



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

## **AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS CONVENCIONAL E SLOFEC PARA DETECÇÃO DE TRINCAS EM AÇO HP.**

Guilherme Brandt Danhoni Moraes

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

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Rio de Janeiro

Agosto 2016


**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS CONVENCIONAL  
E SLOFEC PARA DETECÇÃO DE TRINCAS EM AÇO HP.**


Guilherme Brandt Danhoni Moraes

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALURGISTA.

Examinado por:

  
Profª Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc

  
Profº Luiz Henrique de Almeida, D.Sc

  
Clara Johanna Pacheco, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO de 2016

Moraes, Guilherme Brandt Danhoni

Avaliação do método de correntes parasitas convencional e SLOFEC para detecção de trincas em aço HP./ Guilherme Brandt Danhoni Moraes – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

xii, 44 p.: il.: 29,7 cm

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2016

Referências bibliográficas: p. 41- 43

1. Correntes parasitas. 2. SLOFEC. 3. Aço HP.

I. Pereira, Gabriela Ribeiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Metalúrgica. III. Avaliação do método de correntes parasitas convencional e SLOFEC para detecção de trincas em aço HP.

*“Algum dia, em qualquer parte, em qualquer  
lugar, indefectivelmente, encontrar-te-ás a ti  
mesmo e essa, só essa, pode ser a mais feliz  
ou a mais amarga das tuas horas.”*

*Pablo Neruda*

Dedico este trabalho aos meus pais, Gilson e  
Cristina, e ao meu irmão, Gilsinho.

## Agradecimentos

A Deus, não somente por Sua infinita bondade, mas por haver criado esse mundo maravilhoso e confiar a nós, homens e mulheres, a incrível tarefa de desvendar os mistérios da ciência, tão bem arquitetados por Ele.

Aos meus pais e meu irmão, por tudo, absolutamente tudo. Pelos mais simples ensinamentos, por serem meus guias pelos caminhos da vida, minhas âncoras que nunca me deixaram à deriva, ventos que me levaram às mais belas praias e porto seguro para os momentos de tormenta. Jamais serei capaz de retribuir tudo que fizeram e fazem por mim.

Aos meus avós maternos, Terezinha e Nelson, que, muito embora já não estejam nesse mundo, foram responsáveis por algumas das mais belas lembranças que guardo com muito carinho no meu coração. Tenho certeza que a ausência física não os impediu de me acompanharem nessa jornada até agora, assim como nunca haverá de impedir.

Aos meus avós paternos, Rosa e Décio, por todas as orações, conselhos e preocupação. O amor e carinho que sinto a cada ligação, encontro ou mensagem recebida sempre me alegam e ajudam a seguir em frente em qualquer que seja o objetivo.

Aos meus tios, Fátima e Aurélio, por serem muito mais que tios. Durante absolutamente todos os momentos, desde os mais felizes até os mais tristes, estiveram sempre ao meu lado, como amigos e conselheiros. Me sinto abençoado e honrado por ter segundos pais, que cuidaram e cuidam de mim como um filho.

À toda minha família, que nunca falhou em estar presente e me proporcionar boas risadas e lembranças felizes. Pelo apoio em minhas decisões e pela compreensão quando me ausentei por qualquer que fosse o motivo.

Aos meus amigos e irmãos de sempre, Júlio e Henrique, bem como seus pais, Regina e Toninho, por serem tão especiais comigo em todas as etapas dessa jornada. Também ao amigo Henrique Sant'Anna, por ter se tornado em tão pouco tempo um outro irmão que o destino colocou no meu caminho, bem como como à sua mãe, Rita, que foi um exemplo de bondade e ternura que sempre irei guardar dentro de mim. Aos amigos Yasser e Bouhid por também fazerem parte dessa caminhada junto comigo e por todo o apoio que me deram.

Aos amigos que a UFRJ me deu, Caroline, Diogo, Erik e Rafael, que, além de boas risadas e conselhos, por tantas vezes dividiram o sono e a angústia das provas e dos trabalhos madrugada a fora.

À professora Gabriela, por me dar a oportunidade e honra de desenvolver esse trabalho, ajudando a desenvolver-me no mundo da ciência, compartilhando seu conhecimento e tornando esse projeto possível.

Ao professor Luiz Henrique, por me dar a honra de ser da minha banca examinadora do projeto e pelos valiosos ensinamentos sobre metalurgia física das ligas não-ferrosas e comportamento mecânico dos metais.

Às amigas Johanna Pacheco, Mônica Árenas e Iane Soares, por toda a ajuda e apoio durante todas as etapas de desenvolvimento desse trabalho. Sem vocês não teria conseguido chegar até aqui.

À professora Giselle Mattos, por ser, além de ótima mentora, uma grande amiga, dedicando preciosas horas ao ensino da Siderurgia e ao meu desenvolvimento como pessoa.

Ao amigo Lucas, por todas as horas divididas no LNDC, pela ajuda no desenvolvimento desse projeto, pelos momentos de descontração e por ser um grande companheiro e parceiro.

Ao amigo Fábio Queiroz pela ajuda e por fornecer as microscopias óticas que tanto enriqueceram o trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, por todo o conhecimento transmitido nesses cinco anos de graduação.

A toda equipe da Escola Politécnica, DMM e LNDC, por fazerem com que todos os dias da minha graduação fossem pequenas gotas de crescimento e sabedoria, contribuindo pouco a pouco para a obtenção do meu título de engenheiro.

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

Avaliação do método de correntes parasitas convencional e SLOFEC para detecção de trincas em aço HP.

Guilherme Brandt Danhoni Moraes

Agosto/2016

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Curso: Engenharia Metalúrgica

O presente trabalho visa determinar os parâmetros mais adequados para a inspeção e detecção de descontinuidades em tubos de aço HP. O corpo de prova avaliado foi um tubo retirado de um forno de reforma, no estado de envelhecimento entre I e II, onde operava em uma temperatura próxima a 700°C. Foi realizado um corte na direção axial, obtendo a forma de meia-cana. Oito entalhes com diferentes profundidades, distribuídos uniformemente ao longo do comprimento do tubo, foram realizados por eletroerosão na região interna a fim de simular trincas de fluência. Foram utilizadas as técnicas de correntes parasitas e SLOFEC para a detecção dos entalhes. Os testes com correntes parasitas convencionais foram realizados com frequência de 2 kHz, alimentação de 4 V, ganho de 45 dB, rotação de 215° e ganho vertical de 10 dB. Para a técnica de SLOFEC, os parâmetros foram os mesmos, exceto pela rotação de 190°. As sondas foram utilizadas na parede externa do tubo. Após a aquisição de dados, realizada várias vezes a fim de obter-se representatividade estatística, foi constatado que, com ambas as técnicas, os entalhes que encontravam-se a 3 mm, 5 mm e 7 mm de profundidade foram detectados. Porém os resultados obtidos com SLOFEC apresentaram-se de forma mais consistente.

Palavras-chave: Aço HP, trincas, correntes parasitas, SLOFEC.

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

Evaluation of the standard eddy current and SLOFEC methods for cracks detection in  
HP steel.

Guilherme Brandt Danhoni Moraes

August/2016

Advisor: Gabriela Ribeiro Pereira

Course: Metallurgical Engineering

This work aims to establish the most adequate parameters for inspection and detection of discontinuities in HP steel tubes. The evaluated specimen was retrieved from a reformer furnace, in an aging state between I and II, where it operated under a temperature of approximately 700 °C. An axial section was made, obtaining a half-round shape. Eight equally spaced incisions of different depths along the specimen's length were produced via spark erosion in the internal wall to simulate creep cracks. The eddy current and SLOFEC techniques were employed for the detection of the incisions. The tests with conventional eddy current were conducted with 2 kHz frequency, 4 V power, 45 dB gain, 215° rotation and 10 dB vertical gain. For the SLOFEC technique, the parameters were the same except for the rotation of 190°. The probes were positioned on the external wall of the specimen. After data acquisition, repeated several times to ensure statistical significance, it was found that, with both techniques, the incisions with depths of 3, 5 and 7 mm were detected. The results obtained with the SLOFEC technique, however, were presented more consistently.

Keywords: HP steel, cracks, eddy current, SLOFEC



## Sumário do texto

Índice de figuras .....	x
Índice de tabelas .....	xii
1. Introdução .....	1
2. Revisão Bibliográfica .....	3
<b>2.1. Fornos de reforma .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Aços Resistentes ao Calor .....</b>	<b>4</b>
2.2.1. Aços HP .....	4
2.2.2. Envelhecimento nos aços HP .....	7
2.2.3. Danos por fluência .....	9
<b>2.3. Microscopia ótica/Ferrofluido.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4. Correntes parasitas .....</b>	<b>13</b>
2.4.1. Princípio de funcionamento .....	13
2.4.2. Plano de impedância .....	15
2.4.3. Profundidade de penetração .....	17
2.4.4. SLOFEC.....	19
3. Materiais e métodos .....	21
<b>3.1. Corpo de prova .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Microscopia ótica/Ferrofluido.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3. Correntes Parasitas .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4. Tratamento dos dados.....</b>	<b>27</b>
4. Resultados e discussões.....	28
<b>4.2. Correntes parasitas .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3. SLOFEC.....</b>	<b>34</b>
5. Conclusões .....	39
6. Sugestões para trabalhos futuros .....	40
7. Referências Bibliográficas .....	41

# Índice de figuras

Figura 2.1 – Liga HP-Nb na condição como fundida: (a) micrografia ótica, (b) micrografia MEV obtida com o detector de elétrons retroespalhados [11].	6
Figura 2.2 – Liga HP-NbTi na condição como fundida: (a) micrografia ótica, (b) micrografia MEV obtida com o detector de elétrons retroespalhados [11].	7
Figura 2.3 – Estados de envelhecimento do aço HK, as micrografias óticas foram tomadas perto da superfície interna do tubo. Estado de envelhecimento (a) I; (b) II; (c) III; (d) IV; (e) V e (f) VI. As cavidades em preto observadas nas figuras (e) e (f) são indícios de danos por fluência. Adaptado de [13].	9
Figura 2.4 – Curva típica da evolução temporal da fluência, ilustrando nas micrografias a evolução microestrutural durante o tempo em serviço de um aço de uma planta nuclear. Adaptado de [15].	10
Figura 2.5 – História térmica das ligas estudadas. Morfologia, localização e evolução da microestrutura dos aços HP. (a) morfologia microestrutural do material no estado bruto de fusão, (b) morfologia dos precipitados no primeiro estágio, (c) morfologia dos precipitados quando o material estiver completamente envelhecido. Adaptado de [9].	11
Figura 2.6. Micrografia de um aço AISI 301 LN deformado em 15%. Ataque com HNO <sub>3</sub> 60% e ferrofluido, onde as regiões escuras são martensita $\alpha'$ [18].	13
Figura 2.7 - Etapas do ensaio por correntes parasitas. Adaptado de [25].	15
Figura 2.8 – Representação do plano de impedância. Adaptado de [23].	15
Figura 2.9 – Plano de impedância. Adaptado de [22].	17
Figura 2.10 – Relação entre a densidade de correntes parasitas e profundidade de penetração [24].	18
Figura 2.11 – Representação da profundidade de penetração padrão em duas situações diferentes: (a), menor profundidade; e, (b) maior profundidade. Adaptado de [23].	19
Figura 2.12 – Representação esquemática da técnica SLOFEC Adaptado de [26].	20
Figura 3.1 – Fotografias do corpo de prova em estudo.	21
Figura 3.2 – (a) Desenho esquemático do corpo de prova com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento. (b) Regiões nas quais foram feitas as medias de correntes parasitas e SLOFEC.	22

Figura 3.3. Equipamentos utilizados na aplicação de Ferrofluido, [19].	23
Figura 3.4 – Equipamento de correntes parasitas utilizado: OmniScan MX ECA da Olympus.	24
Figura 3.5 – Montagem utilizada para a realização dos testes de SLOFEC.	24
Figura 3.6 – Metodologia utilizada para a aquisição dos sinais por correntes parasitas e SLOFEC.	25
Figura 3.7 – Representação de como foram realizados os ensaios: (a) ponto a ponto; (b) varredura.	25
Figura 3.8 – Sonda utilizada nos testes.	26
Figura 3.9 – Sonda acoplada ao <i>yoke</i> .	26
Figura 4.1 - Micrografias da região superior, para temperatura de parede inferior a 600°C. Centro de parede. Seção transversal. Polimento mecânico. Ataque químico por imersão em Água Régia saturada com CuCl <sub>2</sub> . Apresenta Estado de Envelhecimento I.	28
Figura 4.2 - Micrografias da região inferior, para temperatura de parede inferior de 700°C. Centro de parede. Seção transversal. Polimento mecânico. Ataque químico por imersão em Água Régia saturada com CuCl <sub>2</sub> . Apresenta Estado de Envelhecimento entre I e II.	29
Figura 4.3 – Amplitude dos sinais obtidos por correntes parasitas nas regiões 1 e 2.	31
Figura 4.4. Fase dos sinais obtidos por correntes parasitas nas regiões 1 e 2.	32
Figura 4.5 – Plano de impedância do ensaio com correntes parasitas para as medidas ponto a ponto nas regiões: (a) extremidade superior; (b) Entalhe 5; (c) Entalhe 8.	32
Figura 4.6 – Gráficos do plano de impedância do ensaio com correntes parasitas com suas respectivas componentes - resistência elétrica (R) e reatância indutiva (X <sub>L</sub> ) - para o ensaio de varredura ( <i>lift-off</i> constante) dos entalhes: (a) 8; (b) 7; (c) 5.	34
Figura 4.7. Amplitude dos sinais obtidos por SLOFEC na região 1 e 2.	36
Figura 4.8. Fase dos sinais obtidos por SLOFEC na região 1 e 2.	36
Figura 4.9 – Plano de impedância do ensaio com SLOFEC para medidas ponto a ponto: (a) extremidade superior; (b) Entalhe 5; (c) Entalhe 8.	37
Figura 4.10 – Gráficos do plano de impedância do ensaio SLOFEC com suas respectivas componentes - resistência elétrica (R) e reatância indutiva (X <sub>L</sub> ) - para o ensaio de varredura ( <i>lift-off</i> constante) dos entalhes: (a) 8; (b) 7; (c) 5.	38

## Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas de uma liga austenítica HP 45 à temperatura ambiente. Adaptado [3].	5
Tabela 2.2 – Composição química de uma liga austenítica HP 45. Adaptado de [3].	5
Tabela 2.3 – Composições químicas dos aços do tipo H. Adaptado de [8].	5
Tabela 2.4 – Níveis de danos causados pela fluência. Adaptado de [1] e [14].	10
Tabela 3.1 – Dimensões do material em estudo.	22
Tabela 3.2 – Comprimento, largura e profundidade dos entalhes distribuídos uniformemente ao longo do corpo de prova.	22
Tabela 3.3 – Profundidade de penetração. Adaptado de [28].	26
Tabela 3.4 – Parâmetros de operação utilizados no OmniScan nas técnicas de correntes parasitas convencional e SLOFEC.	26
Tabela 4.1 – Valor médio (X), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV) da amplitude e da fase dos valores obtidos pelo OmniScan no ensaio ponto a ponto de correntes parasitas convencional.	30
Tabela 4.2. Valores médios, desvios padrões e coeficientes de variações da amplitude e da fase obtidos pelo OmniScan para o ensaio de varredura a um <i>lift-off</i> constante – Correntes parasitas convencional.	33
Tabela 4.3 – Valor médio (X), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV) da amplitude e da fase dos valores obtidos pelo OmniScan para o ensaio SLOFEC.	35
Tabela 4.4 – Valor médio, desvios padrão e coeficiente de variação da amplitude e da fase obtidos pelo OmniScan para o ensaio de varredura a um <i>lift-off</i> constante – SLOFEC.	37

# 1. Introdução

Desde que o petróleo foi descoberto como fonte de energia, a demanda da sociedade e a consequente exploração deste recurso tem crescido até os dias de hoje. Entretanto, mais recentemente, tem havido uma preocupação com os riscos ao meio ambiente, inerentes à utilização de combustíveis fósseis. Portanto, além da busca por novas fontes de energia renováveis e/ou menos poluentes, tem-se tratado também de desenvolver combustíveis oriundos do petróleo com menores emissões de poluentes, de modo a atender às novas legislações que vêm sendo criadas e visam regular as emissões de substâncias deletérias ao meio ambiente.

Uma das tecnologias desenvolvidas para se obter combustíveis menos nocivos ao ambiente é o hidrotreatamento do óleo cru pesado, que baseia-se em estabilizar, com a utilização de hidrogênio, derivados do petróleo, permitindo a produção de combustíveis com um controle superior de poluentes em sua combustão.

A obtenção do hidrogênio, sobretudo no Brasil, tem como peça fundamental os fornos de reforma a vapor. Vapor de água e hidrocarbonetos passam pelo interior de uma série de tubos aquecidos por grandes queimadores externos localizados nas paredes do forno a temperaturas elevadas (aproximadamente 950°C). Como a reação de reforma é extremamente endotérmica, a retirada de energia realizada pela reação mantém os tubos na temperatura de operação.

Além das altas temperaturas, os tubos estão sujeitos a uma pressão interna variando entre 1 MPa e 3 MPa e ao esforço causado pelo próprio peso do tubo e sendo assim, o material utilizado na confecção destes deve resistir a tal situação de operação. O aço austenítico HP é utilizado pois é capaz de resistir às severas condições dos fornos de reforma por longos períodos. Entretanto, esse material, por estar sujeito a altas temperaturas e esforços continuamente, sofre os fenômenos de envelhecimento e fluência, que podem gerar trincas, causando falhas catastróficas. Por isso é importante que haja um controle da integridade estrutural dos tubos, a fim de impedir que essas falhas ocorram.

Este trabalho busca estudar e avaliar a detecção de entalhes produzidos por eletroerosão em uma meia-cana de aço austenítico HP. Para a detecção destes entalhes, foram utilizados os métodos de correntes parasitas convencional e SLOFEC, buscando iniciar o estudo da determinação dos parâmetros de inspeção

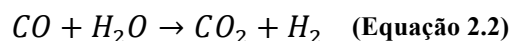
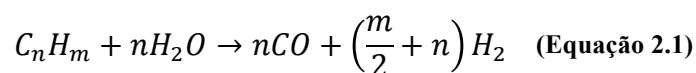
para a situação supramencionada. Após a aquisição de dados, realizada várias vezes a fim de obter-se representatividade estatística, foi constatado que, com ambas as técnicas, os entalhes que encontravam-se a 3 mm, 5 mm e 7 mm de profundidade foram detectados. Porém os resultados obtidos com SLOFEC apresentaram-se de forma mais consistente.

Espera-se que os resultados produzidos por este estudo forneçam dados importantes para o estabelecimento de um eficiente método de inspeção *in situ* de falhas nos tubos em operação nos fornos de reforma.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Fornos de reforma

A obtenção de hidrogênio, oriundo de hidrocarbonetos, pela indústria petroquímica é realizada em fornos de reforma. A produção do hidrogênio ocorre mediante reações endotérmicas entre vapor de água e hidrocarbonetos (majoritariamente o metano) em processos catalíticos que envolvem grandes quantidades de calor [1]. As **Equações 2.1 e 2.2** descrevem as reações de craqueamento dos hidrocarbonetos que ocorrem na presença de catalizadores localizados no interior dos tubos de reforma [2]. É necessário aportar calor a fim de dar início ao processo, pois essas reações químicas são endotérmicas.



As altas pressões e temperaturas às quais estão submetidas as colunas dos fornos de reforma, fazem com que estes sejam componentes extremamente críticos e, sendo assim, é inevitável o aparecimento de danos em serviço, podendo levar a falhas catastróficas. As temperaturas e pressões usuais em serviço das paredes dos tubos variam entre 600°C e 1000°C, e 20 bar e 40 bar, respectivamente, portanto são utilizados materiais que apresentam resistência às altas temperaturas, como por exemplo aços austeníticos ligados a níquel e cromo [3].

As colunas de tubos dos fornos de reforma em questão têm altura entre 10 m e 14 m, diâmetro externo entre 100 mm e 200 mm e espessura entre 10 mm e 20 mm. Como o comprimento dos tubos originais varia entre 1 m e 7 m, é necessário que estes sejam soldados em sua circunferência a fim de se obterem os comprimentos necessários para a ocorrência das reações.

A vida útil nominal dos tubos é de aproximadamente 100.000 h e, decorrentes do processo de envelhecimento ao qual esses tubos estão submetidos, ocorrem mudanças microestruturais no aço, conseqüentemente alterando suas propriedades mecânicas. Portanto é indispensável que haja uma programação de substituição, visando prevenir quaisquer falhas sérias e buscando também o maior aproveitamento possível do

tempo em campanha dos tubos [4]. Entretanto é extremamente difícil prever com boa precisão o tempo exato para a troca dos tubos, visto que eventos anômalos, tais quais surtos de temperatura, podem ocorrer, dificultando a utilização de parâmetros determinados sem esses eventos, ficando clara a necessidade de se realizarem avaliações periódicas das condições estruturais do material em questão.

## 2.2. Aços Resistentes ao Calor

Para situações de trabalho extremas, como é o caso dos fornos de reforma da indústria petroquímica, onde as temperaturas passam dos 650°C, são necessários materiais que apresentem grande resistência aos danos inerentes a tais condições de utilização. Grande parte dos aços utilizados na indústria petroquímica são ligas austeníticas compostas de ferro, cromo e níquel. As duas classes de ligas principais são Fe-Cr-Ni e Fe-Ni-Cr, onde a primeira tem maior percentual de cromo em comparação com o níquel, e a segunda, maior percentual de níquel em comparação com o cromo [5].

As ligas da classe Fe-Cr-Ni possuem alta resistência à fluência, suportam grandes carregamentos, aceitam variações de temperatura moderadas e podem ser utilizados em condições tanto oxidantes como redutoras. Os aços da classe Fe-Ni-Cr, também apresentam resistência para grandes carregamentos, aceitam variações moderadas de temperatura e boa resistência à fluência, porém são mais resistentes a atmosferas oxidantes e carburantes, com exceção para grandes presenças de enxofre [5]. Como o níquel atua como estabilizador da austenita, as ligas da classe Fe-Ni-Cr, com maiores teores de níquel, possuem microestruturas mais estáveis, tendo menor probabilidade de formação de fases deletérias, resultantes da exposição do aço a temperaturas altas [6].

### 2.2.1. Aços HP

Nos aços da classe HP, a letra “H” (*high temperature*) indica resistência a altas temperaturas, e a letra “P” denota os teores de cromo e níquel na liga: a segunda letra varia de “A” a “Z” à medida que o teor de níquel aumenta [3].

A **Tabela 2.1** apresenta as principais propriedades mecânicas do aço estudado no seu estado bruto de fusão em temperatura ambiente [3]. Em geral a altas



temperaturas ocorre uma diminuição dos limites de escoamento e de resistência nos materiais. Entretanto, nas ligas resistentes às altas temperatura a perda de propriedades mecânicas é menor em comparação com outras ligas [6]. A **Tabela 2.2** apresenta a composição química de uma liga austenítica HP e a **Tabela 2.3**, os teores em peso de carbono, cromo e níquel de aços do tipo H [7].

**Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas de uma liga austenítica HP 45 à temperatura ambiente. Adaptado [3].**

Limite de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
235	430	4,5

**Tabela 2.2 – Composição química de uma liga austenítica HP 45. Adaptado de [3].**

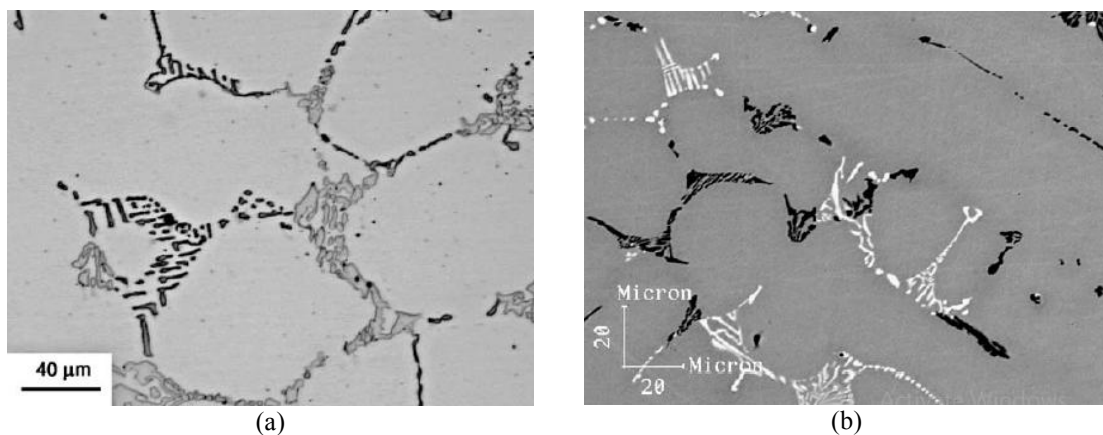
Elemento	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo	Fe
% (em peso)	26	35	0,35 - 0,75	2	2,5	0,04	0,04	0,5	Bal.

**Tabela 2.3 – Composições químicas dos aços do tipo H. Adaptado de [8].**

Classe do aço	Composição química		
	C	Cr	Ni
HA	0,20 máx.	8,0 - 10,0	-
HC	0,50 máx.	26,0 - 30,0	4,0 máx.
HD	0,50 máx.	26,0 - 30,0	4,0 - 7,0
HE	0,20 - 0,50	26,0 - 30,0	8,0 - 11,0
HF	0,20 - 0,40	19,0 - 23,0	9,0 - 12,0
HH	0,20 - 0,50	24,0 - 28,0	11,0 - 14,0
HI	0,20 - 0,50	26,0 - 30,0	14,0 - 18,0
HK	0,20 - 0,60	28	18,0 - 22,0
HK 30	0,25 - 0,35	23,0 - 27,0	19,0 - 22,0
HK 40	0,35 - 0,45	23,0 - 27,0	19,0 - 22,0
HL	0,20 - 0,60	28,0 - 32,0	18,0 - 22,0
HN	0,20 - 0,60	19,0 - 23,0	23,0 - 27,0
HP 45	0,35 - 0,75	24,0 - 28,0	33,0 - 37,0
HP 50 WZ	0,45 - 0,55	24,0 - 28,0	33,0 - 37,0
HT	0,35 - 0,75	13,0 - 17,0	33,0 - 37,0
HT 30	0,25 - 0,35	13,0 - 17,0	33,0 - 37,0
HU	0,35 - 0,75	17,0 - 21,0	37,0 - 41,0
HW	0,35 - 0,75	10,0 - 14,0	58,0 - 62,0
HX	0,35 - 0,75	15,0 - 19,0	64,0 - 68,0

A fabricação dos tubos de aço HP se dá pelo processo de fundição por centrifugação, onde a solidificação inicia-se com a formação de dendritas de austenita na região adjacente à parede do molde, crescendo na direção do metal ainda líquido. Os elevados teores de carbono desta liga (superiores a 0,4%) favorecem a formação de austenita, porém, em contrapartida, quando em solução sólida, o carbono provoca a saturação da austenita, culminando no surgimento de uma rede primária de carbeto eutéticos [9].

Esta precipitação ocorre de forma grosseira, podendo assumir várias formas distintas, como por exemplo ilhas isoladas nas regiões interdendríticas, filmes delineando a dendrita ou pode gerar também uma rede de carbeto com composição eutética e interdendrítica. A velocidade de resfriamento durante a solidificação e, conseqüentemente, a segregação dos constituintes na região dendrítica, são os fatores que determinarão a fase a ser formada. Em aços HP modificados ao nióbio, a rede de carbeto costuma ter a morfologia conhecida como escrita chinesa, ou esqueleto [10]. A **Figura 2.1**, mostra a matriz austenítica juntamente com a rede de carbeto interdendríticos do tipo  $M_{23}C_6$  (escuros) e NbC (claros).

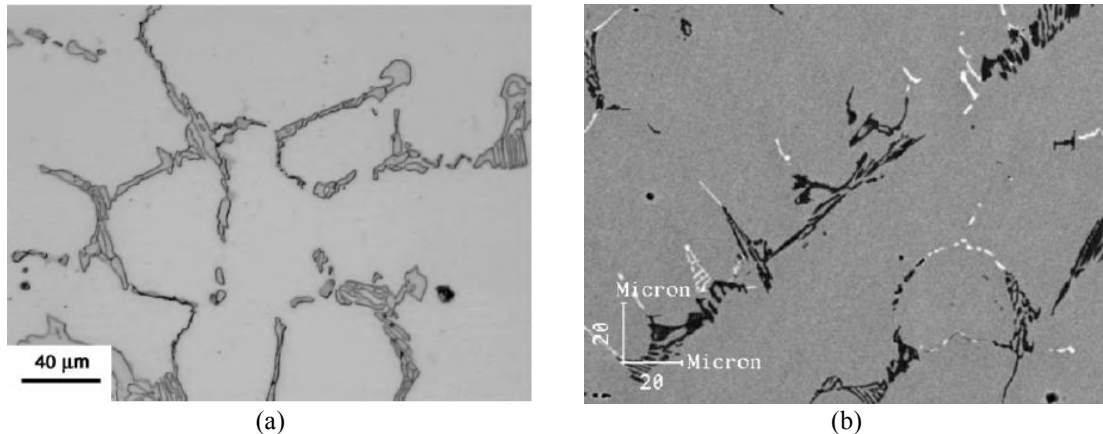


**Figura 2.1 – Liga HP-Nb na condição como fundida: (a) micrografia ótica, (b) micrografia MEV obtida com o detector de elétrons retroespalhados [11].**

A adição de nióbio combinada com titânio em aços HP favorece maior resistência à fluência e menor permeação de hidrogênio devido à formação, nos contornos de grão, de carbeto eutéticos de maior complexidade, em comparação com os aços HP modificados somente ao nióbio, como podemos observar na **Figura 2.2**. A adição de titânio permite que os tubos tenham espessuras menores, aumentando a eficiência da troca térmica e permitindo um significativo aumento na temperatura de

operação, levando a um incremento na produção [9], [11].

Ainda na **Figura 2.2** pode-se observar que, devido à presença de titânio, os carbeto dendríticos têm natureza menos contínua, comparando-se com os carbeto da **Figura 2.1**, onde não há adição de Ti. Similarmente à **Figura 2.1**, os carbeto do tipo  $M_{23}C_6$  são escuros, NbC, claros, e (NbTi)C [11].



**Figura 2.2** – Liga HP-NbTi na condição como fundida: (a) micrografia ótica, (b) micrografia MEV obtida com o detector de elétrons retroespalhados [11].

### 2.2.2. Envelhecimento nos aços HP

Nos fornos de reforma da indústria petroquímica, os tubos de aço HP operam em temperaturas extremamente elevadas e, por isso, estão sujeitos a vários fenômenos inerentes às condições de operação: envelhecimento; fluência, carburização; corrosão; e, fadiga térmica [12]. Os próximos parágrafos tratarão de descrever, para diferentes estados de envelhecimento, ou seja, altas temperaturas e milhares de horas em operação, as características microestruturais do aço HK [13]. De acordo com o autor, as transformações microestruturais também ocorrem nas ligas de aços HP. Como a resistência mecânica do aço HP é superior à do aço HK [6], os tubos de aço HP são confeccionados com uma menor espessura, fazendo com que o diâmetro interno seja maior, o que aumenta o volume suportado de catalisador e, conseqüentemente favorece o aumento da produção, [13].

No estado de envelhecimento I não há mudanças estruturais perceptíveis para temperaturas inferiores a 600°C na parede. A morfologia dos carbeto apresenta-se como o que se conhece como “escrita chinesa”, ou “esqueleto”. Os carbeto possuem forma de placas posicionadas nos contornos das dendritas. Neste estado, a

microestrutura é semelhante à do estado bruto de fusão, como podemos ver na **Figura 2.3(a)**, [13].

Em temperaturas variando entre 600°C e 700°C, inicia-se o coalescimento dos carbeto primários, agrupando-se em blocos compactos, como pode ser observado na **Figura 2.3(b)**. Neste estado, conhecido como estado de envelhecimento II, ocorre a nucleação de carbeto secundários no interior da matriz austenítica, inicialmente nas regiões adjacentes aos braços dendríticos, [13].

O estado de envelhecimento III ocorre em temperaturas entre 700°C e 800°C. Aqui os carbeto primários perdem completamente sua morfologia eutética, assumindo a forma de blocos compactos, e a nucleação de carbeto finamente dispersos na matriz torna-se ainda mais intensa, como ilustra a **Figura 2.3(c)**, [13].

A estabilização da morfologia dos carbeto primários e o coalescimento dos carbeto secundários da matriz ocorre em temperaturas entre 800°C e 900°C. Além disso, ocorre a difusão de carbono dos carbeto secundários nos limites dendríticos para os carbeto primários, causando uma diminuição no número de carbeto secundários em relação ao estado III. Esse é o estágio de envelhecimento IV, mostrado na **Figura 2.3(d)**, [13].

O estado de envelhecimento V ocorre em temperaturas entre 900°C e 1000°C e é marcado por um aumento substancial no tamanho médio dos precipitados, causado pelo coalescimento dos carbeto primários, e uma diminuição da quantidade de precipitados secundários na matriz austenítica, **Figura 2.3(e)**, [13].

O último estado de envelhecimento é o estado VI, mostrado na **Figura 2.3(f)**. Aqui observa-se uma intensificação da condição descrita para o estado de envelhecimento V, com um coalescimento mais intenso dos carbeto secundários, [13].

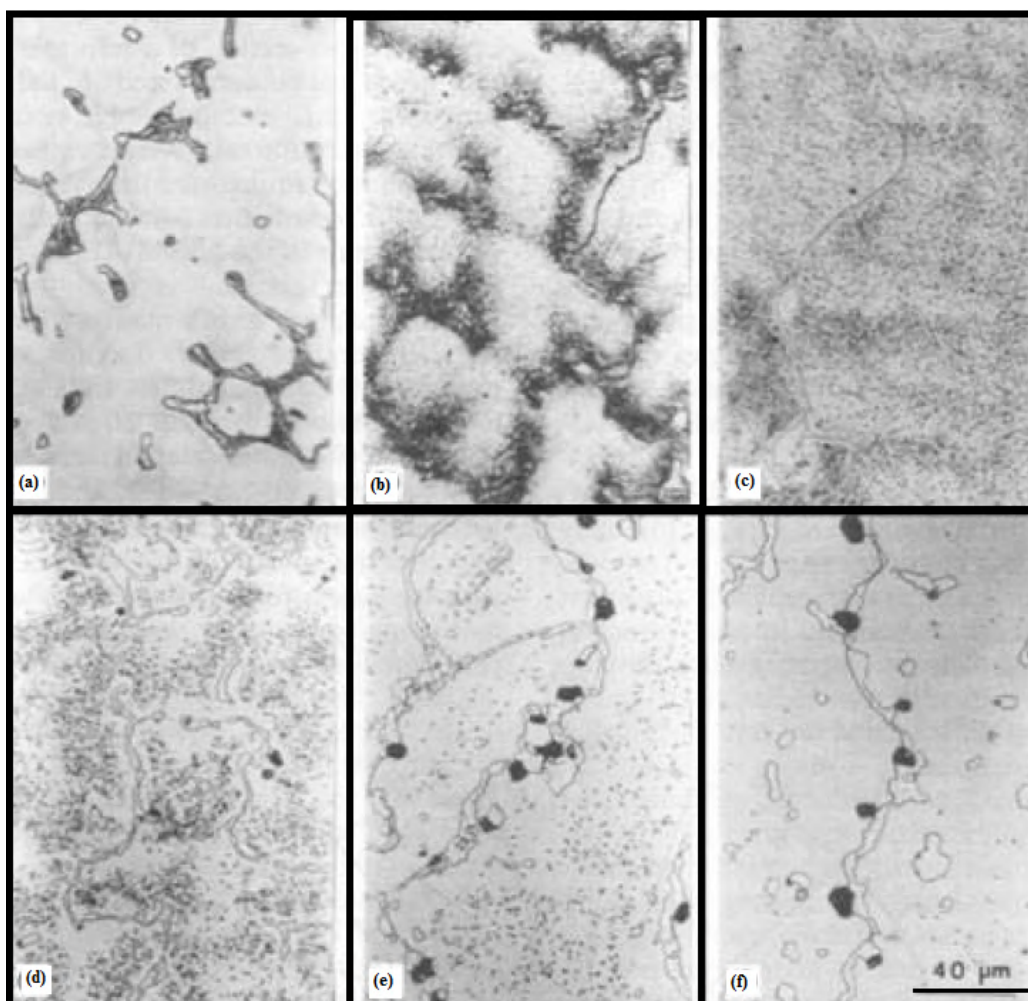


Figura 2.3 – Estados de envelhecimento do aço HK, as micrografias óticas foram tomadas perto da superfície interna do tubo. Estado de envelhecimento (a) I; (b) II; (c) III; (d) IV; (e) V e (f) VI. As cavidades em preto observadas nas figuras (e) e (f) são indícios de danos por fluência. Adaptado de [13].

### 2.2.3. Danos por fluência

O processo de envelhecimento não é o único fator a ser levado em consideração quando se está utilizando tubos de aços da família HP. Os danos por fluência são outro fator que deve ser considerado. As microtrincas, que se formam inicialmente pela interligação de vazios, crescem na direção da parede interna do tubo para posteriormente avançarem para a parede externa [6]. Esses vazios se formam nos contornos dendríticos de forma aleatória, tendo seu aparecimento restrito ao primeiro terço da espessura da parede do tubo, uma vez que a orientação preferencial está nos limites perpendiculares à tensão de tração máxima principal [1]. Os níveis dos danos causados pela fluência, descrito por [1] e [14], estão apresentados de forma resumida na Tabela 2.4 e ilustrado na Figura 2.4.

Tabela 2.4 – Níveis de danos causados pela fluência. Adaptado de [1] e [14].

Nível	Vida consumida (%)	Tipo de dano
A	0	Ausência de vazios
B	25	Vazios aleatoriamente distribuídos, mas não alinhados
C	50	Vazios alinhados, mas não interligados
D	75	Microtrincas de interligação dos vazios alinhados, não atingindo a metade da espessura da parede, iniciando pela superfície interna da coluna
E	100 (extinta)	Trincas em propagação, alcançando 2/3 da espessura da parede, iniciando pela superfície interna da coluna. Substituição necessária.

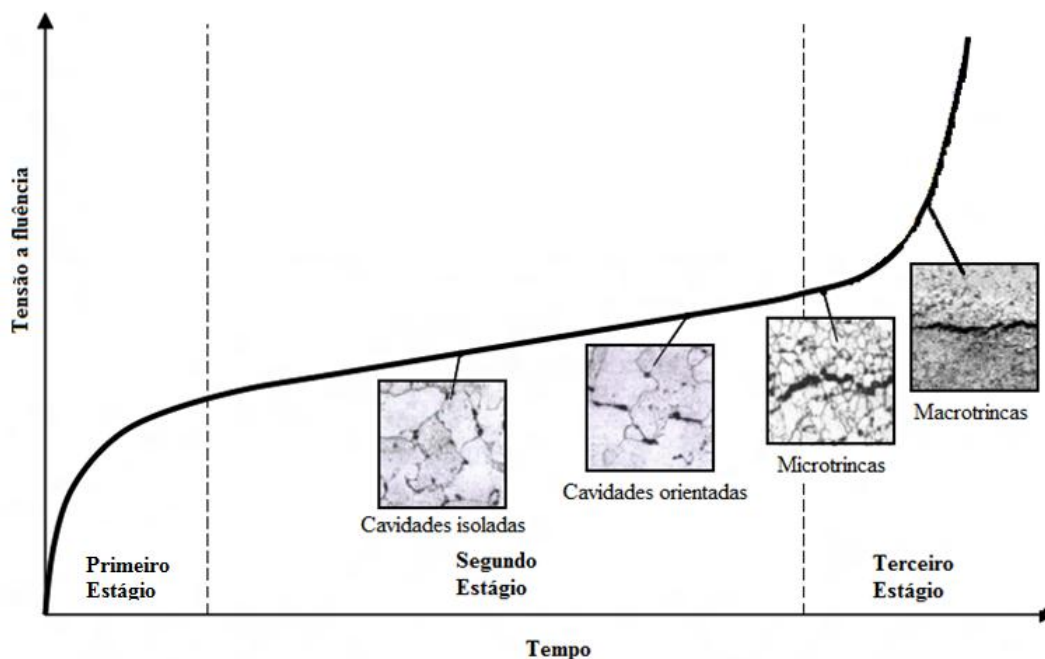
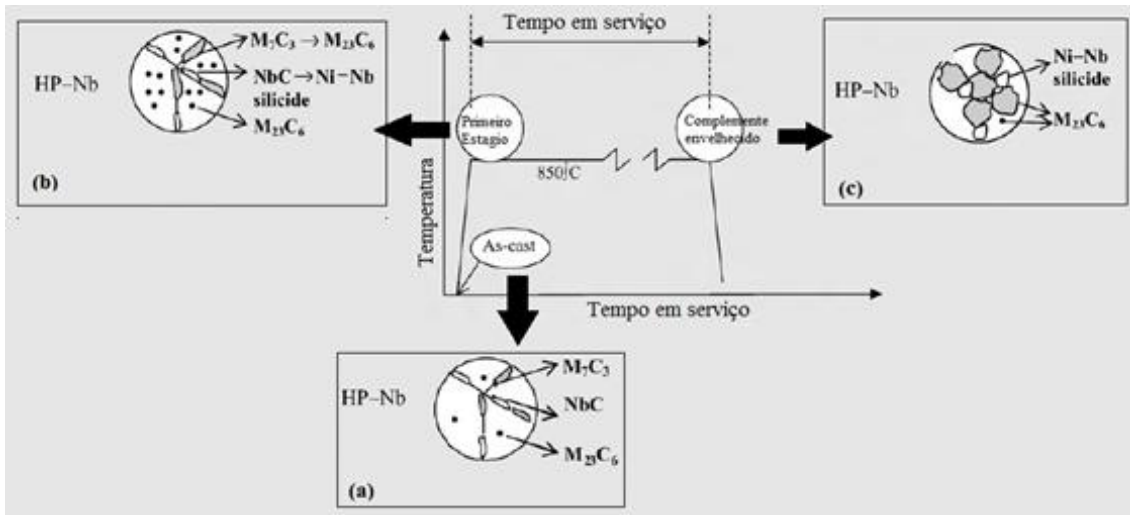


Figura 2.4 – Curva típica da evolução temporal da fluência, ilustrando nas micrografias a evolução microestrutural durante o tempo em serviço de um aço de uma planta nuclear. Adaptado de [15].

SHI et al. [9] estudaram as transformações microestruturais ocorridas em serviço dos aços HP modificados ao nióbio. Os principais constituintes formados na matriz desta liga *as-cast* e em serviço podem ser vistas na **Figura 2.5**. Observa-se que quando a liga está em estado bruto de fusão, os carbeto primários são dos tipos NbC e  $M_7C_3$ , sendo o  $M_7C_3$  predominantemente rico em cromo. Com aumento da temperatura de parede e tempo em serviço, ocorre uma transformação do carbeto NbC em fase G, um siliceto misto de nióbio e níquel ( $Ni_{16}Nb_6Si_7$ ), dos carbeto  $M_7C_3$  interdendríticos em  $M_{23}C_6$ , e a precipitação secundária de carbeto  $M_{23}C_6$  na matriz.



**Figura 2.5 – História térmica das ligas estudadas. Morfologia, localização e evolução da microestrutura dos aços HP. (a) morfologia microestrutural do material no estado bruto de fusão, (b) morfologia dos precipitados no primeiro estágio, (c) morfologia dos precipitados quando o material estiver completamente envelhecido. Adaptado de [9].**

### 2.3. Microscopia ótica/Ferrofluido

As análises microestruturais de materiais por microscopia podem ser realizadas de formas diferentes. Dentre estas, podemos destacar a microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET) e microscopia de campo iônico (MCI). A utilização dessas técnicas deve ser ponderada de acordo com a necessidade de cada estudo, uma vez que os custos de operação dos equipamentos e o tempo para a realização do experimento variam à medida que aumenta-se a complexidade do ensaio.

A microscopia ótica permite a visualização de diversos tipos de defeitos na microestrutura dos materiais, como contornos de grãos e sub-grãos, contornos de maclas e precipitados ou constituintes microestruturais com tamanhos maiores que  $0,5\mu\text{m}$ . Normalmente a obtenção de imagens com boa qualidade por um microscópio ótico deve ser precedida por duas etapas fundamentais: preparação da superfície e revelação. A primeira consiste em determinar qual será a região a ser analisada para posteriormente efetuar o corte, lixamento e polimento. A etapa de revelação será quando as principais características que se busca no material serão acentuadas, o que é possível fazer mediante diferentes tipo de ataque na superfície de análise. Finalmente prossegue-se para a visualização da amostra preparada no microscópio ótico [16].

O ataque, etapa na qual a propriedade e/ou informação que se busca será

acentuada, deve ser específico para o experimento. Sendo assim, existem várias formas de se realizar o ataque na superfície a ser examinada. Essa etapa é importante para que se obtenha altos níveis de contraste na imagem, em virtude da diferença de reflexão da luz nos diferentes constituintes da amostra. Superfícies que apenas receberam polimento refletem a luz de maneira uniforme, prejudicando ou impossibilitando a observação dos constituintes, excetuando casos muito específicos onde as diferenças de reflexividade são grandes [17]. A seguir estão explicados brevemente alguns exemplos de ataque:

- **Químico por imersão:** método mais antigo e mais popular de ataque, onde o reagente utilizado é escolhido com base nas características eletroquímicas dos constituintes da amostra, não sendo necessária nenhuma fonte externa de corrente para efetuar-lo;
- **Eletrolítico:** é aplicado um potencial elétrico entre a amostra e um contra-eletrodo, ânodo e cátodo respectivamente, imersos em uma solução da substância que realizará o ataque. A diferença de potencial é aplicada com o uso de uma fonte de corrente externa;
- **Magnético:** utiliza as propriedades magnéticas dos constituintes a fim de revelar características daqueles que são parcialmente ou totalmente magnéticos. Sabe-se que os primeiros usos deste tipo de ataque se deram em 1931, quando foi utilizado na identificação dos “padrões de Bitter”, com o uso de pós magnéticos. Alguns anos depois aprimorou-se a técnica ao utilizar-se partículas magnéticas em uma solução coloidal [17]. Hoje em dia uma destas soluções coloidais utilizadas em ataques magnéticos é o ferrofluido, que é utilizado por exemplo em aços inoxidáveis da série 300, como vê-se na **Figura 2.6**.



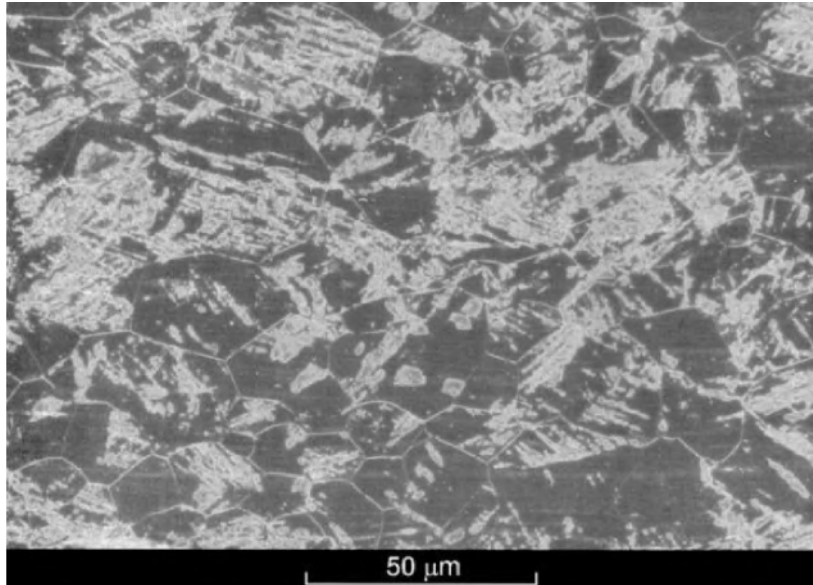


Figura 2.6. Micrografia de um aço AISI 301 LN deformado em 15%. Ataque com HNO 60% e ferrofluido, onde as regiões escuras são martensita  $\alpha'$  [18].

O ferrofluido é composto de partículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), uma forma de óxido de ferro magnético, em solução. Entretanto, devido às suas dimensões muito pequenas (aproximadamente 10 nm), estas partículas assumem a posição de apenas um domínio magnético. Assim, os átomos da partícula de magnetita fazem parte de uma única estrutura magneticamente ordenada em somente uma direção, fazendo com que esta adquira uma propriedade que permite a reação das partículas a um estímulo magnético sem interferir neste mesmo estímulo. Esta propriedade é conhecida como superparamagnetismo [19].

## 2.4. Correntes parasitas

A técnica de inspeção de materiais condutores elétricos por correntes parasitas é um ensaio não destrutivo baseado no princípio da indução eletromagnética [20].

### 2.4.1. Princípio de funcionamento

Todo material condutor elétrico submetido a uma diferença de potencial fornecida por uma fonte de corrente alternada gerará um campo magnético com direção e sentido dependentes da corrente passante. Sendo assim, sempre que a corrente muda seu sentido e/ou altera sua intensidade, ocorrerá também uma mudança no sentido e na

intensidade do campo magnético induzido, conhecido como campo primário. Por outro lado, se houver algum outro material condutor próximo, haverá uma indução de correntes elétricas causada pela interação como o campo magnético primário que, por sua vez, também gerará um campo magnético, conhecido como campo secundário. Segundo a Lei de Lenz, o campo secundário terá direção e sentido opostos ao campo primário [21], [22].

A generalização do conceito físico da indução eletromagnética para o método de correntes parasitas, descrito no parágrafo anterior, é mostrado na **Figura 2.7**. A seguir são descritas as principais interações entre uma bobina e uma chapa metálica, classificadas nas etapas “a”, “b” e “c”.

- **Etapa “a”**: Ao ser percorrida por uma corrente alternada, é gerado um campo magnético primário alternado, representado pelas linhas de formas elípticas e conhecido como campo primário. **Figura 2.7(a)**.
- **Etapa “b”**: Nesta etapa, ocorre a aproximação da bobina a um material condutor elétrico. O campo primário, da etapa anterior, induz correntes elétricas, conhecidas como correntes parasitas, de formas circulares na placa. **Figura 2.7(b)**.
- **Etapa “c”**: Haverá um campo magnético secundário gerado pelas correntes parasitas que opor-se-á ao campo magnético primário. O campo secundário está representado por linhas amarelas, também elípticas. Por fim, a interação entre os campos magnéticos primário e secundário causará alterações na impedância elétrica da bobina. **Figura 2.7(c)**.

As alterações mencionadas na etapa “c” podem ocorrer tanto por defeitos na peça (como por exemplo trincas) ou por alterações nas propriedades do material. As mudanças na impedância da bobina são percebidas e plotadas em um plano de impedância [22].

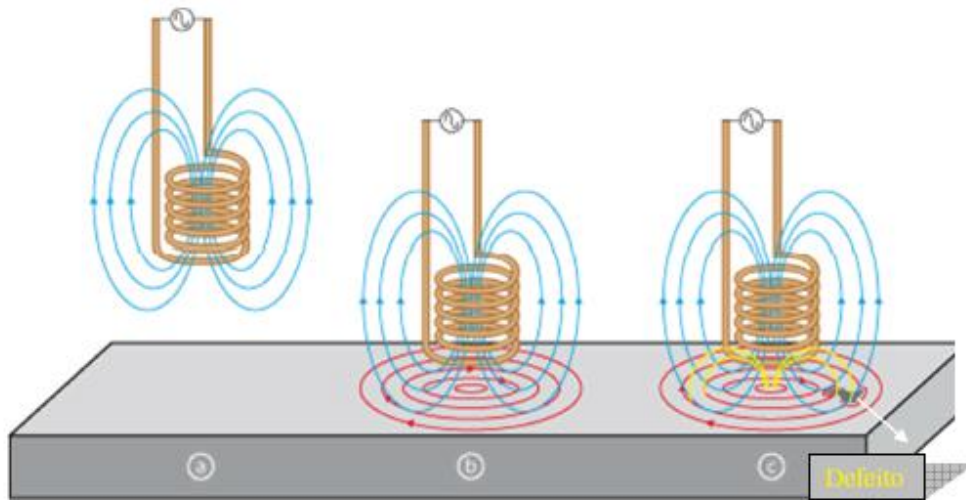


Figura 2.7 - Etapas do ensaio por correntes parasitas. Adaptado de [25].

### 2.4.2. Plano de impedância

Nos ensaios de correntes parasitas, a impedância elétrica ( $Z$ ) é uma combinação da reatância indutiva ( $X_L$ ) e da resistência ( $R$ ) que atuam no fluxo da corrente elétrica do circuito. A reatância capacitiva também é uma componente, porém seu efeito, por ser muito pequeno, é desprezado [21]. O diagrama vetorial no qual são plotadas as duas componentes principais é chamado de plano de impedância, onde o eixo das abcissas representa a resistência e o eixo das ordenadas, a reatância indutiva [21]. A **Figura 2.8** representa um exemplo de plano de impedância.

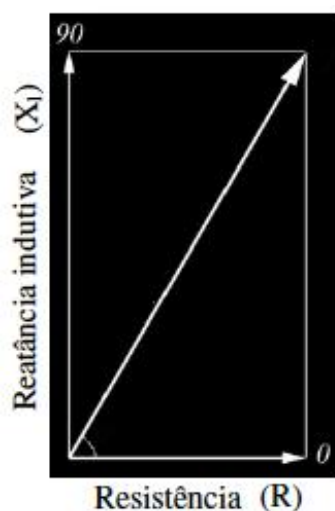


Figura 2.8 – Representação do plano de impedância. Adaptado de [23].

A resultante da junção das duas componentes principais supramencionadas é o vetor

que representa a impedância elétrica ( $Z$ ). Seu módulo pode ser calculado a partir das equações 2.3 e 2.4.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_l^2} \quad \text{Equação 2.3}$$

$$X_l = 2\pi fL \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde  $f$  é a frequência em Hertz e  $L$  é a indutância em Henrys.

O ângulo de fase ( $\varphi$ ) é definido como a arco tangente da divisão da reatância indutiva pela resistência, como mostra a Equação 2.5.

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

A interpretação dos resultados é possível conhecendo a assinatura do sinal e comparando com um material o um ponto de referência. A **Figura 2.9** relaciona alguns pontos de grande importância para o entendimento do plano de impedância. Verifica-se nesta imagem que ao aproximar-se a sonda de uma peça feita em alumínio (material paramagnético), na **Figura 2.9** (linha 0-1), a resistência da bobina aumenta. Isso acontece pois o campo primário emitido pela bobina gera correntes elétricas no interior do alumínio, retirando energia da bobina e, por conseguinte, aumentando sua resistência. Em contrapartida, a reatância indutiva diminui, uma vez que as correntes parasitas também geram um campo magnético secundário, que, como já foi mencionado anteriormente, se opõe ao sentido do campo primário, tendo como resultado um campo magnético total menor para gerar indutância. Quando há a presença de trincas (linha 1-2), ocorre uma queda na resistência e um aumento na reatância, pois a intensidade das correntes parasitas será menor [22].

Quando aproxima-se a sonda a uma peça que apresente alguma resposta, como observado na **Figura 2.9** (linha 0-3) para o caso de um aço ferrítico, ocorrerá um aumento na resistência devido à retirada de energia da bobina pelas correntes parasitas. Já a reatância indutiva elevar-se-á, em dissonância com o caso do alumínio. Os fenômenos descritos anteriormente acontecem devido à alta permeabilidade magnética do aço ferrítico, o que causa uma maior concentração do campo magnético primário. Sendo assim, o fluxo magnético na bobina torna-se maior, enquanto que o campo secundário é suprimido, ambos fatores favoráveis ao aumento da reatância. Por fim, a

existência de trincas será percebida de forma similar ao caso anterior, onde haverá queda na resistência e aumento da reatância, como se vê na linha 3-4 [22].

Outra informação importante que pode ser vista na **Figura 2.9** é o *lift-off* representado pela linha 0-1, no caso do alumínio e pela linha 0-3, no caso do aço ferrítico. Este termo define o espaço entre a sonda e a peça.

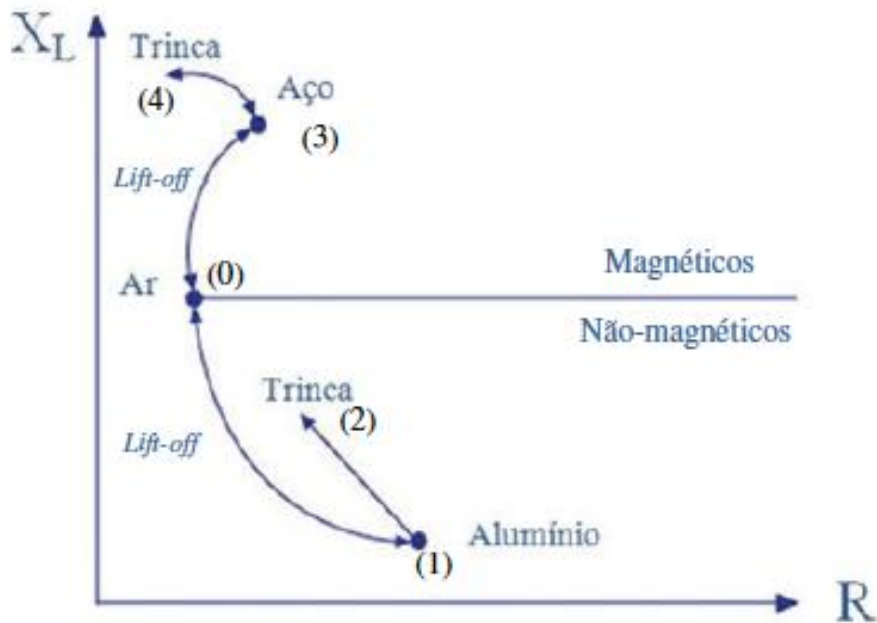


Figura 2.9 – Plano de impedância. Adaptado de [22].

### 2.4.3. Profundidade de penetração

Um dos aspectos mais importantes da técnica de correntes parasitas é a profundidade de penetração, pois as densidades das correntes diminuem à medida que penetram no material, sendo que estas têm densidade máxima na superfície onde se aproxima a bobina. O efeito responsável pela queda na densidade de corrente de acordo com o aumento da profundidade é conhecido como efeito pelicular. A geração de correntes parasitas na superfície cria um campo secundário que, como opõe-se ao campo primário, reduz sua intensidade e, assim, a camada imediatamente abaixo da superfície sofre uma influência de um campo primário menor, gerando correntes induzidas mais fracas [21]. A **Figura 2.10** ilustra o decréscimo na densidade de correntes com a profundidade, onde percebe-se que a relação entre os valores é exponencial e, adicionalmente, há uma profundidade representada pela letra  $\delta$ , que é

conhecida como profundidade de penetração padrão, que é estipulada como sendo o ponto onde a densidade de correntes induzidas equivale a  $1/e$ , ou seja, 37% do seu valor na superfície.

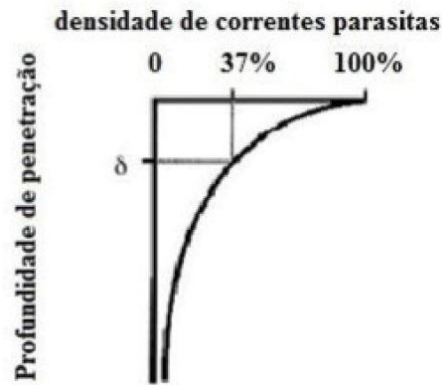
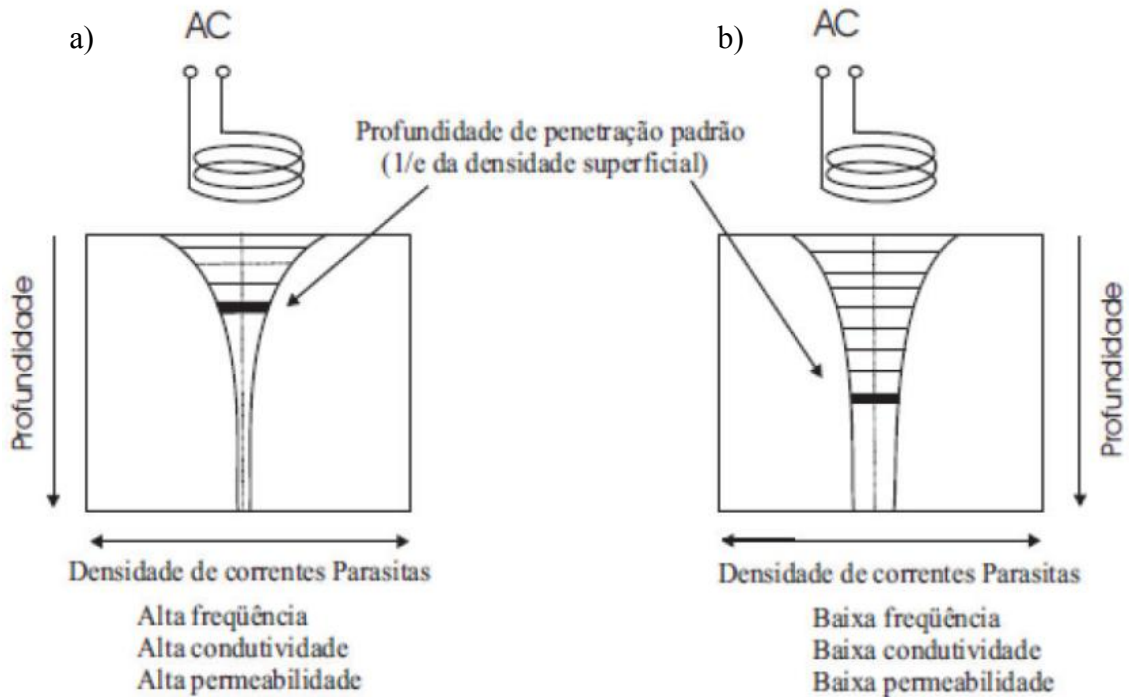


Figura 2.10 – Relação entre a densidade de correntes parasitas e profundidade de penetração [24].

Na **Figura 2.11** é possível ver uma representação das distribuições de correntes parasitas em duas situações diferentes, destacando-se a mudança na profundidade de penetração mediante alterações na frequência, permeabilidade magnética e condutividade elétrica do material testado. Percebe-se que no caso “a”, **Figura 2.11(a)**, as correntes parasitas induzidas na peça apresentam maior concentração e estão mais próximas à superfície, em comparação com o caso “b”, **Figura 2.11(b)**.

A profundidade de penetração padrão ( $\delta$ ), medida em metros [m], pode ser estimada utilizando-se a **equação 2.6**, onde:  $f$  é a frequência de inspeção, em Hertz [Hz];  $\mu$  é a permeabilidade magnética, em Henrys por metro [H/m]; e,  $\sigma$  é a condutividade elétrica em Siemens por metro [S/m] [22].

$$\delta \cong \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad \text{Equação 2.6}$$



**Figura 2.11 – Representação da profundidade de penetração padrão em duas situações diferentes: (a), menor profundidade; e, (b) maior profundidade. Adaptado de [23].**

#### 2.4.4. SLOFEC

Utilizando-se exatamente do mesmo princípio de funcionamento das correntes parasitas, aliado a uma saturação parcial do material pela utilização de um campo magnético externo DC, a técnica SLOFEC permite que materiais ferromagnéticos sejam inspecionados. A utilização do campo magnético externo permite a melhor detecção de pequenas fissuras e pontos de corrosão em superfícies. Um esquema da aplicação da técnica está mostrado na **Figura 2.12**.

Como o efeito da superfície externa está isolado com a saturação pelo campo magnético, a técnica SLOFEC permite alcançar maiores profundidades de penetração das correntes parasitas induzidas, auxiliando na obtenção de resultados mais precisos e confiáveis [26], [27].

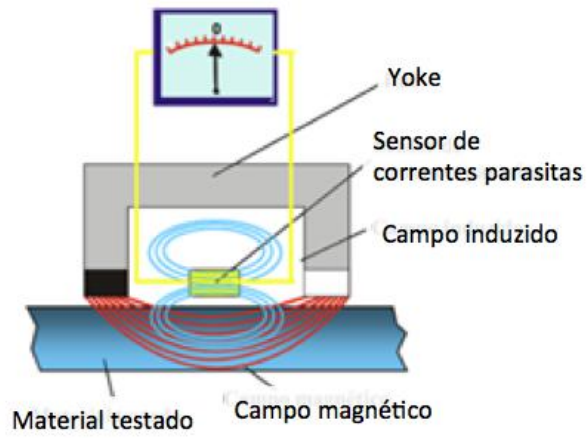


Figura 2.12 – Representação esquemática da técnica SLOFEC Adaptado de [26].



### 3. Materiais e métodos

#### 3.1. Corpo de prova

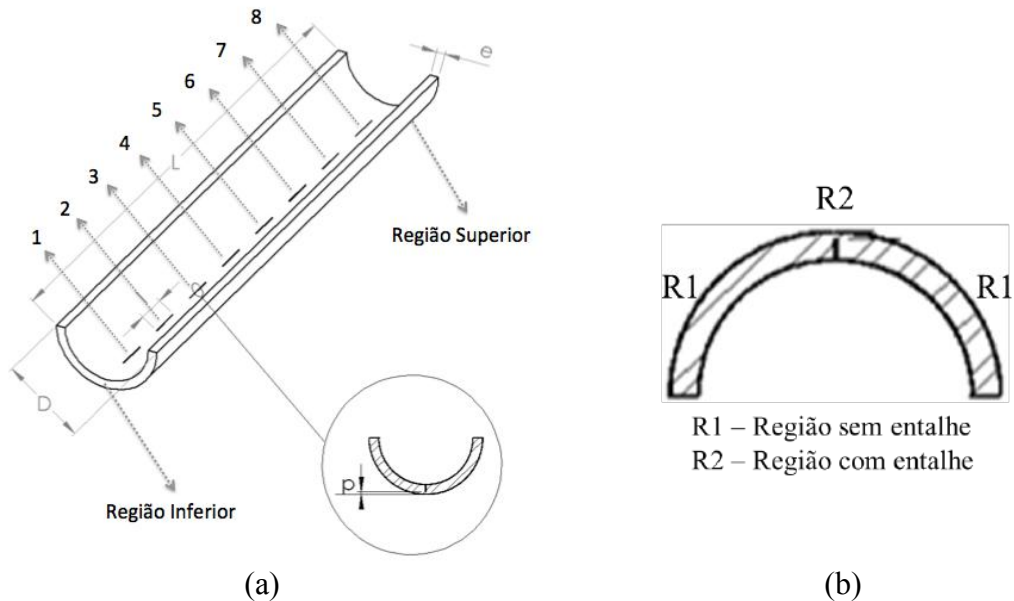
O corpo de prova analisado é um aço austenítico da família HP, retirado de um forno de reforma após 107.000 de horas em serviço, que esteve submetido a uma temperatura entre 600 – 700 °C. O corpo de prova (CP) corresponde a uma sessão de um tubo cortado na direção axial, com o corte passado pela origem, ou seja, pelo meio do tubo. Duas fotografias do corpo de prova podem ser vistas na **Figura 3.1**.



**Figura 3.1** – Fotografias do corpo de prova em estudo.

O presente trabalho visa determinar os parâmetros mais adequados para a inspeção e detecção de descontinuidades no corpo de prova, escopo de estudo. O CP foi estudado com poucas modificações, apenas o corte, obtendo a forma de meia-cana e oito entalhes com diferentes profundidades, distribuídos uniformemente ao longo do comprimento do tubo, feitos na região interna a fim de simular trincas de fluência. Esses entalhes foram realizados por uma empresa terceirizada de cortes por eletroerosão (EDM – *Electric Discharge Machining*). Um desenho do corpo de prova pode ser visto na **Figura 3.2**, a discriminação das dimensões do corpo de prova, na **Tabela 3.1** e as

dimensões dos entalhes, na **Tabela 3.2**.



**Figura 3.2 – (a) Desenho esquemático do corpo de prova com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento. (b) Regiões nas quais foram feitas as medias de correntes parasitas e SLOFEC.**

**Tabela 3.1 – Dimensões do material em estudo.**

L	Comprimento do tubo (mm)	830
Ø	Diâmetro nominal do tubo (mm)	128
e	Espessura do tubo (mm)	11
c	Comprimento do entalhe (mm)	40
l	Largura do entalhe (mm)	0,5

**Tabela 3.2 – Comprimento, largura e profundidade dos entalhes distribuídos uniformemente ao longo do corpo de prova.**

ENTALHE	DIMENSÃO (C × L × P)
1	40 × 0,5 × 0,5 (mm)
2	40 × 0,5 × 1,0 (mm)
3	40 × 0,5 × 1,5 (mm)
4	40 × 0,5 × 2,0 (mm)
5	40 × 0,5 × 3,0 (mm)
6	40 × 0,5 × 4,0 (mm)
7	40 × 0,5 × 6,0 (mm)
8	40 × 0,5 × 8,0 (mm)

### 3.2. Microscopia ótica/Ferrofluido

A aplicação de Ferrofluido foi realizada buscando obter evidências de resposta magnética na parede externa do tubo. Para tal duas amostras, uma de cada extremidade do corpo de prova, foram cortadas, embutidas em resina, lixadas e polidas até que se obtivesse o acabamento superficial necessário. Com as amostras ainda sem ataque, procedeu-se ao microscópio ótico (Axio Imager.M1m da marca *Zeiss*) a fim de obter imagens da microestrutura do aço. Após a obtenção dessas imagens, foi realizada a aplicação de uma solução de Ferrofluido na superfície tratada, a fim de revelar algum comportamento magnético. Mais uma vez as amostras foram levadas ao microscópio e novas imagens, agora após a aplicação do Ferrofluido, foram obtidas. O Ferrofluido utilizado foi o EMG 909 e o solvente foi o EMG 900 series, ambos da marca *FerroTec*, Figura 3.3.



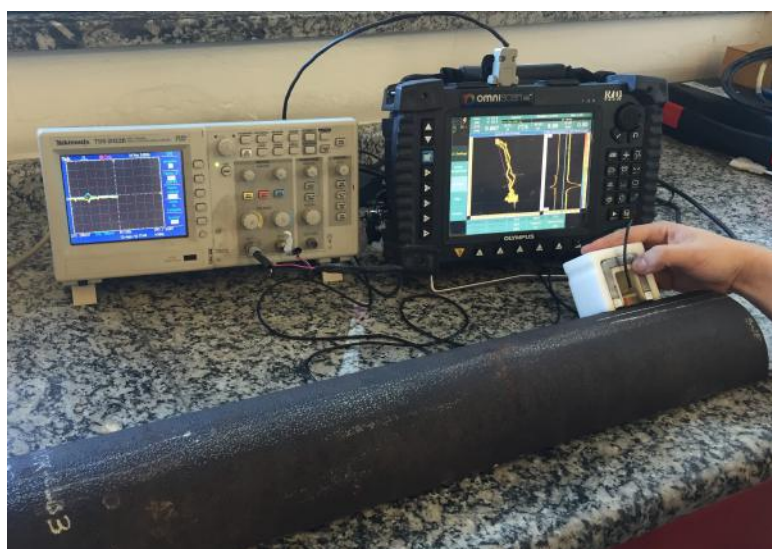
Figura 3.3. Equipamentos utilizados na aplicação de Ferrofluido, [19].

### 3.3. Correntes Parasitas

Para a inspeção com correntes parasitas foi utilizado o equipamento da fabricante Olympus, modelo OmniScan MX ECA, **Figura 3.4**. O OmniScan foi acoplado a um osciloscópio para que fosse possível obter todos os pontos de varredura dos testes realizados, o que permitiu o posterior tratamento desses dados. A **Figura 3.5** demonstra como foi a montagem utilizada para a realização dos testes por SLOFEC.



**Figura 3.4 – Equipamento de correntes parasitas utilizado: OmniScan MX ECA da Olympus.**



**Figura 3.5 – Montagem utilizada para a realização dos testes de SLOFEC.**

Conforme observado na **Figura 3.6**, os testes foram realizados em duas etapas: uma apenas com a sonda (correntes parasitas convencional) e outra com o acoplamento a um *yoke* (SLOFEC). O tubo foi dividido em dez regiões, sendo oito regiões com entalhes e duas, uma em cada extremidade, sem entalhes. Tanto para a obtenção de medidas com correntes parasitas quanto para com SLOFEC, foram realizadas entre cinco e dez tomadas de dados em cada uma das dez regiões de duas formas diferentes: ponto a ponto – onde a sonda foi calibrada no ar e foram realizadas três medidas, uma no entalhe e duas fora do entalhe, **Figura 3.7.a**; varredura – onde a sonda foi calibrada na peça e deslocada de uma região sem entalhe até outra sem entalhe, passando pelo entalhe, **Figura 3.7.b**.

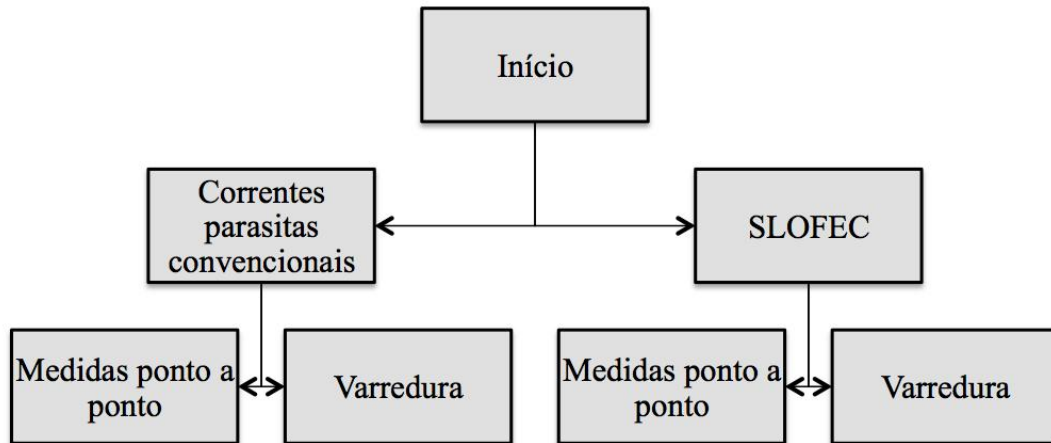


Figura 3.6 – Metodologia utilizada para a aquisição dos sinais por correntes parasitas e SLOFEC.

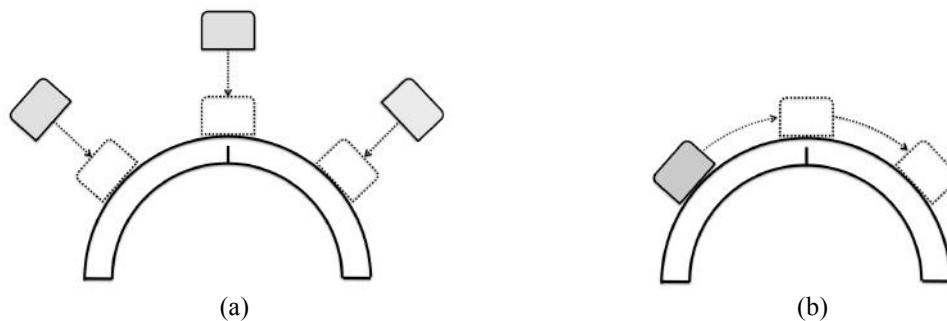


Figura 3.7 – Representação de como foram realizados os ensaios: (a) ponto a ponto; (b) varredura.

A sonda de inspeção foi fabricada no LNDC com um fio de cobre AWG36 (diâmetro de 0,13 mm) embobinado ao redor de um núcleo de ar com 1.200 voltas, **Figura 3.8**. A frequência de operação da bobina está entre 1 kHz e 10 kHz e sua resistência é de 70  $\Omega$ . Uma fotografia mostrando o acoplamento da sonda ao *yoke* pode ser vista na **Figura 3.9**. Os parâmetros de operação utilizados no **OmniScan** são apresentados na Tabela 3.4. A determinação da frequência foi feita a partir da **Equação 2.6** e foi constatado 2 kHz permitiriam uma profundidade de penetração próxima da espessura do tubo. A Tabela 3.3 mostra, para os valores de condutividade elétrica média ( $\sigma_{\text{envelhecido}} = 0,987 \times 10^6$  e permeabilidade magnética absoluta ( $\mu = 1,0076 \times 10^{-6}$ ), os resultados de profundidade de penetração para diferentes frequências.

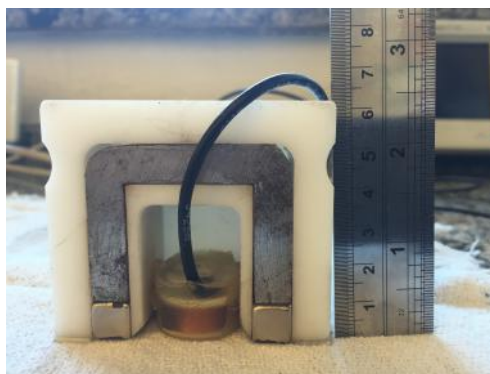


**Tabela 3.3 – Profundidade de penetração. Adaptado de [28].**

f (kHz)	Prof. de Penetração (mm)
0,2	40,05
0,5	25,33
1,0	17,91
1,5	14,62
2,0	12,66
2,5	11,33
5	8,01



**Figura 3.8 – Sonda utilizada nos testes.**



**Figura 3.9 – Sonda acoplada ao yoke.**

**Tabela 3.4 – Parâmetros de operação utilizados no OmniScan nas técnicas de correntes parasitas convencional e SLOFEC.**

Parâmetros de operação	Correntes parasitas	SLOFEC
Frequência (kHz)	2	2
Alimentação (V)	4	4
Ganho (dB)	45	45
Rotação (°)	215	190
Ganho vertical (dB)	10	10

### **3.4. Tratamento dos dados**

Os dados obtidos pelo osciloscópio não têm mesma intensidade de sinal que os dados do OmniScan e, sendo assim, precisaram ser tratados de modo que houvesse congruência entre os dados de ambos aparelhos. O software utilizado para o tratamento dos dados foi o MATLAB®.

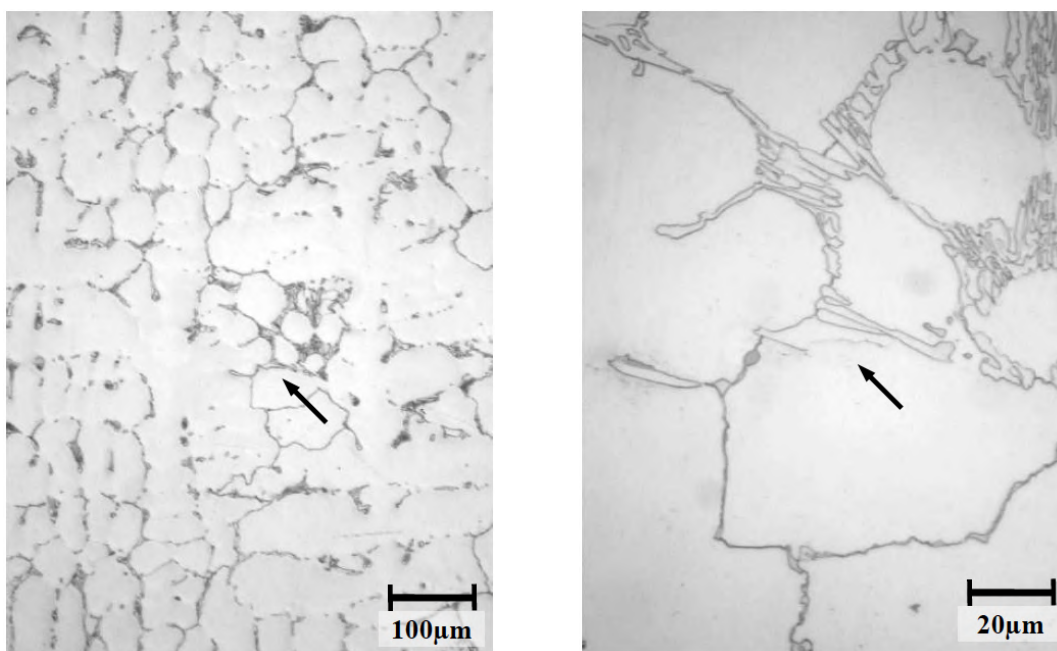
Com os arquivos do osciloscópio no mesmo diretório dos arquivos do MATLAB® foi utilizada uma rotina implementada para filtrar os ruídos dos sinais e plotar os gráficos de Resistência (R) vs. Tempo (s) e Reatância Indutiva (Xl) vs. Tempo (s). O mesmo procedimento foi repetido para cada conjunto de dados, ou seja, duas vezes para cada região (8 entalhes e 2 regiões sem entalhes), sendo uma para os dados do ensaio ponto a ponto e outra para os dados do ensaio de varredura.

Os dados foram selecionados após análise estatística dos valores de cada ensaio, utilizando aquele que mais se aproximava do valor médio de fase.

## 4. Resultados e discussões

### 4.1. Microscopia ótica/Ferrofluido

Durante a fase de aquisição de dados para o trabalho, foi percebida uma variação na resposta magnética ao longo do tubo, o que não era esperado, pois supostamente este encontrava-se no estado de envelhecimento I em toda sua extensão. Foi então realizada uma nova caracterização das extremidades do tubo, onde foi constatado que na extremidade inferior, o estado de envelhecimento está entre I e II. A **Figura 4.1** apresenta as micrografias da extremidade superior e a **Figura 4.2**, da extremidade inferior.

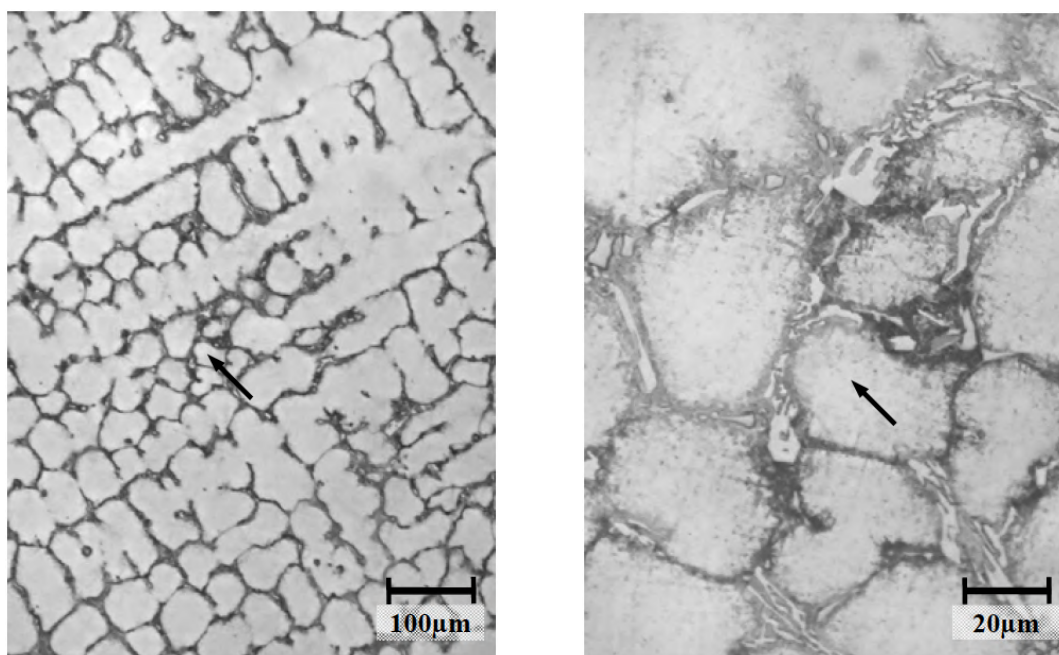


**Figura 4.1 - Micrografias da região superior, para temperatura de parede inferior a 600°C. Centro de parede. Seção transversal. Polimento mecânico. Ataque químico por imersão em Água Régia saturada com  $\text{CuCl}_2$ . Apresenta Estado de Envelhecimento I.**

Entretanto, não somente a microestrutura poderia ser responsável pela resposta magnética, podendo também a camada de óxido e região próxima da parede externa exercerem influência. Portanto, a fim de investigar a resposta magnética dessa região, duas amostras das extremidades do tubo foram cortadas, embutidas em resina e devidamente lixadas e polidas até que se obtivesse um acabamento superficial suficientemente bom para as análises. Entretanto após a obtenção das imagens obtidas



antes e depois da aplicação da solução de Ferrofluido, não foi possível identificar com clareza nenhuma área com resposta magnética.



**Figura 4.2 - Micrografias da região inferior, para temperatura de parede inferior de 700°C. Centro de parede. Seção transversal. Polimento mecânico. Ataque químico por imersão em Água Régia saturada com  $\text{CuCl}_2$ . Apresenta Estado de Envelhecimento entre I e II.**

O motivo do insucesso dos testes com o Ferrofluido é explicado pelo fato deste estar vencido há alguns meses. Com o passar do tempo as nanopartículas de magnetita se aglomeram, tornando-se mais pesadas e, conseqüentemente, perdem sua capacidade de deposição por ser necessário um campo magnético mais forte para atraí-las.

No entanto, alguns meses antes foram realizados testes com outras amostras com Ferrofluido para outros tubos de aço HP em estados de envelhecimentos I, III e V/VI, onde ficou clara a diferença de resposta magnética nas paredes externas e, sendo assim, essas imagens permitem constatar que ocorre um aumento na resposta magnética nas paredes externas dos tubos de aço HP à medida que aumenta o estado de envelhecimento.

Por se tratarem de amostras diferentes, porém do mesmo material e submetidas a condições de operação similares, essas micrografias obtidas anteriormente foram analisadas a fim de se estabelecer um paralelo com o presente estudo. Esperava-se que as amostras extraídas da extremidade inferior da meia cana estudada neste trabalho (estado de envelhecimento I/II) apresentasse aglomeração de ferrofluido na parede

externa, indicando uma resposta magnética mais intensa em comparação com a amostra retirada da extremidade superior (estado de envelhecimento I).

As micrografias nas quais foi possível identificar um aumento da resposta magnética com o envelhecimento podem ser visualizadas no Anexo.

## 4.2. Correntes parasitas

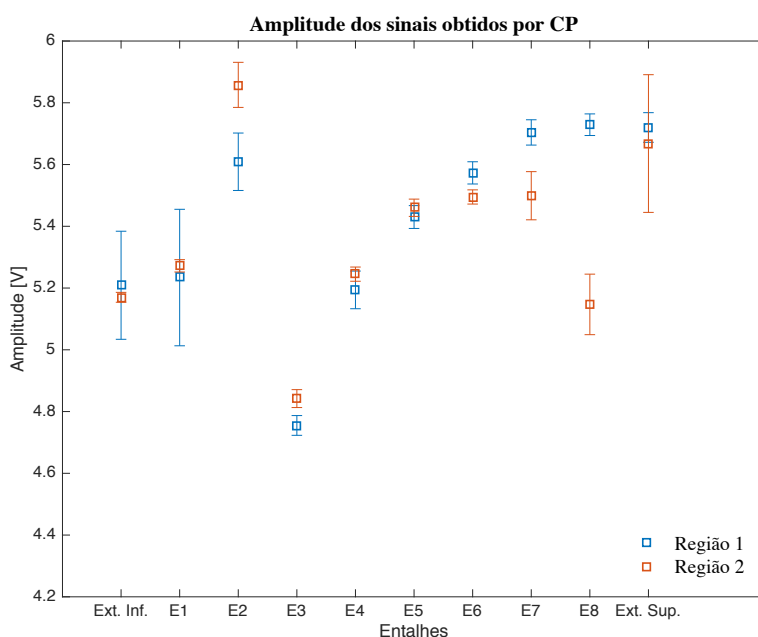
A partir dos valores de amplitude e fase obtidos pelo OmniScan, foram calculados os valores médios, os desvios padrões e os coeficientes de variação de cada conjunto de dados, conforme explicado na **seção 3.3**. Os resultados apresentam-se na **Tabela 4.1**. A **Figura 4.3** e a **Figura 4.4** apresentam, para as regiões 1 e 2, os resultados de amplitude e fase, respectivamente, plotados em gráficos em função dos entalhes.

**Tabela 4.1 – Valor médio (X), desvio padrão ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV) da amplitude e da fase dos valores obtidos pelo OmniScan no ensaio ponto a ponto de correntes parasitas convencional.**

		Correntes parasitas convencional					
		Amplitude			Fase		
	Região	X (V)	$\sigma$ (V)	CV (%)	X (°)	$\sigma$ (°)	CV (%)
Extremidade Superior	R1	5,72	0,048	0,84%	222,85	0,748	0,34%
	R2	5,668	0,223	3,93%	221,909	0,509	0,23%
Entalhe 8	R1	5,729	0,035	0,61%	223,595	0,436	0,19%
	R2	5,147	0,098	1,90%	216,86	0,669	0,31%
Entalhe 7	R1	5,704	0,041	0,72%	222,844	0,397	0,18%
	R2	5,499	0,078	1,42%	219,878	0,179	0,08%
Entalhe 6	R1	5,573	0,036	0,65%	221,045	0,447	0,20%
	R2	5,495	0,023	0,42%	217,94	0,212	0,10%
Entalhe 5	R1	5,43	0,037	0,68%	219,31	0,843	0,38%
	R2	5,46	0,028	0,51%	219,02	0,601	0,27%
Entalhe 4	R1	5,194	0,061	1,17%	214,18	0,687	0,32%
	R2	5,245	0,023	0,44%	213,06	0,506	0,24%
Entalhe 3	R1	4,755	0,032	0,67%	193,535	1,799	0,93%
	R2	4,842	0,029	0,60%	190,31	0,796	0,42%
Entalhe 2	R1	5,609	0,093	1,66%	150,665	1,73	1,15%
	R2	5,858	0,073	1,25%	147,7	1,215	0,82%
Entalhe 1	R1	5,234	0,221	4,22%	172,035	14,493	8,42%
	R2	5,272	0,02	0,38%	176,49	0,586	0,33%
Extremidade Inferior	R1	5,209	0,175	3,36%	187,625	7,847	4,18%
	R2	5,17	0,016	0,31%	186,04	0,398	0,21%

Observamos pela **Figura 4.3** e **Figura 4.4** que os entalhes 6, 7 e 8 apresentam uma diferença significativa, de amplitude e fase, entre a região 1 e 2, indicando que a sonda e os parâmetros utilizados permitem detectar discontinuidades que estão localizados até 7 mm da superfície de inspeção. No entalhe 2 da **Figura 4.3**, observa-se uma diferença de amplitude entre a região 1 e 2, a qual pode estar associada à alterações na camada de óxido em toda a superfície do tubo, entretanto esta diferença não é observada nos resultados de fase, **Figura 4.4**.

Se o CP tivesse o mesmo estado de envelhecimento ao longo de seu comprimento, pressupõe-se que tanto a amplitude como a fase dos pontos da região 1 (sem entalhes) deveriam ser iguais ou muito próximos. No entanto, conforme observado na **Figura 4.3** e **Figura 4.4** existe uma tendência de aumentar ambos os parâmetros partindo da extremidade inferior até a extremidade superior. Desta forma, evidencia-se que existe uma variação no comportamento magnético ao longo CP. Foi observada uma grande variação (região 1): na fase, entre  $223,595^\circ$  (Entalhe 8) e  $150,665^\circ$  (Entalhe 2); e, na amplitude, entre 5,729 (Entalhe 8) e 4,755 (Entalhe 3).



**Figura 4.3 – Amplitude dos sinais obtidos por correntes parasitas nas regiões 1 e 2.**

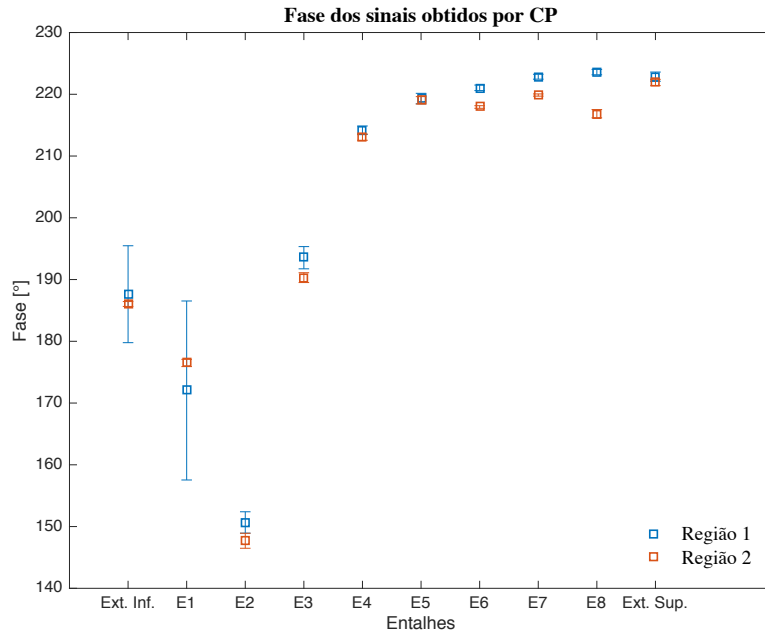


Figura 4.4. Fase dos sinais obtidos por correntes parasitas nas regiões 1 e 2.

A Figura 4.5 ilustra os planos de impedância obtidos pelo OmniScan na extremidade superior, entalhe 5 e 8. É possível observar que na extremidade superior, Figura 4.5(a), não existe uma diferença significativa entre as regiões 1 e 2. Este mesmo comportamento apresenta-se desde a extremidade inferior 1 até o entalhe 5, Figura 4.5(b), indicando que a sonda empregada não permitiu detectar defeitos localizados a 8 mm da superfície de inspeção. Por outro lado, observamos uma diferença significativa entre os sinais das regiões 1 e 2 do entalhe 8, Figura 4.5(c).

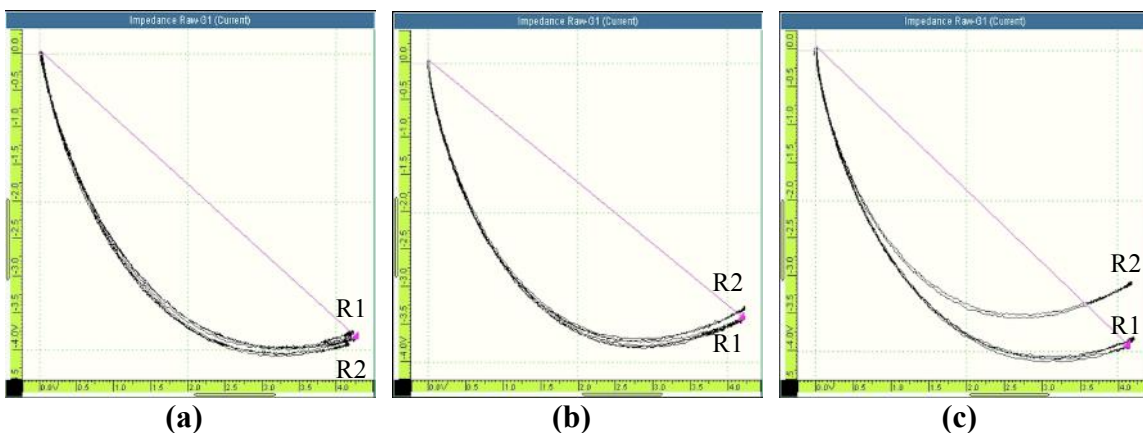


Figura 4.5 – Plano de impedância do ensaio com correntes parasitas para as medidas ponto a ponto nas regiões: (a) extremidade superior; (b) Entalhe 5; (c) Entalhe 8.

Embora os resultados das medidas tomadas ponto a ponto sejam de mais fácil obtenção e portanto apresentem resultados mais consistentes, as medidas de varredura também apresentaram resultados importantes. Nos entalhes 8, 7 e 6 foi possível identificar uma mudança significativa do sinal, caracterizando claramente a detecção do entalhe, indicada pelo aumento da reatância indutiva, **Figura 4.6**. Os valores médios, desvios padrões e coeficientes de variação, tanto da amplitude como da fase, foram obtidos para as dez regiões obtidas com a técnica de correntes parasitas convencional, apresentados na **Tabela 4.2**.

**Tabela 4.2.** Valores médios, desvios padrões e coeficientes de variações da amplitude e da fase obtidos pelo OmniScan para o ensaio de varredura a um *lift-off* constante – Correntes parasitas convencional.

	Amplitude			Fase		
	X (V)	$\sigma$ (V)	CV (%)	X (°)	$\sigma$ (°)	CV (%)
Extrem. Sup.	0,438	0,088	20,1%	158,99	4,78	3,0%
Entalhe 8	1,068	0,024	2,2%	104,97	5,79	5,5%
Entalhe 7	0,502	0,042	8,4%	113,62	12,34	10,9%
Entalhe 6	0,453	0,039	8,6%	116,33	10,84	9,3%
Entalhe 5	0,377	0,075	19,9%	137,98	12,42	9,0%
Entalhe 4	0,530	0,081	15,3%	141,21	3,82	2,7%
Entalhe 3	0,816	0,135	16,5%	119,86	2,58	2,2%
Entalhe 2	0,797	0,149	18,7%	120,96	1,92	1,6%
Entalhe 1	1,864	0,129	6,9%	104,15	2,17	2,1%
Extrem. Inf.	1,676	0,103	6,1%	111,83	3,56	3,2%

A **Figura 4.6** mostra os planos de impedância obtidos pelo OmniScan (primeira coluna) e suas respectivas componentes: Resistência (R); e, Reatância Indutiva ( $X_L$ ), para os entalhes 8, 7 e 5. As dificuldades para a obtenção dos dados, como a baixa frequência utilizada nos testes (2 kHz) e a escala muito pequena do plano de impedância nos ensaios de varredura, contribuem para que os sinais da **Figura 4.6** apresentem uma relação sinal/ruído pequena e, conseqüentemente, os desvios padrões das 10 regiões apresentam um valor significativamente maior, **Tabela 4.2**, se comparado com os resultados ponto-a-ponto.

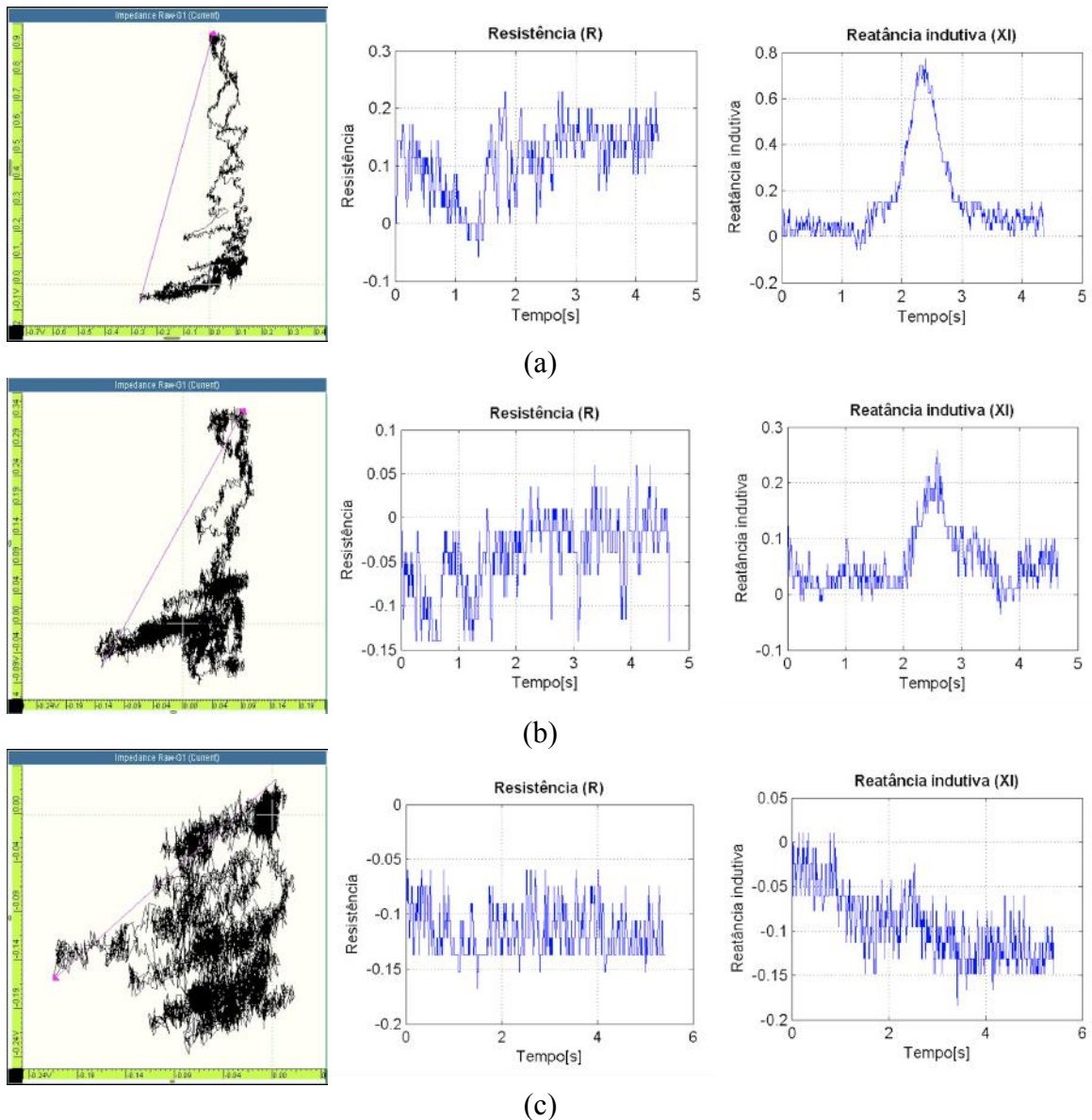


Figura 4.6 – Gráficos do plano de impedância do ensaio com correntes parasitas com suas respectivas componentes - resistência elétrica ( $R$ ) e reatância indutiva ( $X_L$ ) - para o ensaio de varredura (*lift-off* constante) dos entalhes: (a) 8; (b) 7; (c) 5.

### 4.3. SLOFEC

O mesmo procedimento de análise de dados realizado para os ensaios de correntes parasitas foi aplicado também para os dados obtidos com a técnica de SLOFEC. Os valores médios, os desvios padrões e os coeficientes de variação das medidas estão na Tabela 4.3. A Figura 4.7 e a Figura 4.8 apresentam, para as regiões 1 e 2, os resultados de amplitude e fase, respectivamente, plotados em gráficos em função dos entalhes.

**Tabela 4.3 – Valor médio (X), desvio padrão ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV) da amplitude e da fase dos valores obtidos pelo OmniScan para o ensaio SLOFEC.**

SLOFEC							
	Região	Amplitude			Fase		
		X (V)	$\sigma$ (V)	CV (%)	X (°)	$\sigma$ (°)	CV (%)
Extremidade Superior	R1	4,753	0,029	0,61%	212,89	0,748	0,35%
	R2	4,812	0,033	0,69%	212,12	0,563	0,27%
Entalhe 8	R1	4,803	0,024	0,50%	214,53	0,337	0,16%
	R2	4,382	0,044	1,00%	210	0,505	0,24%
Entalhe 7	R1	4,798	0,018	0,38%	214,65	0,504	0,23%
	R2	4,608	0,017	0,37%	212,12	0,164	0,08%
Entalhe 6	R1	4,757	0,011	0,23%	214,5	0,183	0,09%
	R2	4,764	0,013	0,27%	212,98	0,179	0,08%
Entalhe 5	R1	4,709	0,016	0,34%	213,58	0,447	0,21%
	R2	4,724	0,013	0,28%	212,94	0,195	0,09%
Entalhe 4	R1	4,646	0,015	0,32%	211,42	0,444	0,21%
	R2	4,667	0,006	0,13%	211,04	0,167	0,08%
Entalhe 3	R1	4,432	0,016	0,36%	207,04	0,867	0,42%
	R2	4,502	0,023	0,51%	206,04	0,385	0,19%
Entalhe 2	R1	4,326	0,041	0,95%	202,04	0,7	0,35%
	R2	4,351	0,007	0,16%	200,26	0,182	0,09%
Entalhe 1	R1	4,408	0,06	1,36%	205,5	1,918	0,93%
	R2	4,483	0,007	0,16%	204,08	0,205	0,10%
Extremidade Inferior	R1	4,538	0,02	0,44%	207,86	0,695	0,33%
	R2	4,609	0,02	0,43%	207,46	0,385	0,19%

Com a técnica de SLOFEC também foi possível a detecção dos entalhes 6, 7 e 8. A dificuldade de obtenção de dados devido à rugosidade superficial e à imprecisão da operação da sonda foi aumentada devido ao acoplamento da sonda ao *yoke*. Entretanto, é possível perceber que os resultados, de forma geral, foram mais precisos, pois a diferença de amplitude (entre a região 1 e 2) nos entalhes 7 e 8 foram significativamente maiores se comparados com os resultados de correntes parasitas. Nos resultados de fase também é possível observar esta diferença nos entalhes 6, 7 e 8.

Ao analisar os valores médios das fases e das amplitudes em todas as regiões, é possível perceber que a variação destes é muito menor em comparação com os valores obtidos com as correntes parasitas: fase, entre 214,650° (Entalhe 7) e 202,040° (Entalhe 2); na amplitude, entre 4,803 (Entalhe 8) e 4,326 (Entalhe 3). Isso indica que a influência relacionada à resposta magnética da parede externa do tubo foi minimizada drasticamente com a utilização da técnica de SLOFEC.

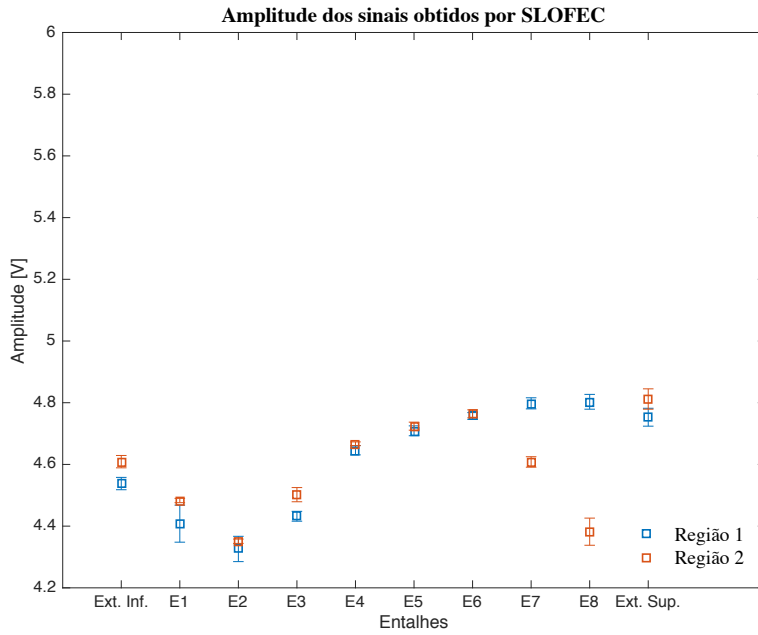


Figura 4.7. Amplitude dos sinais obtidos por SLOFEC na região 1 e 2.

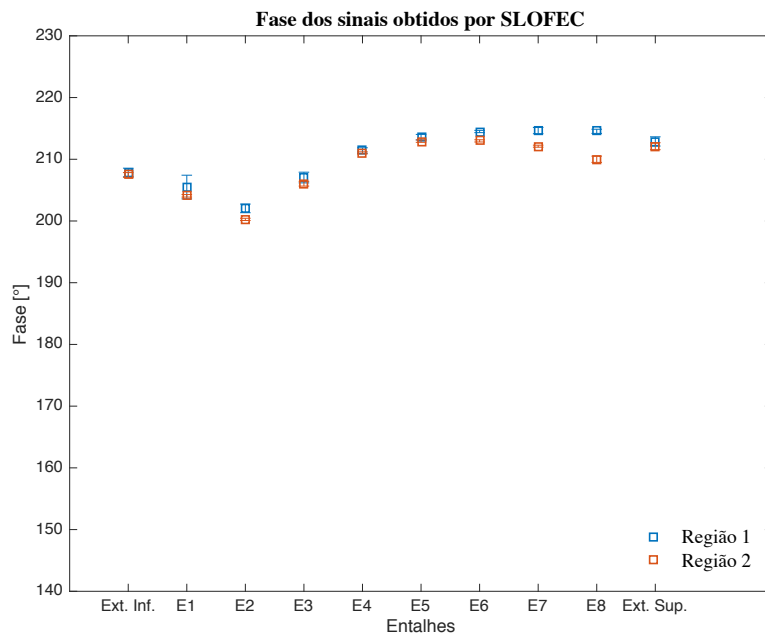
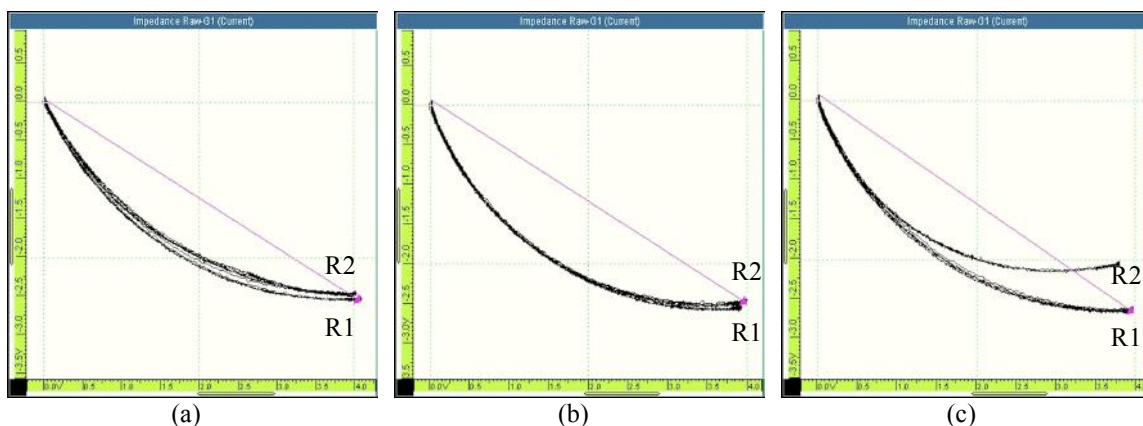


Figura 4.8. Fase dos sinais obtidos por SLOFEC na região 1 e 2.

Os planos de impedância para as medidas realizadas ponto a ponto com a técnica SLOFEC têm aparência similar aos obtidos com correntes parasitas. A **Figura 4.9** mostra as imagens obtidas pelo OmniScan com SLOFEC, sendo possível observar que



o entalhe 8, **Figura 4.9(c)**, é o único que apresenta uma diferença significativa entre a região 1 e a região 2.



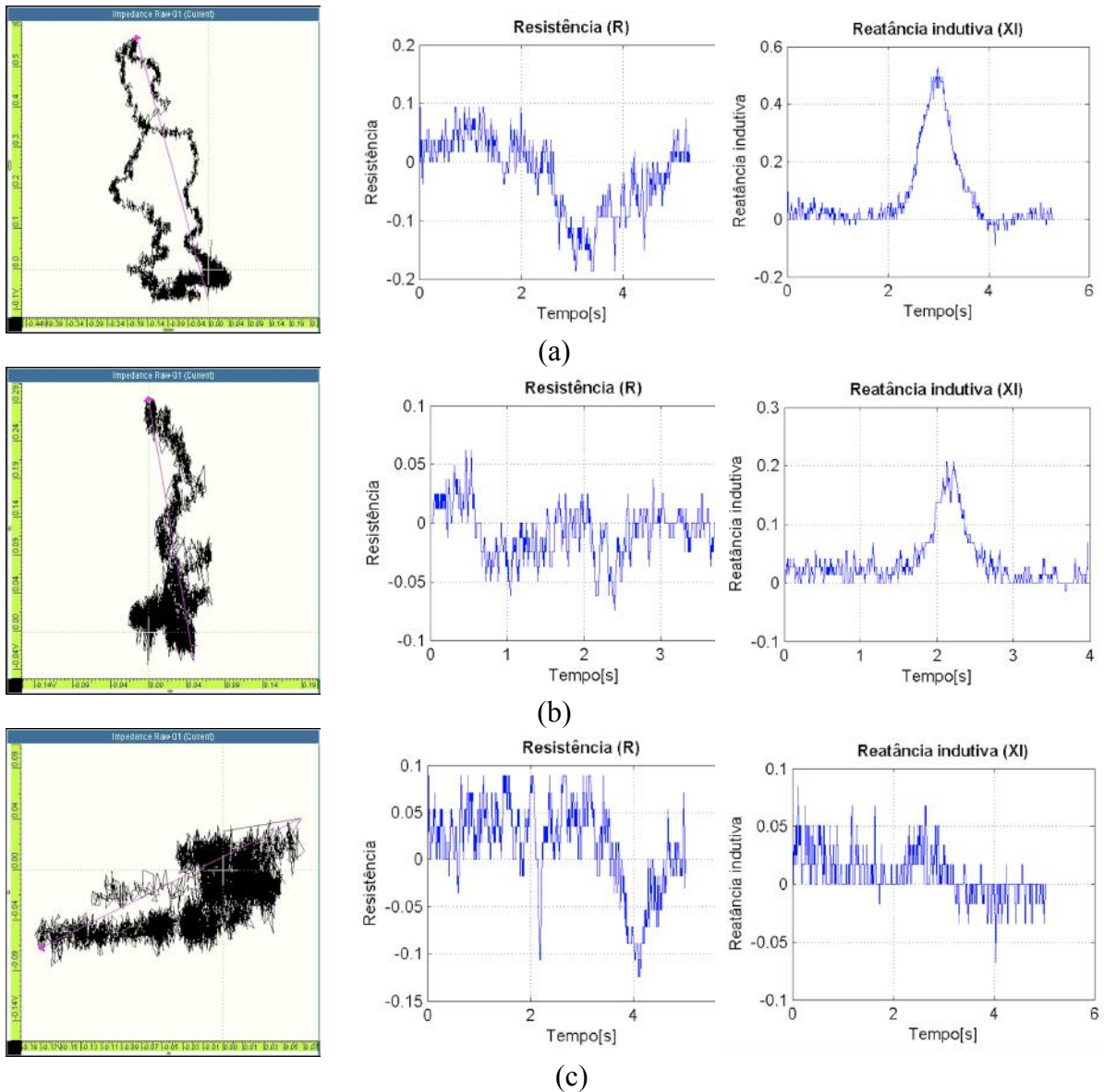
**Figura 4.9 – Plano de impedância do ensaio com SLOFEC para medidas ponto a ponto: (a) extremidade superior; (b) Entalhe 5; (c) Entalhe 8.**

Os resultados no ensaio de varredura também foram similares aos obtidos com correntes parasitas. Foi constatado que os resultados das medidas tomadas ponto a ponto, em virtude da maior facilidade de obtenção, apresentaram valores mais consistentes. Todos os desvios padrões encontrados para esse ensaio foram altos, porém os dados da extremidade superior foram extremamente dispersos e, sendo assim, os dados não foram analisados. Os valores médios, os desvios padrões e os coeficientes de variações das fases e amplitudes obtidas para as dez regiões com a técnica de SLOFEC estão na **Tabela 4.4**.

**Tabela 4.4 – Valor médio, desvios padrão e coeficiente de variação da amplitude e da fase obtidos pelo OmniScan para o ensaio de varredura a um *lift-off* constante – SLOFEC.**

	Amplitude			Fase		
	X (V)	$\sigma$ (V)	CV (%)	X (°)	$\sigma$ (°)	CV (%)
Extrem. Sup.	0,189	0,019	10,1%	152,22	23,93	15,7%
Entalhe 8	0,700	0,018	2,6%	74,64	1,35	1,8%
Entalhe 7	0,358	0,015	4,2%	80,78	9,84	12,2%
Entalhe 6	0,249	0,009	3,6%	121,86	11,90	9,8%
Entalhe 5	0,198	0,053	26,8%	149,28	13,49	9,0%
Entalhe 4	0,199	0,040	20,1%	153,40	8,66	5,6%
Entalhe 3	0,240	0,020	8,3%	130,94	13,25	10,1%
Entalhe 2	0,284	0,009	3,2%	127,22	4,97	3,9%
Entalhe 1	0,374	0,043	11,5%	96,44	7,87	8,2%
Extrem. Inf.	0,250	0,006	2,4%	137,28	7,77	5,7%

O plano de impedância e suas respectivas componentes, Resistência (R) e Reatância Indutiva ( $X_L$ ), obtidas pelo OmniScan apresentam-se na **Figura 4.10**. Da mesma forma como ocorreu com os ensaios com correntes parasitas, os ensaios de varredura obtiveram resultados mais dispersos devido à baixa frequência, escala pequena no plano de impedância e, imprecisão na operação da sonda acoplada ao *yoke*.



**Figura 4.10** – Gráficos do plano de impedância do ensaio SLOFEC com suas respectivas componentes - resistência elétrica (R) e reatância indutiva ( $X_L$ ) - para o ensaio de varredura (*lift-off* constante) dos entalhes: (a) 8; (b) 7; (c) 5.

## 5. Conclusões

Os resultados de correntes parasitas e de SLOFEC realizados nas regiões sem entalhe permitem concluir que o material apresenta uma resposta magnética heterogênea ao longo do CP, pois tanto os valores de amplitude como a fase variam, indicando que o CP sofreu variações microestruturais em seu comprimento. Esse indício é confirmado pela variação microestrutural evidenciada pela diferença do estado de envelhecimento entre as duas extremidades do tubo, como foi constatada mediante análise das micrografias.

De acordo com os resultados obtidos pela técnica de correntes parasitas é possível concluir que a técnica permite detectar os entalhes 6, 7 e 8, com 8 mm, 6 mm e 4 mm de profundidade, respectivamente. Observamos que os entalhes 6, 7 e 8 apresentam uma diferença significativa entre as regiões 1 (sem entalhe) e 2 (com entalhe), tanto no gráfico de amplitude como de fase, indicando que a sonda e os parâmetros utilizados permitem a detecção dos três entalhes. Por outro lado, os resultados obtidos com a técnica de SLOFEC apresentam o mesmo comportamento da técnica de correntes parasitas, no entanto, com a técnica SLOFEC, os desvios padrões dos valores obtidos são menores.

Foi constatado também que, para os parâmetros utilizados nesse projeto, tanto para correntes parasitas convencional quanto para SLOFEC, a profundidade de penetração experimental foi de 7 mm.

## **6. Sugestões para trabalhos futuros**

- Desenvolver um sensor que permita detectar descontinuidades localizadas a uma profundidade de penetração maior que a obtida neste trabalho e desta forma garantir a detecção dos entalhes 1-5;
- Desenvolver uma metodologia que permita fazer um mapeamento ao longo do comprimento do tubo, de tal forma que seja possível identificar e caracterizar os defeitos presentes;
- Analisar a variação microestrutural ao longo do tubo para avaliar a influencia na detecção de trincas da microestrutura no centro de parede com da parede externa;
- Realizar a caracterização magnética do tubo utilizando outras técnicas complementares, como ferrofluido, MFM e Magnetometria.

## 7. Referências Bibliográficas

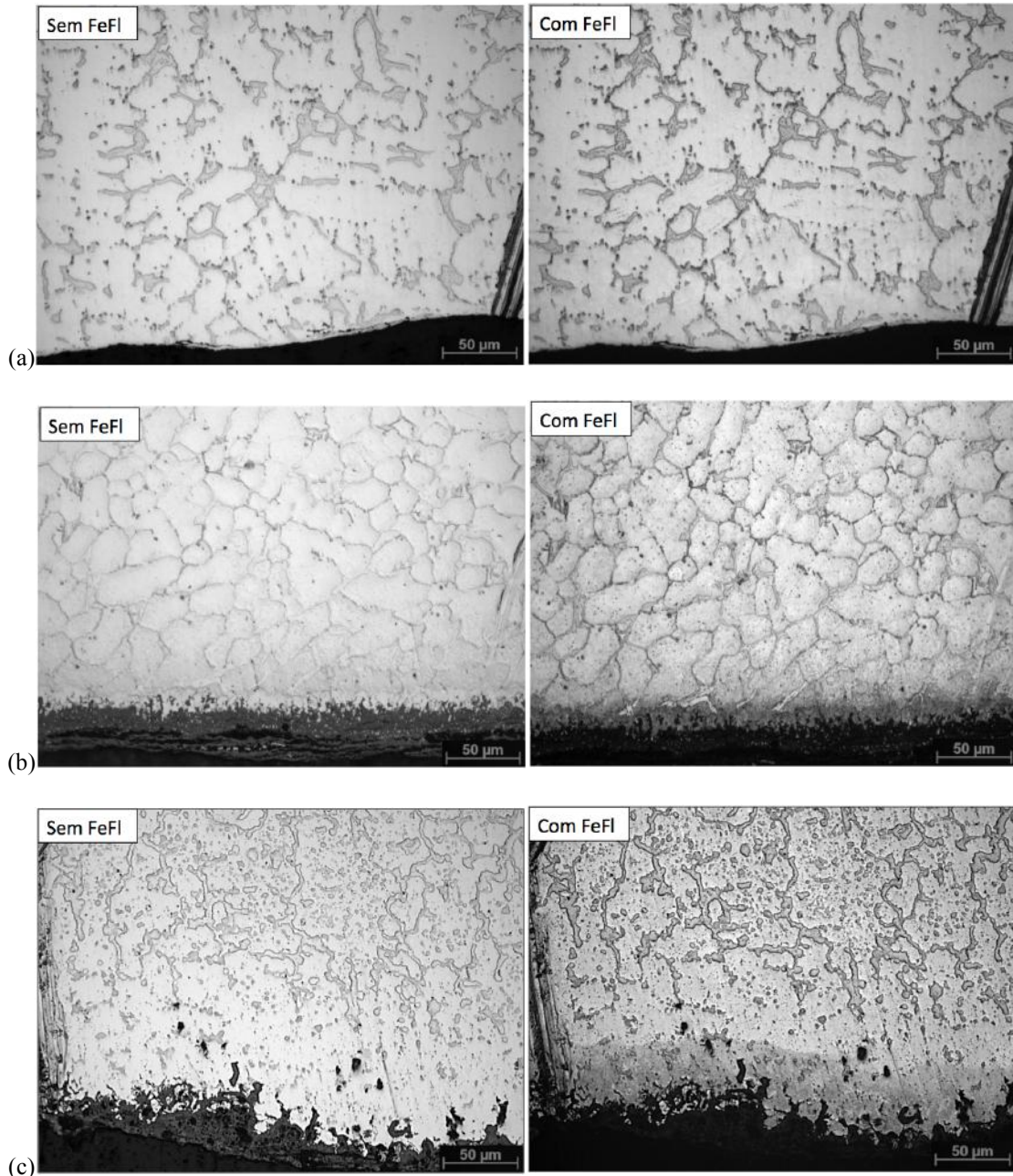
1. *Reformer furnaces: materials, damage mechanisms and assessment*. Silveira, T.L. and May, I.L. 2C, s.l.: The Arabian Journal for Science and Engineering, 2006, Vol. 31, pp. 99-119.
2. *Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance conditions*. Alvino, A., et al. s.l.: Engineering Failure Analysis, 2010, pp. 1526-1541.
3. ASTM, A 297/A 297M - 08. Standart especification for steel castings, iron-chromium and iron-chromium-nickel, heat resistant, for general application. *Norma*. 2008.
4. *Failure analysis and remaining life assessment of service exposed primary reformer heater*. Swaminathan, J., et al. 4, s.l.: Engineering Failure Analysis, 2008, Vol. 15, pp. 311-331.
5. *The system Fe–Ni–Cr: revision of the thermodynamic description*. Tomiska, J. Vienna: Elsevier, 2004, Journal of Alloys and Compounds, pp. 176-187.
6. *Comparison of the creep crack growth resistance of HK40 and HP40 heat-resistant steels*. Zhu, S.J., Wang, Y. and Wang, F.G. 1990, Journal of Mater Science Letter, Vol. 9, pp. 520-521.
7. FERNANDES, K. C. Análise microestrutural do aço HP modificado ao Nb em diferentes condições de envelhecimento. Projeto de Graduação, rio de Janeiro, 2013
8. ASM. Metals Handbook, Cast Stainless Steels. [S.l.]: [s.n.], 1990.
9. *Microstructure evolution during service exposure of two cast, heat-resisting stainless steels HP-Nb modified and 20-32Nb*. Shi, S. and Lippold, J.C. s.l.: Materials Characterization - ELSEVIER, 2007, Vol. 59, pp. 1029-1040.
10. *Caracterização das transformações microestruturais por carburização em serpentinas de fornos de pirólise através de análise metalográfica*. Silveira, Tito. Rio de Janeiro : s.n., 2003.
11. *Microstructural characterization of modified 25Cr–35Ni centrifugally cast steel furnace tubes*. Almeida, L.H., Ribeiro, A.F. and May, I.L. s.l.: ELSEVIER, 2003, Materials Characterization, Vol. 49, pp. 219-229.

12. *Microestrutura de tubos de forno de pirólise desativados após 91.000h de operação*. Silveira, T.F.A., et al. 6, Salvador : COTEQ, 2002.
13. *Reformer furnaces: materials, damage mechanisms and assessment*. Silveira, T.L. and May, I.L. 2C, s.l.: The Arabian Journal for Science and Engineering, 2006, Vol. 31, pp. 99-119.
14. *Criteria for the Evaluation of Damage and Remaining Life in Reformer Furnace Tubes*. May, I. Le, Silveira, T.L. da and Vianna, C.H. 1996, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 66, pp. 233–241.
15. *A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels*. Sposito, G., et al. London : NDT&E International, 2010, Vol. 43, pp. 555-567.
16. PADILHA, A.F., AMBROSIO, F. F°. *Técnicas de Análise Microestrutural*. 1ª ed., São Paulo, Hemus Editora, 1985.
17. ASM HANDBOOK. *Metallography and Microstructures*. Volume 9, ASM International, 1998.
18. TALONEM, J., ASPEGREN, P., HÄNNINEN, H. “Comparison of Different Methods for Measuring Strain Induced  $\alpha'$ - Martensite Content in Austenitic Steels”. *Materials Science Technology* v. 20, pp 1506-1512, 2004.
19. SILVA, L.K., 2015. *Caracterização Magnética dos Efeitos de Deformação em Aços Ferríticos Através da Técnica Bitter Modificada*. Projeto de Graduação, DEMM/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
20. ASM HANDBOOK. *Non destructive Evaluation and Quality Control*. Volume 17, ASM International, 1989.
21. HENRIQUES, P.C. F, CARNEVAL, R. O. *Ensaio Não-destrutivo por Correntes Parasitas*. 1ªed., Rio de Janeiro, DITED/Petrobras, 1990.
22. NDT RESOURCE CENTER, 2015. Disponível em: <<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Instrumentation/impedanceplane.htm>> Acesso em: 06/07/2016.
23. CAMERINI, C. G., 2012. *Desenvolvimento de Sondas de Correntes Parasitas para Detecção e Quantificação de Fase Sigma em Aço Inoxidável Duplex*. Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
24. HANSEN, J., "The Eddy Current Inspection Method". *Insight* v. 46, n. 5, pp 279 – 282, 2004.
25. Olympus, 2015. Disponível em:

- <<https://www.olympusims.com/en/eddycurrenttesting/>>. Acesso em: 26/07/2016.
26. “SLOFEC - Fast corrosion screening technique.” [Online]. Disponível em: <http://www.innospection.com/pdfs/SLOFEC%20Technique.pdf> . Acesso em: 26/07/2016.
27. N. Kasai, S. Ogawa, T. Oikawa, K. Sekine, and K. Hasegawa, “Detection of carburization in ethylene pyrolysis furnace tubes by a C core probe with magnetization,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 29, no. 3, pp. 175–180, 2010.
28. ARENAS, M.P., 2013. Caracterização por ensaios magnéticos não destrutivos de aços HP provenientes de fornos de reforma. Projeto de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## ANEXO

Micrografias onde foi possível identificar o aumento na resposta magnética nas paredes externas dos tubos nos estados de envelhecimento I (a), III (b) e V/VI (c).



Micrografias das regiões próximas à parede externa realizadas antes e após a aplicação de Ferrofluido para os estados de envelhecimento: (a) I; (b) III; e, (c) V/VI.