforme APÊNDICE D, todas amostras apresentaram na parte externa do tubo corrosões generalizadas, já na parte interna apresentaram regiões com corrosão generalizada mais alvéolos e placas. A Tabela 6.5 apresenta os pontos de maior de perda de espessura e o tipo de corrosão encontrada. A caracterização da corrosão tomou como base as formas de corrosão apresentadas na Figura 2.10.

Tabela 6.5 - Caracterização do tipo de corrosão nos tubos escaneados.

Tubo	Codificação (linha/coluna-trocador)	Perda de espessura (mm)	Tipo de corrosão Externa/Interna
1	02/03-F	1,13	Generalizada/Generalizada com Placas
2	03/22-F	0,75	Generalizada/Alveolar
3	04/26-F	0,85	Generalizada/Placas
4	19/38-F	0,70	Generalizada/Alveolar
5	23/36-F	0,97	Generalizada/Alveolar

Continuação.

Tubeo	Codificação (linha/coluna-trocador)	Perda de espessura (mm)	Tipo de corrosão Externa/Interna
6	25/34-F	1,05	Generalizada/Alveolar
7	26/33-F	1,21	Generalizada/Placas
8	28/29-F	1,29	Generalizada/Alveolar
9	29/29-F	1,22	Generalizada/Alveolar
10	30/27-F	1,02	Generalizada/Alveolar
11	01/08-B	1,02	Generalizada/Alveolar
12	01/10-B	0,66	Generalizada/Placas
13	01/12-B	0,55	Generalizada/Alveolar
14	01/14-B	0,88	Generalizada/Placas
15	05/02-B	0,93	Generalizada/Placas
16	10/01-B	1,26	Generalizada/Placas

Como visualizado pela Tabela 6.5, todas as amostras analisadas apresentaram corrosão generalizada (uniforme), sendo que algumas apresentaram morfologia de placas, com um maior desprendimento de material, e outras de alvéolos, com desprendimento de material mais localizado.

Vale destacar que uma tentativa de medir as descontinuidades pela imagem de topo do mapa de espessura gerado pelo Escâner 3D acarretaria alguns erros. A área indicada em destaque de cores para cada descontinuidade não é em geral circular e as "bordas" variam em espessura, impossibilitando definir um contorno para tentar medir uma área/diâmetro e mesmo largura/comprimento bem definido. O destaque em azul (região de menor espessura na imagem) pode estar um pouco ou muito na parte inclinada da parede pois, os mapas não são planificados, o que deforma a vista de topo e assim possíveis medidas.

### 6.3. COMENTÁRIOS FINAIS

Para confrontar as duas técnicas, utilizou-se de uma terceira técnica de medição de menor resolução, o Escâner 3D. Foi possível através desse experimento constatar que não há diferenças significativas entre as médias dos resultados das três técnicas, sendo o IRIS e o RFT equivalentes quanto à determinação e caracterização das mesmas descontinuidades conhecidas. Considerando a diferença dos resultados, Escâner 3D - IRIS e Escâner 3D – RFT, tendo o

Escâner como referência, tem-se que, quanto maior for a descontinuidade maior é a porcentagem de acerto das duas técnicas. Ou seja, a capacidade de detecção das duas está diretamente relacionada à perda de espessura da descontinuidade. Esta semelhança entre os resultados foi comprovada estatisticamente com um nível de significância de 95%, mostrando que existe diferença entre as suas médias.

Em suma, pode-se dizer que o ensaio RFT, por não utilizar o mesmo método de análise que o IRIS, não irá obter resultados idênticos ao do IRIS, porém a técnica possui capacidade de detecção e caracterização de perda de espessura equivalentes às da técnica IRIS.

Utilizou-se o Escâner 3 D para caracterizar o tipo de corrosão presente nos feixes tubulares, devido à alta taxa de corrosão e a maneira de acondicionamento dos feixes, e constatou-se que os dois feixes tubulares estão com corrosões generalizadas tanto na parte interna como externa, generalizada/alveolares e generalizada/placas (em menor número).

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSÕES

Com base nas condições utilizadas e nos resultados observados ao longo deste trabalho, que teve como objetivo melhor compreender a técnica RFT e compará-la com a técnica IRIS em feixes tubulares de aço carbono de trocadores de calor do tipo Casco & Tubos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A avaliação inicial mostrou que a técnica RFT apresenta vários fatores que demandam atenção por parte do inspetor, tanto no momento da caracterização das descontinuidades para calibração dos canais, quanto no momento de análise dos sinais. Dentre esses fatores vale destacar: a velocidade de ensaio, a frequência de operação da sonda, os efeitos causados por interferências externas como da placa de suporte/chicana, o efeito das bordas do tubo, a influência de um entalhe externo (groove) em sua vizinhança e o efeito da distância entre duas descontinuidades adjacentes. Verificou-se que esses fatores alteram de forma direta a realização e análise do ensaio RFT.
- O tracionador da sonda, construído neste trabalho, foi importante para a realização do ensaio RFT com a velocidade desejada, garantindo uma velocidade de ensaio constante e principalmente na busca da melhor frequência de excitação da sonda.
- Em termos de execução dos ensaios não destrutivos, o RFT apresentou-se mais rápido e prático por não necessitar de água e por, conseqüentemente, depender de menos acessórios em relação ao IRIS.
- Em termos de leitura e análise dos resultados dos ensaios não destrutivos, apesar do RFT oferecer maiores dificuldades na interpretação dos dados, foi possível verificar que, para descontinuidades de maiores dimensões, a performance do RFT se assemelha à do IRIS. Já para descontinuidades menores ocorreu uma maior dificuldade na leitura com o RFT.
- Com relação aos valores de pressão de limpeza (hidrojateamento) utilizado nos ensaios, não foi possível verificar uma diferença significativa entre as demandas das técnicas não destrutivas (RFT e IRIS). Este fato está provavelmente relacionado à grande quantidade de incrustações presentes nos tubos dos trocadores cedidos pela refinaria.



- Ao se comparar as duas técnicas não destrutivas de forma global (mesmos trocadores), verificou-se que tanto o RFT como o IRIS foram capazes de reconhecer descontinuidades com as mais variadas perdas de espessuras, sendo assim técnicas equivalentes no que diz respeito à indicação e caracterização do grau de degradação dos tubos em feixes de trocadores de calor.
- No comparativo realizado com três inspetores para a avaliação da metodologia de análise dos resultados do RFT, mostrou-se que as médias entre os resultados dos três inspetores foram equivalentes, não sendo observadas diferenças significativas a partir do modo de condução da análise.
- No comparativo mais pontual (mesmas descontinuidades) entre as técnicas RFT e IRIS, constatou-se que ambas são capazes de identificar e caracterizar descontinuidades de forma equivalente.
- Foi possível também verificar que a porcentagem de acertos do RFT, tendo o IRIS como referência, está diretamente relacionada à profundidade da descontinuidade, ou seja, quanto mais profunda for a descontinuidade maior é o acerto do RFT frente ao IRIS.
- Confirmou-se através do Escâner 3D (técnica destrutiva) que não existe diferença significativa entre os resultados obtidos com o RFT e o IRIS (técnicas não destrutivas).
- A utilização do Escâner 3D para caracterizar o tipo de corrosão presente nos feixes tubulares mostrou a presença de corrosões generalizadas, com morfologias de placas e alveolares.

Assim, os resultados desse trabalho mostraram que o ensaio RFT oferece uma perspectiva bastante promissora para a realização de ensaios em campo de trocadores de calor do tipo Casco & Tubos. Em geral, pode-se afirmar que o RFT pode ser usado para análises rápidas em locais de difícil acesso e onde a grande quantidade de equipamentos a ser avaliado é um fator relevante. Ou seja, o RFT pode ser utilizado mais como ferramenta de varredura célere de cunho mais geral no equipamento e o IRIS como instrumento de investigação mais minuciosa e local.

Esse trabalho gerou um artigo intitulado Análise de Ensaios Não-Destrutivos para Inspeção de Tubos de Trocadores de Calor do Tipo Casco & Tubos: Campo Remoto (RFT) versus Sistema de Inspeção Rotativa Interna (IRIS). Esse artigo foi publicado na revista Soldagem & Inspeção, volume 26 de 2021.

## TRABALHOS FUTUROS

Como forma de avançar em tópicos relacionados ao trabalho realizado, sugere-se:

- Realizar ensaios comparativos entre o RFT e o IRIS variando a pressão de hidrojateamento de forma a comprovar a possibilidade ou não de uma pressão menor para o ensaio RFT;
- Realizar ensaios com canal MIX apresentado pela EDDYFI para detectar descontinuidade próximas ou abaixo da posição das chicanas;
- Realizar ensaios comparativos entre o RFT e o IRIS em tubos com costuras para verificar possíveis dificuldades e o quanto a região da costura interfere no sinal do RFT;
- Confeccionar um catálogo com diversas descontinuidades e respectivos sinais no RFT com o objetivo de ajudar no treinamento de inspetores, bem como para facilitar a análise dos resultados deste ensaio em campo;
- Estudar os tipos de corrosões e fatores de causa em trocadores de calor do tipo Casco & Tubos;
- Realizar o ensaio RFT em tubos com maior número de descontinuidades de formas geométricas conhecidas (produzidas em laboratório) para compreender melhor o sinal gerado por essa técnica;
- Realizar uma mineração no sinal gerado pelo ensaio RFT (*strip chart* e plano de tensão) em busca de parâmetros que melhor representem as descontinuidades;
- Implementar uma inteligência artificial com os parâmetros representativos do ensaio RFT para auxiliar o inspetor no momento de análise dos sinais e assim facilitar a caracterização das descontinuidades com esse ensaio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO (São Paulo). **ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO**. 2022. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ABRACO - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. **C O R R O S Ã O – UMA ABORDAGEM GERAL**. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/israel/teoria/Teoria%20-%20Corrosao.pdf/view>. Acesso em: 10 fev. 2022.

AGUILAR, Kayro de Souza. **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CORRENTES PARASITAS PARA DETECÇÃO DE TRINCAS EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO CLADEADO (X65 + UNS 625)**. 2014. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Engenharia de Materiais da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

AHMAD, Z. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Elsevier Science & Technology Books. 2006.

AL-QADEEB, Fathi E. TUBING INSPECTION USING MULTIPLE NDT TECHNIQUES. In: 3RD MENDT - MIDDLE EAST NONDESTRUCTIVE TESTING CONFERENCE & EXHIBITION, 3., 2005, Manama. TUBING INSPECTION USING MULTIPLE NDT TECHNIQUES. Manama: Mendt, 2005. Disponível em: <<https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=3309>>. Acesso em: 16 mar. 2022

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E2096/E2096M – 16**: Standard Practice for In Situ Examination of Ferromagnetic Heat-Exchanger Tubes Using Remote Field Testing. Pensilvânia: Astm Int'L, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME BPVC.V-2019**: ARTICLE 17 REMOTE FIELD TESTING (RFT) EXAMINATION METHOD. New York: Asme, 2019.

ARAUJO, E. C. C. Trocador de Calor, 106p. São Carlos, EdUFSCar, 2002

ARAUJO, E. C. C. Operações unitárias envolvendo transmissão de calor, 161p, São Carlos: EdUFSCar, 2013.

ARAUJO, Mauro Duque de; SILVA, Arilson Rodrigues da. **APLICAÇÃO CONJUGADA DAS TÉCNICAS DE IRIS, CORRENTES PARASITAS, CAMPO REMOTO e MFL NA INSPEÇÃO DE TUBOS DE TROCA TÉRMICA**. In: 7º ENCONTRO REGIONAL DE END E INSPEÇÃO, 7., 2009, São Leopoldo. **APLICAÇÃO CONJUGADA DAS TÉCNICAS DE IRIS, CORRENTES PARASITAS, CAMPO REMOTO e MFL NA INSPEÇÃO DE TUBOS DE TROCA TÉRMICA..** São Leopoldo: ..., 2009. p. 1-16.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15246**: Ensaio não destrutivo - Ensaio por campo remoto em tubos ferromagnéticos instalados em trocadores de calor. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2005. 13 p.

AZEVEDO, J. L. T. Apontamentos de Permutadores de Calor – Equipamento Térmicos, 2005. obtido em janeiro de 2022 de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571249514/Permutadores2A.pdf>.

BARBOZA, Klevson Ranniet Almeida. Avaliação da técnica de inspeção por correntes parasitas em tubos de permutadores de calor. 2009. 67p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BERNARDO, Gonçalo da Silva Rosa Lopes. **Técnicas avançadas de controlo não destrutivo para ligações de ligas com memória de forma a aços de construção civil**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

CREAFORM3D. **HandySCAN 3D | BLACK Series**. Disponível em: <https://www.creaform3d.com/pt/solucoes-em-metrologia/scanners-3d-portateis-handyscan-3d/especificacoes-tecnicas>. Acesso em: 26 set. 2022.

DURING, Evert D.D.. **Corrosion Atlas: a collection of illustrated case histories**. 3. ed. Amsterdã: Elsevier Bv, 2018.

EDDYFI TECHNOLOGIES. **Magnifi 4: gettinh started with maginifi 4 & application guides**. Canadá: EDDYFI Technologies, 2019. Manual de uso do software Magnifi 4 para a técnica RFT com o equipamento Ectane 2.

EDDYFI. **Remote-Field Testing (RFT)**. Disponível em: <https://www.EDDYFI.com/en/technology/remotefield-testing-rft>. Acesso em: 28 mar. 2022.

ESTADÃO: Petrobras bate recorde ao investir R\$ 2,3 bilhões em manutenção preventiva de refinarias em 2021. São Paulo, 19 jan. 2022. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/noticias/negocios,petrobras-bate-recorde-ao-investir-r-2-3-bilhoes-em-manutencao-preventiva-de-refinarias-em-2021,70003955399>. Acesso em: 26 jan. 2022.

ESTEVES, Andrea Cristina. **Desenvolvimento de Modelo Matemático de Trocador de Calor Tipo Casco-Tubos**. 2009. 100 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Engenharia Mauá, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2009.

FERREIRA, C. E. N., Análise Experimental do desempenho de um trocador de calor do tipo casco e tubos. Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 95p., 2014.

FIGUEREDO, Marcos Alberto da Silva. **INSPEÇÃO DE TUBOS DE TROCADORES DE CALOR E DE CALDEIRAS COM AS TÉCNICAS IRIS E CAMPO REMOTO CONJUGADAS**. In: PANNDT - PAN-AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Conferência**. Rio de Janeiro: Sgs do Brasil Ltda, 2003. p. 1-8.

FIORILLO, David. **METODOLOGIA BÁSICA DE CONDICIONAMENTO E COMISSONAMENTO DE TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO & TUBOS**. 2010. 111 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

FORMIGONI A. L. Análise de defeitos em tubos de geradores de vapor de usinas nucleares utilizando a transformada de hilbert- huang em sinais de inspeção por correntes parasitas. Dissertação apresentada como parte dos Requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, USP 99p, 2012.

GINZEL, E., 2018, Civa Modelling for Internal Ultrasonic Tube Testing, [https://www.ndt.net/article/ndtnet/papers/Ginzel\\_Civa-Modelling-for-internal-tubeinspections.pdf](https://www.ndt.net/article/ndtnet/papers/Ginzel_Civa-Modelling-for-internal-tubeinspections.pdf)

GREICIUNAS, Evaldas. **Modelling Novel Heat Exchangers for Aircraft Thermal Management**. 2019. Tese (Doutorado) - The University of Leeds, [S. l.], 2019.

HUANG, S. E WANG, S. New technologies in electromagnetic non-destructive testing. ISSN 2198-7815 (electronic). Springer Series in Measurement Science and Technology, Ed. Springs, 222p, 2013.

Huang, S. e Wang, S. New technologies in electromagnetic non-destructive testing. ISSN 2198-7815 (electronic). Springer Series in Measurement Science and Technology, Ed. Springs, 222p, 2013

INCROPERA, F. P. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora S.a, 2007.

IOWA STATE UNIVERSITY. **Eddy Current Testing**. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/index.xhtml>. Acesso em: 04 mar. 2022.

Joseph M. Buckley, An introduction to Eddy Current Testing theory and technology, formerly of HOCKING NDT, 1994.

KRZYWOSZ, Kenji; ECKERT, Timothy. **Eddy Current Testing of Service Water Heat Exchangers for Engineers Guideline**. TR - 110392. ed. Palo Alto: Epri, 1999.

LEMASA. **CYCLONE 22K**. Disponível em: <https://www.lemasa.com.br/bicos-de-hidrotrato/cyclone>. Acesso em: 14 jun. 2022.

LIEBERMAN, Norman P.; LIEBERMAN, Elizabeth T.. **A Working Guide to Process Equipment**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. Disponível em: <https://studylib.net/doc/25407009/a-working-guide-to-process-equipment-3rd-edition>. Acesso em: 22 jun. 2022.

MACHADO, M, A. Conceção, Simulação e Validação Experimental de Sondas de Correntes Induzidas para Ensaios Não Destrutivos de Geometrias Tubulares. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Lisboa, 202p, 2014.

MADI, Márcio. **OTIMIZAÇÃO DO PERÍODO DE LIMPEZA DE TROCADORES DE CALOR UTILIZADOS NO REFINO DE PETRÓLEO**. 2005. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MATAREZI, J. C. Aplicação do Ensaio Eddy Current Phased Array em Componentes Aeroespaciais. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, SP, 113p. 2009.

MCGRAW-HILL, **Heat Exchanger**. Concise Encyclopedia of Science and Technology. 5th ed. New York, 2005.

MORAN, Michael J. *et al.* **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos**:: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2005.

MICROSOFT. **CORREL (Função CORREL)**. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/correl-função-correl-995dcef7-0c0a-4bed-a3fb-239d7b68ca92>. Acesso em: 03 dez. 2022.

NDE-ED. Introduction to Eddy Current Testing. <https://www.olympus-ims.com/en/ndttutorials/eca-tutorial/what-is-eca/basic/>. Acesso em 03/2022.

OLYMPUS - INDUSTRIAL SOLUTIONS. **Eddy Current Array Tutorial**: Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/eca-tutorial/>. Acesso em: 22 fev. 2022.

OLYMPUS. **TUBE INSPECTION**: advances in rft tube testing solutions. Tóquio: Olympus, 2022.

ORNELAS, R. 2017, Entendendo o Ensaio de Ultrassom IRIS, <https://newwavendt.com.br/entendendo-o-ensaio-de-ultrassom-iris/>

PEREIRA, Paulo Apicelo de Souza. **ESTUDO PRELIMINAR DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CORRENTES PARASITAS VISANDO A INSPEÇÃO SUBMERSA DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS**. 2007. 91 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciências em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PETROBRAS. **Refino**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/refino/>. Acesso em: 22 jun. 2022.

RAMOS, Júlio Endress; CARNEVAL, Ricardo de Oliveira. **PT-144.01.11733 - TÉCNICAS NÃO INTRUSIVAS DE INSPEÇÃO NÃO DESTRUTIVAS APLICADAS E EQUIPAMENTOS E TUBULAÇÕES**: revisão da guia de boas práticas para inspeção de permutadores de calor do tipo casco e tubo. Rio de Janeiro: Cenpes/Pdep/Tmec, 2015. 50 p.

RUSSELL NDE SYSTEMS INC. **Inspection of Pipelines**. Finite element model of Remote Field Technology. Disponível em: <https://www.russelltech.com/Services/Pipelines>. Acesso em: 16 mar. 2022.

RUSSELL, David E.; MACKINTOSH, David D.; A SHATAT, Ad.. Remote Field Testing. In: UDPA, Satish S.; MOORE, Patrick O.. **Eletromagnetic Testing**. 3. ed. United States Of America: Amer Society For Nondestructive, 2004. p. 1-529.

SABINO, Ricardo Schayer. **INSPEÇÃO DE FEIXES TUBULARES DE TROCADORES DE CALOR**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Ufmg, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SENAI. **Permutadores de calor**: monitoramento e controle de processos. Rio de Janeiro: Senai - Petrobras, 2008. 16 p. Disponível em: <https://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/1trocadores-de-calor.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2022.

SHAH, Ramesh K.; SEKULIC” , Dusˇan P.. **FUNDAMENTALS OF HEAT EXCHANGER DESIGN**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

SHULL, P. J. **Eddy Current**, Non-destructive Evaluation: Theory, Techniques and Applications, capítulo 5, The Pennsylvania State University, altoona, Pennsylvania, Marcel Dekker Books, 2002.

SILVA, Moacy Pereira da. **Controle Preditivo em Rede Aplicado a um Trocador de Calor Casco-Tubos**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

SILVA, V. L. C.M., Predição da incrustação em trocador de calor baseada em redes neurais artificiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computacionais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 60p., 2013.

SOARES, A. Correntes Parasitas, 1. Edição, ISBN: 85-99153-03-X, ABENDE, SP, 203p. 2005.

SOUZA, Eduardo Alencar de. **AVALIAÇÃO DE INIBIDORES DE CORROSÃO PARA SISTEMAS DE RESFRIAMENTO INDUSTRIAL OPERANDO COM CICLO ELEVADO DE CONCENTRAÇÃO**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, A Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

STROSKI, Pedro Ney. **Resistência, Capacitância, Indutância, Impedância e Reatância**. 2017. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2017/08/18/resistencia-capacitancia-indutancia-impedancia-e-reatancia/>. Acesso em: 23 fev. 2022.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Vasos de Pressão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007.

TEMA - TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION. **HEAT EXCHANGER NOMENCLATURE: STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION**. 9 ed. New York: Tema, 2007.

**TUBE INSPECTION**. Canadá: Olympus Ndt, 20 out. 2006.

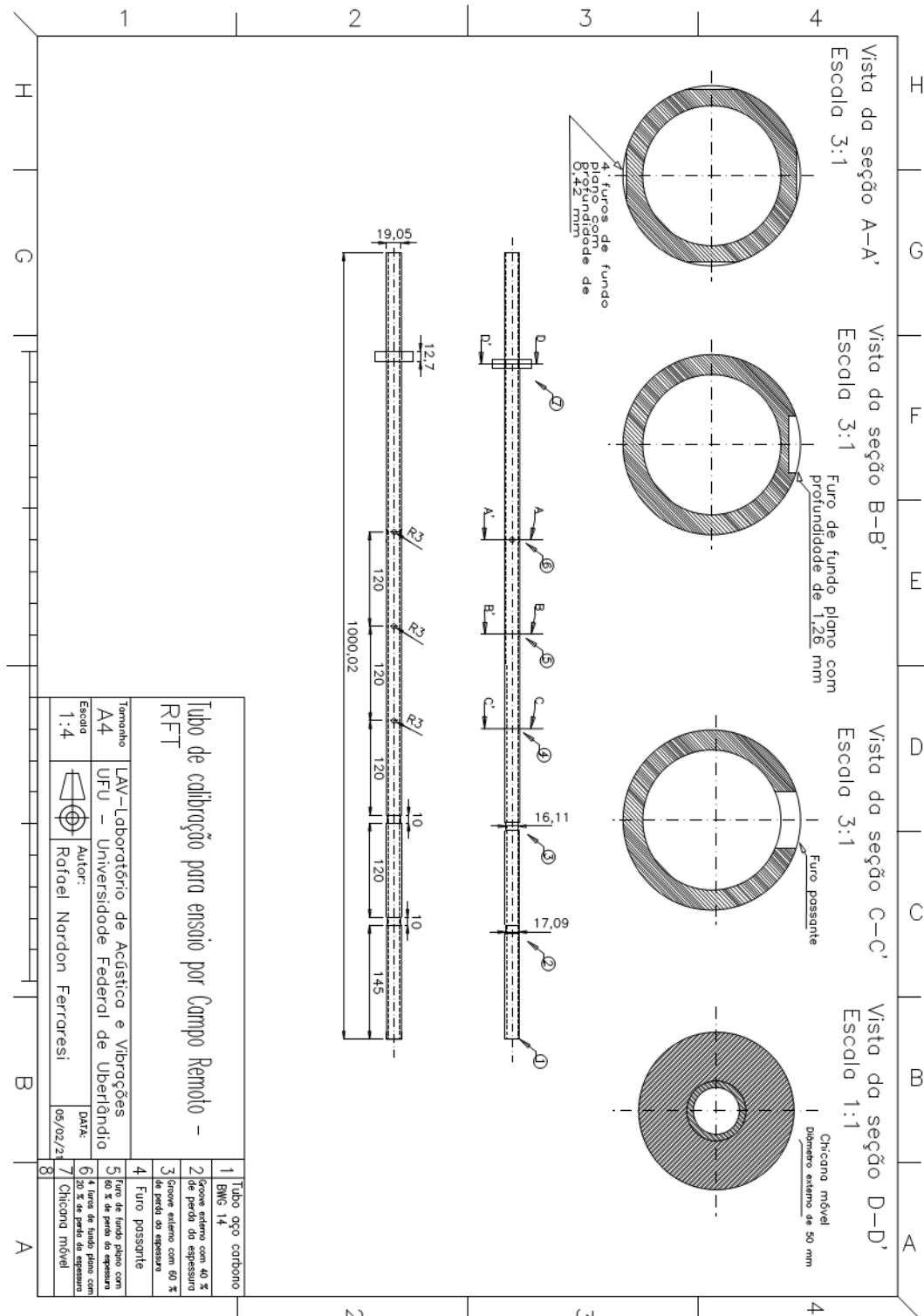
VALLE, Rômulo Ornellas do. Determinação Da Taxa De Incrustação Em Trocadores De Calor Com O Auxílio De Métodos De Otimização. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.



# APÊNDICE

## APÊNDICE A

Desenho técnico de um tubo padrão para calibração do sistema RFT segundo o manual da fabricante de equipamentos *Eddyfi Technologies*® ([www.eddyfi.com](http://www.eddyfi.com)).



## APÊNDICE B

**TABELA B1 – RESULTADOS DO ENSAIO POR RFT DE MAIOR DESCONTINUIDADE E POSIÇÃO NO FEIXE 01-E-10B.**

Linha	Coluna	Perda de espessura (%)	Posição (mm)	Linha	Coluna	Perda de espessura (%)	Posição (mm)
1	1	31,4	777	21	3	57	472,5
1	2	49,1	1089,3	21	4	54,3	3578,7
1	3	56,7	901,5	21	6	53,9	2163,9
1	5	70,3	414,3	21	7	52	639
1	8	62,4	3941,1	21	12	59,3	3177,3
1	9	80,1	3512,7	21	13	71,5	5568,3
1	10	75,8	3390,6	21	15	51,5	3309,6
1	11	50,2	3718,8	21	17	49,8	3153,6
1	12	48,2	5814,6	21	20	55	2636,1
1	13	66,4	3638,7	21	21	54,3	231,3
1	14	66,2	2987,1	21	22	45,6	2343,3
2	1	54,5	607,8	21	24	46,7	1311,3
2	6	48,8	4452,3	21	27	57,2	5389,5
3	1	38,6	468,9	21	28	57	275,4
3	13	25,3	786,6	22	3	52	123,7
3	15	45,7	2784	22	9	40,2	2260,2
4	1	50,5	393	22	11	32	1113,9
4	14	58	3178,8	22	16	36,1	2784,6
4	15	63,6	1197,9	22	22	50,1	5556,6
4	16	66	3422,7	22	23	32,5	3781,8
4	24	46,3	1221,6	22	26	28,8	80,3
4	26	28,8	1176,6	22	27	30,2	2447,1
5	1	39,9	387,6	23	15	50	3035,4
5	2	85,1	5866,5	23	16	42,1	3792,9
5	14	55,7	3081,6	23	19	40,5	4685,7
5	15	44,6	2320,8	23	22	47,3	5054,1
5	16	62	2937,6	24	3	79,2	5044,5
5	17	48,4	1845	24	4	55,3	424,2
5	21	50,7	1048,8	24	5	75,2	424,8
5	23	46,3	682,2	24	6	73,6	5298
5	25	30,4	495	24	7	44,6	1210,8
6	1	82,8	5534,9	24	8	65	299,4
6	4	51,5	5478,3	24	9	64	1019,4
6	6	82	3120	24	10	43,9	2819,4
6	8	59,5	5448,3	24	11	45,1	998,4
6	15	66,6	2095,5	24	12	41,7	5375,7
6	16	29,8	812,1	24	13	58,9	5238,3

6	23	74	290,1	24	14	52,6	2919,6
7	1	73,2	5564,1	24	15	46,8	5253,6
7	8	75	2930,3	24	16	50,3	3020,4
7	16	82,6	4281	24	18	42,9	5434,8
7	20	59,6	2890,8	24	19	25,5	2980,2
8	1	84,3	5490,3	24	20	38,5	2931,6
9	26	77,2	2806,2	24	21	45,2	2902,8
10	1	54,1	2926,8	24	22	41,3	189,9
10	6	38,1	5321,7	24	23	43,9	664,5
10	11	76,1	3629,1	24	25	41,2	765,3
10	14	68,3	5403,6	24	26	36,8	3887,1
10	15	53,1	3247,5	24	27	38,3	2666,7
10	19	60,1	2894,1	24	28	37,5	3467,4
10	23	53,3	5404,1	24	29	56,1	2639,4
11	1	69,9	2907,9	24	30	59,6	3104,1
11	2	93	2253	24	31	35,1	2818,5
11	3	71,2	450,7	24	32	36,1	4797,6
11	4	67,1	4659	24	33	34,9	2923,8
11	7	70,6	443	25	2	34,7	2405,4
11	8	49,7	419,1	25	3	36,3	4407
11	9	42,3	3121,4	25	4	45,1	1326,9
11	10	73,8	4118,4	25	5	52,3	2504,7
11	12	62,3	4951,1	25	6	46,6	1619,7
11	14	50,7	4411,5	25	7	43	2254,2
11	19	50,5	3382,5	25	8	48,6	3132
11	24	54,4	4971,3	25	9	34	4078,5
11	29	68,6	3567,3	25	10	26	278,1
11	35	48,8	2885,6	25	11	34,3	996,9
12	1	49,5	3063,3	25	12	29,4	4746,9
12	2	43,6	1259,4	25	13	40,2	2665,2
12	4	40	2817,9	25	14	66,2	3069
12	6	62,7	3825,3	25	16	35,9	5084,1
12	7	51,3	4125,6	25	17	24,5	3995,4
12	8	70,6	298,6	25	18	62,1	1726,5
12	9	45,4	2539,5	25	19	60,4	4931,4
12	10	49	263,8	25	20	27,1	4996,8
12	11	42,5	2814,3	25	21	17,6	2910
12	12	59,8	4773	25	22	38,6	3374,1
12	14	54,4	4635,8	25	23	41,8	427,2
12	15	51,3	5744	25	25	18,3	3050,1
12	18	40,4	217,8	25	28	29,9	2976,3
12	19	75	4653	25	29	61,6	877,8
12	30	38,5	3082,2	25	31	49,5	879
12	31	51,1	4768,7	25	32	52,2	853,8
12	33	61	448,8	25	33	44,7	1016,4

13	1	60	197,5	26	2	64,4	891
13	2	57,9	5126,4	26	3	53,2	966
13	4	47,6	312,1	26	4	53,9	785
13	5	63,5	2927,7	26	5	61,4	2287
13	6	36,8	2920,8	26	6	69,5	86
13	7	75,1	5377,4	26	7	80,5	80
13	8	63	243,1	26	8	72,4	5195
13	9	45,9	3257,1	26	9	90,7	1187
13	10	66,9	209,1	26	10	64,8	2454
13	11	53	5547,3	26	11	46,4	2934
13	12	56,7	2997,3	26	12	63,8	94
13	13	48,2	5688,1	26	13	59,9	2785
13	14	38,5	3675,3	26	14	58,6	2455
13	16	64,4	384,6	26	15	45,4	110
13	20	39,3	5151	26	16	43,8	4626
13	23	51,7	291,9	26	17	56,1	4451
13	26	77,9	3279,3	26	18	38,8	2793
13	27	39,1	2150,1	26	19	41	3183
13	29	43,9	419,7	26	20	66,1	5457
13	31	54,2	169,5	26	21	68,4	5230
14	3	47,3	5114,1	26	22	58,1	1091
14	5	59,7	419,1	26	23	46,8	4694
14	6	41,7	3426,9	26	24	41,8	4400
14	8	65,7	813,6	26	25	41,7	2350
14	9	42,8	2496	26	26	61,9	2730
14	17	61,8	5347,1	26	27	56,1	717
14	31	50,4	3559,8	26	28	43,6	5113
15	3	42,2	5492,3	26	29	59,7	376
15	8	42,8	3949,8	26	30	69,1	2688
15	9	48,3	627,3	26	31	44,1	2647
15	18	51,7	1714,2	27	3	73,5	1253
15	19	51,2	2709	27	5	64,9	1332
15	20	67,5	633	27	6	50,5	1580
15	21	43,8	470,1	27	7	78,5	545
15	22	42,2	2948	27	8	40,8	2685
15	23	49	2854,9	27	9	45,8	2751
15	24	41,5	528,3	27	10	31,1	1216
15	25	63,8	3380,7	27	11	33,9	1490
15	27	80,9	5305,4	27	12	36,2	643
16	1	66,6	269,7	27	13	49	2307
16	2	20,5	379,8	27	14	22,1	4885
16	3	19,3	795,9	27	15	54	3132
16	5	25,7	1945,2	27	16	36,2	2913
16	6	30,2	351,9	27	17	31,9	4920
16	7	50,6	5028,9	27	18	61,7	1295

16	8	66,4	1777,8	27	19	47,6	1152
16	9	33,5	400,5	27	20	48	2877
16	10	28,5	3936,3	27	21	30,5	1339
16	11	20	1200,6	27	25	99,6	2121
16	12	76,2	2864,4	27	27	37,3	1567
16	13	63,1	2777,6	27	28	51,6	1422
16	15	29,8	2875,5	27	29	40,4	1600
16	16	55,3	2849	27	30	33,8	5205
16	17	53,7	4112,6	28	3	48,9	5137
16	18	74,3	2868,9	28	4	100	260
16	21	48,4	1192,5	28	5	57,8	4406
16	25	70,8	5307,1	28	6	68,1	3931
16	27	66,5	4232,1	28	7	50,1	1705
16	28	73,2	3548,1	28	8	33,9	977
16	29	66,3	5270,9	28	9	46,5	1485
16	30	64,6	4199,3	28	10	37,7	630
16	32	44,9	330,6	28	11	27,7	539
16	33	61,6	5304,5	28	12	68,1	698
16	36	69,6	2645,7	28	13	55,4	1221
16	38	52,6	1688,4	28	14	64	590
17	2	42,9	2218	28	15	50,2	2889
17	3	71,7	5404	28	16	55,7	3122
17	4	69,9	1496	28	17	59	4989
17	6	86,1	2275	28	18	77,6	909
17	7	73,2	90	28	19	44,2	3152
17	8	87	834	28	20	27,1	2973
17	9	97,6	5262	28	21	29,4	1200
17	11	71,2	1889	28	22	48,4	399
17	12	63,6	292	28	24	44,3	2447
17	13	92,6	90	28	25	62,8	2520
17	14	94,4	85	28	26	41,1	4554
17	15	76,7	150	28	27	53	181
17	16	81,3	801	28	28	66,7	991
17	17	42,3	1544	28	29	70,8	1909
17	18	71,4	1371	29	3	40,3	2390
17	19	90,3	1851	29	4	43,5	1300
17	20	77,7	2394	29	5	59,2	429
17	21	56	1100	29	6	48,8	4849
17	22	78,3	1799	29	7	32,3	3244
17	23	95,3	1924	29	8	42,8	717
17	24	95,2	5283	29	9	58,1	5215
17	26	90,7	640	29	10	62,7	1160
17	27	86,8	474	29	11	36,2	3985
17	28	95,4	2391	29	12	33,5	3644
17	29	92,9	1827	29	13	43,6	2374

17	31	78,8	84	29	14	38	4869
17	32	93	5212	29	15	26,8	2480
17	33	94,9	455	29	16	47,2	3460
17	35	90,3	690	29	17	55,2	140
17	36	63,7	420	29	18	35,4	476
17	37	32,6	1161	29	19	51,6	3679
17	38	52,1	5054	29	20	73,5	612
18	3	29,4	5005	29	21	43,3	5149
18	5	39,5	3053	29	23	42,6	5230
18	6	74,4	1164	29	24	40	1198
18	7	34,5	3450	29	25	41,6	5314
18	8	33	1799	29	26	44,7	590
18	10	50,2	220	29	27	45,4	1198
18	11	52,7	1811	29	28	42,8	4775
18	12	35	1521	30	3	76	4286
18	13	50,6	88	30	4	60	4908
18	14	29,4	97	30	5	60,5	2008
18	15	38,9	2200	30	6	36,4	3071
18	16	58,2	136	30	7	47,8	775
18	17	54,9	133	30	8	42,2	292
18	18	59	946	30	9	38,2	255
18	19	65,1	1949	30	10	49,9	2973
18	20	61,7	1362	30	12	80,3	2067
18	21	48,7	4995	30	13	35,7	3068
18	22	69,5	1920	30	14	68,1	2346
18	23	67,9	3332	30	15	81,7	432
18	24	65,9	78	30	16	47,5	110
18	25	60,6	713	30	17	38	509
18	27	69,1	2655,3	30	18	68	2842
18	28	46,5	4402,5	30	19	51	67
18	30	54,5	405,9	30	21	50,2	507
18	34	65,1	428,7	30	22	25,7	89
18	35	62,5	127,5	30	23	61,3	112
19	4	50,6	99,9	30	24	67,7	125
19	5	44,7	4784,1	30	25	39,9	1071
19	6	44,1	268,2	31	2	89,6	936
19	8	43,4	226,5	31	3	96,4	120
19	11	39,3	142,3	31	4	72,6	288
19	14	76,8	1852,2	31	5	58,8	3152
19	15	42,1	433	31	6	40,5	2518
19	18	44,6	2788,2	31	7	42,5	1304
19	19	27,3	2674,8	31	8	61,8	1561
19	21	52,2	2581,5	31	9	57,2	2169
19	22	56,2	2766,3	31	10	74	3993
19	25	56,7	90	31	11	57,7	2803

19	27	46,7	5330,7	31	12	72	3467
19	30	67,1	5301,9	31	13	61,7	983
19	32	57,9	2427,6	31	14	54,1	5291
20	1	73,7	5259,9	31	15	70,9	5517
20	2	73,4	5285,7	31	16	68,4	2106
20	3	65	5350,2	31	17	66,5	545
20	4	61,9	2042,1	31	18	27,5	806
20	6	50,6	188,1	31	19	69,5	1752
20	7	70,4	82	31	20	50,5	514
20	8	67	5476,8	31	21	52,4	461
20	9	46,9	301,8	31	22	81,4	3355
20	10	61,2	5415,9	32	2	48,6	1851
20	13	54	5264,7	32	4	38,7	190
20	14	48,3	1084,5	32	5	45,3	2481
20	16	48	580,2	32	6	33	109
20	18	43,1	920,1	32	7	51,7	5231
20	20	37	2902,8	32	8	59,8	2744
20	21	43,1	2931,6	32	9	82	850
20	23	40,8	5399,7	32	10	64,3	124
20	24	58,3	78,7	32	11	47,3	4961
20	26	70,2	5283,6	32	12	55,6	5457
20	27	45,9	5392,8	32	14	50,8	2980
20	32	81,5	5370	33	1	42,3	110
20	33	41,3	5251,2	33	2	73	89
20	35	45,8	730,2	33	3	52,1	5121

**TABELA B2 – RESULTADOS DO ENSAIO POR RFT DE MAIOR DESCONTINUIDADE E POSIÇÃO NO FEIXE 01-E-10F**

<b>Linha</b>	<b>Coluna</b>	<b>Perda de Espessura (%)</b>	<b>Posição (mm)</b>	<b>Linha</b>	<b>Coluna</b>	<b>Perda de Espessura (%)</b>	<b>Posição (mm)</b>
1	2	38,2	4746,6	21	1	37,9	4191,8
1	3	91,3	3301,8	21	2	42,1	4183,1
2	2	33,7	4805,4	21	3	38,4	4316
2	3	46,7	1039,8	21	4	36,1	1768,6
2	4	55,3	957,9	21	5	43,4	2098,2
2	5	43,9	2513,7	21	6	57,1	2459,8
2	6	66,3	710,7	21	7	57,6	4606,1
2	7	61,2	1095	21	8	49,7	1649,8
2	8	51,3	5491,8	21	9	36,6	2612,7
2	9	65,4	1275,6	21	10	35,5	542,7
2	12	53	1096,8	21	11	32	5811,5
2	13	51,5	634,2	21	12	45,2	2466,9
3	3	73	592,2	21	13	33,3	2556,5
3	4	41	801,9	21	14	36	2692,4
3	5	50,5	706,8	21	15	61,6	2358,6
3	7	52,3	996,3	21	16	41,2	363,7
3	8	53,3	765	21	17	41	2475,6
3	9	62	636	21	18	46,9	2579,2
3	10	78,2	1127,7	21	19	42	4285,2
3	11	44,4	5757,6	21	20	61,1	2501,2
3	12	76,6	750	21	21	34,3	2610,9
3	13	75,6	975,6	21	22	53,7	414,2
3	14	65,2	631,5	21	23	31,3	2617,1
3	15	79,8	1114,2	21	24	33,4	2840,8
3	16	95,6	960,6	21	25	42,1	1595
3	16	79,1	1443,9	21	26	37	1154
3	17	70,1	703,2	21	27	45,8	1901,9
3	19	48,2	1020,6	21	28	39,1	2208,6
3	20	70,8	759,9	21	29	51,5	347,6
3	21	89,9	586,2	21	30	42	4920,1
4	2	82,8	1113,6	21	31	41,2	4597
4	3	95,9	714	21	32	38,3	729,5
4	4	56,1	2542,5	21	33	65,3	823,3
4	5	97,8	880,5	21	34	62,2	1506,4
4	6	96,6	799,5	21	36	22,4	1829,4
4	7	75,3	1019,1	22	2	36	286
4	7	60,3	1944,9	22	3	42,9	4051,8
4	8	87,8	648,3	22	4	37,7	2626,2
4	9	41,5	875,4	22	5	35,1	4156



4	10	100	400,8	22	6	69,4	2213
4	11	84,8	5111,7	22	7	32,2	4315,4
4	12	79,3	723	22	8	41,8	2625,6
4	13	74,3	918,9	22	10	30,7	5438,2
4	14	41,5	1304,4	22	11	38,3	730,5
4	15	85,6	653,7	22	12	69,4	3496,8
4	16	80,5	522	22	13	41,2	4701
4	17	58,4	999,6	22	14	30,1	4508
4	17	46,5	5829,6	22	15	58,5	1784,8
4	18	65,9	830,1	22	16	53,4	4617,2
4	19	45,2	952,5	22	17	43,3	1749,3
4	20	85,7	852,6	22	18	35,1	3864,6
4	21	60,6	914,7	22	19	35,3	2649
4	23	67,5	908,4	22	20	49,5	1617,2
4	23	63,7	5860,4	22	21	40,3	2719,2
4	24	51,4	1972,8	22	22	54,9	711,6
4	25	44,5	621,9	22	23	35,5	2815,5
4	26	29,1	5890,4	22	24	32	1378,1
5	1	69,2	816,9	22	25	39,3	4673,3
5	2	42,4	1237,8	22	26	45,3	2707,5
5	3	46,9	1341	22	27	39,1	3016,3
5	4	81,1	977,7	22	28	49,8	684,2
5	5	90,6	1360,5	22	29	27,2	4653,1
5	6	91,9	420,6	22	30	53,5	4668,3
5	7	60	2610,3	22	31	42,9	4609,6
5	8	35,5	1673,7	22	32	24,5	1563
5	9	55,9	827,7	22	33	45,1	1796,3
5	10	49,3	913,8	22	34	50,2	1833,4
5	11	46,9	1000,2	22	35	40	1166,1
5	12	83,7	1121,4	23	3	34,3	1845,6
5	13	71,9	964,5	23	4	28	4140,5
5	14	43,5	900,3	23	5	31,6	1177
5	20	37,6	725,7	23	7	43	2036,8
5	21	31,1	2027,1	23	8	43,9	1034,1
5	27	45,3	744,9	23	9	24,9	2391,6
5	28	50,6	5385,6	23	10	31,4	2477,6
6	3	54,1	1618,8	23	11	45,7	3260,1
6	4	33,3	5775,9	23	13	46	2617,1
6	5	56,8	1742,1	23	14	36,4	5850
6	6	59,5	1806,9	23	15	83	4423,5
6	7	59,7	1907,4	23	16	38,8	4372,8
6	8	34,8	1707,3	23	17	38,1	2542,2
6	9	42,4	1527,6	23	18	38,8	649,8
6	10	59,7	1653	23	19	39,8	4385,5
6	11	52,7	1503,3	23	20	51	1080

6	11	48,8	3304,8	23	21	34,9	4552,6
6	12	69,9	1691,7	23	22	26,5	4327,7
6	13	50,1	1282,8	23	23	44,3	2672,2
6	14	43	1945,5	23	24	32,5	4732,2
6	15	58	5068,5	23	25	32,4	5753,9
6	16	47,8	4944	23	26	29,2	702,2
6	17	35,5	4208,4	23	27	33,8	764,1
6	20	15,7	1990,5	23	28	45,4	1670,5
6	21	40,3	993,6	23	29	39,3	640,5
6	22	21	1692,3	23	29	30,6	4538,4
6	22	20,3	4230,9	23	30	44,6	4413,9
6	23	28,8	4007,4	23	31	37,3	1565,1
6	24	33	4631,4	23	33	37,6	2053,8
6	25	32,4	4305,6	23	34	47,2	786
6	26	34,3	6950,1	23	35	36	1025,1
6	29	55,2	5805	23	36	34,7	4871,7
7	2	23,3	1861,5	24	4	37,1	2129,9
7	9	46,8	2215,5	24	5	34,9	4278,9
7	10	44,1	1125,9	24	6	47,7	2610,3
7	11	42,2	3827,4	24	7	44,9	2764
7	13	29,9	2444,4	24	8	51,8	2350,5
7	14	47,7	3720,6	24	9	35,1	2370,5
7	16	37,9	4404,3	24	10	44,8	5632,5
7	17	33,1	4019,7	24	11	45,4	691,5
7	18	37,6	1419,9	24	12	42,3	1590,3
7	19	32,6	3829,2	24	13	39,6	608,5
7	21	23,7	1283,4	24	14	75	4302,1
7	22	36,4	3874,5	24	15	35	4405,2
7	23	21,2	1518	24	16	38,6	2361,8
7	24	21,3	3771	24	17	30,4	1485,2
7	25	22,6	2352,9	24	18	50	705,8
7	26	41	4705,8	24	19	46,1	2659,6
7	27	49	353,1	24	20	33,6	1719,5
7	28	39,6	4796,7	24	21	69,6	579,9
7	30	35,4	4338,6	24	22	21,9	3234,4
8	5	39,2	2427	24	23	40,9	2612,6
8	6	48,9	1656,3	24	24	37,5	825,8
8	8	37,9	1846,8	24	25	40,5	4468,4
8	11	35,6	1487,1	24	26	37,7	1743,9
8	12	44,4	1289,4	24	27	38,9	4419,9
8	13	64,6	5870,3	24	28	51,5	2600,7
8	14	45	2840,7	24	29	32,3	4710,8
8	15	38,8	2519,4	24	30	62,4	968,1
8	16	31,2	5880,3	24	31	45,2	4647,5
8	18	46,3	2191,5	24	32	39,3	5073

8	20	31,8	5950,1	24	33	44,7	3208,8
8	21	40,8	1605,3	25	3	62	3070,8
8	23	39,1	1793,1	25	3	34	377
8	24	22,8	2919,3	25	6	57,2	605,3
8	24	17,8	3817,8	25	7	42,4	1998
8	25	32,7	4955,7	25	15	51,7	6870
8	26	38,6	1827,9	25	16	39,1	2436,4
8	27	24,3	2341,5	25	17	41,4	709,5
8	28	48,1	1733,4	25	18	37,2	2508,7
9	2	43,4	3717,6	25	19	36,1	1498,5
9	3	25	5722,2	25	20	46,8	842,9
9	4	38,8	2860,8	25	21	60,9	2014,5
9	5	31,2	2294,4	25	21	42,3	2224,5
9	6	65,6	1905,3	25	22	40,8	1168,5
9	8	41,4	2092,8	25	23	27,5	2740,1
9	9	21,4	4584	25	24	50,1	4422,6
9	10	31,8	5632,5	25	25	52,9	2818,8
9	11	41,4	2073,3	25	26	47,8	1513,9
9	12	39,5	1379,1	25	27	25,6	-2009,1
9	13	51,9	5602,8	25	29	40,4	1863
9	14	67,2	2462,7	25	30	35,3	1316,1
9	16	41,7	2144,7	25	32	74,7	310,5
9	17	41	1563,3	25	33	40,6	1162,7
9	18	38,3	3607,8	25	34	45,1	4601,7
9	19	48,9	2357,7	26	7	49,8	3175,2
9	22	37,7	3919,8	26	8	37	3330,9
9	24	64,9	1507,8	26	9	45,8	2331,3
9	25	31,9	2482,5	26	10	50,8	2431,3
9	27	62,9	5455,5	26	11	43,1	2622,3
9	28	40,3	4220,4	26	12	62,7	246
9	29	58,6	5285,1	26	13	47,6	3304,2
9	34	25,8	1881,3	26	17	34,4	2668,1
10	1	22,6	5870,3	26	18	46,7	2407,2
10	3	24,4	1482	26	19	54,3	2385,6
10	10	42,6	1695,9	26	20	35,2	2761,8
10	11	32,3	2415,3	26	21	38,6	633,8
10	12	72,4	2900,1	26	22	38,3	4554
10	16	40,6	5880	26	23	43,5	2584,5
10	17	61,5	5399,4	26	24	39,3	4409,6
10	18	61,9	1624,2	26	26	34,8	1434,8
10	19	34,6	5205	26	27	37,9	542,7
10	20	59,3	1438,2	26	29	26,1	4365,1
10	22	41,1	3176,7	26	30	62,2	1874,9
10	25	30,7	4298,4	26	31	55,6	977,7
10	26	37,4	2564,7	26	32	45,1	1027,7

10	27	32,5	4513,2	26	33	63,6	1642,7
10	28	60	1821,9	27	3	33,7	2881,7
11	1	35,3	5888,4	27	4	71,4	3061,6
11	7	22,7	2818,8	27	5	43	5667,8
11	8	36	3125,7	27	6	46,2	215,1
11	11	42,1	2382,3	27	7	47,9	2576,1
11	12	48,6	2027,1	27	8	51,3	3282,6
11	13	38,5	3056,1	27	10	52	2568,7
11	16	31,3	1741,5	27	11	40,7	5323,8
11	19	36,7	1872,6	27	12	42,8	658,2
11	23	29,1	3203,4	27	13	47,7	259,5
11	27	28,8	4758,9	27	15	41,5	5486,8
11	31	26,2	5051,4	27	16	75,3	3370,8
12	2	59,3	5780	27	17	41,7	1527,9
12	7	19,7	2589	27	18	50,7	2706,5
12	15	43,7	3151,8	27	19	54	2464,5
12	27	20,3	3427,5	27	20	60,7	3035
13	15	31,6	2222,7	27	22	48,3	636,8
13	28	34,3	5439,6	27	23	46,5	547,6
14	3	41,3	5081,4	27	24	33,6	628,4
14	8	24,2	2970	27	26	45,7	356
14	9	39,4	2082,3	27	27	52,8	144,6
14	11	34	1578,4	27	28	46,1	3380
14	12	45,8	912,6	27	29	49	793,2
14	16	34,2	1263,9	27	31	54,3	4780,9
14	21	25,2	3782,1	28	4	39,2	2880,3
14	23	46,3	2529,1	28	5	39	5565
14	26	44	1414,6	28	6	42	3353,1
14	27	35,5	4891,6	28	7	30,5	2729,1
14	29	28,4	3399,3	28	8	41,1	311,2
14	30	23,7	2958,6	28	9	37	2675,1
14	31	42,8	4285,5	28	10	41,8	5501,7
15	5	50	936	28	11	43,9	1428,6
15	8	32,5	2599,2	28	12	54,4	184,2
15	11	27	1470,9	28	13	55,3	838,1
15	12	62,5	989,8	28	14	45,1	1644,6
15	17	31	1919,7	28	15	50,6	628,5
15	20	20,7	1908	28	16	38,1	240,1
15	26	43,9	5429,1	28	17	53,8	630
15	28	32,1	1889	28	18	52,1	2713
15	30	32,6	4855,2	28	19	53,6	2691,5
15	34	34,3	5204,4	28	20	53,7	1527,5
15	37	26,7	2418	28	21	64,9	680,4
16	9	39	4174,8	28	22	51,9	673,2
16	14	49,8	2251,9	28	23	56,3	212,4

16	26	43,6	2162,9	28	24	62,6	1352,4
16	29	37,1	3027,3	28	25	41,3	1729,8
16	31	32,6	1456,7	28	26	41,8	5681,4
16	33	45,2	4620,6	28	27	56,6	866,5
16	34	34,7	1239,1	28	28	47,4	1779,5
17	12	37,1	1505,7	28	29	51,9	198,6
17	26	38,2	5556	29	4	46,7	3157
17	28	37,5	2643	29	5	41	3481,8
17	33	32	4567,6	29	6	37,4	3283
17	34	30,7	2739	29	7	41,7	2465,5
17	35	36,8	2314,8	29	8	43,8	3851,6
18	2	35,5	4302,9	29	9	46,5	3645,7
18	3	57,2	3905	29	10	41,1	2557,8
18	4	39	1942,8	29	11	55,6	3613,8
18	5	40,1	4098,2	29	12	58,6	622,4
18	6	38,4	1773,2	29	13	45,7	753
18	7	36,2	5646,9	29	16	55,5	4490,7
18	8	38,4	1481	29	17	46	2459,1
18	9	33,2	3382,6	29	18	38,7	2374,2
18	10	30,3	2203,2	29	19	43,4	2497,7
18	11	34,2	2104,4	29	20	56,2	1395,9
18	12	51,7	1673,1	29	21	58,3	595,8
18	13	38,9	1446,2	29	22	38,6	1791,8
18	15	41,4	2512,7	29	23	49,9	621,9
18	16	38,5	1879,5	29	23	32,3	1548,3
18	17	50,2	2861	29	24	46,7	551,7
18	19	33,4	834,2	29	25	38,6	1610,7
18	20	33,8	1244,1	29	26	40,5	3640,9
18	21	36,7	1533,6	29	27	38,3	1736,1
18	22	30,3	2805,4	29	28	42,2	784
18	23	46,5	1892,9	29	29	59,8	799,1
18	24	44,2	2697,6	30	4	48,7	3041,6
18	25	47,7	2591,3	30	5	30,3	734,7
18	26	48,1	1328	30	6	45	514,8
18	27	54,9	3486,3	30	7	49,1	4392,3
18	28	30,2	1524,7	30	8	56,6	2516,5
18	29	57,3	904,9	30	9	39,9	2533,7
18	30	29	793,9	30	10	42,4	2628
18	31	45,4	-465,3	30	11	31,6	4166,1
18	32	41,4	2820,1	30	12	46,8	1611,3
18	33	56	-47,4	30	14	33,1	1669,4
18	36	37,9	4816,2	30	15	46,3	2585,7
18	37	55,5	2669,1	30	16	44,8	2736
18	38	81,6	2057,1	30	17	44,5	589,8
19	3	49,5	1151	30	18	33	1489,8

19	4	41,5	567,6	30	19	57,7	307
19	5	27,2	4707,9	30	20	60,1	522,6
19	6	41,3	1156,7	30	21	59,1	4042,2
19	7	35,2	2578,2	30	22	51,3	664,9
19	8	30,3	2575,5	30	22	44,3	1641,1
19	9	43,2	504,3	30	23	38,7	1092,3
19	10	40,6	2306,8	30	24	47	695,2
19	11	42	241,2	30	25	62,7	1670,5
19	12	42,7	1554,8	30	26	42,9	1940,8
19	14	44,7	2395	30	27	42,9	862,2
19	15	41,5	3903,4	31	4	67,3	689,6
19	16	49,3	4595,4	31	5	88,1	5622,9
19	17	36,4	698,8	31	6	34,5	4142,6
19	18	32,4	1804,5	31	7	38,2	6024,3
19	19	36,4	1836,7	31	8	48,6	3717
19	20	45,1	293,1	31	9	56,7	1487,6
19	21	42,6	923,3	31	10	45,6	4780
19	22	38,6	725,9	31	11	63,7	287,6
19	23	45,5	670,4	31	12	49	790,8
19	24	40,9	799	31	15	48,7	2597,3
19	25	56,5	2152,7	31	16	53,5	2654,2
19	26	56	738,8	31	17	45	3552
19	27	52,5	1295,4	31	18	51,3	5500,6
19	28	54,2	1871,2	31	19	39,8	2496,6
19	30	30,4	5755,3	31	20	41,6	575,3
19	32	46,5	4747,3	31	21	40,1	657,1
19	33	39	4537,9	31	22	49,7	3165
19	34	50,2	764	31	23	63,3	5958,6
19	36	53,4	919,7	31	24	40	2519,6
19	37	69,2	2980	31	25	58,1	2904,4
19	38	39,6	1627,4	32	2	66,1	404
20	2	45,3	4646,4	32	3	57,2	501,1
20	3	34,9	4521,6	32	4	48,1	410,8
20	4	44,2	3989,2	32	5	42,4	2777
20	5	66,4	530,1	32	6	36,2	263,2
20	5	47,5	3425,1	32	7	40,3	2594
20	6	45,3	277	32	8	45,3	4704
20	7	56,9	309,8	32	9	47,8	799,8
20	8	41,1	2783,2	32	10	46,2	2653,4
20	9	32,8	1394,5	32	11	43,1	624,7
20	10	31,2	5646,3	32	12	54,3	1712,9
20	11	34,7	2564,8	32	13	36,9	2448,6
20	13	43	1561,3	32	14	44,6	2354,9
20	14	28,8	2989,5	32	15	58,7	680,5
20	15	44,8	642,9	32	16	44,6	1505,9

20	16	51,2	2364,2	32	17	46,6	826,5
20	17	44,1	1441,5	32	18	35	2586,3
20	18	51,3	2586,4	32	19	55,5	740,4
20	19	44,5	4451,8	32	19	46,4	1135,7
20	20	58,2	4488,1	32	20	41,1	3054,7
20	21	34,9	1578,2	32	21	45,8	2450,3
20	23	78,6	4117,4	32	22	39,4	3082,9
20	24	54,3	4657,8	32	23	61,9	2966,1
20	26	43,1	1457	33	3	38,1	5602,5
20	27	35,8	1225,6	33	4	37	2632,2
20	28	50,9	4813,7	33	5	42,7	810,3
20	29	45,2	733,3	33	6	42,4	5747,7
20	30	51,1	300,3	33	7	55,2	745,2
20	31	36,7	2213,5	33	8	64,9	723,4
20	32	58,5	4573	33	9	54,7	760,8
20	33	57,7	737,1	33	10	46	3227,4
20	34	40,2	1164,3	33	11	56,4	613,8
20	35	45,1	715,1	33	12	41,6	2647,2
20	36	53,2	4218	33	13	53,6	5578,1
20	37	40	4313,1	33	14	48,5	397,5
				33	15	47	1142,4

## APÊNDICE C

**TABELA C1 – RESULTADOS COMPARATIVO DO ENSAIO IRIS VERSUS RFT NO FEIXE 01-E-10B NA MESMA POSIÇÃO.**

Linha/ Coluna	Posição	IRIS	RFT		
			Inspetor 1	Inspetor 2	Inspetor 3
	(mm)	Perda de Espessura (%)	Perda de Espessura (%)	Perda de Espessura (%)	Perda de Espessura (%)
01/03	2900	47,9	47,3	47,1	54,4
01/08	3800	47,9	71,6	60,6	80,7
01/09	2800	57,3	58,3	65,3	67,7
01/10	2200	43,1	31,4	31,4	45
01/12	4250	43,1	30,9	32,5	41,4
01/14	3100	43,1	45,5	67	43,8
04/14	3250	47,9	64,3	65,9	87,5
04/16	2800	47,9	78,2	76,5	69,9
04/24	200	43,1	48,1	40,9	36,7
05/02	2900	57,3	52,4	47,2	36,4
05/14	5900	47,9	47,6	62,3	63,3
05/15	300	66,8	68	65,2	42
05/16	2800	47,9	63,3	55,1	67,7
05/21	200	52,6	56,8	57,1	60
05/25	2800	47,9	50,5	50,5	59,2
06/04	3400	47,9	56,1	50,6	47,7
06/15	2700	62,1	78	82,4	73
06/16	600	52,6	36,3	46,4	51,4
06/23	5800	47,9	69,7	69,1	59
07/16	300	43,1	38,8	69,8	42,1
07/20	3600	66,8	53,7	63,2	54,2
09/26	3200	57,3	77,3	67,4	62,8



10/01	400	52,6	52,5	63,9	51,6
10/06	2800	66,8	81,7	69	74,5
10/11	5800	43,1	42,8	51,5	38,5
10/14	2800	66,8	73,8	53,1	57,7
10/15	1800	62,1	59,5	63	46,1
10/19	400	43,1	42,2	48,1	51,7
11/02	5200	100,0	93,5	99,5	99,4
11/19	1600	47,9	45	49,3	58,4
13/02	3900	43,1	25,6	37,9	39,7
13/06	2900	38,4	40,9	34,3	47,6
13/14	300	43,1	49,4	41,1	66
13/20	5900	57,3	69,3	56,7	51,8
13/27	600	43,1	80,7	75,6	75,6
13/29	5400	52,6	43,6	60,9	53,3
14/09	2400	47,9	47,2	49,3	59,3
14/31	2600	47,9	41,5	63,7	74,7
15/08	3900	38,4	35,2	41,9	38,2
15/09	300	43,1	42,2	41,7	50,8
15/18	450	62,1	52,6	54,8	41,2
15/19	100	43,1	44,7	44,1	63,5
15/20	200	52,6	52	46,2	61,3
15/21	150	47,9	42,5	35,1	58
15/24	200	47,9	47,3	66,7	60,4
15/25	200	43,1	52,7	60,9	65,2
16/05	500	38,4	35,5	34,2	44
16/06	1400	52,6	55	29,9	39,8
16/08	100	52,6	52,5	46,3	55,7
16/10	100	52,6	60,1	51,1	51,4
16/15	200	38,4	26,4	30,1	25,6
16/17	100	62,1	61,9	45,3	65,4
16/21	250	47,9	46,7	33	30,3

16/25	5800	52,6	76,1	71,5	83,8
16/28	5900	66,8	85,7	69,9	88,1
16/32	500	47,9	35,2	48,3	38,6
16/36	3000	52,6	88,6	65,4	67,5
16/38	100	100,0	100	97,7	96,9
17/02	3400	57,3	43	32,1	47,5
17/12	1800	52,6	45,4	44,9	61,9
17/14	5800	57,3	87,7	85,3	85,6
17/15	5900	62,1	80	80,9	82,9
17/17	400	43,1	43,3	49,6	60,2
17/18	5900	57,3	67,1	72,6	58,6
17/20	5900	52,6	46,1	56,5	67,3
17/21	200	38,4	46,3	52,7	48,8
17/24	5900	47,9	54	87,5	74,3
17/27	5900	57,3	88,9	73,4	87,5
17/28	5900	62,1	77	75,9	77
17/31	300	43,1	44	60,8	58,8
18/03	400	47,9	68,3	54	74,8
18/05	1900	43,1	38,8	54,4	46,1
18/11	300	62,1	60,5	53	51,8
18/17	1200	47,9	72,9	71,6	62,4
18/18	5800	43,1	67,6	54,4	41,9
18/21	300	38,4	44,7	52,3	50,1
18/23	5800	47,9	59	75,7	76,8
18/24	5800	66,8	70,9	77,7	70,9
18/25	5900	47,9	79,2	59,9	85
18/27	5900	52,6	65,1	60,5	59,7
19/15	3100	47,9	47,4	55,3	54,8
19/19	3100	38,4	48,8	46,3	37,3
19/25	2700	57,3	53,3	43,3	35,1
20/09	2500	76,3	71,1	72,9	62,6

22/03	2900	52,6	54,2	61,1	39,1
22/22	5900	62,1	63,3	63,6	74,8
22/23	300	38,4	64,1	36,8	47,4
23/15	4100	38,4	50,3	33,8	43,8
24/03	500	38,4	50,4	55	80,9
24/06	3500	43,1	51,5	48,2	53,1
24/08	1100	38,4	41,2	37,7	48,5
24/09	3150	57,3	64,3	73,4	52,4
24/10	600	43,1	42,7	46,6	49,1
24/13	5800	43,1	66	62,5	61,8
24/14	2400	47,9	50,8	40,7	56
24/15	4100	43,1	46,5	44,3	49,5
24/16	2400	62,1	53,5	50,6	62,7
24/19	5900	47,9	54	56,5	64,7
24/20	4700	47,9	36	42,2	28,7
24/21	3100	43,1	50,5	43,6	57,6
24/22	5900	38,4	60	64,6	79,4
24/23	5200	62,1	64,9	47,5	50,5
24/26	3000	43,1	58,4	45,3	54,8
24/28	700	38,4	60,4	44,5	51,2
24/29	3000	43,1	58,2	66,7	75,6
024/31	400	43,1	38,2	42,1	39,4
25/02	400	52,6	88,6	61,7	48,9
25/03	3800	52,6	54	43,8	43,5
25/04	1800	43,1	54,4	62,7	62,5
25/07	4800	43,1	71,2	50,5	53,2
25/08	5900	43,1	60,4	51,3	41
25/09	5900	52,6	76,4	37	56,1
25/10	5900	52,6	81,5	51,2	65,7
25/11	5900	66,8	94	71	79,2
25/12	1600	66,8	51,2	47,8	39,3

25/13	5900	47,9	38,2	54	57,6
25/16	5700	43,1	49,5	58	72
25/17	5800	38,4	38,9	56,7	66,3
25/18	100	52,6	67	40	44,1
25/19	3100	38,4	33,4	38,8	52,4
25/22	5900	52,6	38	50,2	50,3
25/23	2900	38,4	21,3	32,7	31,1
25/25	2800	38,4	40,9	37	33,5
25/28	200	38,4	50	43,3	69,3
25/32	700	33,6	35,9	31,8	64,5
26/02	5700	71,6	68,2	70,2	84
26/03	3600	38,4	53,4	45	45,2
26/04	400	38,4	63,8	59,5	57,8
26/05	3600	47,9	47,6	56,2	52,3
26/06	3200	57,3	38,9	53,2	61,2
26/07	5900	52,6	47,5	58,6	65,3
26/08	350	33,6	36,9	36,8	63,4
26/10	5900	52,6	62	64,5	63,3
26/11	3100	71,6	54,5	73	71,5
26/13	3100	62,1	59,1	66,5	68,4
26/14	5100	52,6	53,2	46,3	52,8
26/15	4100	38,4	45,1	43,3	59,8
26/16	5900	43,1	54,2	48,2	56,6
26/17	5800	47,9	49,1	47,8	48,4
26/18	5800	38,4	38,4	43,3	54,1
26/20	5900	52,6	52,4	54,4	40,2
26/21	3100	47,9	39,5	49	52,6
26/24	2800	52,6	45,6	43,3	45,6
26/25	4700	62,1	49,7	53,9	47,5
26/26	700	47,9	48,7	59,7	57,1
26/27	5850	47,9	67	73,4	59,7

26/28	800	38,4	40,3	54,1	59,9
26/29	2200	52,6	35,8	32,9	47,3
26/30	300	38,4	39	43,3	46,8
27/05	500	43,1	71,5	54,7	58
27/06	1500	43,1	74,7	61	80,7
27/07	3200	62,1	52,8	73	65,9
27/10	800	38,4	53	45,1	52
27/11	3200	38,4	40,9	44,3	40,7
27/12	600	52,6	64,2	44,8	54,9
27/13	2300	57,3	66,5	46,8	37,7
27/14	2800	43,1	37,3	24,9	42,1
27/16	2200	33,6	48,9	32,7	57,9
27/17	5750	43,1	63,5	40,3	41,2
27/18	5700	43,1	57	41,3	34,5
27/20	3200	81,0	69,4	60,3	77,1
27/21	3700	57,3	55,7	52,4	46,3
27/29	4200	57,3	70,4	42,5	48,1
28/05	4300	38,4	47,5	57,8	73,3
28/08	4400	47,9	52	50	44,4
28/09	4200	57,3	53,1	55,4	57,3
28/10	1900	52,6	52,6	48,5	39,3
28/11	400	43,1	81	77,3	77,1
28/12	3200	52,6	50,5	37,6	56,1
28/13	400	38,4	58,7	65,7	46,3
28/14	4100	38,4	34,6	37,1	43,7
28/15	3150	43,1	46,8	40,8	59,8
28/16	4200	43,1	56,4	35,2	60
28/18	4100	38,4	42,2	42	58,7
28/19	3600	47,9	29,3	52,1	32,6
28/20	5100	38,4	43,1	37,3	50,8
28/21	1400	47,9	44,8	42,9	48,4

28/25	1800	38,4	62,4	47,5	53,7
28/27	2700	47,9	51,7	55,7	51,3
29/03	2700	52,6	34,9	47,9	68,9
29/04	3500	43,1	65	52,9	71,1
29/05	200	43,1	81,8	47,6	70,2
29/06	800	38,4	54,2	36,6	46
29/07	2900	57,3	57,9	60,7	29,2
29/08	400	47,9	45,6	56,9	49,8
29/09	4400	66,8	52	51,6	63,6
29/10	5800	52,6	66,7	54,2	54
29/12	1200	57,3	55,8	57,9	58,1
29/13	5900	57,3	84	59,9	76,9
29/14	3200	71,6	66,7	65	82,1
29/15	1300	52,6	33,5	51,6	70,2
29/16	5800	43,1	65,6	46,5	43,1
29/17	5800	47,9	53,9	50,4	46,3
29/21	2400	38,4	49,9	39,1	52,8
29/23	300	38,4	47,2	49,6	51,7
29/24	1700	43,1	43,6	38,5	47,5
29/25	400	38,4	76,6	54,1	74,3
30/03	600	57,3	48,7	59,4	61,6
30/05	500	43,1	47,2	49,1	52,7
30/07	2800	38,4	40,7	35,1	37,9
30/08	5900	47,9	42,3	43,9	43,9
30/09	800	57,3	52,4	42,2	59,2
30/10	2400	62,1	58,5	62,2	56,2
30/14	1300	71,6	68,3	48,2	74,5
30/15	1400	47,9	66,7	53,8	64,2
30/16	2800	52,6	43,6	50,9	46
30/17	2800	52,6	56,4	51	69,5
30/18	2300	57,3	48,3	39,8	68,3

30/19	1300	38,4	56,1	42,7	63,9
30/22	1000	47,9	34,3	46,6	39,7
31/02	1200	52,6	47,7	56,5	55,5
31/03	1000	52,6	53,6	44,4	64,2
31/04	3600	57,3	61,7	62,9	60,3
31/05	2400	38,4	36,9	52,1	36,7
31/06	2900	33,6	52,3	34,4	51,6
31/07	850	38,4	36	44,6	52,5
31/08	1699	43,1	69,1	65,3	34,3
31/10	2400	43,1	56,8	64,7	34,9
31/11	2300	33,6	57,3	53,4	46,8
31/12	4400	52,6	66,4	55,9	65,9
31/14	1400	52,6	82,8	47,3	68,8
31/15	4300	47,9	57,3	54,7	62,2
31/16	1300	57,3	65	63,8	56
31/17	800	38,4	38,4	63,3	41,5
31/19	1400	52,6	40,2	45,8	49,8
31/20	400	33,6	74,2	65,2	68,7
31/22	1200	47,9	57	40,5	60,2
32/04	1400	33,6	43,4	54	46,3
32/05	2300	33,6	66,5	55	67,1
32/06	900	28,9	39,1	35,3	34,9
32/08	1250	38,4	38,3	35,8	40,1
32/09	1400	38,4	67	54,2	69,1
32/10	2300	33,6	70,3	55,4	40,2
32/12	1300	38,4	65,1	65,4	43,9
33/02	2700	66,8	76,8	54,1	60,7
33/03	2400	52,6	48,9	63,6	68,1

**TABELA C2 – RESULTADOS COMPARATIVO DO ENSAIO IRIS VERSUS RFT NO FEIXE 01-E-10f NA MESMA POSIÇÃO.**

Linha/ Coluna	Posição	IRIS	RFT	Linha/ Coluna	Posição	IRIS	RFT
	(mm)	Perda de Espessura (%)	Perda de Espessura (%)		(mm)	Perda de Espessura (%)	Perda de Espessura (%)
02/03	3900	47,9	47,8	22/04	2500	47,9	41,9
02/08	700	38,4	48,4	22/05	500	38,4	30,3
02/10	4000	52,6	49,7	22/06	3500	62,1	58,2
02/13	2000	38,4	34,8	22/07	2200	38,4	35,6
03/07	5900	38,4	45,4	22/08	2800	62,1	58,9
03/08	5100	38,4	35,2	22/10	3200	33,6	40,1
03/09	4700	38,4	30,7	22/12	4600	43,1	45,1
03/10	3600	57,3	51,6	22/13	1700	43,1	49,1
03/11	4000	38,4	33,2	22/14	2400	43,1	30,1
03/12	5500	43,1	55	22/15	2100	33,6	42,5
03/13	1000	43,1	57,3	22/16	4200	43,1	43,2
03/14	5000	47,9	50,8	22/17	2100	52,6	33,9
03/15	4300	33,6	35	22/18	4950	43,1	48,5
03/17	2000	47,9	42,7	22/19	5050	43,1	47,6
03/19	5200	33,6	45,2	22/20	150	52,6	30,8
03/22	2800	33,6	21,8	22/21	3400	47,9	48,2
04/02	3200	33,6	39,1	22/22	3200	43,1	38,4
04/03	4500	43,1	32,9	22/23	900	52,6	59,7
04/04	2800	38,4	37,5	22/24	5800	52,6	25,7
04/05	4950	28,9	34,5	22/25	2500	47,9	39,6
04/06	4600	28,9	21,8	22/26	3100	62,1	60,6
04/07	2600	38,4	48,4	22/27	3000	57,3	58
04/08	3100	33,6	33,6	22/28	2000	47,9	45,6
04/12	4100	43,1	41,8	22/29	1800	43,1	53,5
04/13	4000	47,9	59,4	22/30	3000	43,1	47,4



04/14	4200	33,6	35,2	22/31	5200	52,6	35,7
04/15	3300	33,6	35,4	22/32	5300	43,1	44,3
04/16	1000	47,9	45,2	22/33	4200	47,9	43,7
04/17	4300	33,6	40,1	22/34	5600	62,1	63,2
04/18	2500	38,4	28	22/35	4200	43,1	44,9
04/19	2800	28,9	34,3	23/03	4100	38,4	38,5
04/20	4300	47,9	62	23/04	2800	33,6	34,5
04/21	5300	43,1	73,5	23/05	4900	38,4	38,5
04/26	3100	28,9	17	23/07	3200	38,4	33,2
05/04	3400	38,4	50	23/08	2800	43,1	44,9
05/05	5500	33,6	58,5	23/09	2900	38,4	38,5
05/06	2800	38,4	37,9	23/11	2300	38,4	40,4
05/07	1700	47,9	26,2	23/14	5200	43,1	42,7
05/08	2600	47,9	45,1	23/15	3700	52,6	54,2
05/09	5400	52,6	55,1	23/16	4600	43,1	43,6
05/10	5400	24,2	30,4	23/17	4100	52,6	58,6
05/11	5200	52,6	68,5	23/18	5300	47,9	45,1
05/14	3200	33,6	43,6	23/20	2100	47,9	44,1
06/03	800	33,6	20,3	23/21	3700	38,4	38,2
06/04	3800	47,9	49,2	23/22	2600	47,9	45,4
06/05	3300	47,9	59,8	23/23	3100	47,9	42,3
06/06	4800	33,6	32,1	23/24	3200	57,3	53,7
06/07	4900	43,1	55,4	23/25	5600	43,1	40,6
06/08	4900	33,6	30,3	23/26	4300	43,1	43,1
06/09	4600	28,9	31,8	23/27	2700	43,1	42,5
06/10	3000	38,4	23,3	23/28	5800	57,3	50,2
06/12	2100	62,1	41	23/29	4200	43,1	44,5
06/13	3200	33,6	30,5	23/30	3000	38,4	40,6
06/15	2000	33,6	48,9	23/31	4200	52,6	53,4
06/16	2700	47,9	45	23/33	2700	57,3	45,3
06/17	2000	47,9	48,6	23/34	3200	43,1	47

06/23	1700	33,6	31,8	23/35	3000	38,4	39,9
06/24	1800	33,6	38,5	23/36	2000	43,1	43,7
06/25	1500	38,4	34,2	24/04	2700	43,1	41,6
06/26	2900	28,9	28,9	24/05	2500	38,4	41,3
07/09	3100	33,6	36,1	24/06	500	57,3	47,3
07/10	900	62,1	41	24/07	1500	47,9	45,6
07/11	1500	38,4	36,2	24/08	1700	47,9	41,2
07/13	2000	33,6	36,1	24/09	1900	43,1	38,4
07/14	2900	28,9	30,1	24/10	2900	43,1	47,7
07/16	2500	43,1	48,4	24/11	2700	47,9	34,9
07/17	3000	33,6	35	24/13	5300	52,6	53,5
07/18	4200	57,3	65,1	24/14	5700	57,3	40,8
07/21	1300	33,6	32,6	24/15	1400	52,6	52,7
07/24	2900	33,6	36,9	24/16	1800	38,4	30,7
07/25	700	66,8	59,9	24/17	5600	62,1	52
07/26	3000	28,9	24,1	24/18	5100	57,3	55
08/05	2500	47,9	45,3	24/19	4700	52,6	47,1
08/08	3500	33,6	34,2	24/22	4700	43,1	38,3
08/12	1300	33,6	34,6	24/23	4900	38,4	39,3
08/15	4100	47,9	46	24/24	4400	52,6	40,2
08/16	1300	33,6	46,6	24/25	3600	47,9	40,3
08/23	5200	43,1	45,7	24/26	2000	47,9	41,8
08/24	3700	38,4	41,1	24/27	3700	66,8	64,1
08/25	4800	38,4	37,3	24/28	3300	43,1	45,1
08/26	2900	38,4	34,7	24/29	5700	43,1	46,2
08/28	1900	38,4	35	24/30	1800	38,4	36,9
09/06	800	33,6	31,9	24/31	5200	43,1	42,3
09/08	1500	52,6	44,8	24/32	3500	38,4	43,8
09/10	2700	33,6	37,8	24/33	4100	38,4	35,7
09/11	3200	33,6	34,5	25/03	1500	76,3	80,8
09/12	2900	33,6	36,4	25/06	5900	38,4	39,5

09/13	1100	47,9	41,3	25/15	2700	47,9	40,3
09/14	1200	28,9	30,6	25/16	1400	52,6	51,6
09/16	4300	33,6	38	25/17	1200	47,9	42,8
09/17	4900	38,4	37,2	25/18	1400	52,6	53,9
09/22	5200	62,1	66,4	25/19	4100	38,4	39,5
09/24	400	38,4	36,9	25/20	4100	43,1	40
09/27	1000	33,6	48,2	25/21	400	52,6	53,4
10/03	5500	38,4	60	25/22	1400	38,4	38,8
10/10	5800	62,1	66,1	25/23	3100	38,4	34,9
10/11	5300	43,1	58	25/24	700	71,6	40
10/12	300	62,1	67,5	25/25	700	43,1	43,3
10/16	4900	62,1	75,3	25/26	4450	43,1	45,1
10/17	5200	47,9	46	25/27	4200	43,1	42,3
10/19	1100	38,4	44	25/29	1000	57,3	55,9
10/27	2700	43,1	41,4	25/30	3000	38,4	35
10/28	2000	62,1	59	25/32	2600	47,9	45
11/01	5700	47,9	53,2	25/33	1200	71,6	69
11/08	4300	33,6	37	25/34	2600	52,6	53,4
11/11	2600	38,4	20,1	26/07	2200	62,1	65
11/12	5600	52,6	53,4	26/08	2800	43,1	47,4
11/27	600	33,6	42,3	26/09	5200	38,4	38,9
11/31	3200	52,6	53,8	26/10	5700	47,9	40,1
12/02	2500	57,3	37,8	26/11	2400	38,4	39
12/07	1500	38,4	35,1	26/12	3400	57,3	56
12/27	1200	38,4	36,1	26/13	3200	33,6	23,9
13/15	2500	38,4	34,9	26/18	3300	43,1	52,4
13/28	5000	57,3	50,7	26/19	2800	57,3	51,6
14/08	1300	38,4	37,6	26/20	1200	62,1	30,7
14/09	600	28,9	25	26/21	1400	57,3	47,4
14/11	5200	52,6	58,2	26/22	1700	43,1	40,7
14/16	2600	33,6	43,8	26/24	2400	47,9	47,5

14/23	5300	47,9	50,9	26/26	2000	38,4	40,2
14/26	1000	38,4	35,7	26/27	2000	57,3	50,6
14/27	5300	62,1	56,5	26/29	600	43,1	40,6
14/29	2100	52,6	56,2	26/30	5100	43,1	42,6
14/30	2300	38,4	34,8	26/31	3000	57,3	53,4
14/31	2100	43,1	41,8	26/32	2800	43,1	42,2
15/05	1800	57,3	52,4	26/33	4200	62,1	75,8
15/08	300	33,6	50,7	27/03	2300	52,6	55,6
15/11	5100	43,1	51	27/04	1800	43,1	48,5
15/17	600	38,4	40,1	27/06	3200	43,1	47,5
15/20	400	43,1	40,3	27/07	1800	52,6	49,7
15/26	5100	62,1	37,9	27/08	5000	52,6	53,4
15/28	3800	52,6	49,3	27/10	2000	43,1	40
15/30	3200	38,4	41,3	27/11	2300	47,9	57
16/09	1800	33,6	30,1	27/12	400	38,4	39,6
16/26	5200	47,9	43,1	27/15	3200	47,9	40,7
16/29	5100	47,9	39,2	27/16	5600	52,6	49,1
16/31	4200	28,9	27,4	27/17	4900	47,9	48,7
16/33	1300	43,1	42,5	27/18	3400	47,9	55,4
16/34	300	43,1	43,3	27/19	5200	52,6	51,1
17/12	600	28,9	33,9	27/20	400	52,6	34,5
17/26	1400	33,6	42,3	27/22	1300	62,1	58,9
17/28	1200	38,4	31,6	27/23	3400	47,9	28
17/33	5000	43,1	44,3	27/24	3200	62,1	61,3
17/34	700	38,4	49,5	27/26	4600	47,9	50,4
18/02	1800	28,9	34,2	27/27	5300	62,1	51,5
18/06	2500	33,6	21,4	27/28	2400	62,1	57,3
18/08	1800	47,9	53,3	27/29	5800	57,3	46,8
18/09	3100	71,6	73,3	27/31	5000	38,4	41,4
18/10	5300	43,1	43,5	28/04	500	43,1	41,5
18/11	4200	52,6	52,9	28/06	4500	47,9	40,1

18/12	4100	43,1	43	28/07	3500	43,1	46,9
18/13	2800	38,4	44,1	28/08	2800	43,1	36,2
18/15	2100	38,4	40,5	28/09	1800	52,6	49,5
18/16	1300	38,4	44,2	28/10	5200	43,1	46,9
18/17	1400	38,4	34,7	28/11	4600	71,6	63,6
18/19	250	57,3	56,5	28/12	5700	47,9	43
18/20	700	52,6	42,2	28/13	5800	38,4	35,8
18/21	900	33,6	20,5	28/14	1200	57,3	52,3
18/23	800	33,6	38,1	28/15	4600	43,1	39,2
18/24	3600	71,6	69,5	28/16	4900	62,1	55,9
18/25	3600	33,6	33,8	28/17	2700	38,4	38,2
18/26	2700	52,6	54,6	28/18	3400	52,6	54,4
18/27	2900	57,3	32,8	28/19	2100	62,1	62,9
18/28	1800	52,6	48,3	28/20	2100	52,6	52,2
18/29	3000	47,9	47,8	28/21	900	43,1	46,1
18/30	2300	47,9	47,5	28/22	600	76,3	53,6
18/31	2000	62,1	38,2	28/23	800	52,6	57,2
18/32	1800	38,4	38,5	28/24	5200	43,1	51,3
18/33	1300	62,1	61,2	28/25	2000	43,1	46,4
18/36	1400	38,4	31,4	28/26	300	57,3	50,8
18/38	4700	81,0	79,3	28/27	4300	57,3	48,9
19/03	5200	38,4	47,6	28/28	1400	47,9	43,2
19/04	2800	52,6	47,2	28/29	2600	47,9	48,3
19/05	1100	57,3	51,6	29/04	1800	57,3	51,5
19/06	5100	43,1	41,7	29/05	2800	47,9	63
19/07	3000	71,6	80,2	29/07	5200	33,6	19,3
19/08	2800	38,4	24,5	29/08	4100	43,1	41,6
19/09	2200	62,1	64,6	29/09	5100	66,8	61,4
19/10	1500	62,1	66,8	29/10	2100	57,3	52
19/11	2800	52,6	51,4	29/11	3400	66,8	55,2
19/12	2200	38,4	38,5	29/12	5500	57,3	44,7

19/14	3300	43,1	44,6	29/13	5600	43,1	34,5
19/15	2800	38,4	41,7	29/16	1800	43,1	46,1
19/16	3100	57,3	48,8	29/17	5100	62,1	53
19/17	3200	52,6	49,6	29/18	2100	47,9	38,1
19/18	1700	38,4	40,5	29/19	5100	66,8	54,2
19/19	4200	47,9	49,7	29/20	4100	57,3	59,6
19/20	5100	66,8	38,6	29/21	2800	52,6	46,3
19/21	2300	43,1	41,6	29/22	1000	62,1	60,2
19/22	700	66,8	62,7	29/23	5200	43,1	45,1
19/23	5800	38,4	44,2	29/24	3500	62,1	51,6
19/24	3700	43,1	43,4	29/25	3300	38,4	38,9
19/25	300	38,4	40,2	29/26	1000	38,4	43,4
19/27	2900	52,6	53,4	29/27	800	52,6	51,3
19/28	500	62,1	65	29/28	5100	66,8	65,1
19/30	2500	57,3	53,1	29/29	4800	43,1	40,3
19/32	2400	38,4	46,1	30/04	1800	43,1	45,1
19/33	2600	57,3	48,8	30/05	5900	62,1	61,6
19/34	2500	62,1	54,2	30/06	3600	52,6	55,4
19/36	800	57,3	54,2	30/07	4300	47,9	44,7
19/37	3200	71,6	74,2	30/08	400	52,6	46,5
19/38	1000	38,4	37,1	30/09	2900	52,6	37,2
20/02	2500	52,6	49,5	30/10	4400	47,9	47,5
20/03	5000	52,6	51,5	30/11	600	62,1	36,6
20/04	1800	52,6	57,7	30/12	1400	52,6	42,1
20/05	1500	66,8	67,1	30/14	2100	43,1	49,2
20/06	1900	57,3	56,5	30/15	4200	43,1	39,2
20/07	1200	52,6	60,3	30/16	900	57,3	31
20/08	3100	47,9	46,4	30/17	1800	52,6	32,4
20/09	2100	43,1	65,9	30/18	300	52,6	52,8
20/10	1800	52,6	55,7	30/19	1200	71,6	62,5
20/11	1600	43,1	45,4	30/20	3400	57,3	65,5

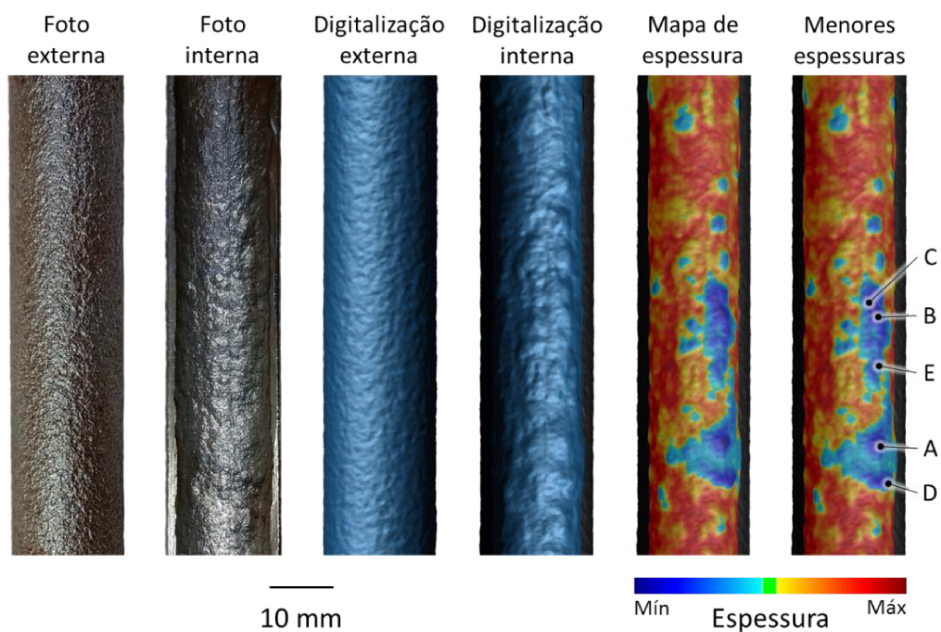
20/13	800	47,9	35,8	30/21	800	52,6	49
20/14	2300	62,1	63,7	30/22	600	47,9	50,1
20/15	2700	52,6	53,2	30/24	800	47,9	42,6
20/16	1400	47,9	47,9	30/25	5200	57,3	60,2
20/18	5100	47,9	48,7	30/26	3400	52,6	55,3
20/19	5000	52,6	52,7	30/27	3400	52,6	47,9
20/20	300	52,6	55,5	31/04	900	43,1	26,1
20/21	2400	47,9	42,4	31/05	5500	43,1	42,3
20/23	1000	47,9	48,8	31/06	4600	62,1	48,1
20/24	3700	47,9	47,1	31/07	1200	52,6	71,5
20/26	3000	66,8	60	31/08	900	47,9	47,7
20/27	3100	52,6	46,1	31/09	4300	38,4	45,5
20/28	2600	62,1	56,2	31/10	2200	62,1	61,4
20/29	2000	52,6	59,9	31/11	1100	47,9	58,1
20/30	5000	52,6	58	31/12	4400	57,3	53,8
20/31	5200	76,3	59,2	31/15	3300	47,9	43,6
20/32	2300	62,1	57,1	31/16	1400	38,4	40,9
20/33	3400	43,1	43,7	31/17	5400	47,9	50,3
20/34	5700	52,6	57,6	31/18	4700	43,1	44,7
20/35	4000	52,6	52,3	31/19	200	66,8	42,8
20/36	4300	43,1	43	31/20	4300	52,6	40
20/37	5000	24,2	33,7	31/22	4600	57,3	36,4
21/01	3700	71,6	76	31/23	2000	62,1	53,1
21/02	1500	43,1	45,5	31/24	4200	47,9	46,8
21/03	900	43,1	40,3	31/25	4500	43,1	27,4
21/05	2500	57,3	62	32/02	5600	62,1	70,1
21/06	4000	47,9	47,1	32/03	3900	57,3	48,9
21/07	3500	66,8	63,3	32/04	2900	66,8	58,2
21/08	4500	57,3	53,3	32/05	3200	57,3	57,3
21/09	2500	43,1	34,2	32/06	1200	47,9	48,6
21/10	3200	57,3	58,6	32/07	5800	43,1	47,5

21/11	300	43,1	44,5	32/08	3500	52,6	50,9
21/12	4100	52,6	56	32/09	2200	47,9	47
21/13	3300	43,1	49,8	32/10	2200	43,1	45,3
21/14	1600	52,6	56,4	32/12	4100	62,1	58,4
21/15	2200	43,1	32,3	32/13	5100	71,6	61,7
21/16	2300	52,6	54,6	32/14	2600	57,3	42
21/17	3300	47,9	53,7	32/15	3200	57,3	57,5
21/18	2800	52,6	35,5	32/16	5200	43,1	41,1
21/19	4300	43,1	47,2	32/17	2600	57,3	56,1
21/20	3400	47,9	65,1	32/18	3200	71,6	44
21/21	2100	43,1	42,3	32/19	4700	57,3	50,4
21/22	2300	38,4	40,6	32/20	4200	47,9	35,1
21/23	2200	43,1	44,8	32/21	4000	52,6	66,7
21/24	3300	62,1	61,4	32/22	3000	47,9	54,3
21/25	2900	52,6	61	33/03	5100	52,6	67,1
21/26	4100	47,9	52,2	33/04	5300	43,1	45,1
21/27	3600	43,1	56,3	33/05	400	43,1	54,9
21/28	5200	38,4	34,1	33/06	1100	47,9	35,9
21/29	1400	52,6	36,7	33/07	800	47,9	45,8
21/30	5800	43,1	46,5	33/08	5200	47,9	49,9
21/31	5200	52,6	45	33/09	5800	52,6	66,3
21/32	5000	62,1	52,2	33/10	5700	66,8	59,8
21/33	5000	52,6	53,7	33/11	3200	62,1	57,2
21/34	4000	62,1	70,4	33/12	2200	38,4	32,9
21/36	3200	38,4	44,5	33/13	1200	47,9	50,4
22/02	3400	33,6	35,7	33/14	2100	71,6	70,7
22/03	2800	52,6	47,2	33/15	3000	43,1	54,2



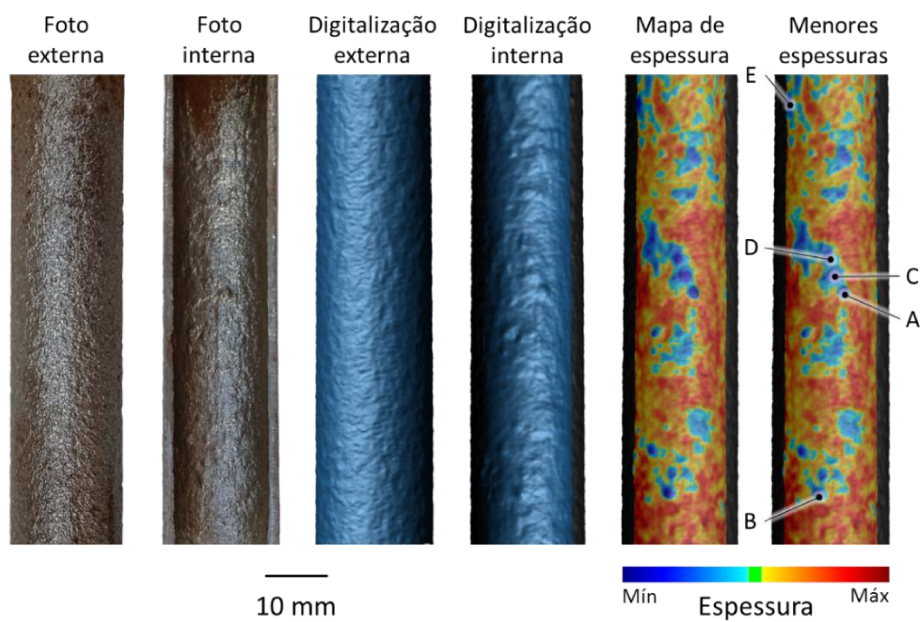
## APÊNDICE D

### RESULTADOS DO ESCÂNER PARA O FEIXE 01-E-10F



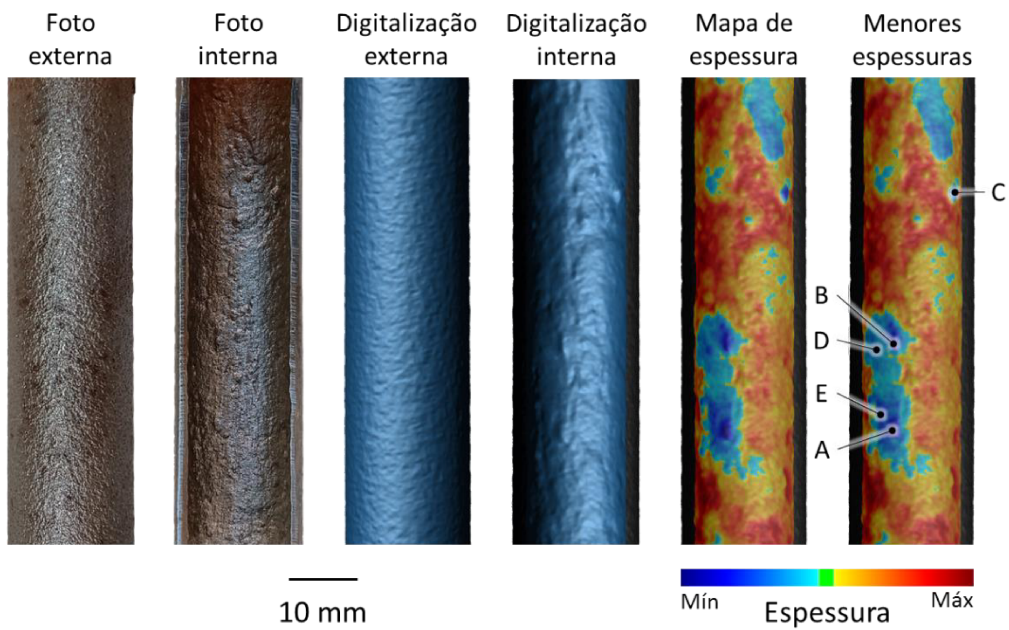
A = 0,976 (maior perda de espessura = 53,7%); B = 1,033; C = 1,049; D = 1,091; E = 1,251

Figura D1 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 02-03-F



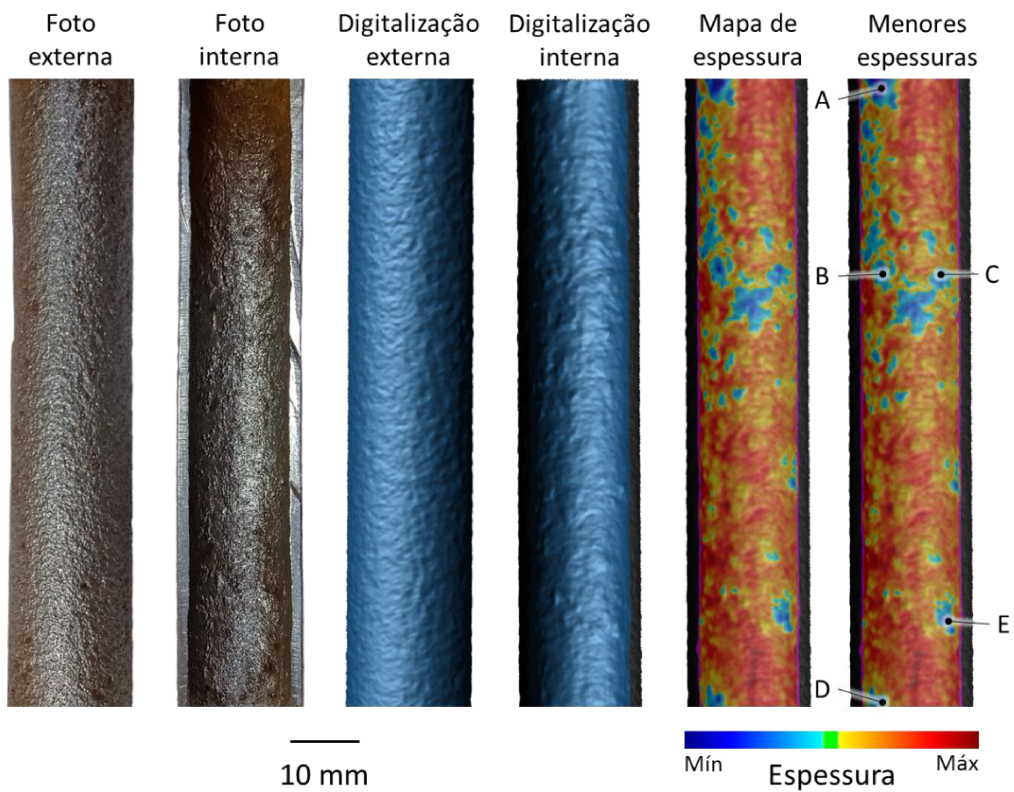
A = 1,360 (maior perda de espessura = 35,5%); B = 1,389; C = 1,408; D = 1,439; E = 1,445

Figura D2 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 03-22-F



A = 1,262 (maior perda de espessura = 40,1%); B = 1,340; C = 1,430; D = 1,490; E = 1,496

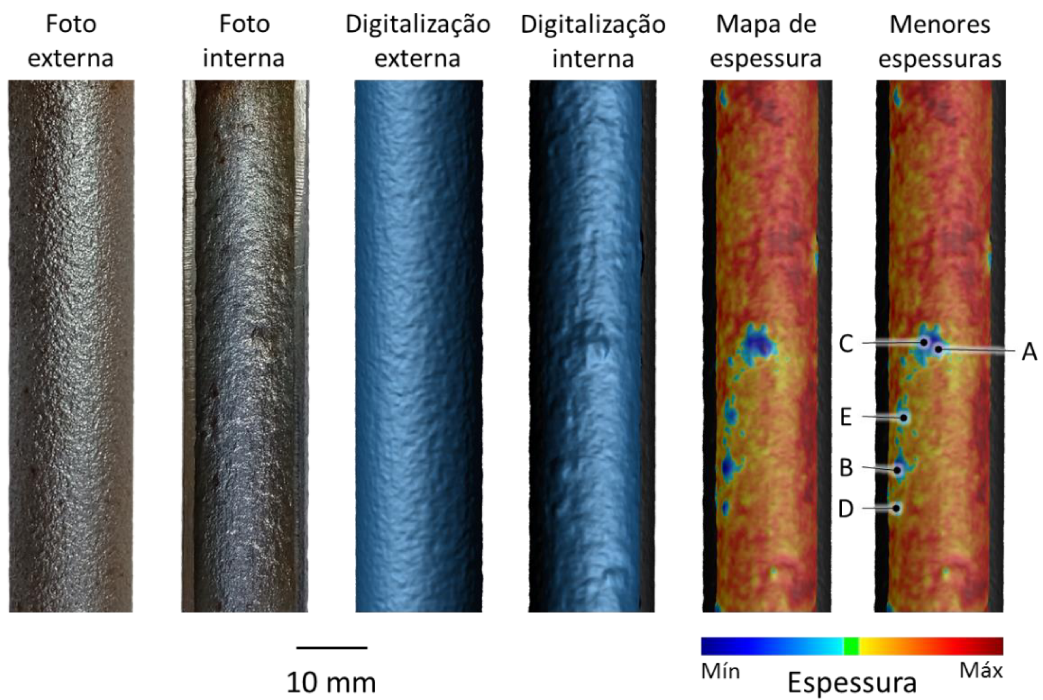
Figura D3 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 04-26-F



A = 1,410 (maior perda de espessura = 33,1%); B = 1,571; C = 1,595; D = 1,597; E = 1,626

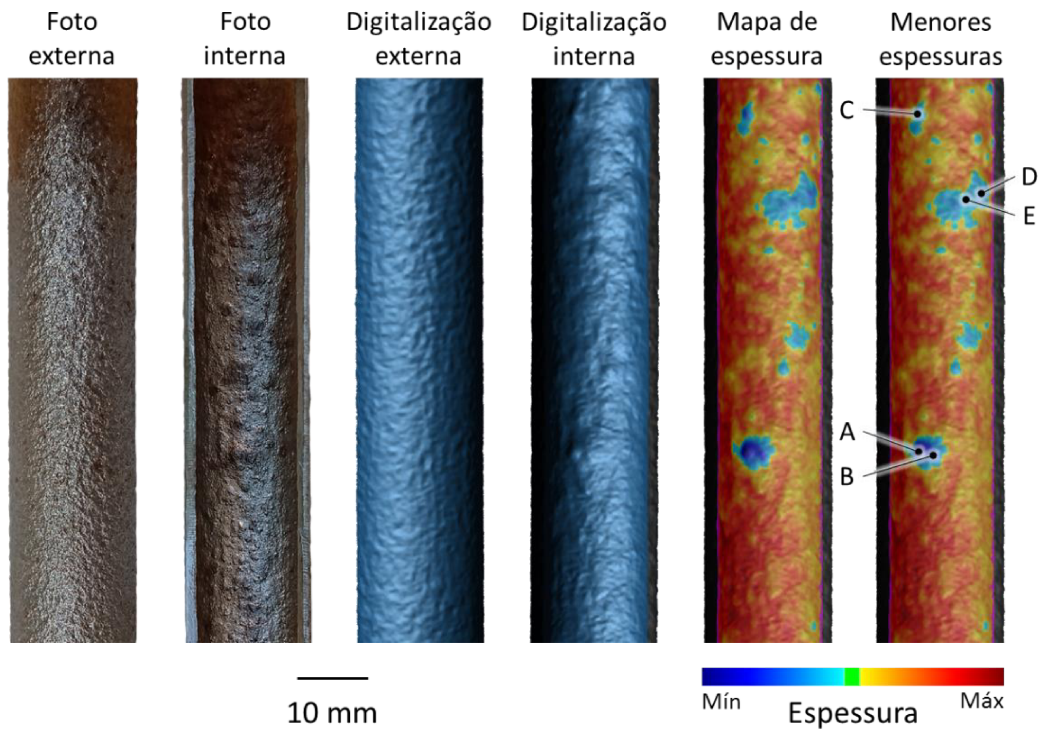
Figura D4 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 19-38-F





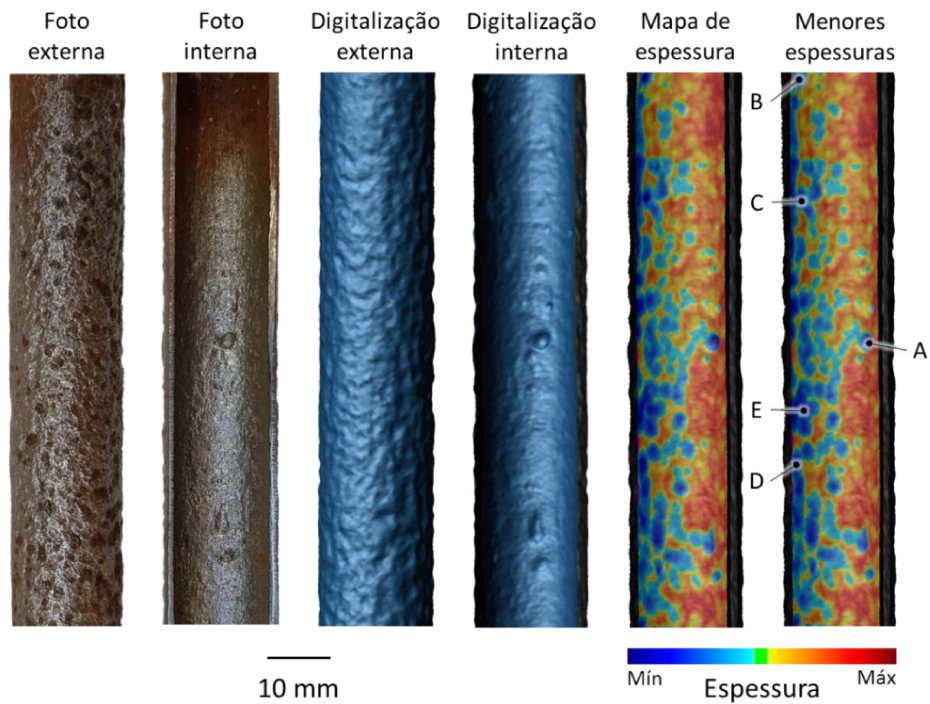
A = 1,142 (maior perda de espessura = 45,8%); B = 1,287; C = 1,292; D = 1,421; E = 1,487

Figura D5 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 23-36-F



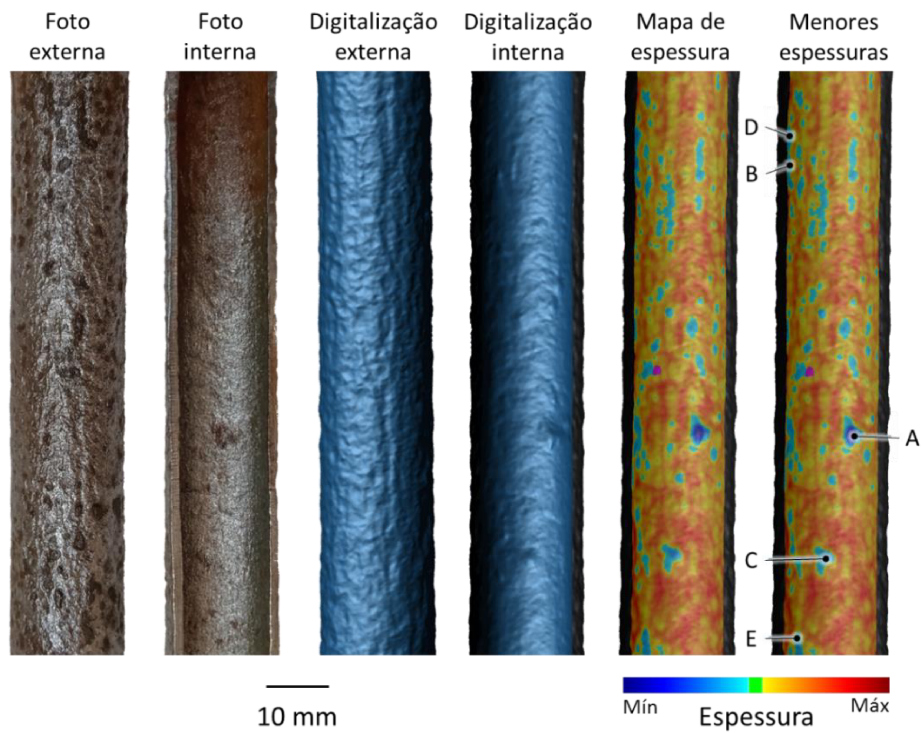
A = 1,061 (maior perda de espessura = 49,7%); B = 1,289; C = 1,355; D = 1,415; E = 1,447

Figura D6 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 25-34-F



A = 0,898 (maior perda de espessura = 57,4%); B = 0,935; C = 1,008; D = 1,014; E = 1,045

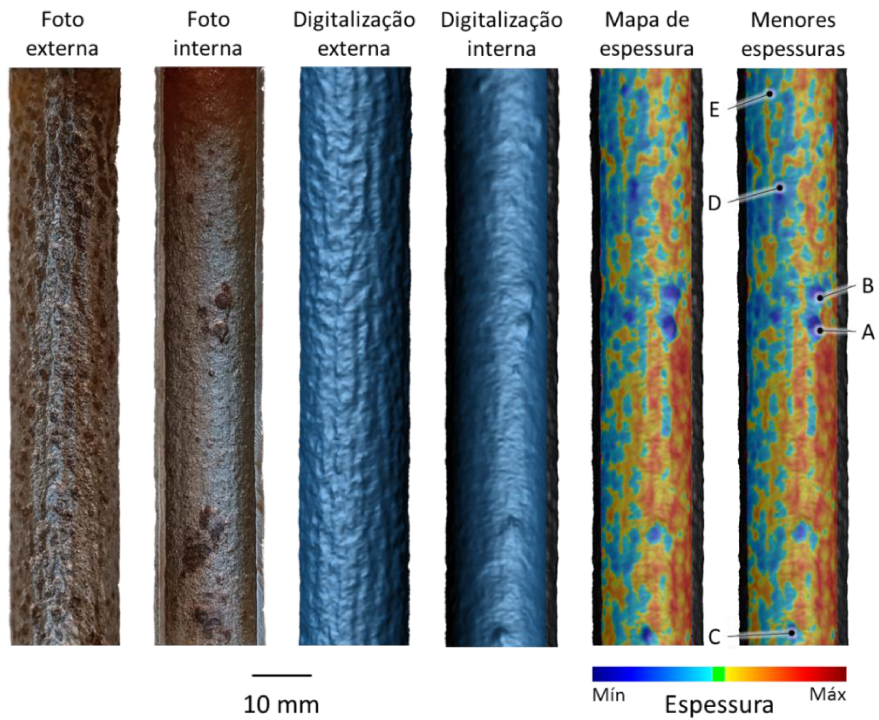
Figura D7 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 26-33-F



A = 0,818 (maior perda de espessura = 61,2%); B = 1,266; C = 1,296; D = 1,317; E = 1,355

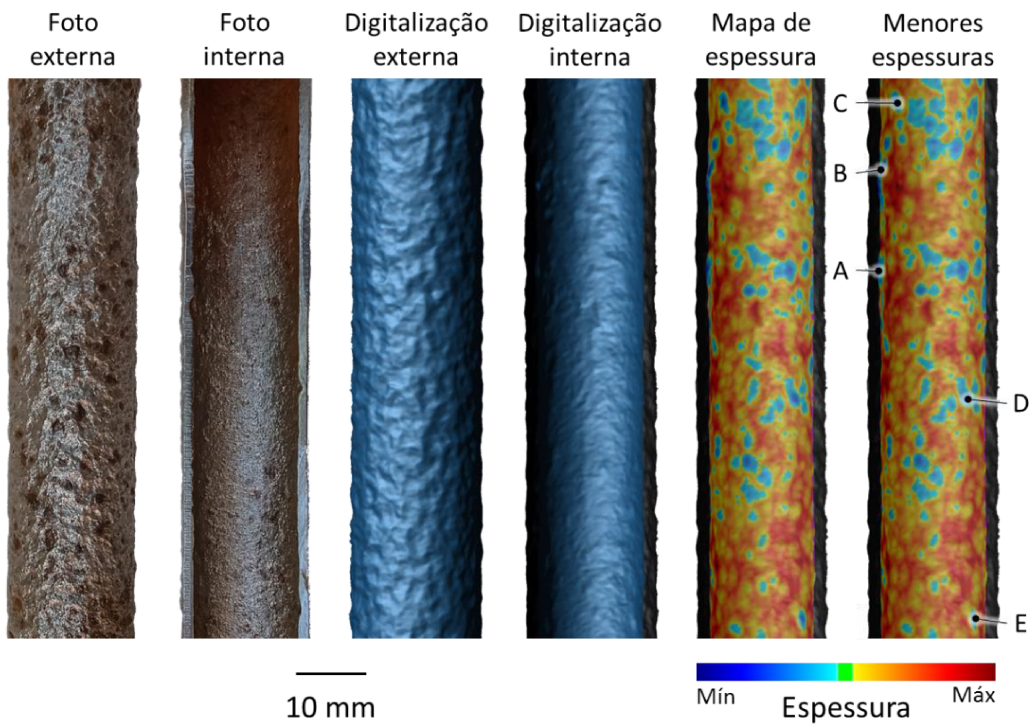
Figura D8 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 28-29-F





A = 0,887 (maior perda de espessura = 57,9%); B = 0,978; C = 1,027; D = 1,080; E = 1,125

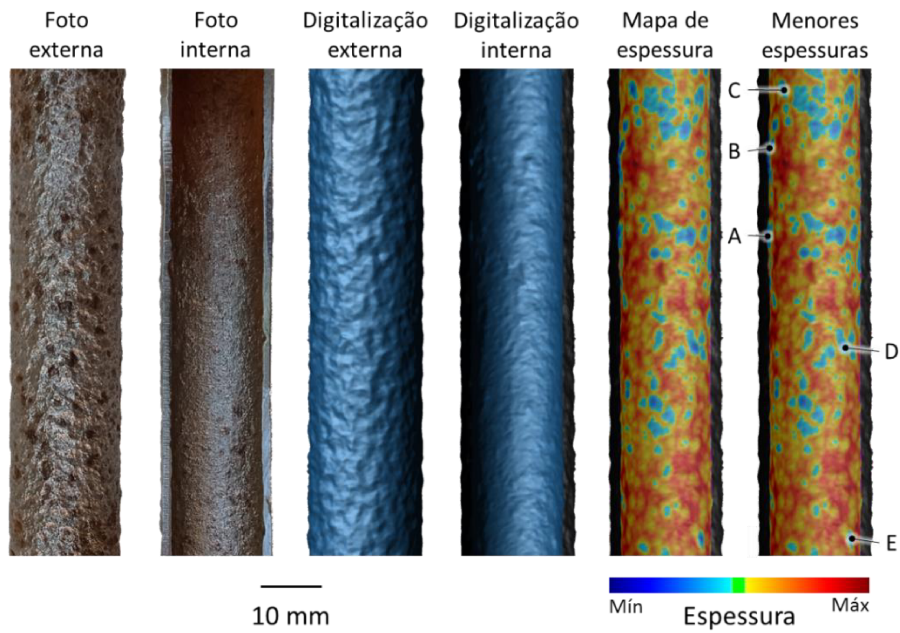
Figura D9 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 29-29-F



A = 1,089 (maior perda de espessura = 48,3%); B = 1,338; C = 1,399; D = 1,402; E = 1,411

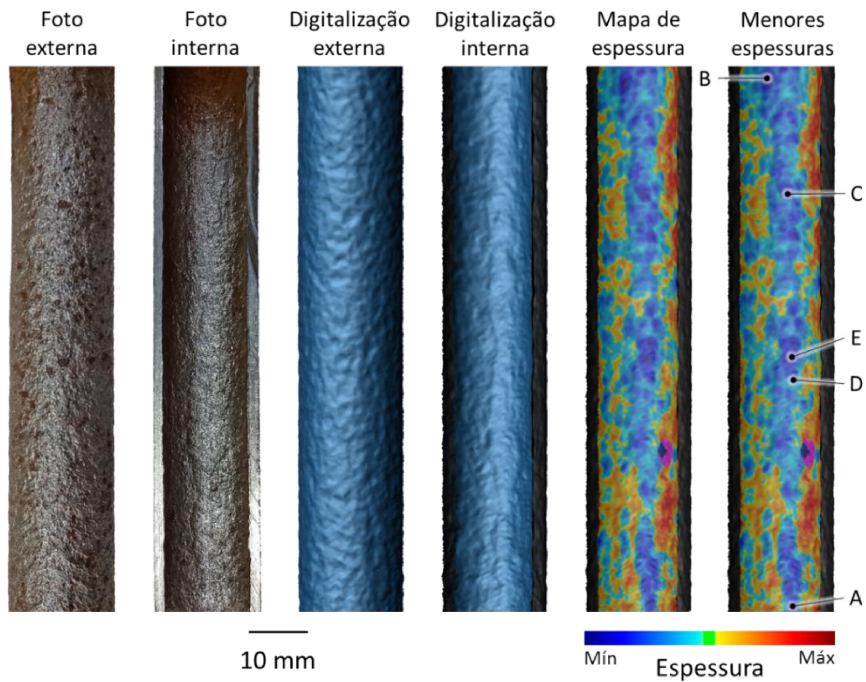
Figura D10 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 30-27-F

## RESULTADOS DO ESCÂNER PARA O FEIXE 01-E-10B



A = 1,095 (maior perda de espessura = 48,1%); B = 1,269; C = 1,537; D = 1,546; E = 1,608

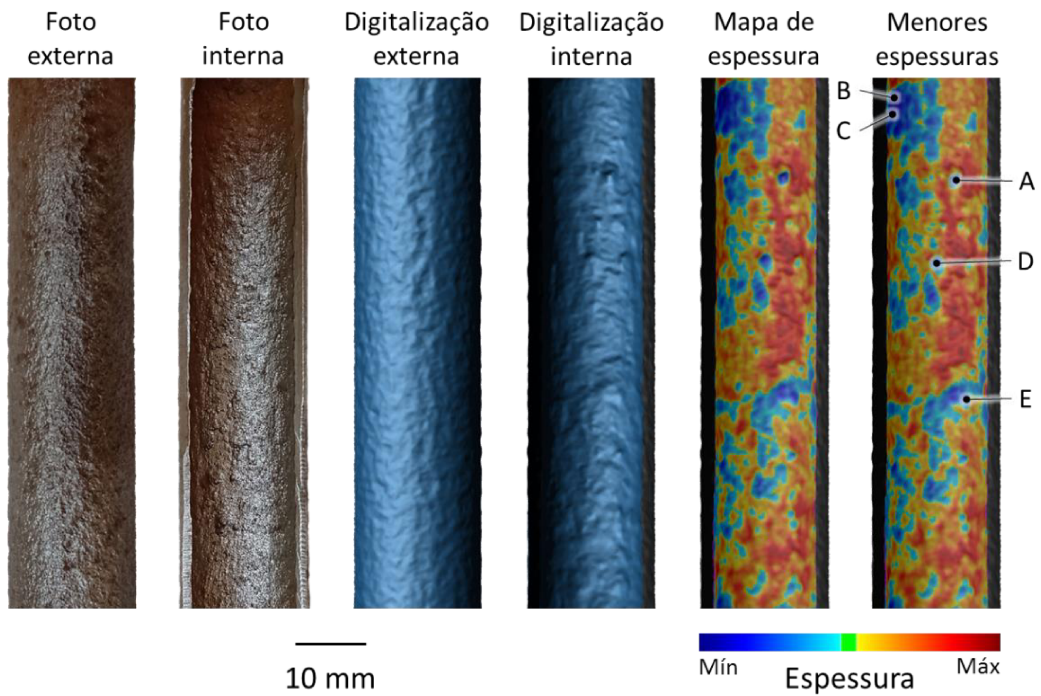
Figura D11 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 01-08-B



A = 1,448 (maior perda de espessura = 31,3%); B = 1,453; C = 1,473; D = 1,477; E = 1,495;

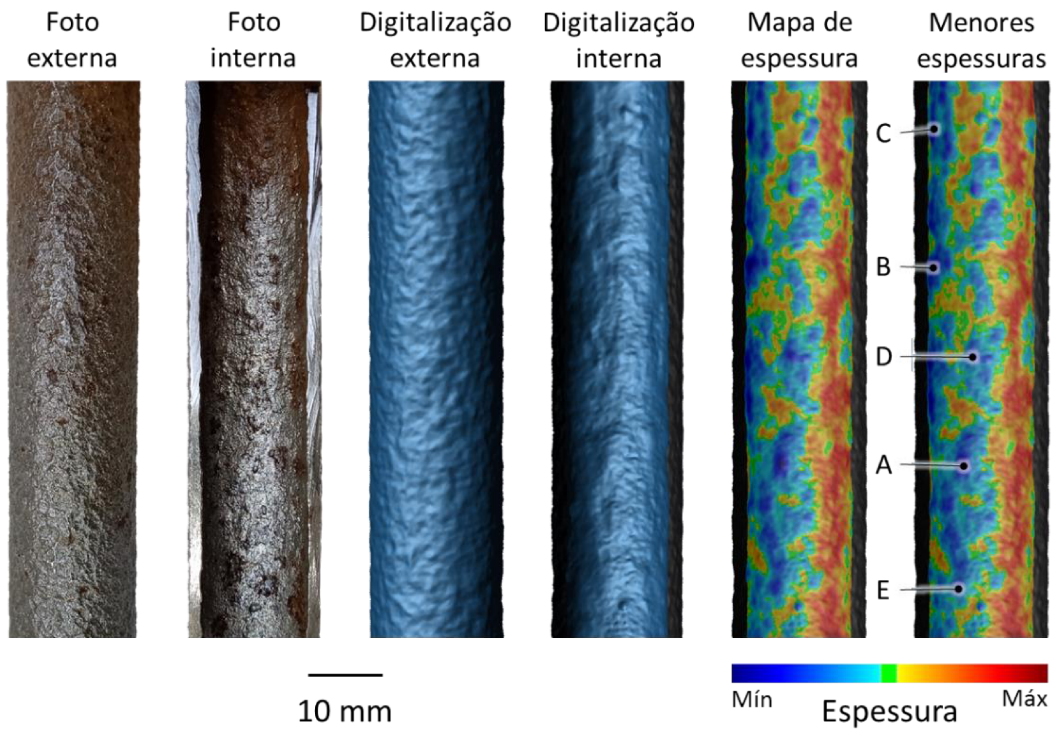
Figura D12 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 01-10-B





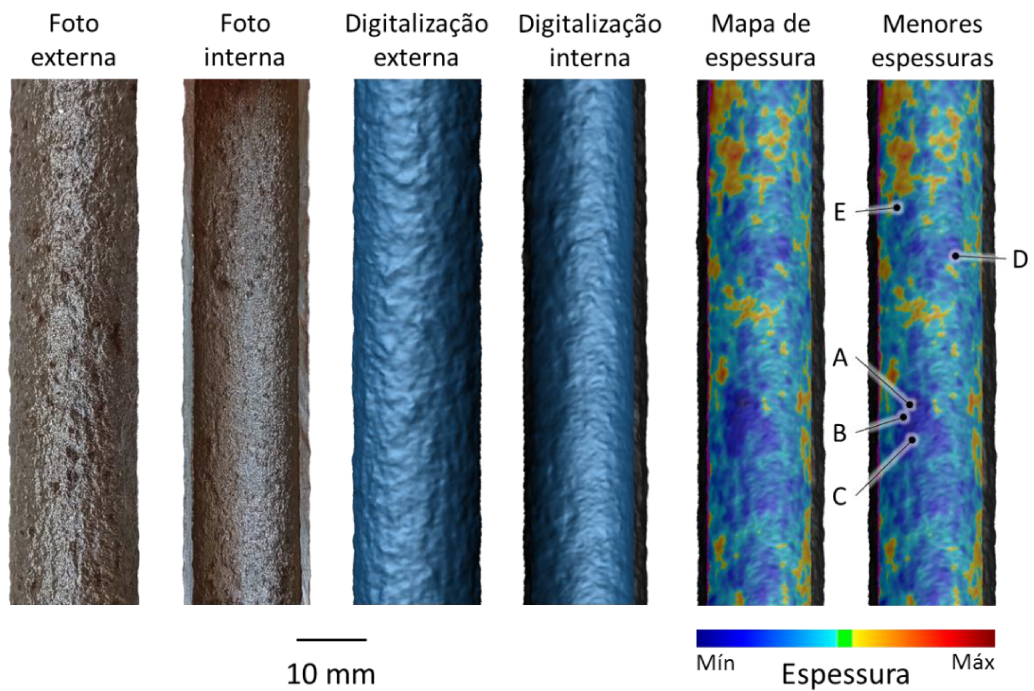
A = 1,560 (maior perda de espessura = 26,0%); B = 1,594; C = 1,637; D = 1,645; E = 1,700

Figura D13 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 01-12-B



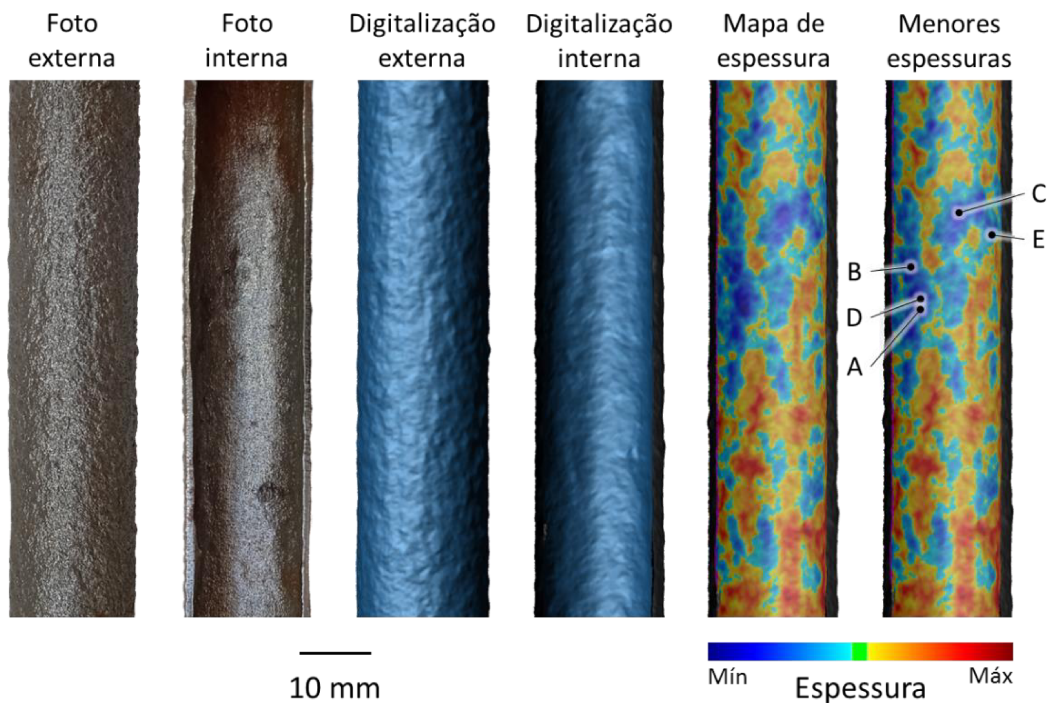
A = 1,231 (maior perda de espessura = 41,6%); B = 1,266; C = 1,338; D = 1,377; E = 1,450

Figura D14 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 01-14-B



A = 1,177 (maior perda de espessura = 44,2%); B = 1,217; C = 1,276; D = 1,288; E = 1,369

Figura D15 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 05-02-B



A = 0,850 (maior perda de espessura = 59,7%); B = 0,908; C = 0,929; D = 0,931; E = 0,973

Figura D16 – Dados dos ensaios por Escaneamento com indicações das menores espessuras identificadas no Tubo 10-01-B



## APÊNDICE E

### PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA A TÉCNICA POR RFT

#### 1. ESCOPO

Este procedimento é específico para o exame de Campo Remoto (RFT - Remote Field Testing) do Projeto UFU/PETROBRÁS, Processo: 2017/00368-9. Título: Desenvolvimento de Metodologias Baseadas em Risco para Inspeção via Ensaios Não Destrutivos de Feixes de Trocadores de Calor tipo Casco & Tubo.

O objetivo é quantificar a perda de parede e os defeitos ao longo de tubos de permutadores de calor ferromagnético do tipo Casco & Tubo.

Condições para aplicação do procedimento:

- Equipamento Ectane 2®, software Magnifi® 4.6R13, da empresa Eddyfi Technologies.
- Sonda rígida “*dual-drive*” de dimensões: Diâmetro externo de 13 mm e comprimento total de 260 mm;
- Tubos de aço carbono com espessura de 2,41 mm, diâmetro externo de 19,05 mm e comprimento 6.000 mm.

#### 2. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

ASME (2019) Section V, Boiler and Pressure Vessel Code. Nondestructive Examination. Article 17 – Remote Field Testing (RFT) Examination Method.

ASTM E 2096-05: Standard practice for in-situ examination of ferromagnetic heat-exchanger tubes using remote field testing.

Manual do Magnifi™ 4. Getting Started With Magnifi 4 & Applications Guides, version 1.0, abril 2019.

ABNT NBR 15246, 2012, Ensaios não destrutivos – Correntes parasitas – Ensaio por campo remoto em tubos ferromagnéticos instalados em trocadores de calor.

### **3 REQUISITOS GERAIS**

#### **3.1. Pessoal**

A equipe de inspeção consiste em no mínimo duas pessoas:

- Operador principal: Responsável pelo equipamento de aquisição de dados e pelo progresso da inspeção. Deve ter amplo conhecimento do equipamento Ectane 2® e do software Magnifi® 4.6R13.
- Operador secundário: Pessoa treinada no manuseio da sonda dentro do tubo a ser inspecionado.

#### **3.2. Condições Do Tubo**

Antes do exame os tubos devem estar limpos e secos o suficiente para permitir a passagem da sonda por dentro dos mesmos. Componentes metálicos e detritos ferromagnéticos podem afetar o nível de confiança do exame além do nível de ruído convencional (típico do ensaio) e não devem estar em contato com os tubos a serem inspecionados.

#### **3.3. Temperatura**

A temperatura dos tubos a serem examinados deve estar entre 5 °C e 40 °C. Durante a inspeção a temperatura ao longo do(s) tubo(s) deve estar em patamar estável dentro de uma margem de  $\pm 5$  °C.

### **4. EQUIPAMENTO DE INSPEÇÃO**

#### **4.1. Instrumento**

Para o exame de tubos ferrosos deve ser utilizado equipamento de teste RFT da marca Eddyfi Technologies (Ectane 2® por meio do software Magnifi® 4.6R13). Trata-se de um instrumento capaz de realizar medições multicanais e multifrequências, podendo realizar medições diferenciais e absolutas simultaneamente.

#### **4.2. Visor**

Os sinais dos canais ativos do equipamento de teste RFT devem ser exibidos utilizando quatro *strip charts*, um plano de voltagem (canal ABS) e um gráfico de *lissajous* (canal DIF) (ver detalhes no manual do Ectane 2®) claramente visíveis ao operador em um laptop externo. A Figura 1 mostra o aspecto geral do visor no computador durante o ensaio.

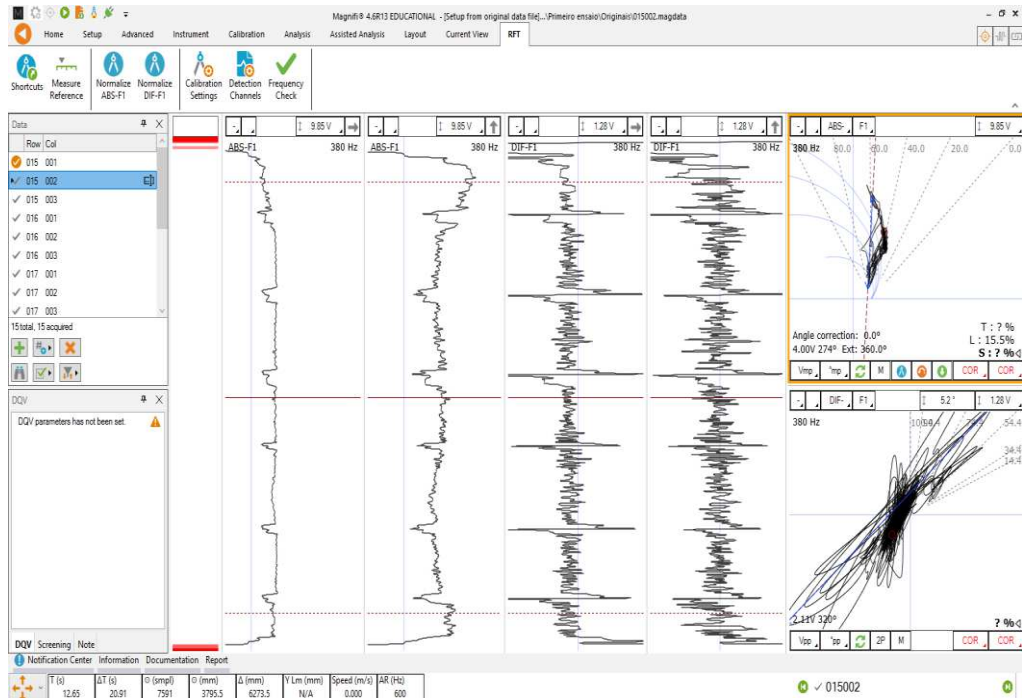


Figura 1 – Visão geral do sinal adquirido durante o ensaio RFT.

### 4.3. Armazenamento do sinal

O equipamento utilizado deve conter dispositivos de armazenamento do sinal digital no computador (ver detalhes no manual do Ectane 2® - software Magnifi® 4.6R13).

### 4.4. Identificações dos resultados da inspeção

Cada tubo do trocador de calor a ser examinado deve receber um código de identificação exclusivo. Os resultados do exame são representados em uma tabela, a qual contém os códigos de identificação do tubo e os resultados dos exames correspondentes. Os resultados incluirão códigos de defeitos com base nas indicações de defeitos mostradas pelo sinal do campo remoto ao examinar o tubo, conforme manual do software Magnifi® 4.6R13.

### 4.5. Sonda

A sonda selecionada para a inspeção deve ter o maior diâmetro possível para os tubos a serem examinados, deixando espaço para detritos, amassados, alterações no diâmetro do tubo e outras obstruções. A configuração da sonda deve ser selecionada de acordo com o tipo de falha que precisa ser detectado.

Para o ensaio em questão, a sonda RFT é rígida “*dual-drive*” e de dimensões: Diâmetro externo de 13 mm e comprimento total de 260 mm. As dimensões desta sonda são indicadas para a realização de ensaios em tubos de aço carbono (BWG 13) de espessura 2,41 mm, diâmetro externo de 19,05 mm e comprimento de 6.000 mm.

#### **4.6. Tracionador Da Sonda**

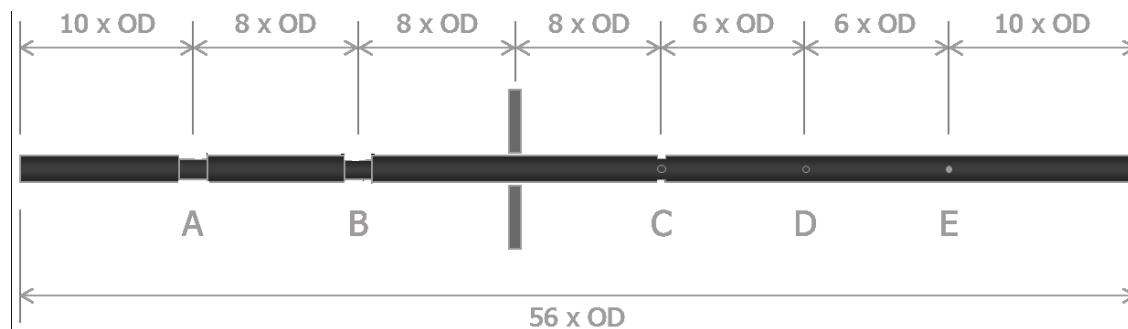
Para manter constante a velocidade da sonda dentro do tubo durante o ensaio é recomendada a utilização de um equipamento que tracione a sonda a uma velocidade adequada e constante.

### **5. PADRÃO DE REFERÊNCIA**

O objetivo de medir um tubo padrão de referência antes do exame é estabelecer um modo de operação para que o equipamento funcione de maneira eficaz. A finalidade é obter as configurações do equipamento (frequência de excitação e de aquisição, ganhos, faixa de fase e origem da fase e outros) de forma adequada para o ensaio.

Podem ser utilizados dois padrões de referência para o exame: o padrão de referência do sistema RFT (conforme descrito na norma ASTM E 2096) e um padrão de caracterização. Os padrões de referência devem ter as mesmas dimensões nominais, tipo de material e grau classe dos tubos a serem examinados. Não havendo um padrão de tubo idêntico aos tubos a serem examinados, recomenda-se uma demonstração da equivalência do exame. As diferenças permitidas nas variações de materiais e dimensionais são especificadas na norma ASTM E 2096.

Um tubo padrão de referência de uso geral é exibido na Figura 2. Nesse tubo, a placa de suporte e as ranhuras externas são usadas para a calibração do canal absoluto, enquanto os orifícios inferiores planos são usados para a calibração do canal diferencial. A placa de suporte usada para este tubo deve ter a mesma espessura da placa presente no trocador a ser examinado.



Sendo:

OD – Diâmetro externo do tubo;

A – Groove de 40% de profundidade da espessura e 10 mm de comprimento;

B – Groove de 60% de profundidade da espessura e 10 mm de comprimento;

C – 4 orifícios de fundo plano de 20% de profundidade da espessura (4 x FBH de 20%), de 5 mm diâmetro;

D – 1 orifício de fundo plano de 60% de profundidade da espessura, de 5 mm diâmetro;

E – 1 orifício passante de 5 mm de diâmetro.

Figura 2 – Recomendação de um padrão de referência de uso geral

**NOTA:** Como referência complementar deve ser usada uma placa de suporte (simulando as chicana do trocador) de aço carbono com uma espessura de 12,5 mm.

## 6. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

### 6.1. Preparação Do Instrumento

O instrumento e o software exigem que as seguintes etapas sejam executadas para preparar a inspeção (vide manual do equipamento e software utilizado neste procedimento), conforme equipamento citado no item 1.

- Iniciar o instrumento e o software
- Criar uma configuração ou carregar uma existente.
- Definir o diretório de trabalho (onde os dados e a configuração serão armazenados no computador).

### 6.2. Determinar A Frequência De Operação

Deve-se usar o padrão de referência do sistema RFT para determinar a frequência operacional da inspeção. A frequência operacional ideal pode ser determinada observando diferentes pontos de referência, como:

- A diferença de ângulo de fase entre duas discontinuidades. Uma configuração recomendada é definir a frequência para obter cerca de 20 graus de separação

angular entre duas descontinuidades de 20% de diferença (por exemplo, ranhura OD de 40% e 60%).

- A diferença de ângulo entre o furo passante (*hole*) e um 4 x FBH de 20% deve ser de 60 graus  $\pm$  10 graus. A Eddyfi recomenda que esse ângulo fique em 65 graus. Uma configuração recomendada é girar o furo a 90 ° e medir 4 x FBH de 20%, sendo que neste caso o ângulo deve ser em torno de 155°.

### **6.3. Calibrar O Canal Absoluto E Diferencial**

Esta etapa pode variar dependendo do instrumento e do software de aquisição e seu objetivo é ajustar o sinal do canal absoluto e diferencial, de maneira a facilitar a análise. Diferentes calibrações são possíveis, mas a seguinte é amplamente utilizada pela maioria dos inspetores de RFT:

- Deve-se ajustar o ganho e a rotação do canal absoluto para que o sinal da placa de suporte seja de 1 volt e 0° no plano de impedância (Figura 3). Para instrumentos que usam a análise do plano de tensão, essa etapa de calibração é frequentemente automatizada, isto é, para este canal utiliza-se a calibração automática e manual.
- Deve-se ajustar o ganho e a rotação do canal diferencial (DIF) para obter o sinal do furo passante (*hole*) do padrão de referência em 1 volt e 90° no plano de impedância. A Figura 4 mostra o canal DIF calibrado.

O ensaio RFT convencional apresenta dificuldade de obter informações de descontinuidades próximas às chicanas, porém o software do equipamento Ectane 2® permite utilizar um canal adicional chamado de MIX; para isso a frequência de excitação do canal DIF deve ser diferente do canal ABS (Figura 5). A Figura 6 mostra a tela do software onde se utiliza o canal MIX entre os dois canais convencionais (ABS e DIF) configurado no canal DIF. Para os trocadores da Petrobrás é necessária esta configuração.

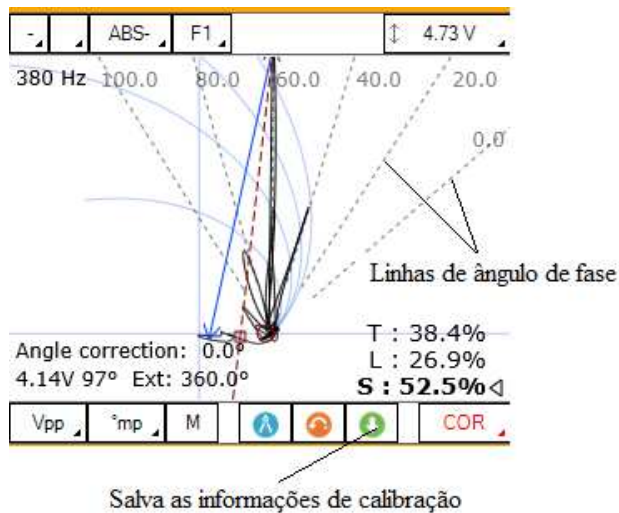


Figura 3 – Sinal no canal ABS após a calibração.

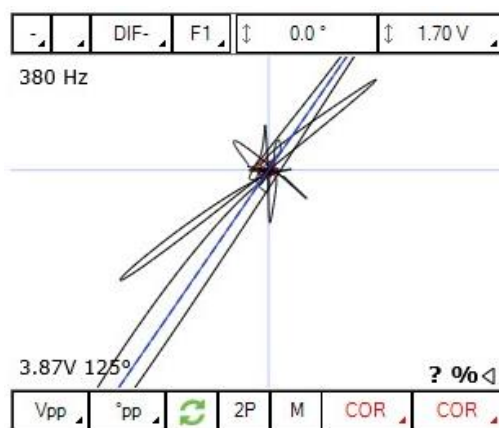


Figura 4 – Sinal do canal DIF após a calibração

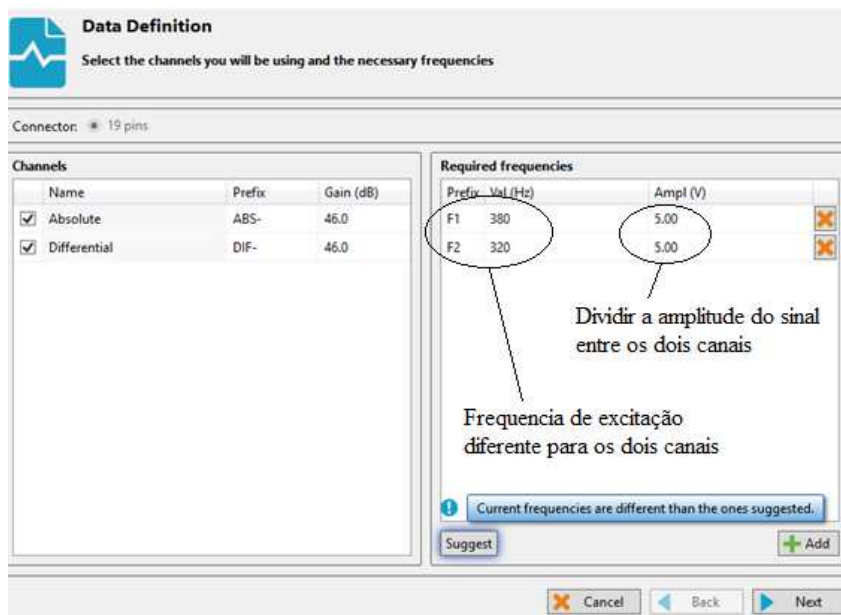


Figura 5 - Definição de dados (canais ABS e DIF)

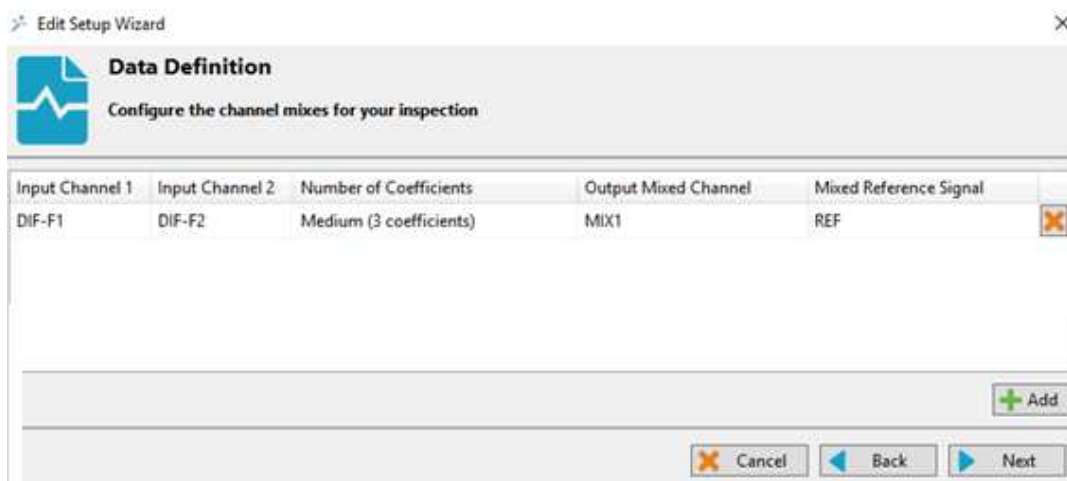


Figura 6 – Configuração do canal MIX no DIF

#### 6.4. Criar Curva De Dimensionamento De Defeitos

A curva de dimensionamento é usada para determinar a profundidade dos defeitos encontrados durante a inspeção. A prática comum é construir uma ou mais curvas de dimensionamento de fase para profundidade com base no sinal obtido do tubo padrão de referência. O detector absoluto é normalmente usado para caracterização de grandes defeitos, enquanto o detector diferencial é preferido para caracterização de pequenos defeitos. Deve-se seguir o manual de operação do fabricante do instrumento para criar a curva de dimensionamento apropriada para a inspeção.

#### 6.5. Determinar A Velocidade De Tração

A velocidade máxima de tração passível de utilização é afetada pela frequência operacional, pela taxa de aquisição e pelo filtro selecionado durante a calibração do instrumento. Para garantir uma boa sensibilidade durante a inspeção, é importante validar a velocidade de tração máxima permitida antes de iniciar a inspeção do componente. Para validar a velocidade de tração deve-se seguir os seguintes passos:

- Puxar o padrão de caracterização ou o padrão de referência do sistema RFT pelo tubo na velocidade desejada durante a inspeção.
- Verificar se o defeito do furo passante foi bem detectado e se a amplitude do sinal permanece próxima do valor definido durante a calibração (normalmente 1 volt). Se a amplitude for menor, deve-se reduzir a velocidade de tração até obter o valor adequado.



- Deve-se usar então a velocidade de tração definida para a inspeção do componente.

**NOTA:** Se a velocidade máxima de tração parecer muito baixa, deve-se considerar a alteração da configuração do filtro passa-baixa. Uma maior frequência de corte pode permitir maior velocidade de tração, mas o nível de ruído será maior.

### **6.6. Sensibilidade Mínima Exigida**

Deve-se usar o padrão de referência do sistema RFT para garantir que a configuração forneça o nível de sensibilidade mínimo necessário. Para fazer isso é preciso seguir os seguintes passos:

- Digitalizar o padrão de referência do sistema RFT na velocidade de tração determinada anteriormente.
- Verificar se todos os defeitos fornecem uma relação sinal/ruído superior a 3.
- Se esse nível de sensibilidade não for obtido para todos os defeitos, deve-se informar no relatório que uma sensibilidade mais baixa é esperada para algum tipo de descontinuidade.

### **6.7. Salvar Os Dados**

- Deve-se adquirir e registrar dados do padrão de referência do sistema RFT e salvar a configuração do instrumento.

## **7. INSPEÇÃO DO COMPONENTE**

### **7.1. Determinar Se É Necessária Compensação De Frequência**

Muitas vezes o comportamento do tubo a ser examinado é diferente do padrão de referência, mesmo que os tubos sejam fabricados com a mesma qualidade. Essa diferença é na maioria das vezes causada por variação na permeabilidade magnética do tubo ou na espessura nominal do tubo. Portanto, é importante validar a configuração criada com os padrões de referência para que seja aplicável ao componente a ser examinado. Para fazer isso, deve-se seguir os seguintes passos:

- Adquirir os dados de alguns tubos localizados em locais diferentes do feixe do trocador.

- Verificar se a atenuação criada pelos tubos é aquela criada pelos padrões de referência. Essa verificação pode ser feita monitorando a posição do ponto de operação no visor do plano de tensão ou a orientação da placa de suporte do tubo.
- Se o ponto de operação ou a placa de suporte do tubo girarem mais de 30°, recomenda-se uma compensação de frequência, isto é, aumentar ou diminuir a frequência de excitação das bobinas. Esta recomendação é detalhada no manual do equipamento da Eddyfi.
- Se a frequência tiver sido alterada, salvar a configuração com um nome diferente e adicionar essas informações ao relatório.

**NOTA:** As frequências usadas nos padrões de referência e nos tubos a serem examinados não devem diferir mais do que um fator de dois. Se o fator exceder esse valor, os padrões de referência devem ser considerados inadequados e substituídos por um que represente com mais precisão o material do tubo a ser examinado.

## **7.2. Exame Do Componente**

- Deve-se adquirir e registrar as leituras de todos os tubos a serem examinados.
- Os sinais são avaliados logo após o ensaio de cada tubo de acordo com o relacionamento de fase para profundidade, com base nos comparadores de referência.
- Durante a aquisição, alguns tubos podem ter um comportamento diferente porque não estão na mesma classe ou devido ao efeito do feixe. Nestes eventos, deve-se observar todos os tubos e refazer a inspeção desses casos no final com uma frequência compensada.

## **7.3. Verificação Do Sistema**

Em intervalos regulares deve-se realizar uma verificação do sistema usando o tubo padrão de referência do sistema RFT para demonstrar a sensibilidade do sistema e os parâmetros operacionais. Os dados deste teste devem ser salvos no diretório de trabalho.

Deve-se realizar uma verificação do sistema:

- Antes de iniciar o exame;

- Após qualquer ajuste de compensação de campo, conforme descrito na seção 7.1;
- No início e no final de cada turno de trabalho;
- Quando a função do equipamento estiver em dúvida;
- Após uma troca de pessoal;
- Após a alteração de qualquer componente essencial do sistema;
- No geral, no mínimo a cada quatro horas;
- Após uma interrupção de inspeção superior a 15 minutos;
- Quando surgir alguma dúvida sobre o bom funcionamento do equipamento, os tubos examinados desde a última verificação de calibração devem ser reexaminados.

Durante o exame, todas as alterações e os sinais adquiridos devem ser armazenados.

## **8. ANÁLISE DOS DADOS REGISTRADOS**

- Identifique o tubo com uma indicação conforme item 3.4.
- Usando os padrões de calibração de falhas, avalie as indicações relevantes de acordo com os requisitos do contratante
- As indicações relevantes normalmente devem ter uma relação sinal/ruído superior a 2.
- Quando possível, use a resposta absoluta e diferencial para validar a indicação.
- Antes de qualquer dimensionamento é importante verificar se a indicação está em uma região do tubo com as mesmas propriedades do padrão de referência. Essa verificação pode ser feita das seguintes maneiras:
  - Observar a posição do ponto nominal (no plano de tensão).
  - Observar a orientação da placa de suporte mais próxima (no diferencial).
  - Se o ponto nominal ou a orientação da placa de suporte do tubo tiver girado, uma correção deve ser feita antes de fazer a medição.
- Indicação localizada em pequena amplitude é melhor dimensionada com o canal diferencial.
- A indicação localizada de grande amplitude (mais que o dobro da tensão do furo passante no padrão de referência) deve ser medida com o canal absoluto.
  - A corrosão geral e a erosão devem ser medidas com o canal absoluto.

- Observe áreas de sensibilidade usando as indicações do padrão de referência
- Se desejar, examine as áreas selecionadas usando um método ou técnica complementar para obter mais informações.
- Observe as áreas em torno das chicanas usando o modo MIX no diferencial (vide manual do software do equipamento) com o objetivo de determinar as descontinuidades nessa região.

## **9 CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO**

Qualquer critério de aceitação ou rejeição deve ser especificado pelo cliente ou em conjunto com os requisitos do cliente.

## **10. RELATÓRIO FINAL**

Os itens listados abaixo podem ser incluídos no relatório do exame. Todas as informações abaixo devem ser arquivadas, independentemente de serem ou não necessárias no relatório.

- Proprietário, local, tipo e número de série do componente examinado.
- Tamanho, tipo, material e configuração dos tubos examinados.
- Sistema de numeração de tubos.
- Extensão do exame com, por exemplo, áreas de interesse, cobertura completa ou parcial, quais tubos e com que comprimento.
- Pessoal que realiza o exame e suas qualificações.
- Modelos, tipos e números de série dos componentes do sistema RFT utilizados, incluindo o comprimento da sonda e extensão do cabo.
- Uma lista completa de todas as configurações e parâmetros relevantes do instrumento usados, como frequências de operação, tensões de acionamento da sonda, ganhos, tipos de canais mistos ou processados e velocidade da sonda. A lista deve permitir que as configurações possam ser referenciadas para cada tubo individual examinado.
- Números de série de todos os padrões de tubo usados.
- Breve resumo de todas as técnicas usadas durante o exame.

- Uma lista de todas as regiões do trocador de calor ou tubos específicos em que foi obtida sensibilidade limitada.
- Informações específicas sobre técnicas e curvas de referência de profundidade usadas para dimensionar cada indicação.
- Resultados de exames complementares que influenciaram a interpretação e avaliação.

## ANEXO A

**TABELA A1 - RESULTADOS DO ENSAIO POR IRIS NO FEIXE TUBULAR 01-E-10B  
REALIZADO PELA EMPRESA QUALYEND**

Linha/ coluna	Posição (mm)	Espessura Remanes. (mm)	Perda de Espessura (%)	linha/ coluna	Posição (mm)	Espessura Remanes. (mm)	Perda de Espessura (%)
01/02	5000	1,4	33,65	25/15	5900	1,4	33,65
01/03	3000	1,1	47,87	25/16	5700	1,2	43,13
01/08	3800	1,1	47,87	25/17	5900	1,3	38,39
01/09	2800	0,9	57,35	25/18	100	1	52,61
01/10	2000	1,2	43,13	25/19	3000	1,3	38,39
01/11	3000	1,3	38,39	25/20	2000	1,3	38,39
01/12	4000	1,2	43,13	25/21	2000	1,3	38,39
01/13	3000	1,2	43,13	25/22	5900	1	52,61
01/14	3200	1,2	43,13	25/23	2900	1,3	38,39
03/13	500	1,1	47,87	25/25	2800	1,3	38,39
03/15	2000	1,3	38,39	25/28	200	1,3	38,39
04/14	3000	1,1	47,87	25/32	700	1,4	33,65
04/15	5800	0,9	57,35	26/02	5200	0,6	71,56
04/16	2500	1,1	47,87	26/03	4000	1,3	38,39
04/24	200	1,2	43,13	26/04	200	1,3	38,39
05/02	3000	0,9	57,35	26/05	4000	1,1	47,87
05/14	5900	1,1	47,87	26/06	3000	0,9	57,35
05/15	300	0,7	66,82	26/07	5900	1	52,61
05/16	2800	1,1	47,87	26/08	500	1,4	33,65
005/17	2000	1,1	47,87	26/10	5900	1	52,61
05/21	400	1	52,61	26/11	3000	0,6	71,56
05/25	1000	1,1	47,87	26/12	3000	1,2	43,13
06/04	3500	1,1	47,87	26/13	3000	0,8	62,09
06/06	5000	1,1	47,87	26/14	5000	1	52,61
06/08	2000	0,9	57,35	26/15	4000	1,3	38,39
06/15	2900	0,8	62,09	26/16	5900	1,2	43,13
06/16	200	1	52,61	26/17	5900	1,1	47,87
06/23	5800	1,1	47,87	26/18	5800	1,3	38,39
07/16	300	1,2	43,13	26/19	5900	1,1	47,87
07/20	3500	0,7	66,82	26/20	5900	1	52,61

09/26	2000	0,9	57,35	26/21	3000	1,1	47,87
10/01	400	1	52,61	26/24	3000	1	52,61
10/06	3000	0,7	66,82	26/25	4200	0,8	62,09
10/11	5800	1,2	43,13	26/26	1000	1,1	47,87
10/14	2800	0,7	66,82	26/27	5900	1,1	47,87
10/15	2000	0,8	62,09	26/28	800	1,3	38,39
10/19	400	1,2	43,13	26/29	2200	1	52,61
11/01	2500	1,3	38,39	26/30	300	1,3	38,39
11/02	5100	0	100,00	27/05	500	1,2	43,13
11/19	1500	1,1	47,87	27/06	2000	1,2	43,13
13/02	4000	1,2	43,13	27/07	3700	0,8	62,09
13/06	3000	1,3	38,39	27/09	5000	1,1	47,87
13/14	300	1,2	43,13	27/10	1000	1,3	38,39
13/20	5900	0,9	57,35	27/11	3000	1,3	38,39
13/27	500	1,2	43,13	27/12	600	1	52,61
13/29	5400	1	52,61	27/13	2000	0,9	57,35
14/09	2400	1,1	47,87	27/14	2800	1,2	43,13
14/31	2500	1,1	47,87	27/16	2200	1,4	33,65
15/08	4000	1,3	38,39	27/17	5800	1,2	43,13
15/09	300	1,2	43,13	27/18	5700	1,2	43,13
15/18	500	0,8	62,09	27/20	3000	0,4	81,04
15/19	100	1,2	43,13	27/21	3700	0,9	57,35
15/20	200	1	52,61	27/29	4200	0,9	57,35
15/21	150	1,1	47,87	27/30	2500	1,1	47,87
15/24	200	1,1	47,87	028/05	4200	1,3	38,39
15/25	200	1,2	43,13	28/08	4100	1,1	47,87
16/01	5000	0,9	57,35	28/09	4200	0,9	57,35
16/02	400	1,3	38,39	28/10	2000	1	52,61
16/03	1000	1,2	43,13	28/11	400	1,2	43,13
16/05	500	1,3	38,39	28/12	3000	1	52,61
16/06	1400	1	52,61	28/13	500	1,3	38,39
16/07	5000	1	52,61	28/14	4000	1,3	38,39
16/08	100	1	52,61	28/15	3000	1,2	43,13
16/10	200	1	52,61	28/16	4000	1,2	43,13
16/11	300	1	52,61	28/17	4700	0,8	62,09
16/15	200	1,3	38,39	28/18	4000	1,3	38,39
16/17	100	0,8	62,09	28/19	3800	1,1	47,87
16/21	200	1,1	47,87	28/20	5000	1,3	38,39
16/25	5800	1	52,61	28/21	1500	1,1	47,87

16/28	5900	0,7	66,82	28/25	1800	1,3	38,39
16/32	500	1,1	47,87	28/27	3000	1,1	47,87
16/36	3000	1	52,61	29/02	300	1	52,61
16/38	5100	0	100,00	29/03	3000	1	52,61
17/02	3400	0,9	57,35	29/04	4000	1,2	43,13
17/12	2000	1	52,61	29/05	200	1,2	43,13
17/14	5800	0,9	57,35	29/06	1000	1,3	38,39
17/15	5900	0,8	62,09	29/07	3000	0,9	57,35
17/17	400	1,2	43,13	29/08	500	1,1	47,87
17/18	5900	0,9	57,35	29/09	4000	0,7	66,82
17/20	5900	1	52,61	29/10	5800	1	52,61
17/21	200	1,3	38,39	29/12	1200	0,9	57,35
17/24	5900	1,1	47,87	29/13	5900	0,9	57,35
17/27	5900	0,9	57,35	29/14	3000	0,6	71,56
17/28	5900	0,8	62,09	29/15	1500	1	52,61
17/31	300	1,2	43,13	29/16	5900	1,2	43,13
18/03	400	1,1	47,87	29/17	5900	1,1	47,87
18/05	2000	1,2	43,13	29/19	2000	1,1	47,87
18/11	300	0,8	62,09	29/21	2500	1,3	38,39
18/17	1200	1,1	47,87	29/23	300	1,3	38,39
18/18	5800	1,2	43,13	29/24	1800	1,2	43,13
18/21	500	1,3	38,39	29/25	500	1,3	38,39
18/23	5800	1,1	47,87	30/03	600	0,9	57,35
18/24	5800	0,7	66,82	30/05	800	1,2	43,13
18/25	5900	1,1	47,87	30/06	3000	1,2	43,13
18/27	5900	1	52,61	30/07	2800	1,3	38,39
19/15	3000	1,1	47,87	30/08	5900	1,1	47,87
19/19	3000	1,3	38,39	30/09	1000	0,9	57,35
19/25	2700	0,9	57,35	30/10	2000	0,8	62,09
20/09	2500	0,5	76,30	30/11	1100	0,6	71,56
22/03	3000	1	52,61	30/14	1300	0,6	71,56
22/22	5900	0,8	62,09	30/15	1500	1,1	47,87
22/23	400	1,3	38,39	30/16	3000	1	52,61
23/15	4000	1,3	38,39	30/17	2800	1	52,61
24/03	500	1,3	38,39	30/18	2000	0,9	57,35
24/06	3500	1,2	43,13	30/19	1300	1,3	38,39
24/08	1000	1,3	38,39	30/22	1000	1,1	47,87
24/09	3000	0,9	57,35	31/02	1100	1	52,61
24/10	800	1,2	43,13	31/03	1000	1	52,61



24/11	2000	1,2	43,13	31/04	4000	0,9	57,35
24/12	1900	1,2	43,13	31/05	2500	1,3	38,39
24/13	5800	1,2	43,13	31/06	2900	1,4	33,65
24/14	2000	1,1	47,87	31/07	800	1,3	38,39
24/15	4000	1,2	43,13	31/08	1600	1,2	43,13
24/16	2500	0,8	62,09	31/09	1800	1,1	47,87
24/19	5900	1,1	47,87	31/10	2400	1,2	43,13
24/20	4700	1,1	47,87	31/11	2300	1,4	33,65
24/21	3000	1,2	43,13	31/12	4000	1	52,61
24/22	5900	1,3	38,39	31/14	1400	1	52,61
24/23	5000	0,8	62,09	31/15	4200	1,1	47,87
24/26	3000	1,2	43,13	31/16	1200	0,9	57,35
24/28	800	1,3	38,39	31/17	800	1,3	38,39
24/29	3000	1,2	43,13	31/19	1400	1	52,61
24/31	500	1,2	43,13	31/20	400	1,4	33,65
24/32	2500	1,3	38,39	31/22	1200	1,1	47,87
25/02	400	1	52,61	32/04	1300	1,4	33,65
25/03	4000	1	52,61	32/05	2300	1,4	33,65
25/04	2000	1,2	43,13	32/06	1000	1,5	28,91
25/07	5000	1,2	43,13	32/08	1300	1,3	38,39
25/08	5900	1,2	43,13	32/09	1400	1,3	38,39
25/09	5800	1	52,61	32/10	2300	1,4	33,65
25/10	5900	1	52,61	32/11	2000	0,9	57,35
25/11	5900	0,7	66,82	32/12	1300	1,3	38,39
25/12	1600	0,7	66,82	33/01	1000	0,8	62,09
25/13	5900	1,1	47,87	33/02	2700	0,7	66,82
25/14	4000	1,4	33,65	33/03	2500	1	52,61

**TABELA A2 - RESULTADOS DO ENSAIO POR IRIS NO FEIXE TUBULAR 01-E-10F  
REALIZADO PELA EMPRESA QUALYEND**

<b>Linha/ Coluna</b>	<b>Posição (mm)</b>	<b>Espessura Remanes. (mm)</b>	<b>Perda de Espessura (%)</b>	<b>Linha/ Coluna</b>	<b>Posição (mm)</b>	<b>Espessura Remanes. (mm)</b>	<b>Perda de Espessura (%)</b>
02/03	4000	1,1	47,87	21/32	5000	0,8	62,09
02/08	700	1,3	38,39	21/33	5000	1	52,61
02/10	3700	1	52,61	21/34	4000	0,8	62,09
02/13	2000	1,3	38,39	21/36	3200	1,3	38,39
03/07	6000	1,3	38,39	22/02	3400	1,4	33,65
03/08	5500	1,3	38,39	22/03	2800	1	52,61
03/09	4700	1,3	38,39	22/04	2500	1,1	47,87
03/10	3700	0,9	57,35	22/05	500	1,3	38,39
03/11	4000	1,3	38,39	22/06	3500	0,8	62,09
03/12	5200	1,2	43,13	22/07	2200	1,3	38,39
03/13	800	1,2	43,13	22/08	2800	0,8	62,09
03/14	5000	1,1	47,87	22/10	3200	1,4	33,65
03/15	4200	1,4	33,65	22/11	5000	1,2	43,13
03/17	2000	1,1	47,87	22/12	4700	1,2	43,13
03/19	5300	1,4	33,65	22/13	1600	1,2	43,13
03/22	2800	1,4	33,65	22/14	2400	1,2	43,13
04/02	3000	1,4	33,65	22/15	2300	1,4	33,65
04/03	4200	1,2	43,13	22/16	4200	1,2	43,13
04/04	2800	1,3	38,39	22/17	2000	1	52,61
04/05	5000	1,5	28,91	22/18	4500	1,2	43,13
04/06	4700	1,5	28,91	22/19	5000	1,2	43,13
04/07	2500	1,3	38,39	22/20	150	1	52,61
04/08	3000	1,4	33,65	22/21	3500	1,1	47,87
04/12	4000	1,2	43,13	22/22	3200	1,2	43,13
04/13	3800	1,1	47,87	22/23	1000	1	52,61
04/14	4200	1,4	33,65	22/24	5800	1	52,61
04/15	3200	1,4	33,65	22/25	2500	1,1	47,87
04/16	1000	1,1	47,87	22/26	3000	0,8	62,09
04/17	4200	1,4	33,65	22/27	3000	0,9	57,35
04/18	2500	1,3	38,39	22/28	2000	1,1	47,87
04/19	2800	1,5	28,91	22/29	1800	1,2	43,13
04/20	4300	1,1	47,87	22/30	3000	1,2	43,13
04/21	5200	1,2	43,13	22/31	5200	1	52,61

04/26	3000	1,5	28,91	22/32	5300	1,2	43,13
05/04	3500	1,3	38,39	22/33	4000	1,1	47,87
05/05	5500	1,4	33,65	22/34	5500	0,8	62,09
05/06	2800	1,3	38,39	22/35	4000	1,2	43,13
05/07	1500	1,1	47,87	23/03	4000	1,3	38,39
05/08	2500	1,1	47,87	23/04	2800	1,4	33,65
05/09	5500	1	52,61	23/05	5000	1,3	38,39
05/10	5700	1,6	24,17	23/07	3200	1,3	38,39
05/11	5200	1	52,61	23/08	2800	1,2	43,13
05/14	3000	1,4	33,65	23/09	3000	1,3	38,39
06/03	700	1,4	33,65	23/11	2000	1,3	38,39
06/04	3000	1,1	47,87	23/14	5400	1,2	43,13
06/05	3200	1,1	47,87	23/15	3700	1	52,61
06/06	4500	1,4	33,65	23/16	4600	1,2	43,13
06/07	5000	1,2	43,13	23/17	4000	1	52,61
06/08	5100	1,4	33,65	23/18	5300	1,1	47,87
06/09	4700	1,5	28,91	23/19	1000	1	52,61
06/10	2900	1,3	38,39	23/20	2000	1,1	47,87
06/12	2000	0,8	62,09	23/21	3700	1,3	38,39
06/13	3000	1,4	33,65	23/22	2500	1,1	47,87
06/15	1800	1,4	33,65	23/23	3000	1,1	47,87
06/16	2500	1,1	47,87	23/24	3000	0,9	57,35
06/17	1900	1,1	47,87	23/25	5600	1,2	43,13
06/23	1800	1,4	33,65	23/26	4000	1,2	43,13
06/24	2300	1,4	33,65	23/27	2700	1,2	43,13
06/25	1500	1,3	38,39	23/28	5800	0,9	57,35
06/26	2900	1,5	28,91	23/29	4000	1,2	43,13
07/04	2800	1	52,61	23/30	3000	1,3	38,39
07/09	3000	1,4	33,65	23/31	4200	1	52,61
07/10	1000	0,8	62,09	23/33	2700	0,9	57,35
07/11	1500	1,3	38,39	23/34	3200	1,2	43,13
07/12	2000	0,9	57,35	23/35	3400	1,3	38,39
07/13	2300	1,4	33,65	23/36	2000	1,2	43,13
07/14	2900	1,5	28,91	24/03	1500	1,3	38,39
07/15	1000	1,5	28,91	24/04	2700	1,2	43,13
07/16	2500	1,2	43,13	24/05	2500	1,3	38,39
07/17	3000	1,4	33,65	24/06	500	0,9	57,35
07/18	4200	0,9	57,35	24/07	1500	1,1	47,87
07/19	200	1,3	38,39	24/08	1200	1,1	47,87

07/21	1300	1,4	33,65	24/09	2000	1,2	43,13
07/24	2900	1,4	33,65	24/10	3000	1,2	43,13
07/25	500	0,7	66,82	24/11	2700	1,1	47,87
07/26	3000	1,5	28,91	24/12	1700	0,9	57,35
08/05	2100	1,1	47,87	24/13	5300	1	52,61
08/08	3100	1,4	33,65	24/14	5700	0,9	57,35
08/12	1000	1,4	33,65	24/15	1500	1	52,61
08/15	4100	1,1	47,87	24/16	1800	1,3	38,39
08/16	1200	1,4	33,65	24/17	5500	0,8	62,09
08/22	1400	1,3	38,39	24/18	5000	0,9	57,35
08/23	5200	1,2	43,13	24/19	4700	1	52,61
08/24	3500	1,3	38,39	24/20	1000	1	52,61
08/25	4800	1,3	38,39	24/21	500	0,7	66,82
08/26	2900	1,3	38,39	24/22	4700	1,2	43,13
08/28	1900	1,3	38,39	24/23	5000	1,3	38,39
09/03	5800	1,4	33,65	24/24	4500	1	52,61
09/06	800	1,4	33,65	24/25	3800	1,1	47,87
09/07	3000	1,3	38,39	24/26	2000	1,1	47,87
09/08	1500	1	52,61	24/27	3500	0,7	66,82
09/10	2700	1,4	33,65	24/28	3000	1,2	43,13
09/11	3000	1,4	33,65	24/29	5700	1,2	43,13
09/12	2900	1,4	33,65	24/30	2000	1,3	38,39
09/13	1000	1,1	47,87	24/31	4800	1,2	43,13
09/14	1300	1,5	28,91	24/32	3500	1,3	38,39
09/15	3600	1,2	43,13	24/33	4000	1,3	38,39
09/16	4200	1,4	33,65	24/34	5900	1,3	38,39
09/17	5000	1,3	38,39	25/03	1500	0,5	76,30
09/22	5000	0,8	62,09	25/06	5900	1,3	38,39
09/23	800	1,1	47,87	25/08	5600	1,2	43,13
09/24	500	1,3	38,39	25/15	2700	1,1	47,87
09/27	1000	1,4	33,65	25/16	1300	1	52,61
09/30	300	1,4	33,65	25/17	1200	1,1	47,87
10/02	700	1,5	28,91	25/18	1400	1	52,61
10/03	5200	1,3	38,39	25/19	4000	1,3	38,39
10/04	1000	1,5	28,91	25/20	4000	1,2	43,13
10/06	2000	1,4	33,65	25/21	500	1	52,61
10/07	4000	1,4	33,65	25/22	1400	1,3	38,39
10/10	5800	0,8	62,09	25/23	3000	1,3	38,39
10/11	5300	1,2	43,13	25/24	600	0,6	71,56

10/12	300	0,8	62,09	25/25	800	1,2	43,13
10/16	4500	0,8	62,09	25/26	4500	1,2	43,13
10/17	5200	1,1	47,87	25/27	4000	1,2	43,13
10/19	1000	1,3	38,39	25/29	1000	0,9	57,35
10/21	800	1,2	43,13	25/30	3000	1,3	38,39
10/27	2500	1,2	43,13	25/31	4200	1,1	47,87
10/28	2000	0,8	62,09	25/32	2500	1,1	47,87
10/30	4000	1,4	33,65	25/33	1200	0,6	71,56
11/01	5700	1,1	47,87	25/34	2500	1	52,61
11/08	4200	1,4	33,65	26/04	2200	1	52,61
11/11	2800	1,3	38,39	26/06	3500	1,1	47,87
11/12	5600	1	52,61	26/07	2000	0,8	62,09
11/15	2800	1,4	33,65	26/08	2800	1,2	43,13
11/18	2700	1	52,61	26/09	5000	1,3	38,39
11/22	5700	0,9	57,35	26/10	5700	1,1	47,87
11/25	1200	1,4	33,65	26/11	2500	1,3	38,39
11/27	500	1,4	33,65	26/12	3000	0,9	57,35
11/31	3000	1	52,61	26/13	3200	1,4	33,65
12/02	2500	0,9	57,35	26/14	3200	1,3	38,39
12/04	600	1,3	38,39	26/15	1500	1,1	47,87
12/05	800	1,3	38,39	26/17	5000	0,9	57,35
12/07	1200	1,3	38,39	26/18	3200	1,2	43,13
12/08	1500	1,4	33,65	26/19	2800	0,9	57,35
12/09	2500	1,3	38,39	26/20	1200	0,8	62,09
12/18	1200	0,9	57,35	26/21	1500	0,9	57,35
12/19	3000	1,3	38,39	26/22	1600	1,2	43,13
12/21	600	1,4	33,65	26/23	3000	1,4	33,65
12/24	2300	0,9	57,35	26/24	2400	1,1	47,87
12/25	1700	1	52,61	26/25	2300	1,4	33,65
12/27	1200	1,3	38,39	26/26	1800	1,3	38,39
13/07	1700	1	52,61	26/27	2000	0,9	57,35
13/11	2000	1,4	33,65	26/28	1500	1	52,61
13/12	600	1,1	47,87	26/29	600	1,2	43,13
13/13	3600	1,3	38,39	26/30	5000	1,2	43,13
13/15	2800	1,3	38,39	26/31	3000	0,9	57,35
13/24	400	1,3	38,39	26/32	2800	1,2	43,13
13/28	5200	0,9	57,35	26/33	4200	0,8	62,09
13/32	2000	1	52,61	27/03	2500	1	52,61
13/33	1800	1,4	33,65	27/04	1800	1,2	43,13

14/08	1300	1,3	38,39	27/05	1000	1	52,61
14/09	600	1,5	28,91	27/06	3000	1,2	43,13
14/11	5000	1	52,61	27/07	1800	1	52,61
14/16	2500	1,4	33,65	27/08	5000	1	52,61
14/23	5300	1,1	47,87	27/09	1200	0,9	57,35
14/26	1000	1,3	38,39	27/10	2000	1,2	43,13
14/27	5300	0,8	62,09	27/11	2000	1,1	47,87
14/29	2100	1	52,61	27/12	400	1,3	38,39
14/30	2300	1,3	38,39	27/13	1800	1,1	47,87
14/31	2100	1,2	43,13	27/14	5000	0,8	62,09
15/05	1300	0,9	57,35	27/15	3000	1,1	47,87
15/08	400	1,4	33,65	27/16	5500	1	52,61
15/11	5000	1,2	43,13	27/17	5000	1,1	47,87
15/17	600	1,3	38,39	27/18	3500	1,1	47,87
15/20	200	1,2	43,13	27/19	5000	1	52,61
15/26	5000	0,8	62,09	27/20	500	1	52,61
15/28	3800	1	52,61	27/21	1000	1,1	47,87
15/30	3200	1,3	38,39	27/22	1300	0,8	62,09
16/09	1800	1,4	33,65	27/23	3500	1,1	47,87
16/26	5000	1,1	47,87	27/24	3200	0,8	62,09
16/29	5000	1,1	47,87	27/25	2500	1,3	38,39
16/31	4200	1,5	28,91	27/26	4500	1,1	47,87
16/33	1300	1,2	43,13	27/27	5000	0,8	62,09
16/34	300	1,2	43,13	27/28	2500	0,8	62,09
17/12	500	1,5	28,91	27/29	5800	0,9	57,35
17/26	1400	1,4	33,65	27/30	4200	1,2	43,13
17/28	1200	1,3	38,39	27/31	5000	1,3	38,39
17/33	5000	1,2	43,13	27/32	5000	0,9	57,35
17/34	700	1,3	38,39	28/03	2500	1,2	43,13
18/02	1500	1,5	28,91	28/04	500	1,2	43,13
18/03	3200	0,8	62,09	28/06	4500	1,1	47,87
18/04	3300	0,9	57,35	28/07	3500	1,2	43,13
18/05	3000	1,1	47,87	28/08	2800	1,2	43,13
18/06	2500	1,4	33,65	28/09	2000	1	52,61
18/07	2000	0,9	57,35	28/10	5000	1,2	43,13
18/08	1000	1,1	47,87	28/11	4500	0,6	71,56
18/09	3000	0,6	71,56	28/12	5600	1,1	47,87
18/10	5300	1,2	43,13	28/13	5800	1,3	38,39
18/11	4200	1	52,61	28/14	1000	0,9	57,35

18/12	4000	1,2	43,13	28/15	4800	1,2	43,13
18/13	2800	1,3	38,39	28/16	4900	0,8	62,09
18/14	2300	1,2	43,13	28/17	2900	1,3	38,39
18/15	2000	1,3	38,39	28/18	3500	1	52,61
18/16	1300	1,3	38,39	28/19	2000	0,8	62,09
18/17	1400	1,3	38,39	28/20	2000	1	52,61
18/19	300	0,9	57,35	28/21	1000	1,2	43,13
18/20	700	1	52,61	28/22	500	0,5	76,30
18/21	1000	1,4	33,65	28/23	800	1	52,61
18/22	1000	1,2	43,13	28/24	5000	1,2	43,13
18/23	800	1,4	33,65	28/25	2000	1,2	43,13
18/24	3500	0,6	71,56	28/26	300	0,9	57,35
18/25	3600	1,4	33,65	28/27	4500	0,9	57,35
18/26	2700	1	52,61	28/28	1500	1,1	47,87
18/27	2900	0,9	57,35	28/29	2500	1,1	47,87
18/28	1800	1	52,61	29/03	2500	1,2	43,13
18/29	2800	1,1	47,87	29/04	1800	0,9	57,35
18/30	2300	1,1	47,87	29/05	3000	1,1	47,87
18/31	1700	0,8	62,09	29/07	5000	1,4	33,65
18/32	1800	1,3	38,39	29/08	4000	1,2	43,13
18/33	1300	0,8	62,09	29/09	5000	0,7	66,82
18/36	1500	1,3	38,39	29/10	2000	0,9	57,35
18/38	4700	0,4	81,04	29/11	3000	0,7	66,82
19/02	2500	1	52,61	29/12	5500	0,9	57,35
19/03	5200	1,3	38,39	29/13	5800	1,2	43,13
19/04	2800	1	52,61	29/14	4600	0,9	57,35
19/05	1100	0,9	57,35	29/15	5500	0,8	62,09
19/06	5000	1,2	43,13	29/16	1800	1,2	43,13
19/07	3000	0,6	71,56	29/17	5000	0,8	62,09
19/08	2500	1,3	38,39	29/18	2000	1,1	47,87
19/09	2000	0,8	62,09	29/19	5000	0,7	66,82
19/10	1400	0,8	62,09	29/20	4000	0,9	57,35
19/11	2800	1	52,61	29/21	2800	1	52,61
19/12	2200	1,3	38,39	29/22	1000	0,8	62,09
19/14	3000	1,2	43,13	29/23	5200	1,2	43,13
19/15	1800	1,3	38,39	29/24	3500	0,8	62,09
19/16	3000	0,9	57,35	29/25	3000	1,3	38,39
19/17	3200	1	52,61	29/26	1000	1,3	38,39
19/18	1700	1,3	38,39	29/27	1000	1	52,61

19/19	4200	1,1	47,87	29/28	4900	0,7	66,82
19/20	5000	0,7	66,82	29/29	5000	1,2	43,13
19/21	2300	1,2	43,13	30/03	2500	1,3	38,39
19/22	700	0,7	66,82	30/04	2000	1,2	43,13
19/23	5800	1,3	38,39	30/05	5900	0,8	62,09
19/24	3900	1,2	43,13	30/06	4000	1	52,61
19/25	500	1,3	38,39	30/07	4300	1,1	47,87
19/26	3500	0,7	66,82	30/08	400	1	52,61
19/27	2900	1	52,61	30/09	2900	1	52,61
19/28	500	0,8	62,09	30/10	4500	1,1	47,87
19/30	2500	0,9	57,35	30/11	600	0,8	62,09
19/31	2200	1,3	38,39	30/12	1200	1	52,61
19/32	2000	1,3	38,39	30/13	600	1,1	47,87
19/33	2800	0,9	57,35	30/14	2000	1,2	43,13
19/34	1700	0,8	62,09	30/15	4000	1,2	43,13
19/36	500	0,9	57,35	30/16	1000	0,9	57,35
19/37	3200	0,6	71,56	30/17	1500	1	52,61
19/38	1000	1,3	38,39	30/18	500	1	52,61
20/02	2500	1	52,61	30/19	600	0,6	71,56
20/03	5000	1	52,61	30/20	2700	0,9	57,35
20/04	1500	1	52,61	30/21	1000	1	52,61
20/05	1500	0,7	66,82	30/22	500	1,1	47,87
20/06	1900	0,9	57,35	30/23	5900	1	52,61
20/07	1200	1	52,61	30/24	1200	1,1	47,87
20/08	3000	1,1	47,87	30/25	4700	0,9	57,35
20/09	2000	1,2	43,13	30/26	2800	1	52,61
20/10	1800	1	52,61	30/27	3500	1	52,61
20/11	1400	1,2	43,13	31/03	4000	1,1	47,87
20/13	800	1,1	47,87	31/04	1000	1,2	43,13
20/14	2300	0,8	62,09	31/05	5500	1,2	43,13
20/15	2700	1	52,61	31/06	4500	0,8	62,09
20/16	1400	1,1	47,87	31/07	1500	1	52,61
20/17	900	1,2	43,13	31/08	1000	1,1	47,87
20/18	5000	1,1	47,87	31/09	4000	1,3	38,39
20/19	5000	1	52,61	31/10	2000	0,8	62,09
20/20	300	1	52,61	31/11	1000	1,1	47,87
20/21	2000	1,1	47,87	31/12	4200	0,9	57,35
20/22	3000	1,3	38,39	31/13	1800	1,2	43,13
20/23	1000	1,1	47,87	31/14	4000	1,1	47,87



20/24	3900	1,1	47,87	31/15	3200	1,1	47,87
20/25	4000	1,3	38,39	31/16	1500	1,3	38,39
20/26	2800	0,7	66,82	31/17	5200	1,1	47,87
20/27	3100	1	52,61	31/18	4700	1,2	43,13
20/28	2600	0,8	62,09	31/19	400	0,7	66,82
20/29	2300	1	52,61	31/20	4300	1	52,61
20/30	5000	1	52,61	31/21	2000	0,8	62,09
20/31	5200	0,5	76,30	31/22	4500	0,9	57,35
20/32	2300	0,8	62,09	31/23	2000	0,8	62,09
20/33	3400	1,2	43,13	31/24	4200	1,1	47,87
20/34	5700	1	52,61	31/25	4500	1,2	43,13
20/35	4100	1	52,61	32/02	5000	0,8	62,09
20/36	4300	1,2	43,13	32/03	4000	0,9	57,35
20/37	5000	1,6	24,17	32/04	3000	0,7	66,82
21/01	3700	0,6	71,56	32/05	3000	0,9	57,35
21/02	1500	1,2	43,13	32/06	1500	1,1	47,87
21/03	1000	1,2	43,13	32/07	5800	1,2	43,13
21/04	3000	1	52,61	32/08	3500	1	52,61
21/05	2500	0,9	57,35	32/09	2200	1,1	47,87
21/06	4000	1,1	47,87	32/10	2000	1,2	43,13
21/07	3500	0,7	66,82	32/12	4000	0,8	62,09
21/08	4500	0,9	57,35	32/13	5000	0,6	71,56
21/09	2500	1,2	43,13	32/14	2500	0,9	57,35
21/10	3000	0,9	57,35	32/15	3200	0,9	57,35
21/11	300	1,2	43,13	32/16	5000	1,2	43,13
21/12	4000	1	52,61	32/17	2500	0,9	57,35
21/13	3000	1,2	43,13	32/18	3200	0,6	71,56
21/14	1600	1	52,61	32/19	4500	0,9	57,35
21/15	2000	1,2	43,13	32/20	4200	1,1	47,87
21/16	4300	1	52,61	32/21	4000	1	52,61
21/17	3000	1,1	47,87	32/22	3200	1,1	47,87
21/18	2800	1	52,61	32/23	2500	0,8	62,09
21/19	4000	1,2	43,13	33/03	5000	1	52,61
21/20	3500	1,1	47,87	33/04	5200	1,2	43,13
21/21	2100	1,2	43,13	33/05	500	1,2	43,13
21/22	2300	1,3	38,39	33/06	1000	1,1	47,87
21/23	2200	1,2	43,13	33/07	800	1,1	47,87
21/24	3000	0,8	62,09	33/08	5000	1,1	47,87
21/25	2900	1	52,61	33/09	5800	1	52,61

21/26	4000	1,1	47,87	33/10	5500	0,7	66,82
21/27	3500	1,2	43,13	33/11	3000	0,8	62,09
21/28	5200	1,3	38,39	33/12	2400	1,3	38,39
21/29	1500	1	52,61	33/13	1200	1,1	47,87
21/30	5800	1,2	43,13	33/14	2000	0,6	71,56
21/31	5200	1	52,61	33/15	3000	1,2	43,13