# USO DO APRENDIZADO DE MÁQUINA NA CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE UM AÇO HP MODIFICADO AO NB

Aymê Fernandes de Assis

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

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Co-orientadora: Clara Johanna Pacheco

Rio de Janeiro

Novembro de 2020

USO DO APRENDIZADO DE MÁQUINA NA CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE UM AÇO HP MODIFICADO AO NB

Aymê Fernandes de Assis

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DOS CURSOS DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALURGIA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA DE MATERIAIS E METALURGIA.

Examinado por:

_____

Gabriela Ribeiro Pereira, D. Sc

PEMM-COPPE/UFRJ

_____

Clara Johanna Pacheco, D. Sc

LNDC/UFRJ

_____

Luiz Henrique de Almeida, D. Sc

PEMM-COPPE/UFRJ

_____

Adriana da Cunha Rocha, D. Sc

PEMM-COPPE/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO de 2020

Assis, Aymê Fernandes

Uso do aprendizado de máquina na caracterização magnética de um aço HP modificado ao Nb/ Aymê Fernandes de Assis. – Rio de Janeiro:

UFRJ/ Escola Politécnica, 2020.

86 p.: il; 29,7 cm.

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira.

Co-orientadora: Clara Johanna Pacheco.

Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Materiais e Metalurgia, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 62-65.

1. Aço HP 2. Correntes Parasitas 3. Caracterização Microestrutural. 4.Reforma à vapor. 5. Aprendizado de Máquina. 6. Evolução Microestrutural. 7. END.

I. Pereira, Gabriela Ribeiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Materiais. III. Uso do aprendizado de máquina na caracterização magnética de um aço HP modificado ao Nb.

*Dedico à minha família*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que sempre se preocuparam em me oferecer os melhores recursos para meu aprendizado e me deram coragem para enfrentar cada obstáculo que se apresentou em minha vida até o momento.

Agradeço ao Adriano Caldeira, por compartilhar comigo momentos de alegria e aprendizado, tornando minha jornada neste mundo mais leve.

Agradeço à minha família, por compreenderem os momentos de festividades em que me ausentei para estudar.

Agradeço à Gabriela Cardoso, pelo apoio e amizade desde à época do ensino fundamental no CPII até os dias de hoje.

Aos amigos que ganhei da METALMAT, agradeço pela parceria em grupos de estudos dosados com os momentos de descontração – como o famoso Churrasco METALMAT. A UFRJ também me deu amigos de outros cursos, muito presentes tanto nos almoços entre aulas no Grêmio até em aniversários. Não somente alunos, encontrei como amigos meus Professores – como Gabriela Pereira e Adriana Rocha – que compartilharam comigo lanchinhos, conversas e conselhos. O convívio com amigos foi fundamental para seguir os longos sete anos de graduação.

Ao final da graduação, tive a oportunidade de fazer parte da Modec do Brasil, empresa que trouxe para a prática meus conhecimentos teóricos sobre engenharia e me proporcionou conhecer profissionais de diferentes departamentos e nacionalidades. Aos amigos da Modec, agradeço os exemplos diários de como ser melhor – tanto como profissional quanto como pessoa. Em especial aos meus chefes David Filho e Sandro Araújo, por valorizarem o meu trabalho desde o início do estágio.

Este trabalho só foi possível graças à equipe de END do LNDC, que foram pacientes e me deram o suporte necessário nos ensaios de correntes parasitas. Em especial, à Johanna Pacheco e Gabriela Pereira, pela orientação sobre a metodologia do trabalho e na elaboração do texto. Este trabalho também contou com o suporte do Fábio Queiroz do laboratório de Propriedades Mecânicas na interpretação das micrografias por MO.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheira de Materiais e Metalurgia.

# USO DO APRENDIZADO DE MÁQUINA NA CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE UM AÇO HP MODIFICADO AO NB.

Aymê Fernandes de Assis

Novembro/2020

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Co-orientadora: Clara Johanna Pacheco

Cursos: Engenharia de Materiais e Engenharia Metalúrgica

O uso de ligas Resistentes ao Calor em colunas de reforma à vapor tem sido crescentemente estudado nas últimas décadas em função do ganho em resistência à fluência destes componentes e da necessidade por aumento de tempo em serviço. Estudos caracterizaram o desenvolvimento da morfologia, composição química e distribuição de fases típicas de cada estado de evolução microestrutural de alguns aços HP. Além disso, encontrou-se mudança na intensidade e distribuição da resposta magnética ao longo da espessura desses tubos também em função do envelhecimento. Com objetivo de identificar os estados de envelhecimento de um tubo de reforma à vapor de de um aço HP modificado ao Nb de forma não destrutiva, este trabalho buscou por um classificador que apresentasse melhor desempenho ao classificar dados obtidos por ensaio de correntes parasitas utilizando sensor híbrido com saturação magnética. Para classificar as amostras segundo seu estado microestrutural, foi realizada análise por microscopia ótica e comparação com o modelo proposto por QUEIROZ (2017). A atribuição de classe aos dados obtidos foi realizada a partir da técnica *Support Vector Machine* de *Machine Learning*.

*Palavras-chave:* Aço HP, Correntes Parasitas, Caracterização, Reforma à vapor, Aprendizado de Máquina, Evolução Microestrutural, END

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

THE USE OF MACHINE LEARNING IN MAGNETIC CHARACTERIZATION OF A Nb MODIFIED HP-TYPE STEEL.

Aymê Fernandes de Assis

November/2020

Advisor: Gabriela Ribeiro Pereira

Co-advisor: Clara Johanna Pacheco

Course: Materials and Metallurgical Engineering

The use of heat-resistant alloys on steam reforming tubes has been increasingly studied during the last decades aiming creep resistance enhancement as well as the longer in-service time of these components. Previous studies have characterized the morphology evolution, chemical composition and typical phases distribution of some HP steels on each ageing condition. Besides, it has been found that the magnetic signal changes in terms of intensity and distribution along with the thickness of these tubes and also in the function of the ageing condition. In order to identify, in a non-destructive manner, the ageing condition of Nb modified HP-type steel steam reforming tubes, this work searched for a classifier with the best classify performance of data from eddy current using a hybrid sensor with a magnetic saturation mechanism. To classify samples according to its microstructural condition, optical microscopy analysis was carried out based on the model proposed by QUEIROZ (2017). The assignment of eddy current data into classes was done by the machine learning technique SVM.

*Keywords*: HP-type steel, Eddy current, Characterization; Steam reforming, Machine learning, Microstructural evolution, NDE

**SUMÁRIO**

Lista de Figuras ..... x
Lista de Tabela ..... xiv
Lista de Abreviações e Siglas ..... xv
1 INTRODUÇÃO ..... 1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 3
2.1 REFORMA A VAPOR ..... 3
2.1.1 Tubos de Reforma ..... 3
2.2 Aços Inoxidáveis Austeníticos Resistentes ao calor ..... 5
2.2.1 Aço HP ou 25Cr-35Ni ..... 6
2.2.2 Estados de Envelhecimento do Aço HP ..... 7
2.2.3 Aço HP e sua Resistência à Fluência ..... 15
2.3 Caracterização pelo Ensaio não destrutivo Correntes Parasitas ..... 16
2.3.1 Ensaio Não-Destrutivo ..... 16
2.3.2 Indução Eletromagnética ..... 17
2.3.3 Correntes Parasitas ..... 18
2.3.4 Plano de Impedância ..... 19
2.3.5 Condutividade Elétrica e Permeabilidade Magnética ..... 21
2.3.6 Parâmetros que influenciam o ensaio de Correntes Parasitas ..... 22
2.3.7 Lift-off ..... 24
2.3.8 Tipos de Sondas de Correntes Parasitas ..... 24
2.3.9 Sensor de efeito Hall ..... 25
2.3.10 Processamento dos sinais obtidos pelo sensor híbrido ..... 25
2.3.11 Inspeção de Tubos de Reforma por Corrente Parasita ..... 26
2.3.12 Correntes parasitas com saturação magnética ..... 26
2.4 Aprendizado de máquina ou *Machine Learning* ..... 27
2.4.1 *Support Vector Machine (SVM*) ..... 27
3 MATERIAIS E MÉTODOS ..... 28
3.1 Metodologia ..... 28
3.2 Segmentos e Amostras ..... 29
3.2.1 Amostras e Segmentos ..... 29

3.3 Microscopia Ótica ..... 30
3.3.1 Preparação Metalográfica ..... 30
3.3.2 Obtenção das Micrografias ..... 31
3.4 Ensaio de Correntes Parasitas ..... 32
3.4.1 Sonda Utilizada ..... 32
3.4.2 Metodologia de Inspeção do Segmento ..... 32
3.4.3 Banco de Dados para Classificadores ..... 34
3.4.4 Classificadores ..... 34
3.4.5 Blind Test ..... 35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 36
4.1 Microscopia Ótica ..... 36
4.1.1 Microestrutura Típica do Aço HP-Nb e sinal obtido com a sonda híbrida 36
a) Amostra A1 – Estado de Envelhecimento I ..... 36
b) Amostras A2 e A3 – Estados de Envelhecimento II e III ..... 37
c) Amostras A4 e A5– Estado de Envelhecimento IV e V ..... 37
d) Amostra A6 – Estado de Envelhecimento VI ..... 37
4.1.2 Micrografia da Espessura do Tubo ..... 44
4.2 CLASSIFICADORES ..... 45
4.2.1 Blind Tests ..... 54
5 CONCLUSÃO ..... 59
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTURO ..... 61
7 REFERÊNCIAS ..... 62
8 ANEXOS ..... 66

## Lista de Figuras

**Figura 2-1.** Exemplo da arquitetura de forno de reforma. Adaptado de PEREZ, *et al*. (2013). ...4

**Figura 2-2.** (a) Efeito do Cromo no aço em ambiente industrial durante 10 anos; (b) Efeito do Cromo na resistência dos aços à oxidação em altas temperaturas. Retirado de INFOMET-1. .....6

**Figura 2-3.** Microscopia Ótica da microestrutura bruta de estado fundido de Aço HP: (a) Modificado ao Nb (b) Modificado ao Nb e microligado ao Ti. Retirado de DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003).....7

**Figura 2-4.** Maior aumento por MO de estado fundido do aço HP a) Nb b) NbTi. Modificado de DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003) .....8

**Figura 2-5.** Imagens de MEV de HP-Nb e HP-NbTi como fundido. (a) HP-Nb por elétrons secundários (b) HP-Nb por elétrons retroespalhados; (c) HP-NbTi por elétrons secundários; (d) HP-NbTi por elétrons retroespalhados. Modificado de DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003).....9

**Figura 2-6.** Imagens de MEV de HP-Nb e HP-NbTi após envelhecimento à 900°C durante 1000h. (a) HP-Nb por elétrons secundários; (b) HP-Nb por elétrons retroespalhados; (c) HP-NbTi por elétrons secundários; (d) HP-NbTi por elétrons retroespalhados. Modificado de DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003). .....9

**Figura 2-7.** Carbetos de HP-NbTi através de MET. (a) Região da fase G, Carbetos de Nióbio e Titânio (NbTi), carbetos primários (P-Cr) e secundários (S-Cr) de Cromo; (b) Carbetos de Ti (Ti) dentro da região G (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003). .....10

**Figura 2-8.** Microestrutura do HP-Nb (a e b) e HP-NbTi (c e d) em estado envelhecido observadas em MEV. Modificada de QUEIROZ (2017).....11

**Figura 2-9.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento I para os aços HP-Nb e HP-NbTi segundo QUEIROZ (2017). (a) Ocorrência de morfologia "Escrita Chinesa" (b) Ausência de morfologia "Escrita Chinesa". Retirado de QUEIROZ (2017). .....12

**Figura 2-10.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento II para os aços HP-Nb e HP-NbTi segundo QUEIROZ (2017) (a) Ausência de precipitação acicular (b) Ocorrência de precipitação acicular. Adaptado de QUEIROZ (2017).....12

**Figura 2-11.** Critério de classificação dos Estados de Envelhecimento III para os aços HP-Nb e HP-NbTi segundo QUEIROZ (2017) (e) Ocorrência de precipitação acicular (f) Ausência de precipitação acicular. Adaptado de QUEIROZ (2017). .....13

**Figura 2-12.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento IV para os aços HP-Nb e HP-NbTi segundo QUEIROZ (2017). (a) e (b) precipitação com refinamento característico no estado IV. Adaptado de QUEIROZ (2017). .....13

**Figura 2-13.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento V para os aços HP-Nb e HP-NbTi. (a) precipitação com refinamento característico do estado V. Adaptado de QUEIROZ (2017). .....14
**Figura 2-14.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento VI para os aços HP-Nb e HP-NbTi. (a) Matriz mais limpa característica do estado VI. Adaptado de QUEIROZ (2017).....14
**Figura 2-15.** Exemplo de curva característica de envelhecimento de um tubo de reforma. Retirado de QUEIROZ (2017). .....15
**Figura 2-16.** Esquema das respostas eletromagnéticas. a) Campo magnético induzido por corrente aplicada. b) Corrente Elétrica induzida por campo magnético aplicado. .....18
**Figura 2-17.** Campo magnético resultante induzido em bobina, retirado de NDE. .....18
**Figura 2-18.** Desenho esquemático de ensaio de correntes parasitas. .....19
**Figura 2-19.** Plano de impedância, adaptado de NDE-ED-2. .....20
**Figura 2-20.** Plano de impedância de um bloco de calibração, retirado de ARENAS (2017). ...21
**Figura 2-21.** Relação entre densidade da corrente parasita e profundidade atingida. Adaptado de ASM HANDBOOK COMITTEE (1989). .....22
**Figura 2-22.** Mapeamento do campo magnético de quatro amostras de aço resistente ao calor sob campo de 400 mT, nos estados: a) Como fundido; b) Estado I; c) Estado IV e d) Estado VI de envelhecimento. Representação da silhueta da amostra em pontilhado. Adaptado de PEREIRA (2017). .....24
**Figura 2-23.** Princípio de funcionamento do sensor de efeito Hall. (a) Sem campo magnético aplicado. (b) Com campo magnético aplicado. Retirado de GARCAÍ-MARTNÍ; GÓMEZ-GIL; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, 2011). .....25
**Figura 2-24.** Curva de Magnetização das regiões de centro de parede e superfície externa. Retirado de ARENAS (2017).....27
**Figura 2-25.** Ilustração esquemática das etapas do *SVM*. .....28
**Figura 3-1.** Fluxograma do procedimento. .....29
**Figura 3-2.** Esquema do corte das amostras. .....30
**Figura 3-3.** Fluxograma referente à preparação metalográfica. .....31
**Figura 3-4.** Esquema das micrografias e suas regiões na amostra. Visão superior. .....31
**Figura 3-5.** Micrografia do tipo Mosaico. .....32
**Figura 3-6.** Ilustração da configuração do ensaio de corrente parasita. .....32
**Figura 3-7.** Marcações ou geratrizes. .....33
**Figura 3-8.** Obtenção de dados por ensaio de corrente parasita. Visão do tubo como se estivesse aberto. .....33
**Figura 3-9.** Fluxograma do Teste de Classificação e Blind Test. .....36

**Figura 4-1.** Micrografia por MO da amostra A1 (Estado de Envelhecimento I) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética. ..... 38

**Figura 4-2.** Micrografia por MO da amostra A2 (Estado de Envelhecimento II) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética. ..... 39

**Figura 4-3.** Micrografia por MO da amostra A3 (Estado de Envelhecimento III) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética. ..... 40

**Figura 4-4.** Micrografia por MO da amostra A4 (Estado de Envelhecimento IV) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética. ..... 41

**Figura 4-5.** Micrografia por MO da amostra A5 (Estado de Envelhecimento V) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética. ..... 42

**Figura 4-6.** Micrografia por MO da amostra A6 (Estado de Envelhecimento VI) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética. ..... 43

**Figura 4-7**. Curva característica dos estados de envelhecimento das amostras. ..... 44

**Figura 4-8.** Micrografia da espessura das seis amostras (A1, A2, A3, A4, A5 e A6) com diferentes estados de evolução. Magnificação de 50x. (a) Estado I (A1); (b) Estado II (A2); (c) Estado III (A3); (d) Estado IV (A4); (e) Estado V (A5) e (f) Estado VI (A6). ..... 45

**Figura 4-9.** Gráfico de Amplitude x Fase sem saturação magnética apresentando os seis estados de envelhecimento. Em pontilhado, são as prováveis fronteiras definidas pelo *SVM* para delimitar as regiões atribuídas a cada classe. ..... 46

**Figura 4-10.** Gráfico de Amplitude x Fase com saturação magnética apresentando os seis estados de envelhecimento. Em pontilhado, são as prováveis fronteiras definidas pelo *SVM* para delimitar as regiões atribuídas a cada classe. ..... 47

**Figura 4-11.** Gráfico de Amplitude x *Off-set* sem saturação magnética apresentando os seis estados de envelhecimento. Em pontilhado, são as prováveis fronteiras definidas pelo *SVM* para delimitar as regiões atribuídas a cada classe. .....47
**Figura 4-12.** Gráfico de Amplitude x *Off-set* com saturação magnética apresentando os seis estados de envelhecimento. Em pontilhado, são as prováveis fronteiras definidas pelo *SVM* para delimitar as regiões atribuídas a cada classe. .....48
**Figura 4-13.** Gráfico de Amplitude x Fase do classificador C1 (Estados de Envelhecimento I, II e VI) utilizando sensor com saturação magnética. .....49
**Figura 4-14.** Gráfico de Amplitude x Fase do classificador C1 (Estados de Envelhecimento I, II e VI) utilizando sensor sem saturação magnética. .....50
**Figura 4-15.** Gráfico de Amplitude x *Off-set* dos estados de envelhecimento do classificador C1 utilizando sensor com saturação magnética.....50
**Figura 4-16.** Gráfico de Amplitude x *Off-set* dos estados de envelhecimento do classificador C1 utilizando sensor sem saturação magnética. .....51
**Figura 4-17.** Esquema de retirada das amostras B1A e B1B com relação a B1 e ao queimador. .....56
**Figura 4-18.** Micrografias por MO de: (a) B1A em 50 x, (b) B1A em 500x; (c) B1B em 50x e (d) B1B em 500x.....57
**Figura 4-19.** Gráficos da amostra B1: (a)Amplitude x Fase sem saturação magnética; (b) Amplitude x Fase com saturação magnética; (c) Amplitude x Off-set sem saturação magnética e (d) Amplitude x Off-set com saturação magnética. As regiões tracejadas indicam os estados Ar, I, II e VI (C1) treinados pelo SVM.....58

## Lista de Tabela

**Tabela 2-1.** Composição Química em percentagem em peso de aços inoxidáveis do tipo HP-Nb de acordo com a ASTM A608 (2018). .....6

**Tabela 3-1.** Composição Química da amostra fornecida pelo Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT) em porcentagem. .....29

**Tabela 3-2.** Relação entre segmento de tubo, amostra de microscopia e estado de envelhecimento. .....30

**Tabela 3-3.** Atribuição de dados aos estados de envelhecimento no modo treino.....34

**Tabela 3-4.** Relação dos classificadores e abrangência dos estados de envelhecimento. .....34

**Tabela 4-1.** Relação dos classificadores propostos, estados de envelhecimento contemplados e a porcentagem de acerto. .....49

**Tabela 4-2.** Matriz de Confusão do classificador C1. .....51

**Tabela 4-3.** Matriz de Confusão do classificador C0. .....52

**Tabela 4-4.** Previsões de acordo com os classificadores C0 ao C9 em ensaio de Blind Test B1. .....54

**Tabela 4-5.** Matriz de confusão de todos os classificadores em ensaio de Blind Test em B1. ...54

**Tabela 4-6.** Previsão visual das amostras *Blind Tests* para todos os classificadores onde A x F (s): Amplitude x Fase sem saturação; A x O (s): Amplitude x Off-set sem saturação; A x F (c): Amplitude x Fase com saturação e A x O (c): Amplitude x Off-set com saturação. .....55

**Tabela 4-7.** Acurácia dos classificadores em ensaio Blind Test (para os estados I e II). .....58

**Tabela 4-8.** Matriz de confusão para identificação do Estado II para os classificadores C0 ao C9. .....59

**Lista de Abreviações e Siglas**

**Instituição**

LNDC- *Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem;*

END- *Ensaios Não Destrutivos;*

DEMM- *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ;*

UFRJ- *Universidade Federal do Rio de Janeiro;*

**Parâmetros**

R- *Resistência elétrica;*

$X_C$- *Reatância Capacitiva;*

$X_L$- *Reatância Indutiva;*

Z- *Indutância;*

A – *Amplitude da tensão*

φ – *Fase*

**Equipamentos**

MO – *Microscopia Ótica*

MEV – *Microscopia Eletrônica de Varredura*

MET – *Microscopia Eletrônica de Transmissão*

# 1 INTRODUÇÃO

Os aços resistentes ao calor são utilizados na fabricação de colunas em fornos de reforma à vapor em virtude de sua elevada resistência à fluência. Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com o propósito de prolongar a vida em fluência desses componentes através de aprimoramentos na microestrutura e melhor entendimento da evolução de fases durante serviço. Com base nisso, o aço inoxidável HP modificado ao Nb surgiu apresentando maior resistência à fluência do que seus antecessores, os aços HK e HP. Mais recentemente, desenvolveu-se o aço HP modificado ao Nb e microligado ao Ti. (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

Tendo em vista a dificuldade de obter um histórico preciso de tensão-temperatura desses tubos durante serviço de reforma catalítica, é mais vantajoso analisá-los por técnicas de ensaios não destrutivos do que realizar a troca precoce dos tubos (SHANNON; JASKE; SMITH, 2010).

Correntes parasitas é uma dentre várias técnicas de ensaio não destrutivo aplicadas pela indústria. Seu mecanismo se baseia no fenômeno de indução eletromagnética, que consiste no surgimento de corrente elétrica induzida no material inspecionado através da aplicação de corrente alternada em uma bobina. Por ser uma técnica comparativa, apenas é possível detectar alteração no material inspecionado caso esta impacte na condutividade e permeabilidade magnética do mesmo por meio de comparação com o material de calibração. (NDE-ED-1; NDE-ED-2; NDE-ED-3; ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO (ABENDI); ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989; INSPECTIONEERING).

Considerando que o requisito de ser condutor seja atendido, a corrente parasita é uma técnica rápida e bastante versátil, podendo ser aplicada para diversas finalidades, como detecção de defeitos superficiais ou caracterizações microestruturais, por exemplo. Por outro lado, em virtude da sensibilidade desta técnica, pode haver interferência de fatores relevantes, inerentes ao material ou ambiente, que podem prejudicar a interpretação do sinal obtido, como ocorre em presença de campos magnéticos externos ou por efeito do fenômeno *liftoff*, por exemplo (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

Estudos mostram diferentes respostas magnéticas de amostras de aços HP-Nb em função do seu estado de envelhecimento (ARENAS, 2013, 2017; DA SILVEIRA, 2017). Os estados de evolução microestrutural são estruturas características formadas em função

do envelhecimento dependendo das condições de tempo e temperatura de operação dos fornos (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003). Além disso, a camada de óxido formada neste tipo de aço possui caráter ferro-magnético, o que pode causar interferência com o sinal de correntes parasitas (DA SILVEIRA, 2017, 2018). Desta forma, ao usar ensaios não destrutivos por correntes parasitas para avaliação microestrutural dos tubos, é necessário que seja acoplado ao sensor um mecanismo de saturação magnética adequado para inibir a resposta magnética da amostra durante ensaio (ARENAS, 2017).

O objetivo deste trabalho é, a partir dos dados coletados com uma sonda híbrida de correntes parasitas, verificar a eficiência de classificadores capazes de prever por *Support Vector Machine (SVM)* de forma precisa e acurada o estado de envelhecimento de colunas de reforma à vapor de um aço HP-Nb caracterizadas por microscopia óptica.

Neste trabalho, a classificação dos dados gerados pelos ensaios de correntes parasitas com saturação magnética é realizada em função do estado de evolução microestrutural através do uso de *SVM* tipo Linear. *SVM* é uma técnica de *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina, em português) largamente utilizada com o propósito de classificar dados utilizando cálculo de fronteira. O princípio de funcionamento inclui etapa de treino, onde o algoritmo recebe os dados juntamente com suas respectivas classes e, após o aprendizado, na etapa de teste, são previstas as classes dos dados treinados. A atribuição do estado de envelhecimento (valores I, II, III, IV, V e VI) para os dados de cada amostra foi possível a partir do modelo proposto por QUEIROZ (2017), que caracterizou os estados de envelhecimento de acordo com microestrutura típica através de análise por microscopia ótica.

Como resultado, foi possível verificar que a técnica de aprendizado de máquina *SVM* foi capaz de identificar de forma satisfatória os estados de evolução microestrutural de um aço HP modificado ao Nb, conforme esperado pela previsão visual do modelo de "nuvens" de dispersão de dados.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 REFORMA A VAPOR

A reforma a vapor é responsável por prover o hidrogênio necessário para a remoção de enxofre do petróleo, durante a etapa de refino (PETROBRÁS, 2002). A redução do teor de enxofre visa atender à crescente necessidade de reduzir a emissão de poluentes pela queima de combustíveis de fósseis (DUTRA, 2019).

Basicamente, a produção de hidrogênio em reforma a vapor ocorre através da reação entre hidrocarbonetos e vapor d'água em presença de catalisadores, conforme mostra as reações (1) e (2). A reação (1) ocorre dentro dos tubos de reforma e é altamente endotérmica. A energia para tal reação é fornecida por queimadores laterais em posições específicas na coluna (PETROBRÁS, 2002; DUTRA, 2019). Desta forma, o tubo é exposto a um gradiente de temperatura nos sentidos axial e radial (ALVES, 2005). A reação (2) é responsável por liberar gás hidrogênio no sistema.

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + \left(n + \frac{m}{2}\right)H_2 \qquad (1)$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad (2)$$

Com o aumento da eficiência dos catalisadores nas últimas décadas, a temperatura da parede dos tubos pôde ser reduzida, fato este que pode prolongar a vida em serviço dos tubos de reforma assim como aumentar a produtividade da reforma a vapor (QUEIROZ, 2017).

Os tipos de fornos de reforma variam em tamanho e em função da posição dos queimadores, do tipo de mistura de gás e do sentido de seu fluxo pelo interior do tubo. O mais comum é o tipo caixa com queimadores de teto (QUEIROZ, 2017).

### 2.1.1 Tubos de Reforma

Os tubos são dispostos na vertical dentro da câmara de radiação, como mostra a Figura 2-1. Geralmente, cada tubo possui 10 a 15m de comprimento e é fabricado a partir de união por solda de segmentos que podem variar de 2 e 6 metros cada, com diâmetro de 100 a 200m e 10 a 25mm de espessura (DA SILVEIRA; LE MAY, 2006).

A entrada do gás ocorre na extremidade superior dos tubos, onde a temperatura da parede dos tubos se encontra igual à do gás, entre 400 e 550°C, a uma pressão constante

entre 1 e 4MPa (DA SILVEIRA; LE MAY, 2006). Logo abaixo, tochas são dispostas em fileira no teto (ver Figura 2-1), região de maior gradiente de temperatura axial (ALVES, 2005).

À medida que o gás desce pelo tubo, a temperatura do forno se eleva, alcançando valores máximos entre 800 e 900°C na sua metade inferior. Findada a reação, o produto já percorreu toda a coluna e é direcionado ao coletor de saída (DA SILVEIRA; LE MAY, 2006).

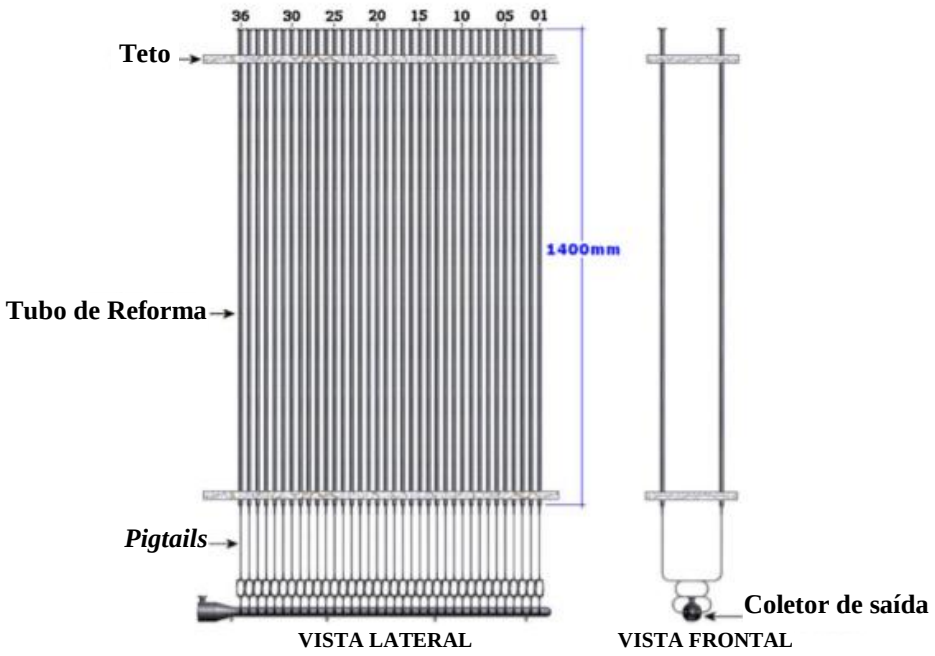



**Figura 2-1.** Exemplo da arquitetura de forno de reforma. Adaptado de PEREZ, *et al*. (2013).

O perfil de temperatura da parede do tubo é complexo por conta, dentre outros fatores, da reação endotérmica catalítica e da regulagem dos queimadores variarem conforme o uso do forno. Desta forma, é esperado que haja um aumento de temperatura na coluna com o passar do tempo (DA SILVEIRA; LE MAY, 2006).

De acordo com a American Petroleum Institute - API 530 (2015), os tubos de reforma são projetados para 100.000h de serviço e uma campanha pode durar entre 12 a 36 meses. Ou seja, um mesmo tubo de reforma pode ser utilizado durante período de 4 a 11 campanhas. No entanto, na prática, o tempo observado oscila entre maiores e menores períodos, dependendo do material e do modo como os parâmetros de processo são controlados (SHANNON; JASKE; SMITH, 2010; DA SILVEIRA; LE MAY, 2006). Do ponto de vista econômico e logístico, o tempo ideal seria de até 150.000h (LE MAY; DA SILVEIRA; VIANNA, 1996).

Dentre os componentes presentes em fornos de reforma, as colunas são os mais caros e mais difíceis de serem substituídos (DA SILVEIRA; LE MAY, 2006). Para realizar a retubagem de 200 tubos, o valor pode chegar a 4 milhões de dólares. Além disso, o prejuízo decorrente do *shutdown* de uma planta é de cerca de US$ 250.000,00/dia e pode chegar, em média, a 17 semanas de parada (HEVNER; GROUP, 2014).

Com objetivo de operar durante o máximo tempo possível nessas condições severas, o material adequado para fabricação destes tubos deve apresentar elevada resistência mecânica sob altas temperaturas e também resistência a fluência (PEREZ *et al*., 2013).

Tipicamente, os tubos de reforma são feitos de ligas resistentes a altas temperaturas. Dentro deste contexto, utilizou-se por um tempo os aços HK, que foram substituídos pelos aços HP e, em seguida, pelos aços HP modificados ao Nb. Na última década, a preferência foi ao HP microligado, o mais resistente a fluência dentre os três citados. A evolução na melhoria na resistência do material permitiu aumentar a temperatura do processo de reforma, reduzir a espessura do tubo ou aumentar o seu tempo de serviço (QUICKEL, *et al.*, 2009). Por serem bastante duros, não é possível conformar estes aços e, por isso, os tubos são produzidos a partir de fundição por centrifugação (DA SILVEIRA; LE MAY, 2006).

## 2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS RESISTENTES AO CALOR

A fluência é o principal causador de danos nas ligas presentes em fornos de reforma catalítica, devido a sua condição de temperatura muito elevada. Haja vista disso, no setor petroquímico, houve uma tendência no sentido de troca de superligas por aços inoxidáveis resistentes ao calor com intuito de reduzir o custo e manter a resistência à fluência (LE MAY; DA SILVEIRA; VIANNA, 1996; DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

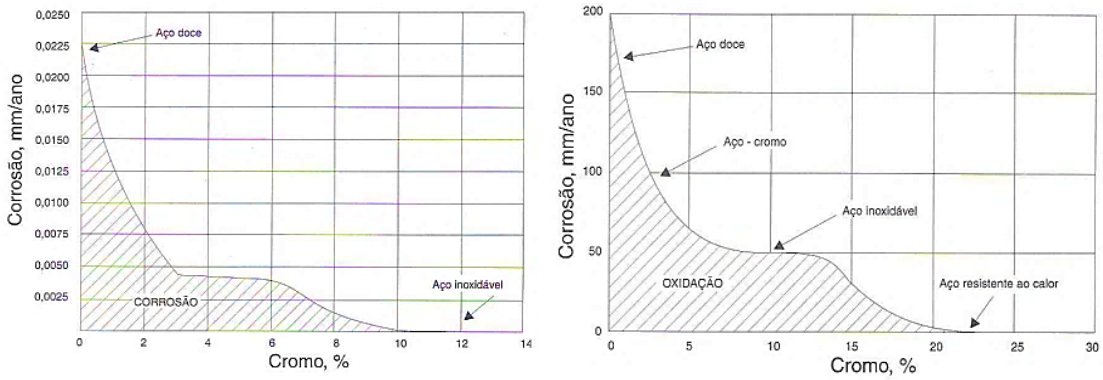
Nos últimos anos, os aços resistentes ao calor vêm sendo aprimorados em decorrência do crescente estudo das modificações morfológicas da microestrutura e da presença de fases estáveis destes aços promovidas pelo fenômeno de envelhecimento que ocorre durante longo tempo de serviço e sob condições de temperatura relativamente elevada (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

O uso do aço inoxidável resistente ao calor do tipo HK (25% de Cr e 20% de Ni) em fornos de reforma data deste 1960. Após ajuste do teor de Ni para cerca de 35%, foi

desenvolvido o aço do tipo HP, que substituiu o uso do aço HK na fabricação de colunas de reforma (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

### 2.2.1 Aço HP ou 25Cr-35Ni

Aços inoxidáveis compreendem a classe da liga Fe-C cuja resistência à corrosão é elevada, devido à influência do elemento de liga Cromo. De acordo com a Figura 2-2 (a), acima de aproximadamente 11% de Cr, um aço apresenta corrosão nula em ambiente industrial durante 10 anos. Em altas temperaturas, no entanto, a facilidade em oxidar aumenta mesmo em teores próximos de 11%, conforme Figura 2-2 (b). Contudo, acima de aproximadamente 22% de Cr, mesmo em elevadas temperaturas, o aço não sofre oxidação. A este tipo de aço, atribui-se o nome de Resistente ao Calor (INFOMET-1).




(a) (b)

**Figura 2-2.** (a) Efeito do Cromo no aço em ambiente industrial durante 10 anos; (b) Efeito do Cromo na resistência dos aços à oxidação em altas temperaturas. Retirado de INFOMET-1.

Segundo a ASTM A608 (2018), a composição química dos aços inoxidáveis do tipo HP deve apresentar valores conforme Tabela 2-1.

O Ni, em conjunto com o Cr, intensifica a resistência à corrosão. Por ser um elemento gamógeno, também torna a matriz da liga Fe-Cr-Ni austenítica, tornando-a um pouco mais maleável (INFOMET-2).

**Tabela 2-1.** Composição Química em percentagem em peso de aços inoxidáveis do tipo HP-Nb de acordo com a ASTM A608 (2018).

| C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Mo | Nb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,38-0,45 | 0,5-1,5 | 0,5-1,5 | 0,03 | 0,03 | 24,0-27,0 | 34,0-37,0 | 0,5 | 0,5-1,5 |

O elemento Si pode melhorar a oxidação deste tipo de liga em temperaturas como 800°C para teores próximos de 2%. O molibdênio é capaz de aumentar a resistência à fluência dessas ligas, contanto que a matriz se mantenha austenítica (INFOMET-2).

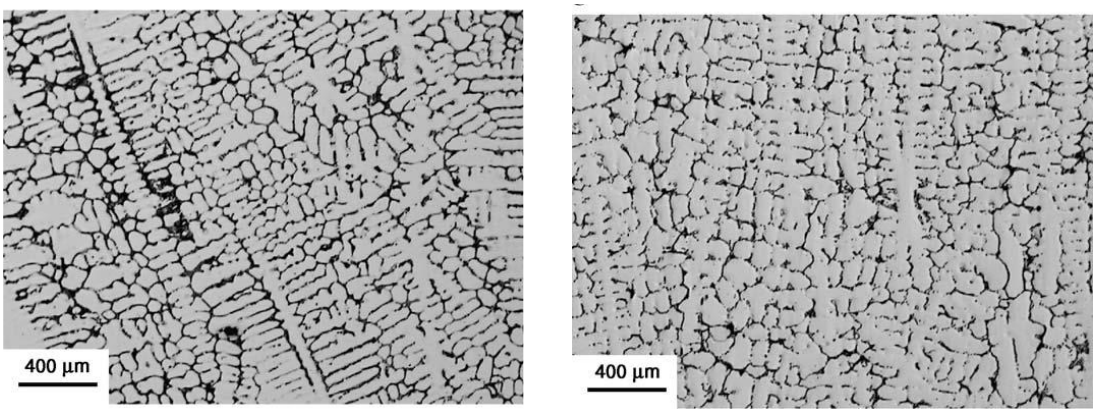
A adição de Nb (e também Ti microligado) possui dois objetivos (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003):

a) Desfazer a estrutura bruta de fusão obtida pelo processo de fabricação por fundição centrífuga;
b) Obter carbetos mais estáveis, através da substituição do Cromo;

Além disso, o Ti é responsável por uma precipitação secundária mais fina e dispersa dos carbetos, como será visto na seção 2.2.2.

### 2.2.2 Estados de Envelhecimento do Aço HP

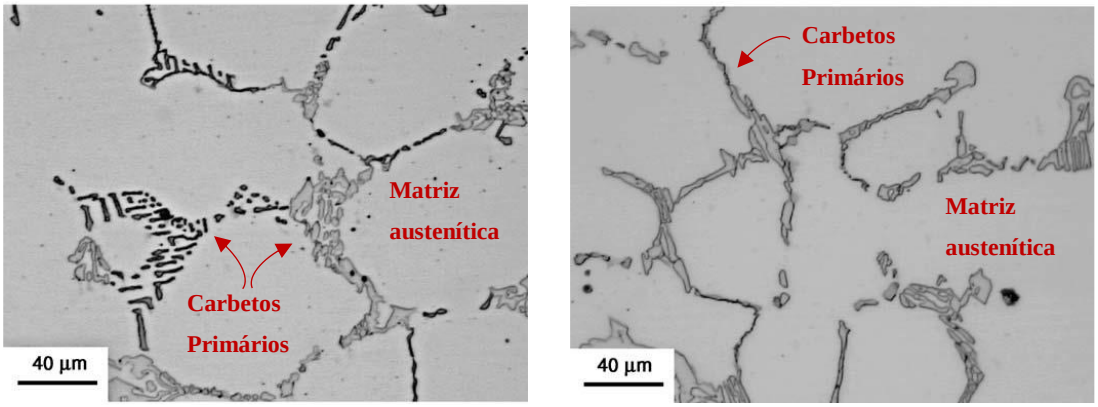
Segundo estudo realizado por DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003), o aço HP-Nb e HP-NbTi apresentam estrutura como fundido na forma de rede de carbetos primários dendríticos em matriz austenítica. Esta morfologia característica após fundição por centrifugação é exibida na Figura 2-3 (a), do aço HP modificado ao Nb e na Figura 2-3 (b), do HP-Nb microligado ao Ti.




a) HP-Nb b) HP-NbTi

**Figura 2-3.** Microscopia Ótica da microestrutura bruta de estado fundido de Aço HP: (a) Modificado ao Nb (b) Modificado ao Nb e microligado ao Ti. Retirado de DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003).

As dendritas são compostas por carbetos de cromo e de nióbio de forma alternada, como mostram na Figura 2-4 (a), referente ao aço HP-Nb, e letra (b), referente ao HP-NbTi. Com base na referida figura, notou-se que a presença de Ti na liga causou inibição na precipitação dos carbetos interdendríticos (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).




a) HP-Nb b) HP-NbTi

**Figura 2-4.** Maior aumento por MO de estado fundido do aço HP a) Nb b) NbTi. Modificado de DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003)

Com base na imagem feita por MEV em Figura 2-5 (b) e (d), com uso de elétrons retroespalhados, é possível identificar as fases claras como as ricas em Nb enquanto as regiões escuras, ricas em Cr, já que o peso atômico do Nb é maior do que o do Cr (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

Na liga HP-Nb em estado não-envelhecido (Figura 2-5 (a) e (b)), as fases presentes são Carbeto de Nióbio (NbC) e Carbeto de Cromo (Cr7C3). Na condição envelhecida (Figura 2-6 (a) e (b)Figura 2-5), o NbC se transforma em fase G devido a sua instabilidade em temperaturas elevadas. Dessa forma, Figura 2-6 (b) apresenta as fases Cr7C3 na região clara e fase G na região escura (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

Em HP-NbTi, as fases presentes no estado como fundido (Figura 2-5 (c) e (d)) são Carbeto de Nióbio Titânio ((NbTi)C) e Carbeto de Cromo (Cr7C3). Diferentemente de como ocorre em HP-Nb, o carbeto de nióbio e titânio (NbTi) não se transforma totalmente em fase G no aço HP-NbTi envelhecido, fato que é atribuído à presença do elemento Ti na liga. Desta maneira, a Figura 2-6 (d) apresenta as fases de HP-NbTi em estado envelhecido como sendo Cr7C3 na região clara e (NbTi)C e fase G na região escura (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003)

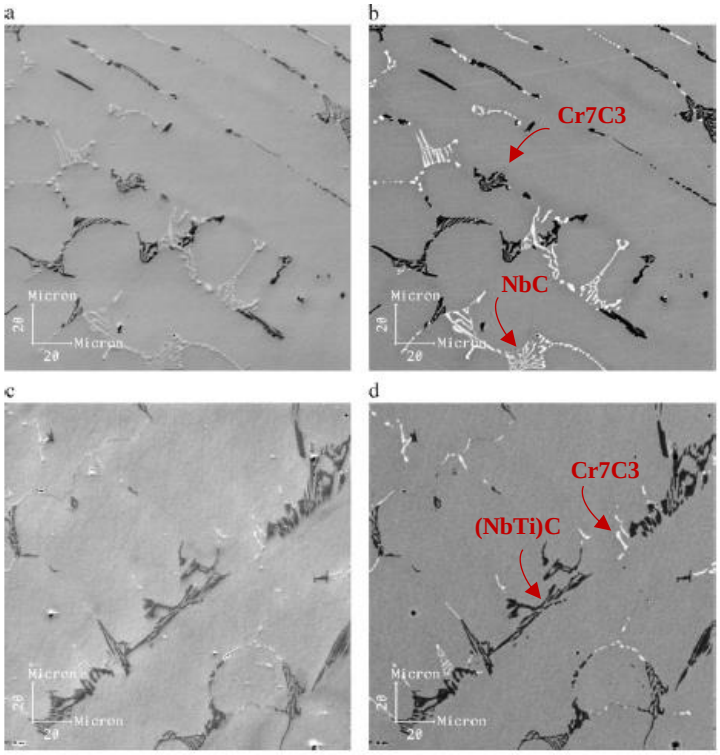



**Figura 2-5.** Imagens de MEV de HP-Nb e HP-NbTi como fundido. (a) HP-Nb por elétrons secundários (b) HP-Nb por elétrons retroespalhados; (c) HP-NbTi por elétrons secundários; (d) HP-NbTi por elétrons retroespalhados. Modificado de DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003).

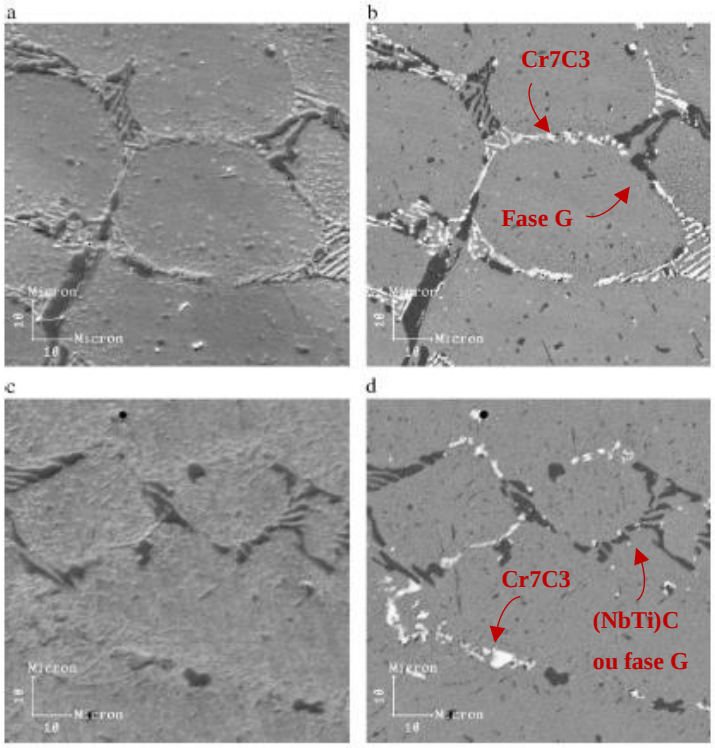



**Figura 2-6.** Imagens de MEV de HP-Nb e HP-NbTi após envelhecimento à 900°C durante 1000h. (a) HP-Nb por elétrons secundários; (b) HP-Nb por elétrons retroespalhados; (c) HP-NbTi por elétrons secundários; (d) HP-NbTi por elétrons retroespalhados. Modificado de DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY (2003).

Não é possível identificar a fase G nas imagens por MEV (Figura 2-5 e Figura 2-6) devido à sua semelhança com os precipitados de (NbTi)C, sendo então necessário o uso de MET (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003). Por MET, observa-se pela Figura 2-7(a) os carbetos primário (P-Cr) e secundário (S-Cr) de Cromo, carbeto de nióbio e Ti (NbTi) e a fase G. Pela Figura 2-7(b), nota-se a presença de carbetos de titânio no interior da fase G, resultante da transformação do carbeto de Nb e Ti em fase G durante envelhecimento (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

Uma possível explicação levantada por ALMEIDA *et al*. (2003) para a resistência à fluência de HP-NbTi ser superior à de HP-Nb é devido ao controle da transformação do carbeto de nióbio em fase G promovido pelo titânio (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003). ALMEIDA *et al*. (1996) apontaram a interface da fase G com a matriz como sendo a região preferencial para ocorrer a fratura por fluência (DE ALMEIDA, *et al.*, 1996). Desta forma, a transformação lenta de NbTiC em fase G implica em menor contorno disponível para iniciar uma falha por fluência (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

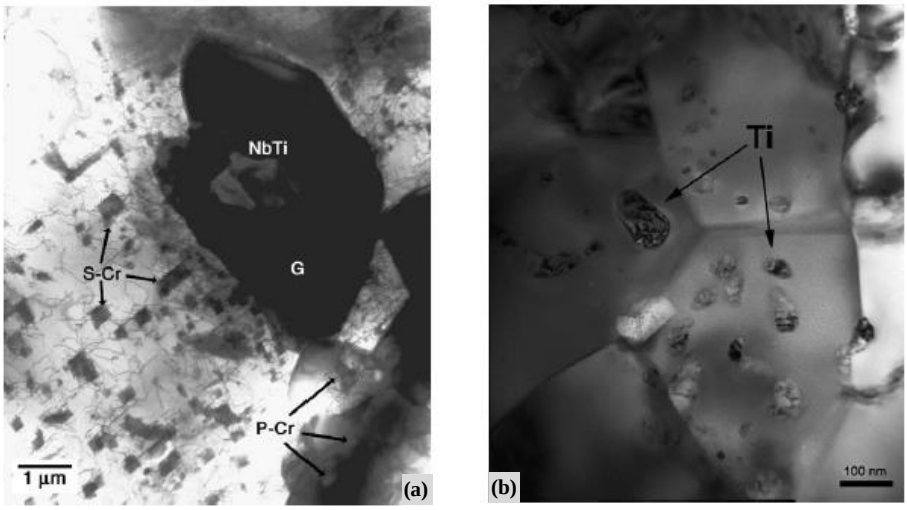



**Figura 2-7.** Carbetos de HP-NbTi através de MET. (a) Região da fase G, Carbetos de Nióbio e Titânio (NbTi), carbetos primários (P-Cr) e secundários (S-Cr) de Cromo; (b) Carbetos de Ti (Ti) dentro da região G (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003).

Além da questão do sítio preferencial, segundo RIBEIRO *et al*. (2002) a elevada resistência a fluência de HP-NbTi também pode ser em decorrência da fina e bem distribuída precipitação secundária, que oferece maior resistência à movimentação das discordâncias.

Através de MEV em maior aumento na Figura 2-6, observa-se que, em condições envelhecidas, o carbeto de nióbio em HP-Nb é estruturado em forma de lamelas alternadas (letras (a) e (b)) enquanto o HP-NbTi apresenta morfologia em blocos (letras (c) e (d)). Esta estrutura fragmentada do NbC é conhecida como "Escrita Chinesa" ou "Espinha de Peixe" (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003; QUEIROZ, 2017).

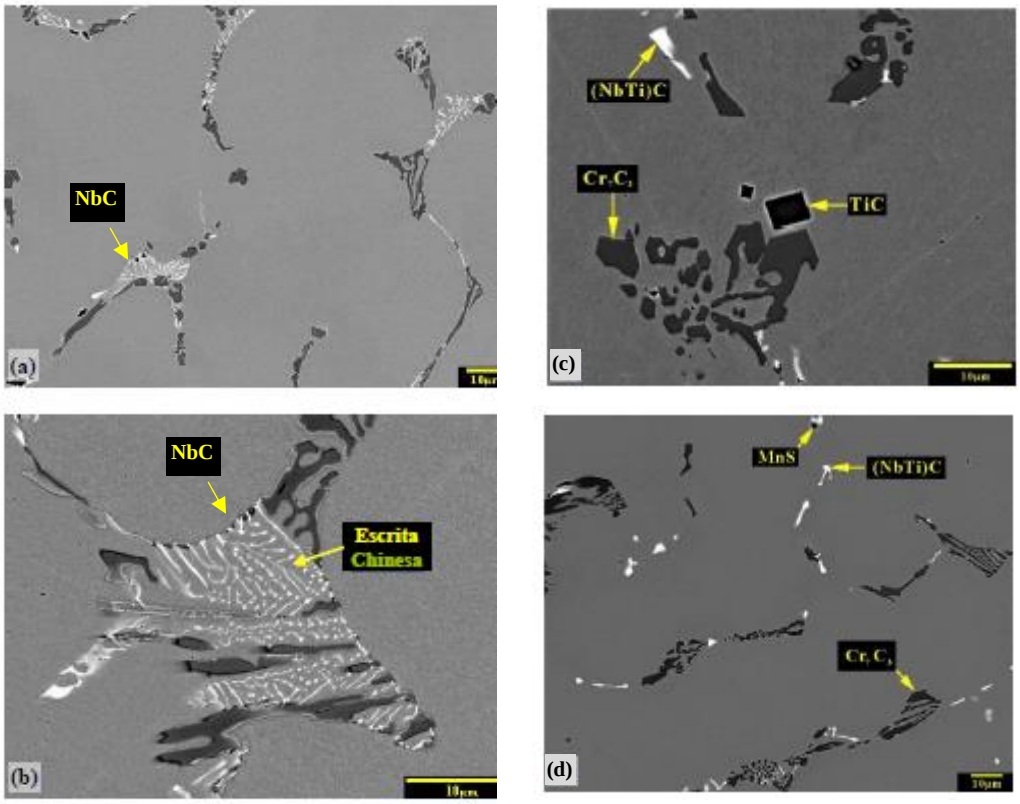



**Figura 2-8.** Microestrutura do HP-Nb (a e b) e HP-NbTi (c e d) em estado envelhecido observadas em MEV. Modificada de QUEIROZ (2017).

QUEIROZ (2017) desenvolveu critério de caracterização dos estados de envelhecimento de aços HP-Nb e HP-NbTi com base em sua microestrutura típica através de microscopia ótica, como pode ser visto nas imagens presentes nas Figura 2-9 a Figura 2-14 assim como nas definições abaixo.

**Estado de envelhecimento I:** Figura 2-9 (a) e (b) apresentam matriz austenítica limpa com carbetos primários interdendríticos (eutético de carbetos de cromo e carbetos de nióbio). A morfologia "Escrita Chinesa" é atribuída à ausência de Ti e Zr (letra (a) de Figura 2-9). Figura 2-9 (b) retrata a estrutura na presença de Ti ou Zr. Este estado retrata a condição não-envelhecida da liga e se mantém desta forma sob temperaturas de até 600°C. Em serviço, é a região da coluna que está fora do forno (DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003; QUEIROZ, 2017).

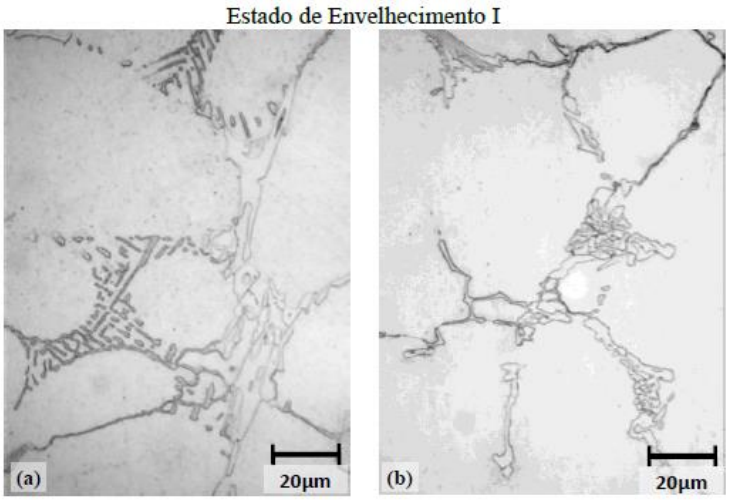



**Figura 2-9.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento I para os aços HP-Nb e HP-NbTi segundo QUEIROZ (2017). (a) Ocorrência de morfologia "Escrita Chinesa" (b) Ausência de morfologia "Escrita Chinesa". Retirado de QUEIROZ (2017).

- **Estados de envelhecimento II e III:** Estados marcados pela precipitação intensa de carbetos secundários, que apresentam morfologia acicular causados pela relação baixa de Cr/Nb, conforme mostram Figura 2-10 (a) sem Ti e (b) com Ti para o estado II e Figura 2-11 (a) sem Ti e (b) com Ti para o estado III. Ocorre geralmente entre 600 e 700°C. A formação dos carbetos aciculares está associada a uma baixa razão de Cr/Nb pois o nióbio forma carbetos mais estáveis do que o cromo e, desta forma, a tendência do sistema é consumir mais nióbio em forma de carbeto, preterindo o cromo e mantendo-o em solução sólida (SOARES, 1992; QUEIROZ, 2017).

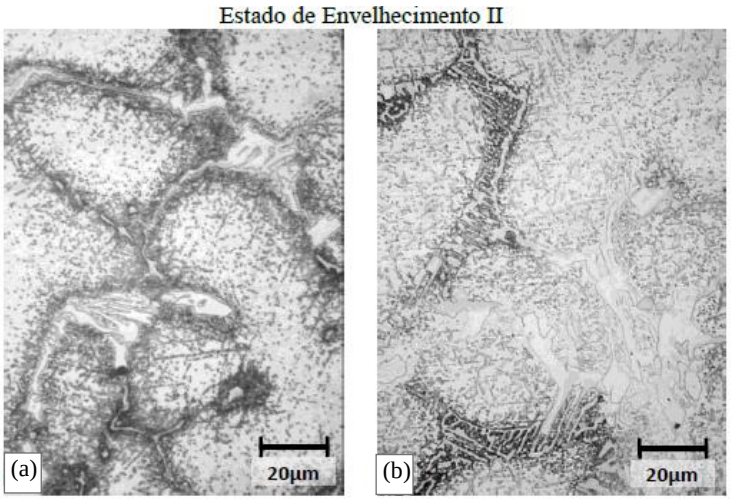



**Figura 2-10.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento II para os aços HP-Nb e HP-NbTi segundo QUEIROZ (2017) (a) Ausência de precipitação acicular (b) Ocorrência de precipitação acicular. Adaptado de QUEIROZ (2017).

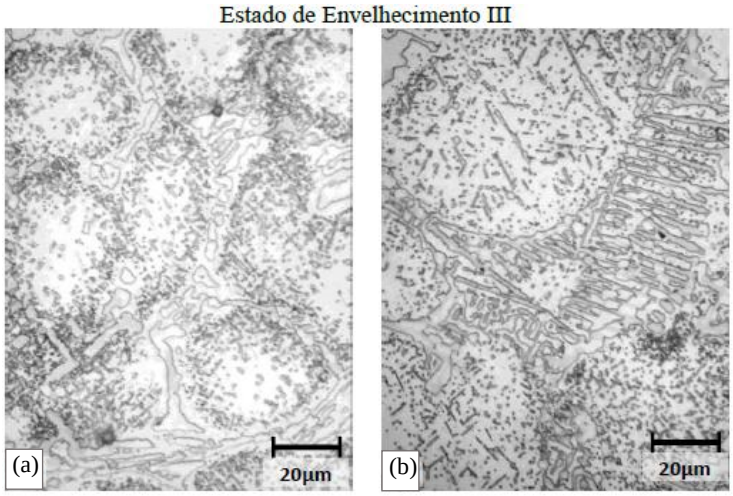



**Figura 2-11.** Critério de classificação dos Estados de Envelhecimento III para os aços HP-Nb e HP-NbTi segundo QUEIROZ (2017) (e) Ocorrência de precipitação acicular (f) Ausência de precipitação acicular. Adaptado de QUEIROZ (2017).

- **Estados de envelhecimento IV e V:** Estados caracterizados pelo refinamento dos precipitados secundários e espessamentos dos precipitados primários, visto nas Figura 2-12 letras (a) e (b) e Figura 2-13(a), o que torna a matriz mais limpa na região entre os carbetos primários e secundários. O estado IV é formado entre 800 e 900ºC enquanto o estado V, entre 900 e 1000ºC (QUEIROZ, 2017).

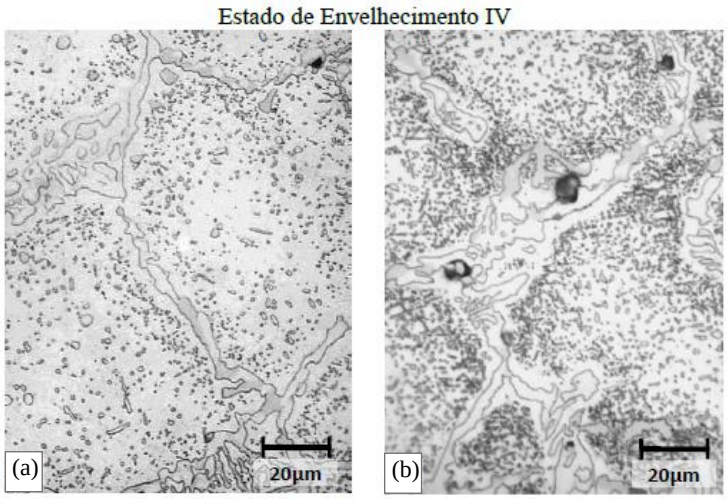



**Figura 2-12.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento IV para os aços HP-Nb e HP-NbTi segundo QUEIROZ (2017). (a) e (b) precipitação com refinamento característico no estado IV. Adaptado de QUEIROZ (2017).

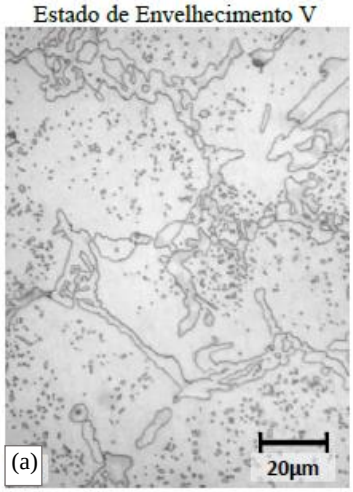



**Figura 2-13.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento V para os aços HP-Nb e HP-NbTi. (a) precipitação com refinamento característico do estado V. Adaptado de QUEIROZ (2017).

- **Estado de envelhecimento VI:** Matriz limpa em função do coalescimento intenso dos precipitados secundários quando sob temperaturas superiores a 1000°C, conforme Figura 2-14(a) (QUEIROZ, 2017).

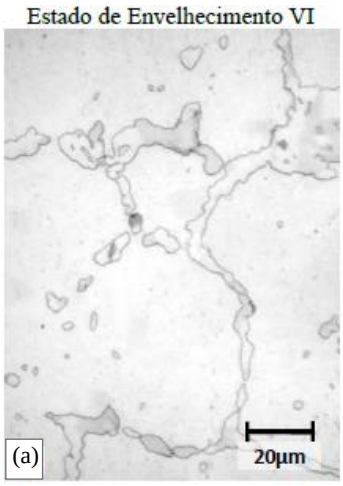



**Figura 2-14.** Critério de classificação do Estado de Envelhecimento VI para os aços HP-Nb e HP-NbTi. (a) Matriz mais limpa característica do estado VI. Adaptado de QUEIROZ (2017).

A partir da caracterização dos estados de evolução microestrutural ao longo da coluna de reforma, é feito um diagrama relacionando a distância relativa, o estado de envelhecimento e a temperatura de serviço. Tal diagrama é chamado de Curva Característica de Envelhecimento e a **Figura 2-15** é um exemplo.

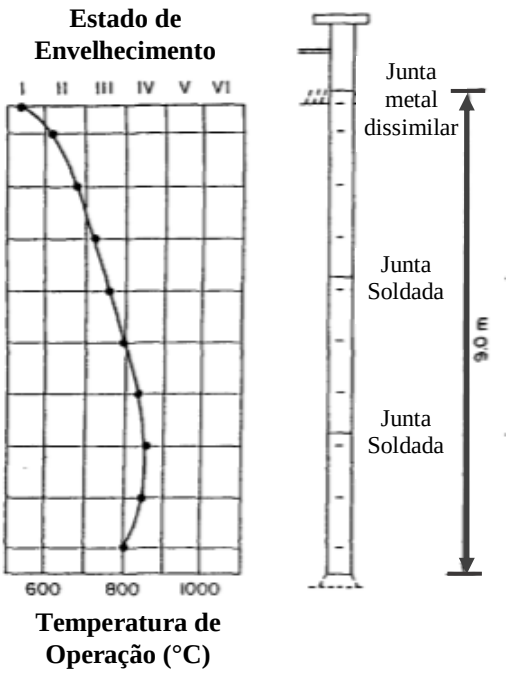



**Figura 2-15.** Exemplo de curva característica de envelhecimento de um tubo de reforma. Retirado de QUEIROZ (2017).

### 2.2.3 Aço HP e sua Resistência à Fluência

Fluência é um modo de deformação permanente e dependente do tempo observado em materiais sujeitos a esforços ou tensões constantes quando expostos à elevada temperatura (CALLISTER, 1999). Seu mecanismo de fratura típico quando sob baixo carregamento e alta temperatura é através dos contornos de grão (INFOMET-3).

De forma suscinta, as microestruturas ideais para evitar fluência são (INFOMET-4):

a) Grãos grosseiros, pois há menos grãos para sofrer escorregamento;
b) Fundidos, pois apresentam grãos maiores (comparando com os forjados);
c) Precipitados estáveis, pois são mais resistentes que as metaestáveis;
d) Ligas austeníticas, pois são mais resistentes que as ferríticas;

Segundo ALMEIDA *et al*. (2003), para os aços HP, a resistência à fluência é dependente da composição química assim como da forma como as fases são geradas e distribuídas durante fabricação ou vida em serviço. De acordo com alguns autores (DE ALMEIDA *et al.*, 1996; DE ALMEIDA; RIBEIRO; LE MAY, 2003; QUEIROZ 2017) a resistência à fluência deste tipo de aço é proveniente dos seguintes mecanismos:

a) Impedimento do deslizamento dos contornos de grão, devido às posições de rede assumidas pelos carbetos eutéticos primários;

b) Restrição no movimento de discordâncias, provocada pela fina distribuição dos carbetos de cromo, promovida pela presença do Ti na liga;
c) Menor interface entre fase G e matriz, região que se acredita ser preferencial na fratura por fluência.

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO PELO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO CORRENTES PARASITAS

### 2.3.1 Ensaio Não-Destrutivo

Os ensaios não destrutivos são técnicas de inspeção capazes de detectar, caracterizar e mensurar alterações estruturais de materiais, como defeitos, fases, espessura da peça, entre outras.

A principal vantagem do END é, como o próprio nome indica, não causar nenhum dano à peça inspecionada (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989; ABENDI; INSPECTIONEERING). Além disso, são técnicas consideradas seguras cujos resultados são confiáveis. Tais técnicas podem ser utilizadas tanto para fabricação quanto serviço.

Durante a fabricação, é possível certificar a conformidade de um produto durante cada etapa de processamento assim como em seu estado final (INSPECTIONEERING; ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989). Durante o serviço, utiliza-se para monitorar a integridade de um equipamento ou estrutura sem a necessidade de um *shutdown* ou custo com trocas preditivas desnecessárias, funcionando como um importante indicador de tempo de vida remanescente de equipamentos, o que permite o uso do ativo de forma mais eficiente sem comprometer a segurança das pessoas e do meio ambiente (ABENDI; ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

Para realizar um ensaio por END, é necessário que o operador seja treinado, qualificado e certificado, além de utilizar equipamentos calibrados e seguir normas e critérios de aceitação previamente estabelecidos (ABENDI).

Os ENDs são largamente utilizados em setores como o petroquímico, químico, aeroespacial, siderúrgico e naval, por exemplo. O uso desse tipo de técnica é considerado um fator de peso na competitividade das empresas que os utilizam. As principais técnicas são (ABENDI; INSPECTIONEERING):

a. Ensaio visual;
b. Ultrassom;
c. Líquido penetrante;

d. Radiografia

e. Correntes parasitas.

Os seguintes aspectos devem ser considerados para a seleção da técnica de END segundo ASM HANDBOOK COMITTEE (1989):

a. Propriedades relevantes do material;

b. Tipo/localização/tamanho do defeito que se deseja observar;

c. Tamanho/espessura/geometria da peça a ser inspecionada.

Tendo em vista que, de modo geral, existe uma correlação entre a microestrutura e as propriedades do material, a caracterização por END associa os resultados obtidos pela técnica com a microestrutura observada. A microscopia pode ser realizada de forma destrutiva, através de corte de amostra, ou não-destrutiva, por uso de réplica (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

Com base nos fatores importantes para a seleção da técnica END, como o caráter condutor da peça a ser inspecionada e a presença de camada de óxido magnética, e também levando em consideração fatores como a rapidez do ensaio, a técnica de corrente parasita foi escolhida para caracterizar os estados de envelhecimento do aço HP-Nb em questão.

### 2.3.2 Indução Eletromagnética

Conforme Faraday descobriu no século XIX, materiais condutores induzem a criação de campo magnético alternado quando uma corrente alternada (ambos em função do tempo) é aplicada sobre eles. Maxwell contribuiu ao conceito quando previu que uma corrente alternada, por sua vez, também pode ser induzida a partir de um campo magnético alternado, fechando a relação entre eletricidade e magnetismo, como ilustra Figura 2-16, letras (a) e (b), respectivamente (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989; NUSSENZVEIG, 1997; NDE-ED-2).

Na Figura 2-16 (a), a corrente elétrica alternada $i(t)$ aplicada a um condutor linear cria o campo magnético induzido $\overrightarrow{B_{ind}}(t)$ e na mesma figura, letra (b), o campo magnético alternado $\vec{B}(t)$ aplicado ao mesmo condutor, produz a corrente induzida $i_{ind}(t)$, segundo a Regra da Mão Direita (NDE-ED-2).

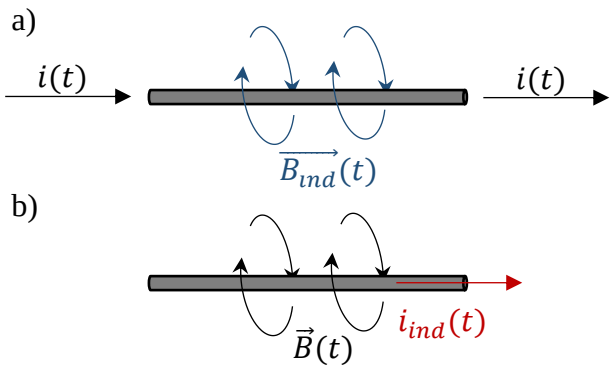



**Figura 2-16.** Esquema das respostas eletromagnéticas. a) Campo magnético induzido por corrente aplicada. b) Corrente Elétrica induzida por campo magnético aplicado.

Em uma bobina, devido a sua geometria, as linhas do campo magnético induzido se concentram no interior das espiras como resultado da interação dos campos magnéticos circulares ao redor do fio condutor, como mostra Figura 2-17 (NDE-ED-2).

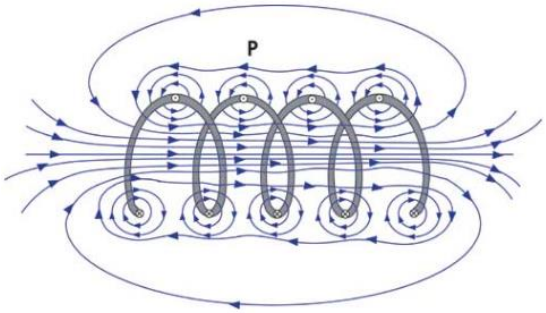



**Figura 2-17.** Campo magnético resultante induzido em bobina, retirado de NDE.

### 2.3.3 Correntes Parasitas

O ensaio de correntes parasitas consiste na criação de um campo magnético primário - produzido pela passagem de uma corrente alternada nas espiras da bobina – que, quando próximo a um outro condutor, cria uma corrente alternada neste material. Essa corrente induzida em outro condutor é chamada de “corrente parasita” (NDE-ED-3; ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989). De acordo com a Lei de Lenz, uma corrente induzida por um campo magnético primário adota direção de modo que o seu campo magnético (secundário) se oponha ao primário (NUSSENZVEIG, 1997).

Segundo a equação da Lei de Faraday (3), a variação temporal de um campo magnético induz a criação de uma força eletromotriz, produzindo corrente elétrica no sentido contrário ao campo (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989; NUSSENZVEIG, 1997)

$$\varepsilon = \frac{-dB(t)}{dt} \quad (3)$$

O percurso radial da corrente parasita através da peça também provoca o surgimento de um outro campo magnético variável com o tempo, chamado de “campo magnético secundário”, que interage com o campo magnético primário, como mostra a Figura 2-18. (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989; END-ED-4).;

A Figura 2-18 retrata esquematicamente o mecanismo descrito, onde uma fonte de corrente alternada gera corrente $i(t)$ que percorre as espirais em série, dentro da sonda. O campo magnético primário $\vec{B}(t)$ é produzido pelas espiras, que induz a corrente parasita $i_p(t)$ que, por fim, induz o campo magnético secundário $\overrightarrow{B_{sec}}(t)$. Não há necessidade de contato direto da bobina com a amostra pois trata-se de um fenômeno de indução magnética (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

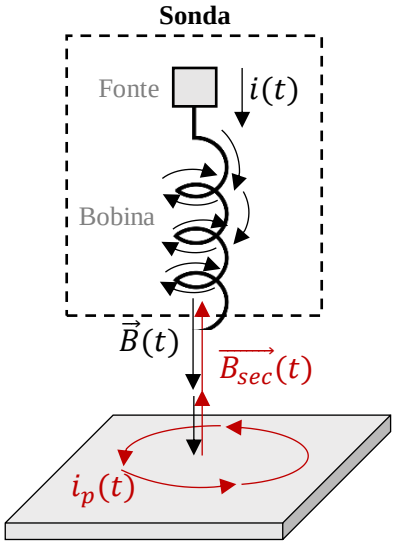



**Figura 2-18.** Desenho esquemático de ensaio de correntes parasitas.

A partir do exemplo na Figura 2-18 e com base no princípio de eletromagnetismo, é de se esperar que o campo magnético secundário induza uma corrente contrária à corrente aplicada na bobina. Dessa forma, haverá interação entre as correntes aplicada e induzida, ocorrendo a redução da corrente aplicada, efeito atribuído à Reatância Indutiva, que será discutida adiante (NDE-ED-2).

### 2.3.4 Plano de Impedância

Quando uma corrente contínua percorre uma bobina, apenas haverá a resistência (R) como fator de oposição à passagem da corrente. Porém, quando uma corrente

alternada é flui sobre a mesma bobina, outros dois fatores limitadores surgem: a reatância indutiva ($X_L$) e a reatância capacitiva ($v$) (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

A impedância é a combinação dessas três componentes: resistiva (R), reativa indutiva ($X_L$) e reativa capacitiva ($X_C$), podendo ser expressa como um número complexo, onde $X_L$ e $X_C$ são valores imaginários. Como o efeito da reatância capacitiva em bobinas é desprezível, a impedância neste caso apenas depende da resistência e da reatância indutiva, conforme equação (4) e **Figura 2-19** (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

$$Z = \sqrt{R^2 + {X_L}^2} \qquad (4)$$

O plano de impedância é exemplificado no Figura 2-20, onde materiais ferromagnéticos ocupam a região superior enquanto materiais não-ferromagnéticos, a região inferior. Além de identificar o comportamento magnético de determinado material, é possível também obter o ângulo de fase (θ) e a amplitude de sua curva de impedância (Z) (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989; NDE-ED-2).

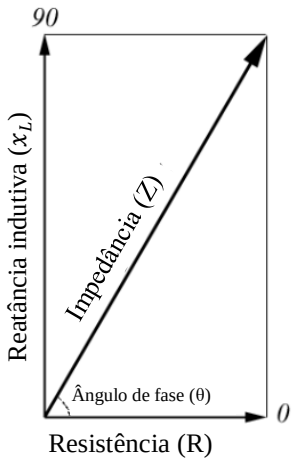



**Figura 2-19.** Plano de impedância, adaptado de NDE-ED-2.

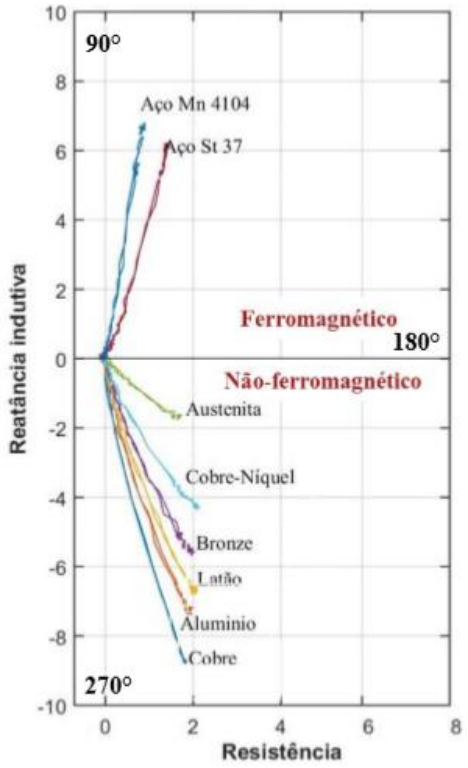



**Figura 2-20.** Plano de impedância de um bloco de calibração, retirado de ARENAS (2017).

### 2.3.5 Condutividade Elétrica e Permeabilidade Magnética

O ensaio de correntes parasitas é, portanto, sensível à duas propriedades do material: a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética. Present State of Eddy Current Inspection O primeiro termo, Condutividade (σ), pode ser entendido como a "facilidade" com que as cargas elétricas fluem pelo material. Permeabilidade Magnética (μ), por outro lado, seria a "facilidade" com que um fluxo magnético é estabelecido em um circuito em resposta a um campo aplicado, sendo representado pela razão entre a densidade de fluxo no material (B) e o campo magnético aplicado (H) (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

A condutividade de uma liga pode ser alterada em função de mudanças microestruturais. Desta forma, esta técnica é capaz de detectar mudanças metalúrgicas que sejam suficientes para alterar a condutividade (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

A permeabilidade magnética, além de depender do caráter magnético do material, também é passível de variação em função dos mesmos fatores que influenciam a condutividade (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

### 2.3.6 Parâmetros que influenciam o ensaio de Correntes Parasitas

As correntes parasitas se concentram na superfície da peça inspecionada, e, à medida que avançam pela espessura do material, a densidade de corrente diminui até o ponto em que seja nula. Tal fenômeno é chamado de "skin effect" e é ilustrado no Figura 2-21. A profundidade representa a região da peça que de fato é examinada pela técnica (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

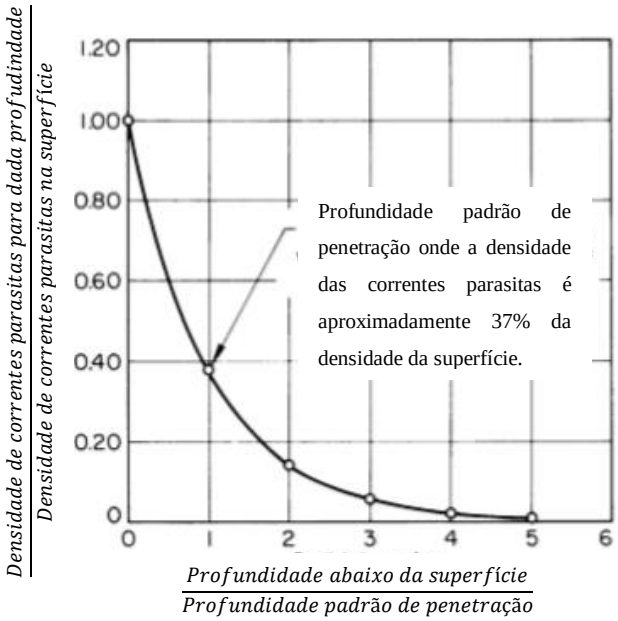



**Figura 2-21.** Relação entre densidade da corrente parasita e profundidade atingida. Adaptado de ASM HANDBOOK COMITTEE (1989).

A profundidade atingida (δ) é inversamente proporcional à frequência da corrente (f), como apresentada na equação de profundidade de penetração (5) (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (5)$$

Muito embora baixas frequências sejam desejáveis pois permitem grande penetração, elas comprometem a resolução do ensaio. Em materiais ferromagnéticos, baixas frequências não implicarão necessariamente em grande penetração. A frequência utilizada em ensaios de corrente parasita, geralmente entre 200Hz e 6MHz, é definida em função de (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989):

a. Espessura da peça inspecionada;

b. Resolução desejada;
c. Profundidade que deve ser atingida na peça;
d. Finalidade do ensaio.

Desta forma, determinar a frequência é uma escolha em que se deve balancear as prioridades da inspeção.

Outro fator que influencia este tipo de ensaio não destrutivo é a permeabilidade magnética. O trabalho realizado por PEREIRA *et al*. (2017) mostra o desenvolvimento de uma região ferromagnética na superfície externa de tubos de um aço HP, experimento exposto na Figura 2-22. Em Figura 2-22(a), a amostra - que não sofreu envelhecimento - apresenta resposta magnética com baixa intensidade e uniforme tanto pela superfície quanto em seu interior. Em Figura 2-22(b), caracterizada como Estado I (região da coluna acima do queimador), a amostra inicia o processo de perda uniformidade de seu campo magnético, marcando o início da concentração magnética em sua superfície.

Com avanço do envelhecimento (representados pelas letras (c) e (d) em Figura 2-22 como estados IV e VI, respectivamente), observou-se um aumento de resposta magnética na camada externa do tubo e, durante esse desenvolvimento, uma perda de uniformidade na amostra. Em Figura 2-22 (d), representando o Estado VI, chega-se à resposta nula no centro de parede da amostra enquanto na superfície externa é bastante elevada. Notou-se também o espessamento dessa região ferromagnética quando comparada letra (d) com letras (a), (b) e (c).

Segundo SILVEIRA (2018), os diferentes estados de evolução microestrutural para este tipo de liga apresentam mudança na resposta magnética entre si devido à:

a) Produção de camada de óxido na superfície externa do tubo provocada pelo calor excessivo, cuja região se alarga conforme aumento de temperatura. Esta camada é composta por $Fe_3O_4$ e $NiFe_2O$, óxidos de comportamento ferromagnético. Então, o comportamento ferromagnético da superfície externa do tubo tende a crescer conforme aumento de temperatura.
b) Resposta magnética no centro de parede varia em função da evolução microestrutural;

Por conclusão, este tipo de aço tende a apresentar contraste na resposta magnética ao longo de sua espessura à medida que o envelhecimento avança. É relevante o conhecimento prévio do caráter magnético da peça a ser examinada pois há interferência entre o campo magnético induzido pelo material e o sensor durante o ensaio de correntes parasitas, como discutido na seção 2.3.12 (ARENAS, 2017).

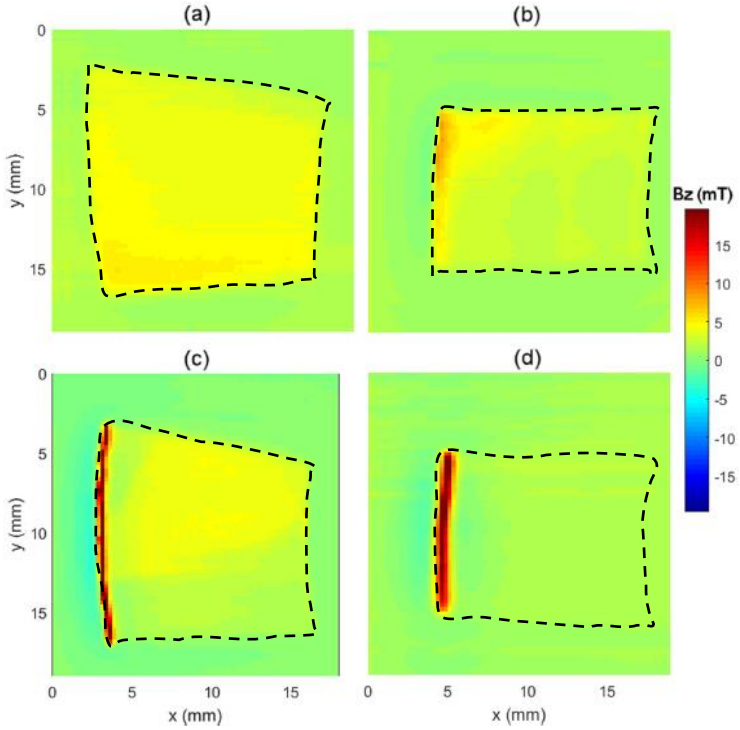



**Figura 2-22.** Mapeamento do campo magnético de quatro amostras de aço resistente ao calor sob campo de 400 mT, nos estados: a) Como fundido; b) Estado I; c) Estado IV e d) Estado VI de envelhecimento. Representação da silhueta da amostra em pontilhado. Adaptado de PEREIRA (2017).

### 2.3.7 Lift-off

Segundo ARENAS (2013), o *Lift-off* refere-se à variação de impedância devido ao espaçamento entre a sonda e a peça e representa um fator complicador para a interpretação dos dados do ensaio, principalmente em peças cuja superfície é irregular.

### 2.3.8 Tipos de Sondas de Correntes Parasitas

Há variados tipos sondas de corrente parasita, a depender dos requisitos e finalidade de cada inspeção (NDE-ED-5; ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989). Dentre elas, destacam-se a Indutiva e Híbrida (ARENAS, 2017).

**Sondas Indutivas:** São compostas apenas por uma bobina de excitação de campo magnético. Este tipo de sonda mede variações de impedância, resultantes da interferência entre o campo magnético primário (excitado pela bobina) e o secundário (induzido pela corrente parasita no material). Na ausência de mudanças microestruturais ou presença de defeitos, não serão observadas alterações de impedância (ARENAS, 2017).

**Sondas Híbridas:** São sondas que utilizam sensores magnéticos para detecção de campo magnético. Dentre os diversos tipos de sensores magnéticos, destaca-se o de efeito

Hall, o qual foi o utilizado no presente trabalho (GARCAÍ-MARTNÍ; GÓMEZ-GIL; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, 2011; ARENAS, 2017).

### 2.3.9 Sensor de efeito Hall

O efeito Hall foi descrito por RAMSDEN (2006) como uma tensão que surge em resposta à aplicação de um campo magnético perpendicular ao fluxo da corrente elétrica, adotando direção ortogonal ao plano campo-corrente.

A Figura 2-23 retrata o efeito Hall ao mostrar uma placa condutora que, sem influência de campo magnético, o voltímetro indica 0V entre posições perpendiculares à passagem de corrente (A e B); e sob campo magnético perpendicular à placa, observa-se certa diferença de potencial, atribuída à tensão de Hall. Esta tensão é proporcional à densidade do campo e da corrente e é induzida a partir de campo não variável com o tempo (RAMSDEN, 2006; GARCAÍ-MARTNÍ; GÓMEZ-GIL; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, 2011).

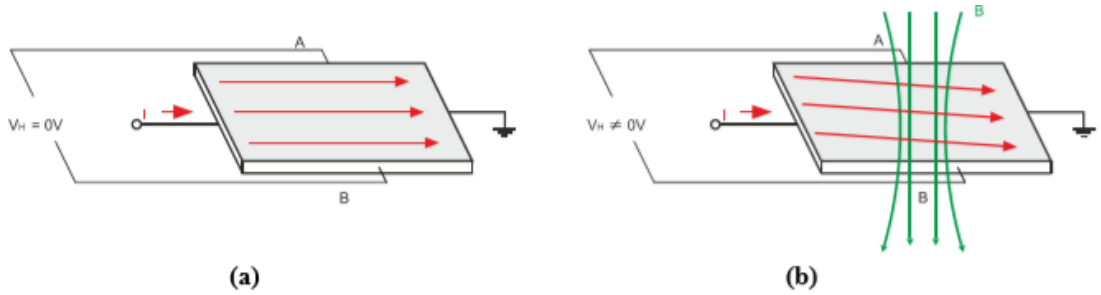



**Figura 2-23.** Princípio de funcionamento do sensor de efeito Hall. (a) Sem campo magnético aplicado. (b) Com campo magnético aplicado. Retirado de GARCAÍ-MARTNÍ; GÓMEZ-GIL; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, 2011).

Os sensores Hall são pequenos, resistentes, apresentam alta precisão espacial e boa relação custo-benefício. Além disso, uma característica relevante para este trabalho é sua capacidade de não saturar sob fortes campos magnéticos (RAMSDEN, 2006; ARENAS, 2017).

### 2.3.10 Processamento dos sinais obtidos pelo sensor híbrido

Com objetivo de transformar a tensão analógica – que é registrada tanto na saída na bobina de excitação (senoide 1) quanto pela entrada na bobina de recepção (senoide 2) – em sinal digital (para que possa ser processada pelo computador) é necessário utilizar um algoritmo de adaptação de senoide de três parâmetros, como realizado em trabalho de ARENAS (2017). Os parâmetros são:

a) Defasagem entre as bobinas de excitação e de recepção de campo (φ);
b) Amplitude da tensão (A);
c) Valor médio de tensão da bobina de recepção (*off-set*)

### 2.3.11 Inspeção de Tubos de Reforma por Corrente Parasita

Com base nos parâmetros discutidos anteriormente, entende-se que o plano de impedância de tubos de reforma seja afetado por (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989; SILVEIRA, 2017):

a. Mudança microestrutural, devido ao envelhecimento da liga em altas temperaturas;
b. Presença de óxido da superfície externa desses tubos, devido ao forte caráter ferromagnético desses óxidos;
c. Variação da espessura da peça, pela formação de camada de oxidação;
d. Presença de defeitos;
e. Frequência da corrente aplicada;
f. *Lift-off*, causado pela irregularidade da superfície da peça.

### 2.3.12 Correntes parasitas com saturação magnética

Devido a permeabilidade magnética dos materiais ferromagnéticos, é criado um campo magnético no material durante a inspeção por correntes parasitas. Este campo adicional interage com o campo induzido pela corrente parasita (campo secundário) e, como resultado, ele pode ser mascarado (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

Com intuito de inibir o campo adicional provocado pela camada de óxido de aços HP, aplica-se um campo magnético de corrente contínua de modo a magnetizar o material até a sua saturação (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989). Então, após inibição magnética da camada superficial de óxido, a leitura do ensaio de corrente parasitas é da região interna do aço HP (DA SILVEIRA, 2018).

A Figura 2-24 apresenta uma comparação entre a magnetização necessária para inibir a resposta magnética da superfície externa e do centro de parede. No referido gráfico, observa-se maior necessidade de magnetização da região rica em óxido (ferromagnética) do que a de centro de parede (paramagnética).

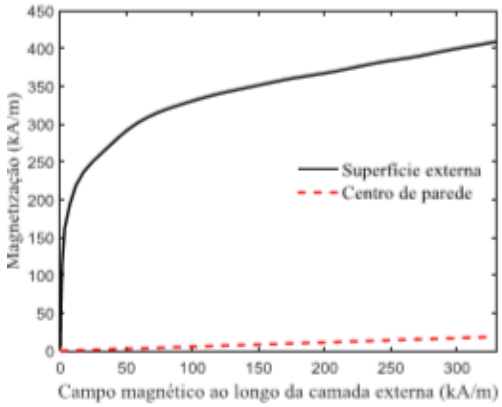



**Figura 2-24.** Curva de Magnetização das regiões de centro de parede e superfície externa. Retirado de ARENAS (2017).

Para inspecionar, então, utiliza-se um elemento de saturação, por exemplo um *yoke* com eletroímã nas extremidades, bem próximo à peça examinada. A bobina de inspeção deve estar localizada dentro do campo magnético de saturação (ASM HANDBOOK COMITTEE, 1989).

## 2.4 APRENDIZADO DE MÁQUINA OU *MACHINE LEARNING*

*Machine Learning* tem sido crescentemente utilizada pois permite a obtenção de informações e padrões valiosos a partir de um grande volume de dados. Esta técnica se baseia no aprendizado de um algorítimo quando este é alimentado com dados específicos. Após o aprendizado, a máquina é capaz de aplicar a informação aprendida quando necessário. O aprendizado pode ser desenvolvido sob diversas formas, por exemplo (DEY, 2016):

a. Com auxílio do usuário;
b. Sem interferência do usuário;
c. Parcialmente influenciado pelo usuário;
d. entre outras.

No próximo parágrafo, será abordada a técnica *SVM*, de Aprendizado Supervisionado, ou seja, que demanda auxílio do usuário (DEY, 2016).

### 2.4.1 *Support Vector Machine (SVM)*

*Support Vector Machine* (*SVM*) é uma técnica de Aprendizado Supervisionado e, como tal, depende necessariamente de uma ação externa para produzir informação. O aprendizado compreende em duas etapas: a de **treino** e a de **teste** (DEY, 2016).

- **Treino:** Momento em que é estabelecida a correlação entre os dados de *input* (entrada) e de *output* (saída), conforme determinado pelo usuário.
- **Teste:** Após o treino, o algoritmo aplica a informação assimilada nos dados de *input* (utilizados no treino) e avalia seu grau de acerto.

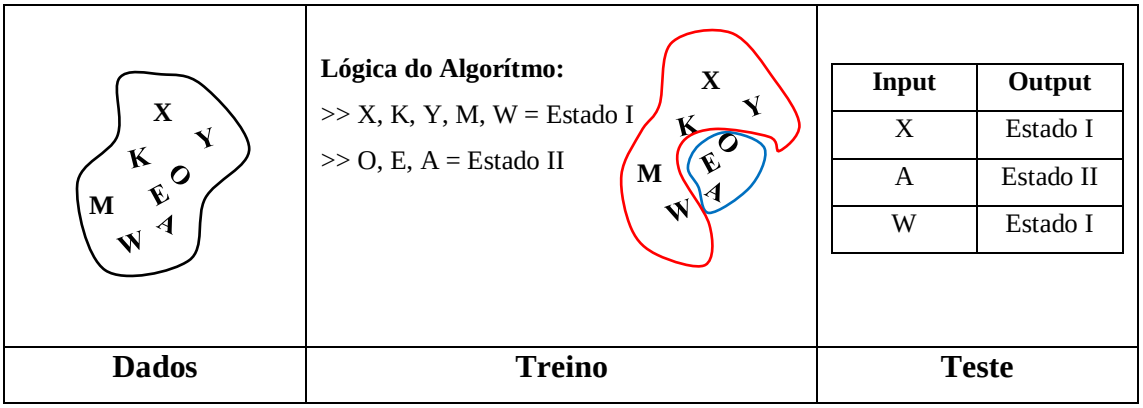



**Figura 2-25.** Ilustração esquemática das etapas do *SVM*.

*SVM* é mais utilizada para finalidade de classificação, cujo modo de funcionamento se baseia no cálculo de fronteira dos dados, como exemplifica a Figura 2-25. Entende-se como "classificação dos dados" a atribuição de uma classe à uma informação (DEY, 2016; ARENAS, 2017). Quando o *input* está fora destes limites definidos no treinamento, a técnica calcula qual classe apresenta menor distância até o ponto desejado, a fim de estabelecer a atribuição da classe (DEY, 2016).

# 3 MATERIAIS E MÉTODOS

## 3.1 METODOLOGIA

Com base no fluxograma presente na Figura 3-1, seis segmentos de um aço austenítico do tipo HP-Nb foram obtidos através de corte a frio de uma única coluna de reforma, de modo a representar cada um dos seis estados de envelhecimento, de I a VI.

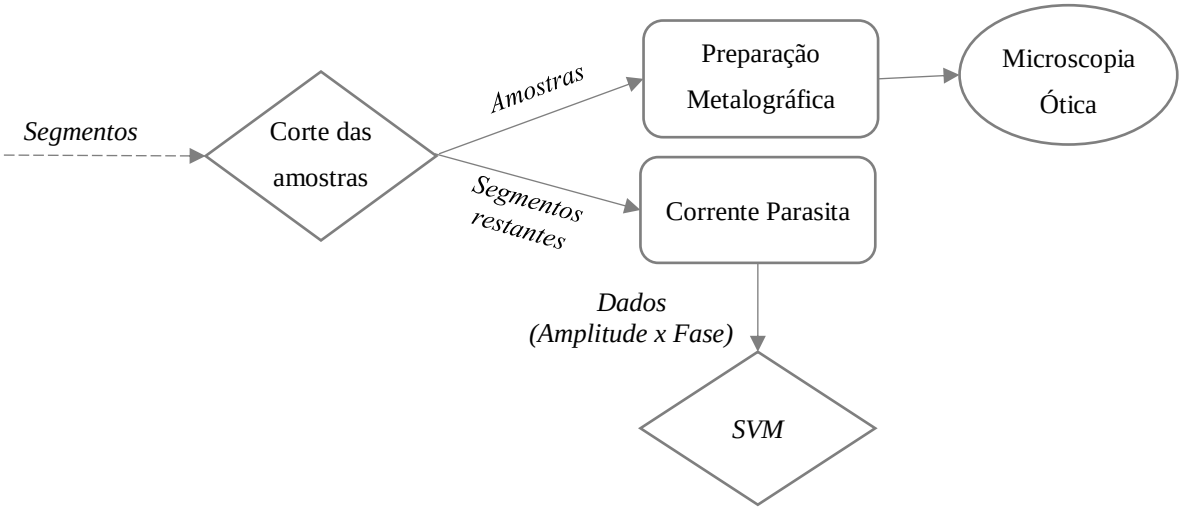



**Figura 3-1.** Fluxograma do procedimento.

De cada segmento, foi retirada uma amostra (5 x 5 x 3 cm) destinada a obtenção de micrografia. A análise metalográfica das amostras contou com o auxílio do Microscópio Ótico *Zeiss IMAGER.M1m* enquanto os segmentos restantes foram examinados pela técnica não destrutiva de corrente parasita e classificados por aprendizado de máquina *SVM*, conforme fluxograma presente na Figura 3-1.

## 3.2 SEGMENTOS E AMOSTRAS

### 3.2.1 Amostras e Segmentos

O tubo de aço inoxidável recebido apresentou composição química conforme Tabela 3-1, caracterizado como do tipo HP modificado ao Nióbio e microligado ao Titânio (HP-NbTi). Em amarelo na **Tabela 3-1**, estão destacados os elementos de maior relevância para discussão neste trabalho.

**Tabela 3-1.** Composição Química da amostra fornecida pelo Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT) em porcentagem.

| Ni | Cr | C | Nb | Si | Mn | W | Ti | Zr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 34 | 26,1 | 0,44 | 0,92 | 1,34 | 0,85 | 0,13 | <0,01 | 0,016 |

A obtenção dos segmentos e amostras foi previamente realizada de acordo com a Figura 3-2, de modo que cada segmento representasse um estado de envelhecimento de onde uma pequena amostra fosse retirada para análise metalográfica.

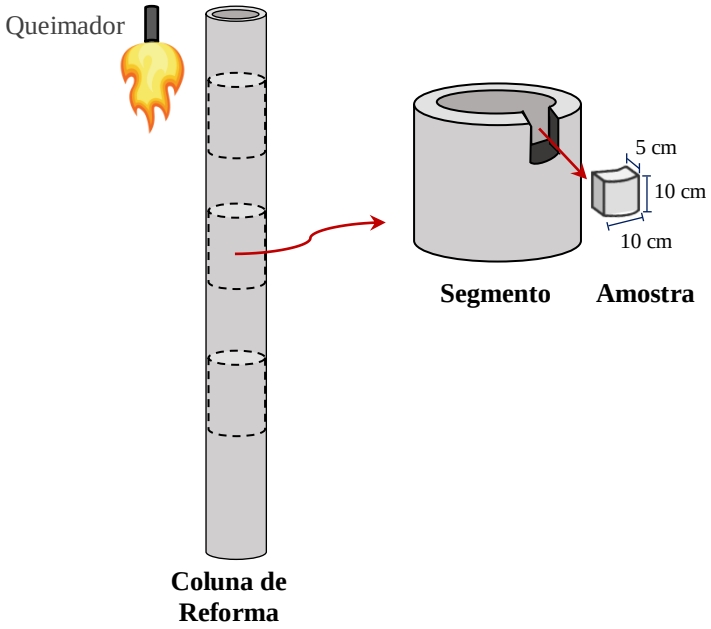



**Figura 3-2.** Esquema do corte das amostras.

A numeração e relação do segmento com sua amostra, estado de envelhecimento e temperatura de operação da coluna de reforma se encontram na Tabela 3-2.

**Tabela 3-2.** Relação entre segmento de tubo, amostra de microscopia e estado de envelhecimento.

| Segmento de Tubo | Amostra | Estado de Envelhecimento | Temperatura de operação (°C) |
|---|---|---|---|
| X1 | A1 | I | 500-600 |
| X2 | A2 | II | 600-700 |
| X3 | A3 | III | 700-800 |
| X4 | A4 | IV | 800-900 |
| X5 | A5 | V | 900-1000 |
| X6 | A6 | VI | 1000-1100 |

## 3.3 MICROSCOPIA ÓTICA

### 3.3.1 Preparação Metalográfica

De acordo com o fluxograma presente na Figura 3-3, as seguintes etapas de preparação metalográfica foram realizadas nas seis amostras:

a. Embutimento com resina baquelite;

b. Lixamento seguindo a ordem das lixas 100, 200, 400, 600 e 1200;

c. Polimento em alumina;

d. Ataque químico por Água Régia ($10ml\ de\ HNO_3 + 20ml\ de\ HCl + 30ml\ de\ Água + CuCl_2\ até\ saturar$) por 5 segundos.

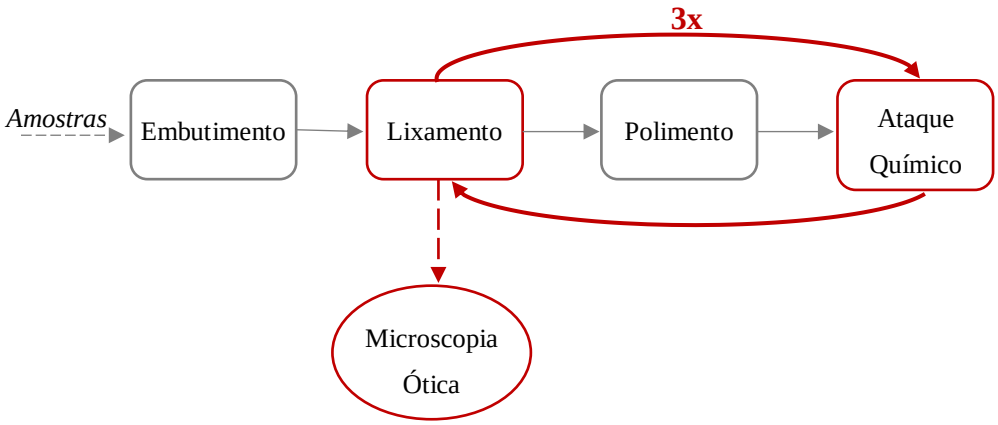



**Figura 3-3.** Fluxograma referente à preparação metalográfica.

O ataque químico foi intercalado com o lixamento por três vezes, da forma apresentada na Figura 3-3. Desta maneira observou-se uma melhor qualidade das micrografias pelos técnicos do laboratório de aulas práticas do DEMM.

### 3.3.2 Obtenção das Micrografias

As amostras foram caracterizadas segundo critério desenvolvido por QUEIROZ (2017), que analisou as micrografias da região de centro de parede, região indicada na Figura 3-4. Neste trabalho, foi utilizado microscópio ótico *Zeiss IMAGER.M1m*.

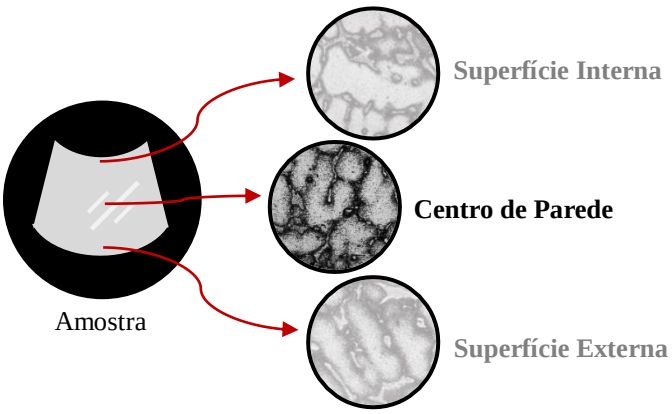



**Figura 3-4.** Esquema das micrografias e suas regiões na amostra. Visão superior.

Além da região citada, também foram obtidas imagens ao longo da espessura pela ferramenta Mosaico (Figura 3-5), nativo do *software* do microscópio utilizado, com

intuito de observar as diferenças microestruturais ao longo do gradiente de temperatura da espessura do tubo.

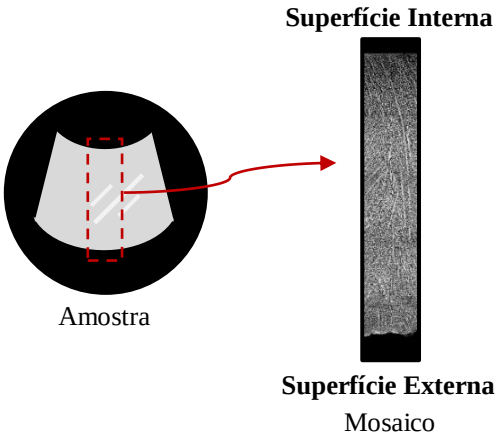



**Figura 3-5.** Micrografia do tipo Mosaico.

## 3.4 ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS

### 3.4.1 Sonda Utilizada

A sonda utilizada é uma sonda híbrida que possui componentes de excitação e detecção de correntes parasitas, sendo eles respectivamente a bobina de indução e um sensor Hall. Além disso, visando saturar a influência magnética da camada oxidada, o sistema também possui um elemento de magnetização externa.

### 3.4.2 Metodologia de Inspeção do Segmento

Para a coleta de dados, cada segmento de tubo a ser examinado foi fixado na posição horizontal, de modo que um braço mecânico conduzisse a sonda híbrida pela superfície da peça, como representado na Figura 3-6.

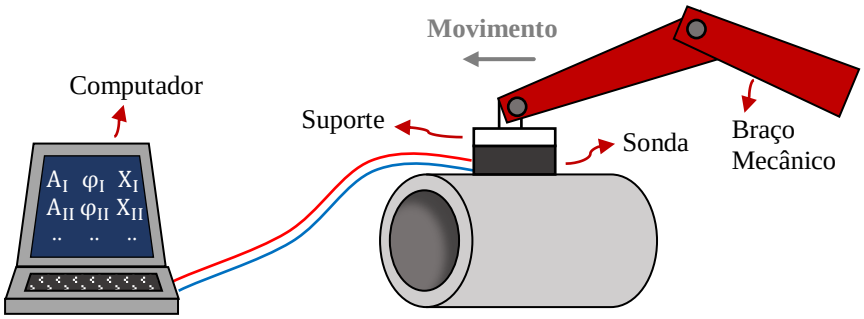



**Figura 3-6.** Ilustração da configuração do ensaio de corrente parasita.

O sinal detectado pela sonda é transmitido por um sistema elétrico a fim de ser armazenado como dado no computador, através de uma rotina desenvolvida por ARENAS (2017) no software *Matlab*. De forma concomitante, o braço mecânico é controlado por um operador enquanto a obtenção de dados é comandada pela rotina, no computador.

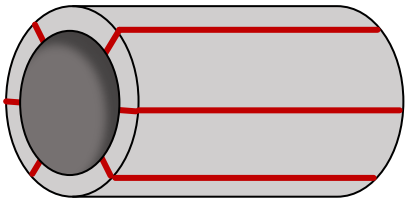


**Figura 3-7.** Marcações ou geratrizes.

A Figura 3-7 exibe as marcações feitas nos segmentos em seu sentido longitudinal, com intuito de servirem como guia visual para o operador controlar o trajeto do sensor. À medida que a sonda avança pelas geratrizes, os sinais são detectados ponto a ponto através do sensor, como a Figura 3-8 detalha.

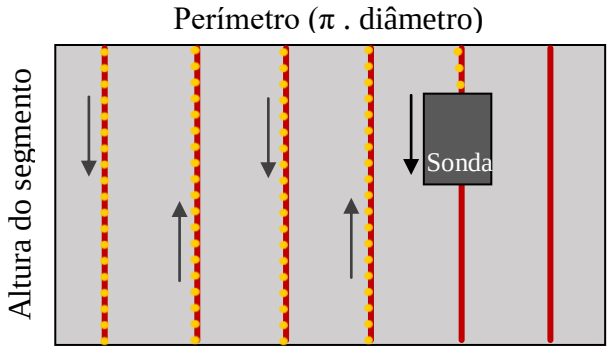



**Figura 3-8.** Obtenção de dados por ensaio de corrente parasita. Visão do tubo como se estivesse aberto.

Um ensaio completo consistiu em examinar linhas-guias (chamadas de geratrizes), buscando-se variar o sentido entre uma varredura e outra. Para isto, o tubo foi rotacionado, sempre deixando a linha a ser examinada virada para cima (em direção a sonda).

### 3.4.3 Banco de Dados para Classificadores

O sinal digital obtido pelo sensor em cada ponto (como mostrado na Figura 3-8) consiste em três parâmetros: amplitude (A), fase (φ) e *off-set*. Na etapa treino, como explicado na seção 2.4.1, a atribuição do sinal em classes (estados) é realizada conforme Tabela 3-3.

**Tabela 3-3.** Atribuição de dados aos estados de envelhecimento no modo treino.

| **Parâmetros de Classificação de Correntes Parasitas** | | | **Estado de Envelhecimento** |
|---|---|---|---|
| Amplitude | Fase | *Off-set* | |
| $A_I$ | $\varphi_I$ | $X_I$ | I |
| $A_{III}$ | $\varphi_{III}$ | $X_{III}$ | III |
| $A_V$ | $\varphi_V$ | $X_V$ | V |

Uma rotina de programação em *Matlab* foi especialmente elaborada para coletar os dados do sensor e permitir a criação de classificadores através da técnica de *Machine Learning SVM Linear*, de acordo com metodologia apresentada por ARENAS (2017). A ferramenta *SVM Linear* faz parte do *toolbox* do programa *Matlab.*

Os parâmetros obtidos com a sonda híbrida com magnetização externa foram também usados para a coleta de dados com a sonda sem magnetização externa, isto com o intuito de incrementar o número de informações referentes ao material na criação do classificador. De acordo com isto, para cada segmento analisado são usados seis parâmetros.

### 3.4.4 Classificadores

Foram desenvolvidos dez classificadores, de modo que cada um contemplasse uma determinada combinação de estados de envelhecimento. Cada combinação foi escolhida para evitar grande sobreposição de estados, conforme mostra o gráfico de Amplitude x Fase dos seis estados e, com isso, busca-se reduzir a chance de falsos-positivos durante os ensaios de correntes parasitas. A Tabela 3-4 contém os classificadores propostos.

**Tabela 3-4.** Relação dos classificadores e abrangência dos estados de envelhecimento.

| Classificadores | Estados |
|---|---|
| C0 | I, II, III, IV, V, VI |
| C1 | I, II, VI |
| C2 | I, III, VI |
| C3 | I, IV, VI |
| C4 | I, V, VI |
| C5 | I, II, III, VI |
| C6 | I, IV, V, VI |
| C7 | I, II, V, VI |
| C8 | I, III, V, VI |
| C9 | I, III, V |

O objetivo deste trabalho é encontrar um classificador que apresente alta acurácia e alta precisão nos ensaios. Com intuito de reproduzir o modo como será usado em campo e para avaliar se há influência dos dados examinados no resultado, foram realizados também os chamados *Blind Test*.

### 3.4.5 Blind Test

*Blind Tests* são ensaios feitos em tubos que não participaram da criação dos classificadores, como mostra o fluxograma na Figura 3-9. Este tipo de teste permite analisar se a performance do classificador tem relação com os dados examinados (do banco de dados ou não) de modo a avaliar se há um "vício" por parte do classificador. B1 é a amostra cuja classificação é desconhecida.

De acordo com a Figura 3-9, os segmentos com inicial X (X1, X2, X3..) geraram dados de amplitude (A), fase ($\varphi$) e *off-set* através da técnica de correntes parasitas. Estes dados foram utilizados tanto para criação do classificador (na etapa treino) quanto para serem classificados (na etapa teste). Com base nestes classificadores gerados, o segmento desconhecido B1 foi analisado.

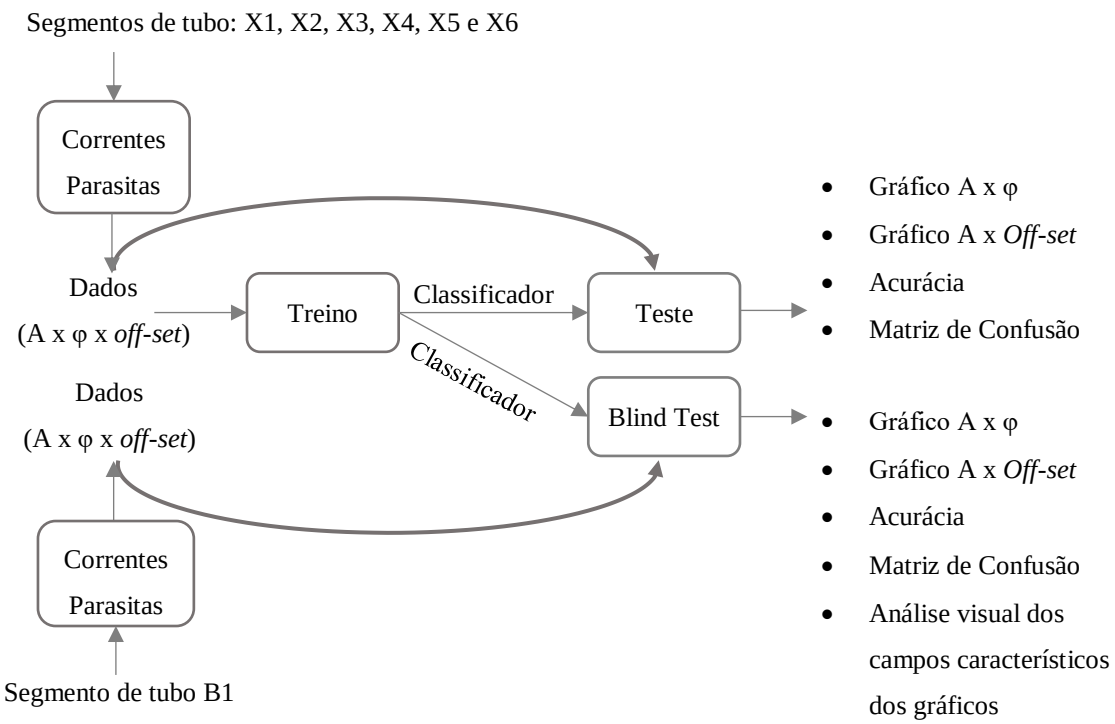



**Figura 3-9.** Fluxograma do Teste de Classificação e Blind Test.

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1 MICROSCOPIA ÓTICA

O critério de caracterização em seis estados de envelhecimento proposto por QUEIROZ (2017) se baseia na identificação de elementos típicos da microestrutura - como morfologia e distribuição espacial - de regiões específicas em tubos de reforma à vapor de uma liga HP-NbTi e HP-Nb através de análise por MO.

### 4.1.1 Microestrutura Típica do Aço HP-Nb e sinal obtido com a sonda híbrida

A seguir, serão apresentadas as imagens por MO e os sinais obtidos com a sonda híbrida para cada segmento avaliado. Os gráficos correspondentes a sonda híbrida com e sem magnetização externa apresentam os valores de amplitude e fase, sempre comparados com o sinal obtido no ar, o qual é usado como o sinal de referência.

#### a) Amostra A1 – Estado de Envelhecimento I

Como esperado, a microestrutura de A1 (Figura 4-1 letras (a) e (b)) não apresenta a morfologia “Escrita Chinesa” por conta da presença de Zr na liga. Também por este motivo, as dendritas estão finas e descontínuas combinadas com uma matriz limpa

(Figura 4-1 letras (a) e (b)). Os sinais obtidos pelo ensaio de correntes parasitas com a sonda híbrida apresentam um sinal diferenciado com relação ao sinal do ar (Figura 4-1 letras (c) e (d)).

**b) Amostras A2 e A3 – Estados de Envelhecimento II e III**

Os estados de envelhecimento II e III (Figura 4-2 e Figura 4-3 letras (a) e (b)) são marcados pela estrutura acicular, mais presente na amostra A3 (Figura 4-3 letras (a) e (b)) do que na A2 (Figura 4-2 letras (a) e (b)), principalmente no interior das dendritas. É também visível uma intensa precipitação secundária. Os sinais obtidos pelo ensaio de correntes parasitas com a sonda híbrida formam uma nuvem de pontos diferenciada do sinal do ar (Figura 4-2 e Figura 4-3 letras (c) e (d))

**c) Amostras A4 e A5– Estado de Envelhecimento IV e V**

As microestruturas de A4 e A5 (Figura 4-4 e Figura 4-5 letras (a) e (b)) também se mostraram similares à estabelecida por QUEIROZ (2017) como sendo características dos Estados IV e V, respectivamente. O Estado IV apresentou espessamento típico próximo aos contornos das dendritas promovendo a dissolução dos carbetos (Figura 4-4 letras (a) e (b)). O Estado V se encontra bastante refinado com precipitados secundários bem distribuídos na matriz, que está mais limpa que no estado anterior (Figura 4-5 letras (a) e (b)). Os sinais obtidos pelo ensaio de correntes parasitas com a sonda híbrida formam uma nuvem de pontos diferenciada do sinal do ar (Figura 4-4 e Figura 4-5 letras (c) e (d)).

**d) Amostra A6 – Estado de Envelhecimento VI**

Observou-se na amostra A6 (Figura 4-6 letras (a) e (b)) a matriz limpa, com precipitação muito fina e espaçada, sem espessamento nos contornos. Portanto, muito parecida com a do modelo de QUEIROZ (2017). Os sinais do ensaio de correntes parasitas desta amostra ocuparam uma grande extensão do gráfico, na faixa onde a amplitude da resposta é maior. Os sinais obtidos pelo ensaio de correntes parasitas com a sonda híbrida formam uma nuvem de pontos diferenciada do sinal do ar (Figura 4-6 letras (c) e (d)).

## A1 – Estado de Envelhecimento I

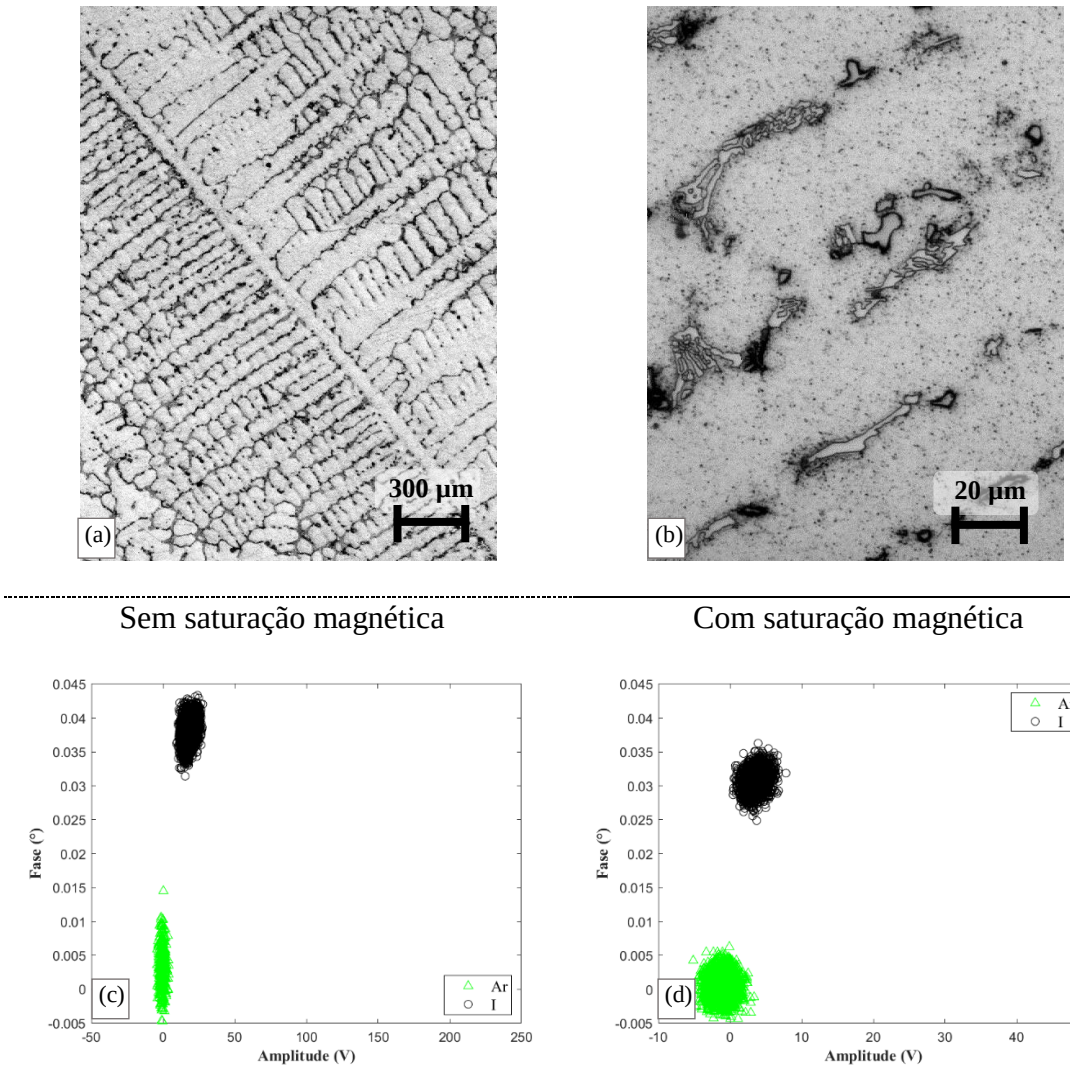
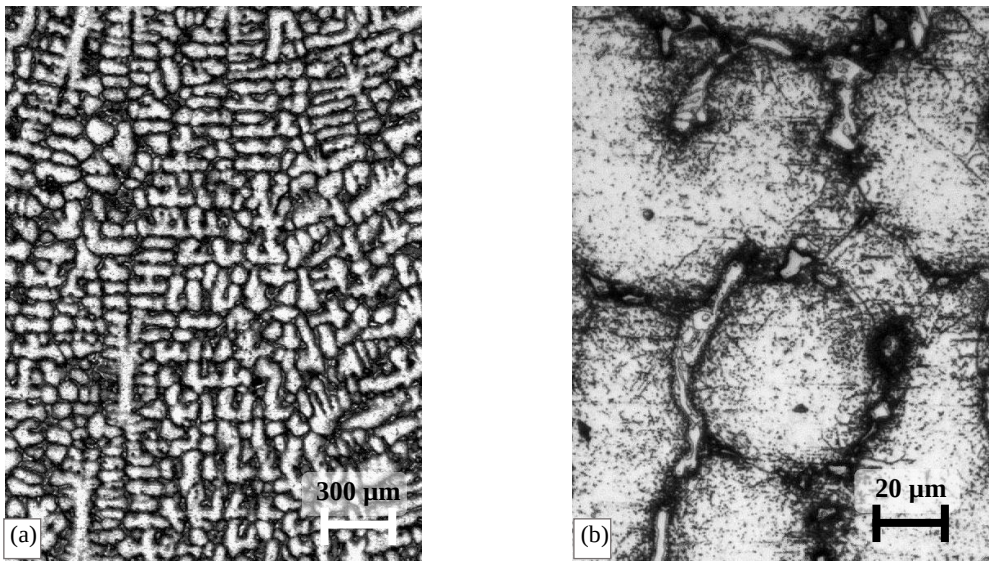



**Figura 4-1.** Micrografia por MO da amostra A1 (Estado de Envelhecimento I) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética.

## A2 – Estado de Envelhecimento II




Sem saturação magnética | Com saturação magnética

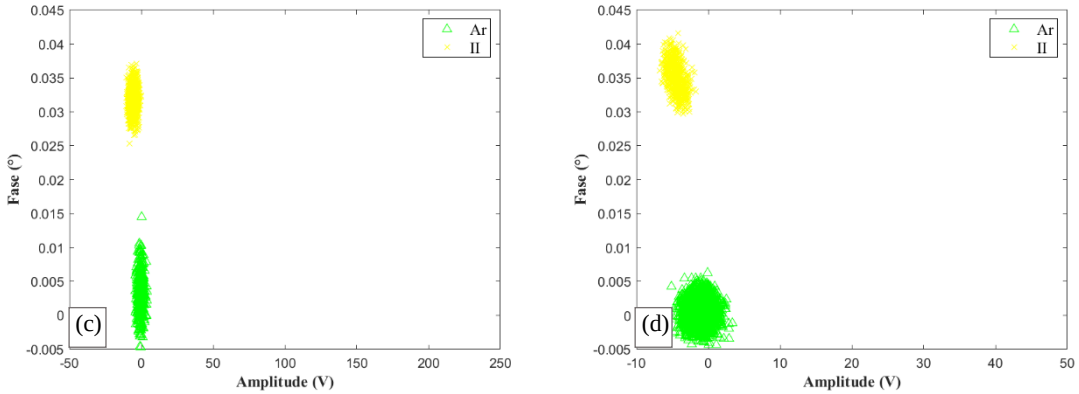



**Figura 4-2.** Micrografia por MO da amostra A2 (Estado de Envelhecimento II) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética.

## A3 – Estado de Envelhecimento III

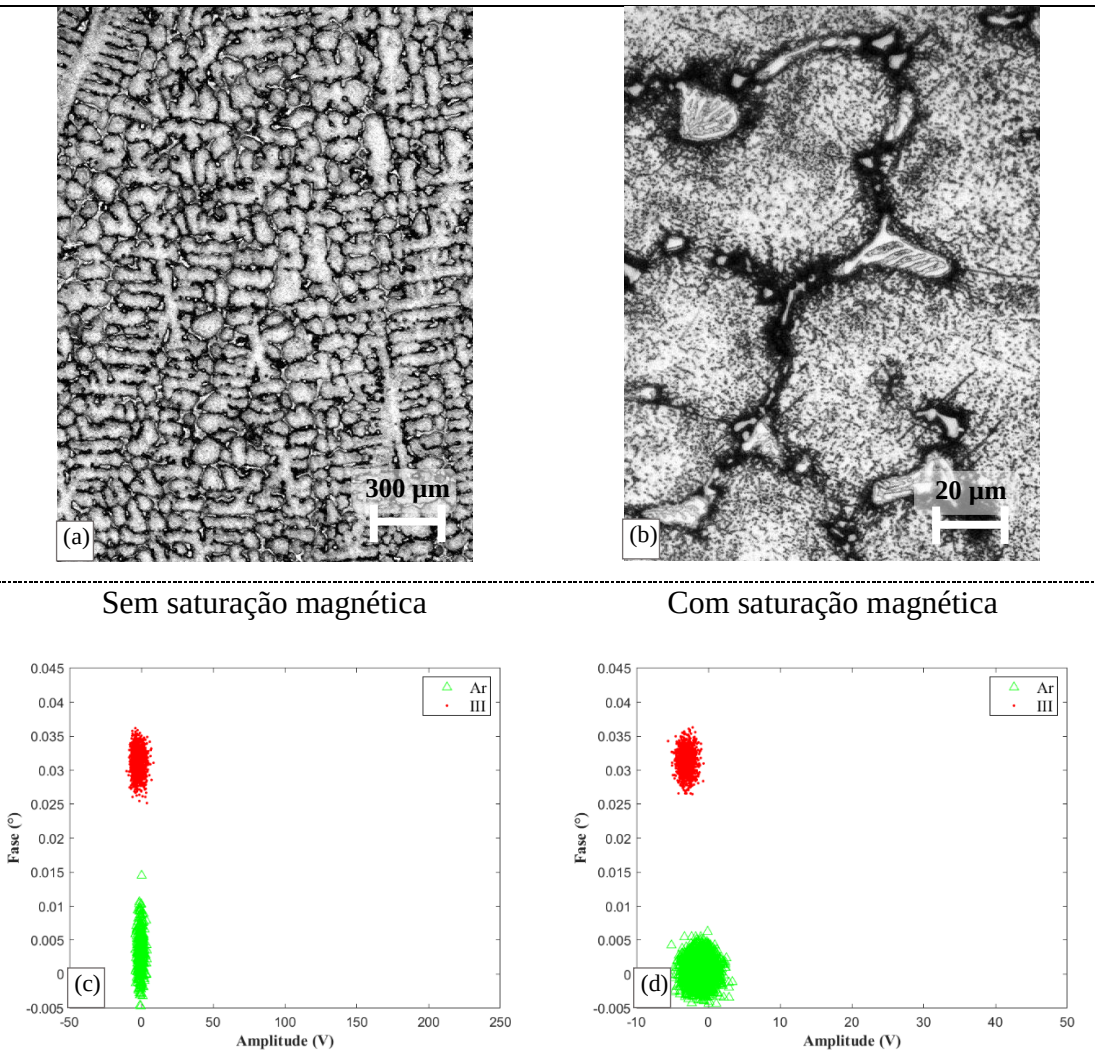



**Figura 4-3.** Micrografia por MO da amostra A3 (Estado de Envelhecimento III) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética.

**A4 – Estado de Envelhecimento IV**

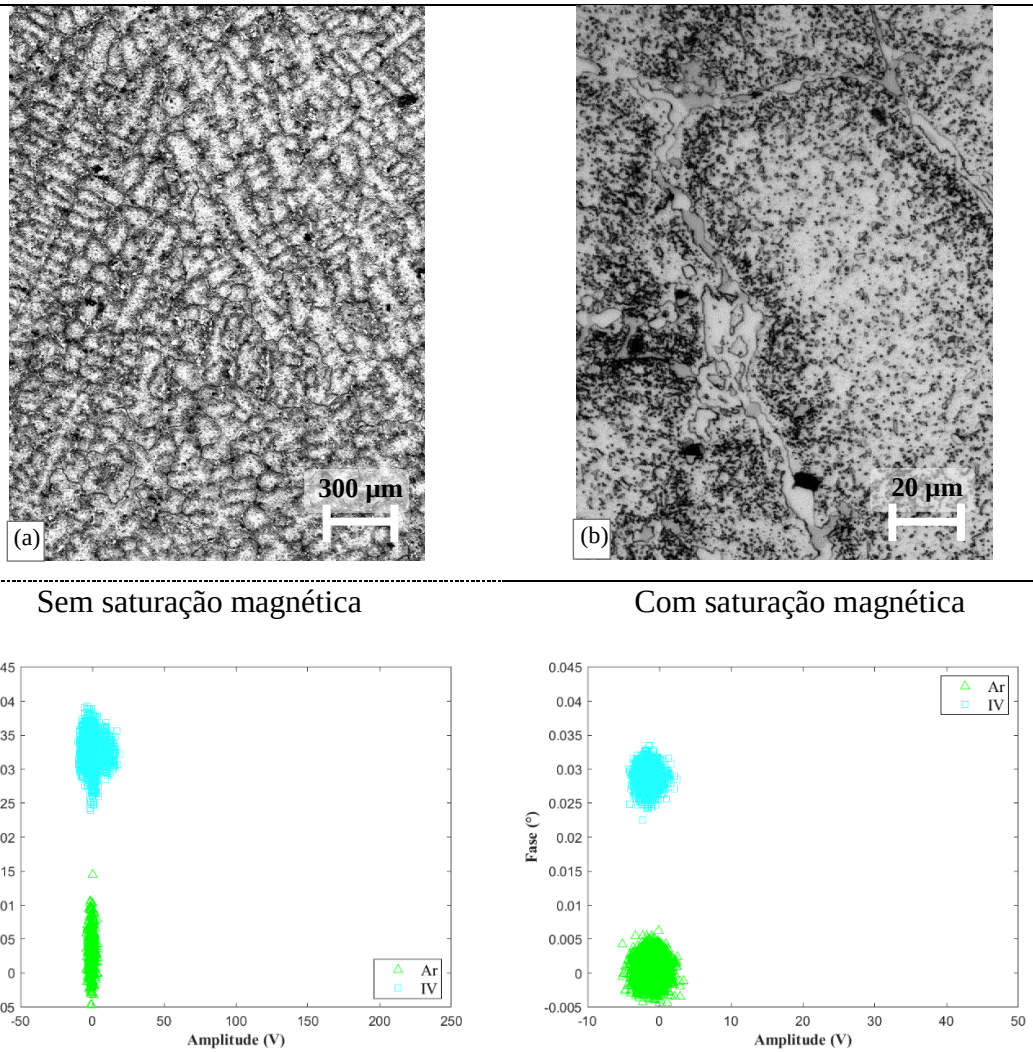



**Figura 4-4.** Micrografia por MO da amostra A4 (Estado de Envelhecimento IV) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética.

**A5 – Estado de Envelhecimento V**

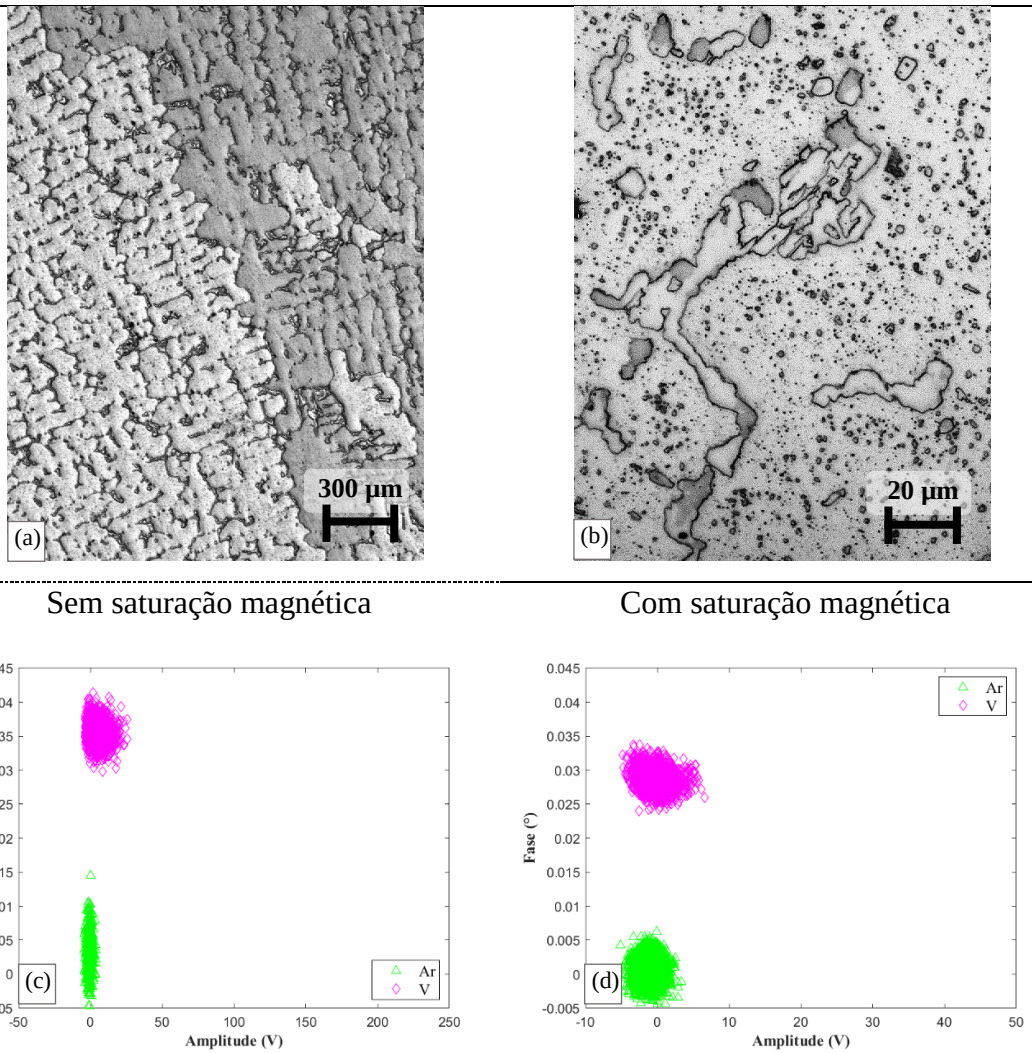



**Figura 4-5.** Micrografia por MO da amostra A5 (Estado de Envelhecimento V) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética.

**A6 – Estado de Envelhecimento VI**

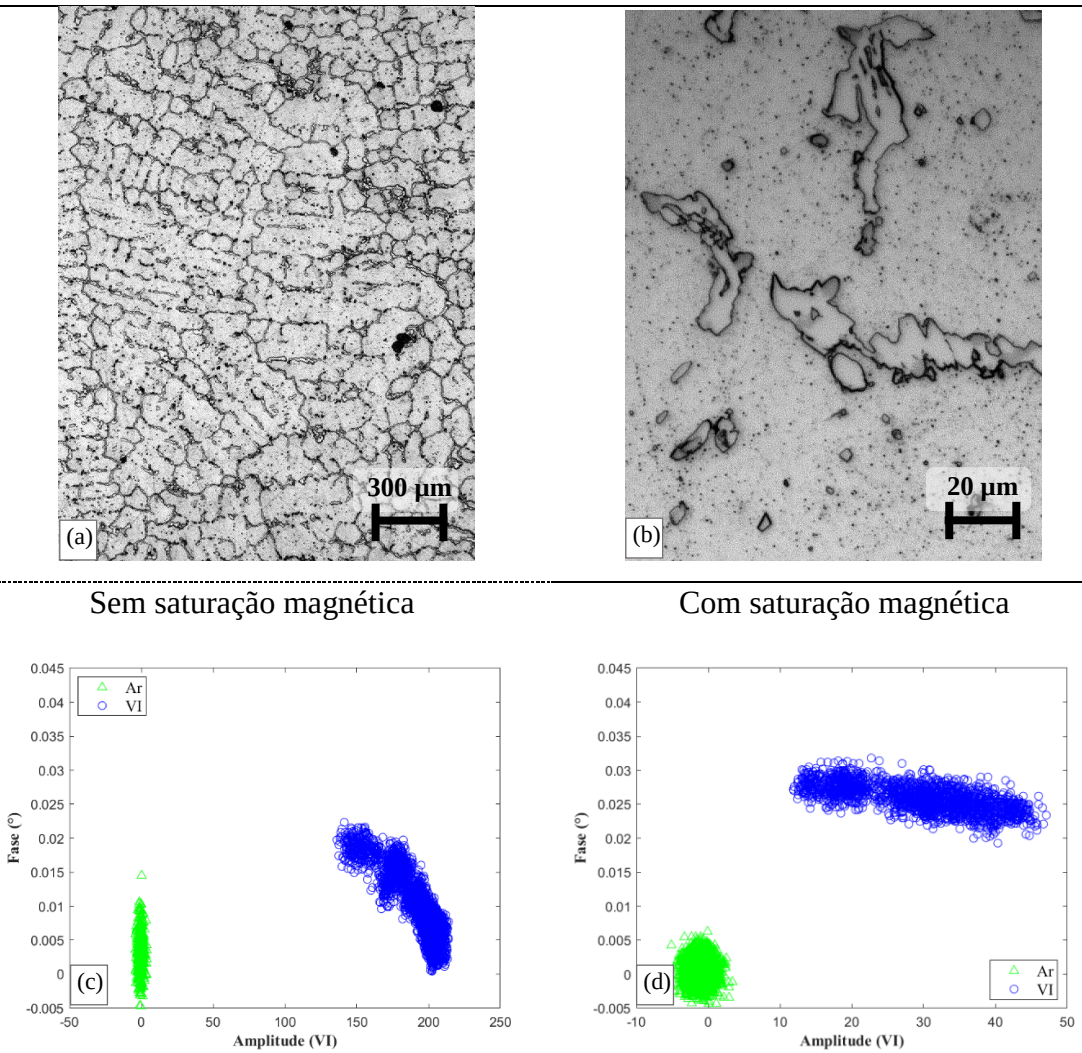



**Figura 4-6.** Micrografia por MO da amostra A6 (Estado de Envelhecimento VI) com magnificação de (a) 50x e (b) 500x, gráficos Amplitude x Fase a partir de ensaio de corrente parasita com sonda híbrida (c) sem saturação magnética e (d) com saturação magnética.

O Figura 4-7 representa a curva característica de estado de envelhecimento das amostras A1, A2, A3, A4, A5 e A6 com suas respectivas posições na coluna de reforma em relação à primeira junta soldada.

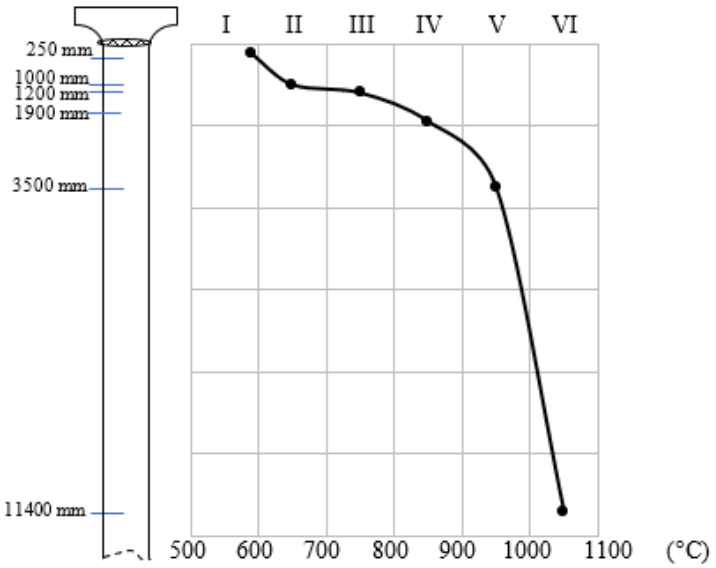
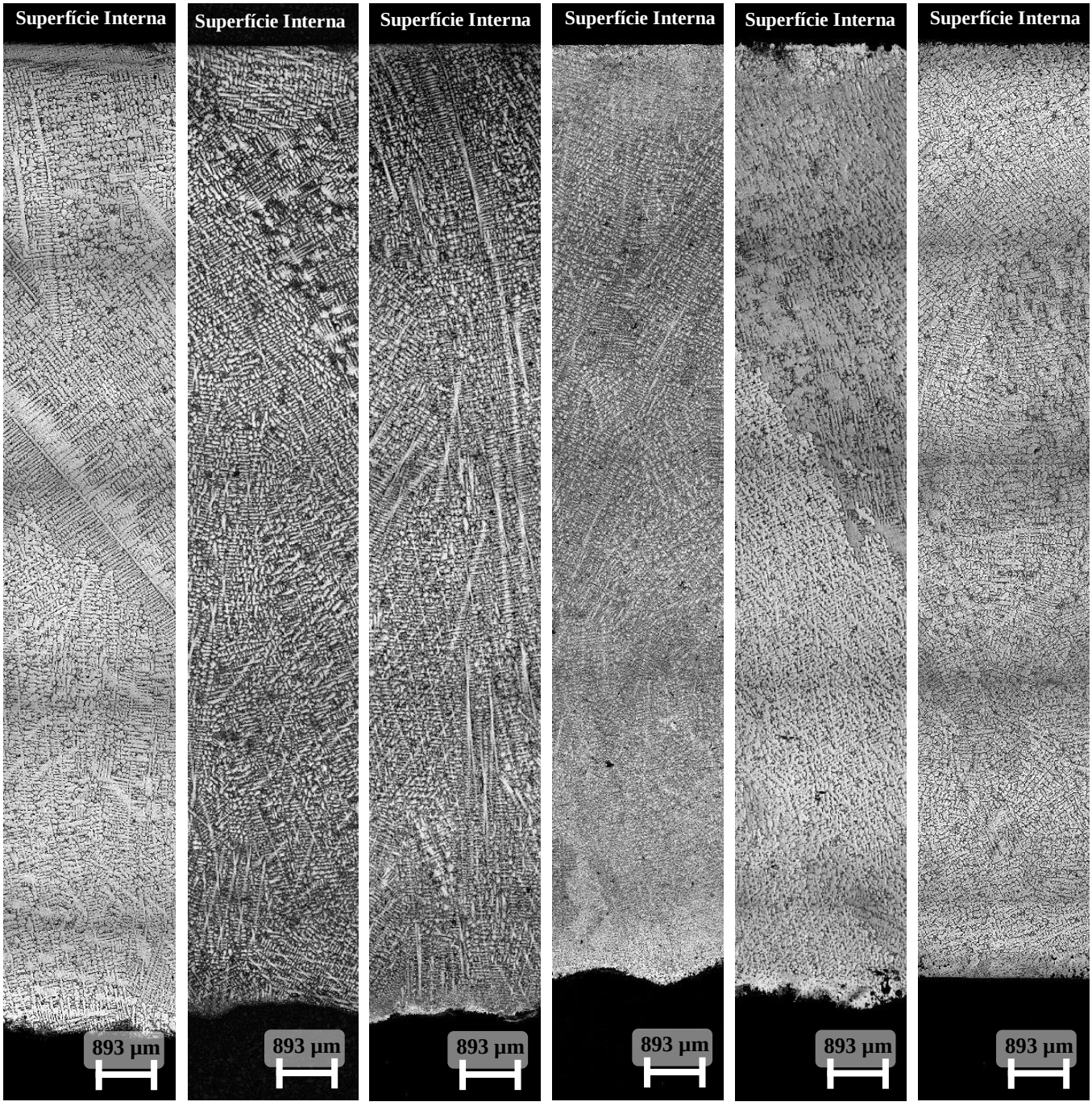



**Figura 4-7**. Curva característica dos estados de envelhecimento das amostras.

### 4.1.2 Micrografia da Espessura do Tubo

A partir da magnificação em 50x ao longo da espessura das seis amostras, foram obtidas as imagens presentes na Figura 4-8. Comparando as seis amostras neste formato, é possível identificar para:

- **Estado I:** Estrutura dendrítica fina e de matriz limpa (Figura 4-8 letra (a));
- **Estado II e III:** Intensa precipitação na estrutura dendrítica (Figura 4-8 letras (b) e (c));
- **Estado IV:** Refino da estrutura dendrítica, processo que parece se originar da superfície externa em direção ao centro de parede. Superfície interna apresenta ainda dendritas extensas e visíveis nesse aumento. Efeito de "limpeza" da microestrutura provocado pela dissolução dos carbetos (Figura 4-8 letra (d));
- **Estado V:** Maior dissolução dos carbetos. Mudança de coloração cuja fronteira se localiza no centro de parede, possivelmente devido ao ataque químico pois a região mais externa tende a se apresentar de forma mais envelhecida (Figura 4-8 letra (e));
- **Estado VI:** Maior uniformidade na microestrutura com estrutura refinada. Não é possível observar dendritas neste aumento (Figura 4-8 letra (f)).




**a) Estado I** **b) Estado II** **c) Estado III** **d) Estado IV** **e) Estado V** **f) Estado VI**

**Figura 4-8.** Micrografia da espessura das seis amostras (A1, A2, A3, A4, A5 e A6) com diferentes estados de evolução. Magnificação de 50x. (a) Estado I (A1); (b) Estado II (A2); (c) Estado III (A3); (d) Estado IV (A4); (e) Estado V (A5) e (f) Estado VI (A6).

## 4.2 CLASSIFICADORES

É possível notar que os dados associados a cada estado de envelhecimento ocupam posições específicas nos gráficos de Amplitude x Fase após ensaio de correntes parasitas utilizando sonda híbrida com e sem saturação magnética (Figura 4-9 e Figura 4-10 respectivamente). Por conta da semelhança, chama-se de "nuvem" a forma como os dados

de determinado estado de evolução microestrutural se organizam no gráfico. Cada nuvem foi delimitada com uma linha tracejada com o objetivo de ajudar na visualização do sinal correspondente a cada estado de envelhecimento. Observa-se maior sobreposição entre os estados de envelhecimento no gráfico de Amplitude x Fase quando não houve saturação (Figura 4-9) do que com saturação (Figura 4-10). Desta forma, a saturação magnética ajudou a tornar os campos característicos dos estados mais isolados e, portanto, menos complicados de serem identificados. De acordo com ambos os gráficos, os estados VI e Ar não devem apresentar erro de identificação.

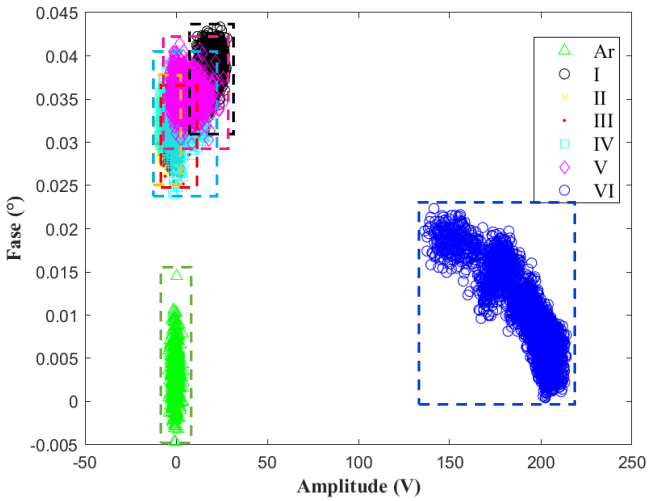



**Figura 4-9.** Gráfico de Amplitude x Fase sem saturação magnética apresentando os seis estados de envelhecimento. Em pontilhado, são as prováveis fronteiras definidas pelo *SVM* para delimitar as regiões atribuídas a cada classe.

Por outro lado, é esperada certa confusão entre os estados I, II, III, IV e V devido à sobreposição da "nuvem" entre eles observada em Figura 4-9 e Figura 4-10. Entre alguns pares desses estados, também é possível que exista alguma interferência, de acordo com os gráficos dos estados individuais na seção anterior.

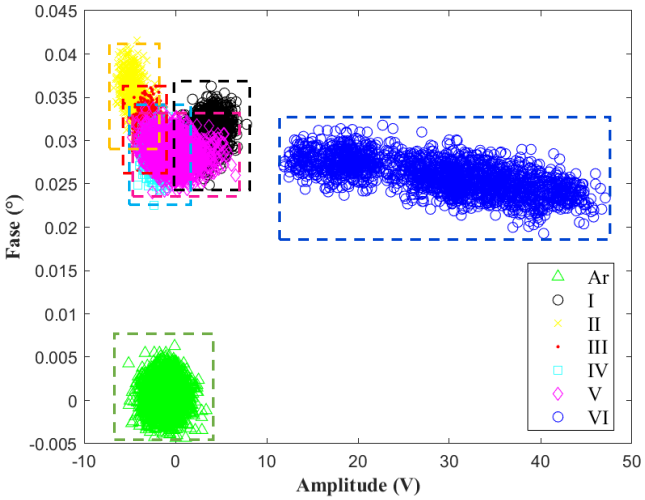



**Figura 4-10.** Gráfico de Amplitude x Fase com saturação magnética apresentando os seis estados de envelhecimento. Em pontilhado, são as prováveis fronteiras definidas pelo *SVM* para delimitar as regiões atribuídas a cada classe.

Um dos parâmetros avaliados para cada sinal coletado é o *off-set*. A Figura 4-11 apresenta a relação de Amplitude x *Off-set* a partir de ensaio utilizando sonda sem saturação magnética, enquanto o **Figura 4-12**, com saturação. Nestes gráficos, o estado VI é o único que ocupa uma região onde não há nenhuma interferência com outros dados. O estado I se encontra parcialmente isolado quando não houve saturação magnética.

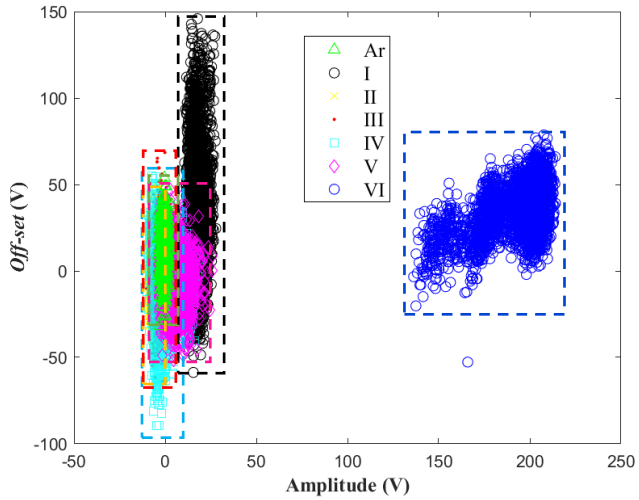



**Figura 4-11.** Gráfico de Amplitude x *Off-set* sem saturação magnética apresentando os seis estados de envelhecimento. Em pontilhado, são as prováveis fronteiras definidas pelo *SVM* para delimitar as regiões atribuídas a cada classe.

Diferentemente do caso de Amplitude x Fase, em Amplitude x *Off-set* (**Figura 4-12**) a saturação magnética trouxe maior sobreposição entre os dados dos estados, aumentando a chance de erro dos classificadores.

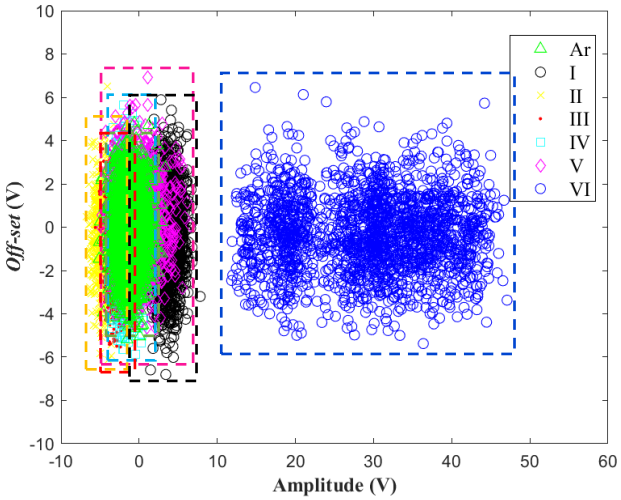



**Figura 4-12.** Gráfico de Amplitude x *Off-set* com saturação magnética apresentando os seis estados de envelhecimento. Em pontilhado, são as prováveis fronteiras definidas pelo *SVM* para delimitar as regiões atribuídas a cada classe.

Como esperado, o uso de dispositivo de saturação causou redução drástica na amplitude dos dados. Com base nesses quatro gráficos, foram pensados classificadores que apresentassem baixa probabilidade de falsos-positivos e negativos em virtude da sobreposição dos estados, como informado na seção 3.4.4.

A Tabela 4-1 apresenta os classificadores propostos, os estados de envelhecimento treinados e a porcentagem de acerto encontrada durante fase de teste. Como percebe-se através da referida tabela, um classificador que foi treinado com todos os seis estados de envelhecimento (C0) errou 14,7% dos dados quando posto em teste, apresentando a pior performance entre os dez classificadores.

Buscando um classificador de desempenho superior em detectar os estados de envelhecimento de colunas de reforma, foram propostos outros nove classificadores: C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9, de modo que cada um contemplasse uma combinação diferente de estados de envelhecimento.

Foram gerados gráficos de Amplitude x Fase e Amplitude x *Off-set* (com e sem saturação) para cada classificador de modo a visualizar as possíveis interferências de estados. Esses gráficos de todos os dez classificadores se encontram em Anexo A (Amplitude x Fase – sem saturação), Anexo B (Amplitude x *Off-set* – sem saturação), Anexo C (Amplitude x Fase – com saturação) e Anexo D (Amplitude x *Off-set* – com saturação).

**Tabela 4-1.** Relação dos classificadores propostos, estados de envelhecimento contemplados e a porcentagem de acerto.

| | Estados | Acurácia | I | II | III | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C0 | I, II, III, IV, V, VI | 85,3% | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| C1 | I, II, VI | 100,0% | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ |
| C2 | I, III, VI | 100,0% | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ |
| C3 | I, IV, VI | 99,7% | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ |
| C4 | I, V, VI | 98,7% | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ |
| C5 | I, II, III, VI | 98,1% | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ |
| C6 | I, IV, V, VI | 94,4% | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| C7 | I, II, V, VI | 97,7% | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ |
| C8 | I, III, V, VI | 97,3% | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| C9 | I, III, V | 96,7% | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ |

Como exemplo, para o classificador C1 (Estados de Envelhecimento I, II e VI), Figura 4-13 e Figura 4-14 exibem os resultados de Amplitude x Fase com e sem saturação, respectivamente. Não há intereferência entre os dados de estados diferentes. Isto explicaria a acurácia de 100% presente na Tabela 4-1.

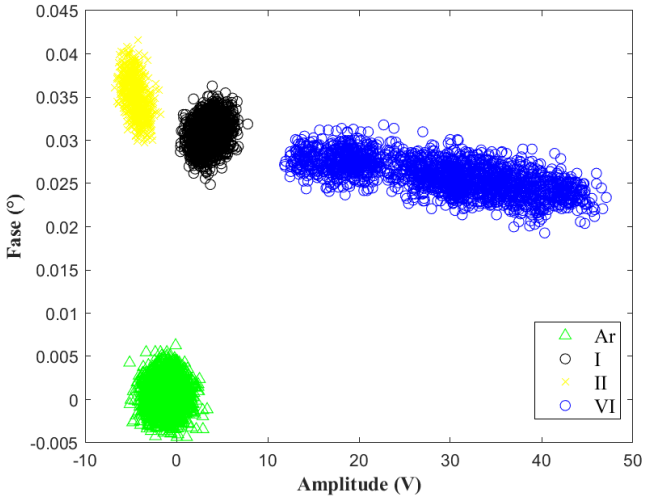



**Figura 4-13.** Gráfico de Amplitude x Fase do classificador C1 (Estados de Envelhecimento I, II e VI) utilizando sensor com saturação magnética.

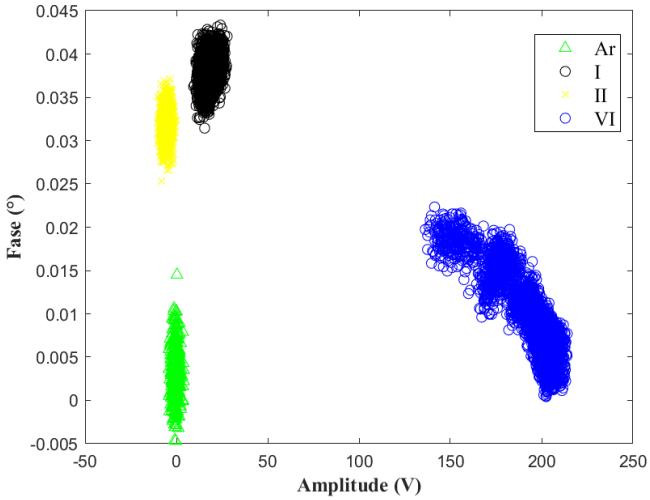



**Figura 4-14.** Gráfico de Amplitude x Fase do classificador C1 (Estados de Envelhecimento I, II e VI) utilizando sensor sem saturação magnética.

Por sua vez, Figura 4-15 e Figura 4-16 exibem os resultados de Amplitude x *Off-set* com e sem saturação, respectivamente, de C1. Nestes casos, observa-se: sobreposição entre os estados II e Ar (em Figura 4-16); entre I e Ar (em Figura 4-15) e entre II e Ar (em Figura 4-15). Por isso, poderia ser esperada certa confusão de resposta entre esses estados.

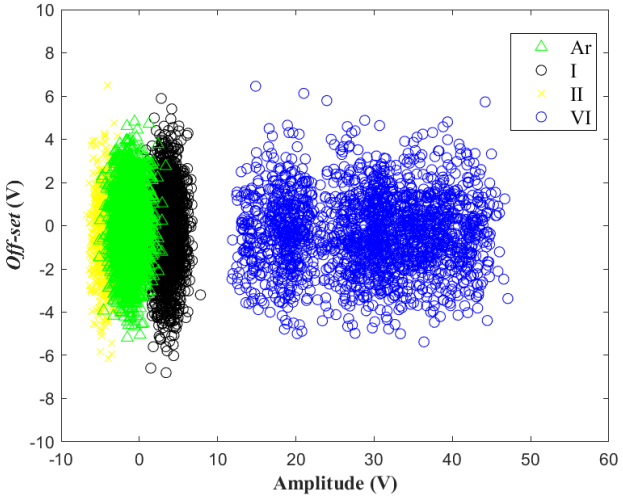



**Figura 4-15.** Gráfico de Amplitude x *Off-set* dos estados de envelhecimento do classificador C1 utilizando sensor com saturação magnética.

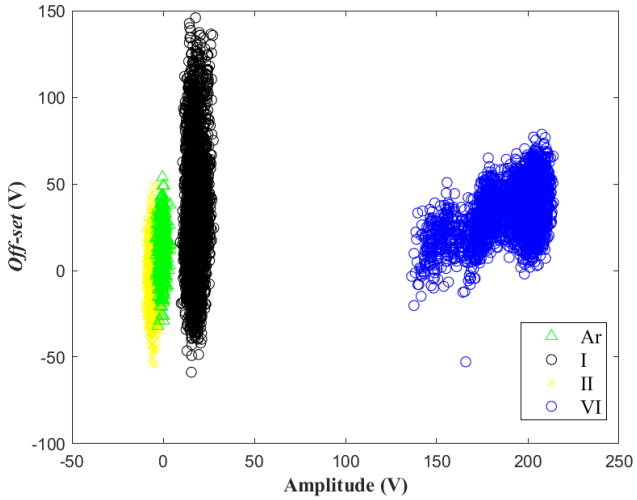



**Figura 4-16.** Gráfico de Amplitude x *Off-set* dos estados de envelhecimento do classificador C1 utilizando sensor sem saturação magnética.

A comparação pura e simples de acurácia entre classificadores (ver Tabela 4-1) não é suficiente para determinar qual é o mais adequado para uso. Como exemplo, a comparação entre C8 e C9 é um caso em que poderia ser levado a concluir que C8 é um classificador melhor que C9 pois apresenta maior acurácia. Pelo fato de C9 não ser treinado com o estado VI (que não apresenta sobreposição com nenhum outro estado), seu erro torna-se relativamente maior quando comparado com C8. Então, para compreender melhor o comportamento dos classificadores, é preciso entender qual é a sua tendência de erro através da matriz de confusão.

As linhas da matriz de confusão representam os **estados atribuídos na fase de treino** (classificação) enquanto as colunas representam os **estados identificados na fase de teste** (identificação). A Tabela 4-2 corresponde a matriz de confusão de C1, mostrando que não houve confusão entre os estados treinados, fato que era esperado pois a acurácia se mostrou 100% na Tabela 4-1.

**Tabela 4-2.** Matriz de Confusão do classificador C1.

| | | Identificação | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Classificação | C1 | Ar | I | II | VI |
| | Ar | 100% | | | |
| | I | | 100% | | |
| | II | | | 100% | |
| | VI | | | | 100% |

A matriz de confusão de C0, presente na Tabela 4-3, aponta tendência a erro entre os estados que experimentaram sobreposições mostradas em Figura 4-9, Figura 4-10, Figura 4-11 e Figura 4-12.

**Tabela 4-3.** Matriz de Confusão do classificador C0.

Identificação

| Classificação \ C0 | Ar | I | II | III | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ar | 100% | | | | | | |
| I | | 97% | | | | 3% | |
| II | | | 82% | 18% | | | |
| III | | | 4% | 80% | 15% | | |
| IV | | | | 7% | 73% | 20% | |
| V | | 5% | | 4% | 34% | 57% | |
| VI | | | | | | | 100% |

De acordo com Tabela 4-3, C0 acertou 100% dos dados do estado VI, provavelmente devido à ausência de sobreposição nos quatro gráficos citados. Embora Ar tenha apresentado algumas coincidências de dados com outros estados, C0 não apresentou dificuldades em classificá-lo, possivelmente em função do aprendizado por *SVM* considerar os seis parâmetros, de modo a compensar uma possível confusão no resultado: amplitude (com e sem saturação), fase (com e sem saturação) e *Off-set* (com e sem saturação).

Dentre os estados de sobreposição, destacam-se os estados IV e V em função do alto erro em identificar um quando na verdade é o outro: 34% dos dados classificados como V foram identificados pelo *SVM* como IV. Esse valor é expressivo quando comparado ao acerto de 57% do estado V. O contrário, contudo, não é tão elevado: Ao testar o estado IV, apenas 20% dos dados foram identificados como V.

Ainda com base na Tabela 4-3, o estado V é o que sofre maior incidência de falsos-positivos (43% dos dados), podendo ser confundido com os estados I (5% dos dados), III (4% dos dados) e IV (34% dos dados). O estado IV é confundido com os estados III (3%) e IV (20%) enquanto o estado III é preterido pelos estados II (4%) e IV (15%). Por fim, o estado II é confundido pelo III 18% das vezes e o I, 3% pelo V.

No Anexo E**Error! Reference source not found.**, se encontra a matriz de confusão dos classificadores C0 ao C9, além de suas respectivas acurácias. Com base nisso, compreende-se melhor a diferença de acurácia entre C8 e C9, discutido

anteriormente: A ausência do estado VI em C9 torna os erros V por I (Classificação V identificada como I) e III por V (Classificação III identificada como V) maiores quando comparados com C8.

O raciocínio utilizado para analisar os classificadores C0 e C1 foi o mesmo adotado para os demais (C2 ao C9) a fim de entendê-los a fundo:

1º. **Análise visual de sobreposição de estados nos gráficos:**
   - Definir possíveis confusões entre os estados em cada gráfico a partir das regiões ocupadas pelas "nuvens" de dados;
   - Analisar diferenças das "nuvens" de dados entre os gráficos com e sem saturação;

2º. **Análise da matriz de confusão:**
   - Se os erros da matriz foram os mesmos esperados em (1º);
   - Avaliar se a precisão da classificação foi suficientemente alta.

Em que pese o fato da superposição de "nuvens" observada em Figura 4-9 ao Figura 4-12, a acurácia nos classificadores se mostrou satisfatória, principalmente para o gráfico de Amplitude x *Off-set*, já que a variação do parâmetro *off-set* é menor em relação aos parâmetros de amplitude e fase.

Em suma, C1 e C2 apresentaram acurácia de 100%, muito provavelmente devido ao isolamento dos estados considerados; C3 e C4 atingiram alta precisão considerando as interseções entre os estados I e IV (C3) e I e V (C4); C5 apresentou acurácia relativamente boa (98,1%), contudo a tendência de erro de 16% entre estados II e III (região de interseção) é um fator que prejudicaria sua escolha; C6 foi o classificador que apresentou pior desempenho dentre os propostos (com exceção de C0) com confusão de cerca de 10% entre os estados IV e V; C7 e C8 apresentaram menor precisão do que C3 e C4, o que é compreensível pois o número de estados conflitantes considerados é maior; Por fim, como a questão da baixa acurácia de C9 foi explicada anteriormente, então, ele é muito similar ao C8, com a desvantagem de não saber classificar um estado fácil como o estado VI. Com base nesta análise, os classificadores C7 e C8 podem ser escolhidos como os melhores dentre os 10 propostos, com a ressalva para C3 que também apresentou bom desempenho, mas que possui apenas três estados.

### 4.2.1 Blind Tests

Uma amostra – cuja classificação era desconhecida – foi testada pelo sensor híbrido e classificada através dos classificadores propostos C0 ao C9. Os resultados das previsões de cada classificador para a amostra de *blind test* se encontram na Tabela 4-4. Na referida tabela, nota-se que a média de previsão para B1 foi alta, o que indica que esta amostra pode ser considerada de fácil leitura por cada classificador, sendo os valores abaixo desta média destacados em vermelho.

**Tabela 4-4.** Previsões de acordo com os classificadores C0 ao C9 em ensaio de Blind Test B1.

| | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I, II, III, IV, V, VI | I, II, VI | I, III, VI | I, IV, VI | I, V, VI | I, II, III, VI | I, IV, V, VI | I, II, V, VI | I, III, V, VI | I, III, V | Média |
| B1 | II | I | I | I | I | I | I | I | I | I | |
| | 99,85% | 99,93% | 100,00% | 100,00% | 99,33% | 100,00% | 100,00% | 99,85% | 99,93% | 100,00% | 99,76% |

A previsão do classificador é o estado indicado por *SVM* que apresentou maior porcentagem de identificação durante varredura da peça. Portanto, a Tabela 4-4 não é capaz de mostrar a precisão obtida para cada estado de evolução microestrutural. Para tal, a matriz de confusão presente na Tabela 4-5 mostra as outras possibilidades encontradas por cada classificador para a amostra B1. A primeira observação é de que todos os classificadores apresentaram alta precisão.

**Tabela 4-5.** Matriz de confusão de todos os classificadores em ensaio de Blind Test em B1.

| | | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | I, II, III, IV, V, VI | I, II, VI | I, III, VI | I, IV, VI | I, V, VI | I, II, III, VI | I, IV, V, VI | I, II, V, VI | I, III, V, VI | I, III, V |
| B1 | Ar | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| | I | 0,00% | 99,93% | 100,00% | 100,00% | 99,33% | 100,00% | 100,00% | 99,85% | 99,93% | 100,00% |
| | II | 99,85% | 0,07% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,07% | 0,00% | 0,00% |
| | III | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| | IV | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| | V | 0,15% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,67% | 0,00% | 0,00% | 0,07% | 0,07% | 0,00% |
| | VI | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |

A partir dos gráficos de Amplitude x Fase e Amplitude x *Off-set* (com e sem saturação) da amostra de *blind test* B1 em Anexo F, nota-se sobreposição das “nuvens” de dados com a do estado Ar. Tal fato, contudo, não impactou na classificação de C0 a C9, conforme Tabela 4-5, já que não houve indicação de B1 como Ar por nenhum classificador.

Além disso, foi realizada análise visual comparativa entre as regiões típicas das "nuvens" dos estados com a "nuvem" obtida pelo ensaio de B1 de acordo com o ponto de vista de cada classificador. Os gráficos utilizados para esta análise estão presentes em Anexo G ao Anexo P e a análise visual se encontra na Tabela 4-6, o que seria em teoria o modo como o *SVM* realiza a identificação. Na referida tabela, A x F (s) significa Amplitude x Fase sem saturação; A x O (s) significa Amplitude x *Off-set* sem saturação; A x F (c) significa Amplitude x Fase com saturação e A x O (c) significa Amplitude x *Off-set* com saturação. Em verde, são as previsões visuais que coincidem com a do *SVM* enquanto em vermelho são os estados que não foram indicados pelo *SVM*. Apenas o classificador C0 apresenta discrepância entre a análise visual dos quatro gráficos e o resultado apresentado pelo *SVM*. Em alguns casos, o resultado indicado pela máquina não é o mais consistente se comparado com os gráficos, o que sugere que as fronteiras geradas por esta técnica de aprendizado de máquina são mais complexas do que como foram imaginadas e marcadas nos gráficos.

**Tabela 4-6.** Previsão visual das amostras *Blind Tests* para todos os classificadores onde A x F (s): Amplitude x Fase sem saturação; A x O (s): Amplitude x Off-set sem saturação; A x F (c): Amplitude x Fase com saturação e A x O (c): Amplitude x Off-set com saturação.

| | | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B1 | A x F (s) | I, II, III, IV, V | I | I, III | I, IV | I, V | I, II, III | I, IV, V | I, V | I, III, V | I, III, V |
| | A x O (s) | I, IV, V | I | I, III | I, IV | I, V | I, III | I, IV, V | I, V | I, III, V | I, III, V |
| | A x F (c) | I, V | I | I | I | I, V | I | I, V | I, V | I, V | I, V |
| | A x O (c) | I, V | I | I | I, IV | I, V | I | I, V | I, V | I, V | I, V |
| | **Resultado** | **I, V** | **I** | **I** | **I** | **I, V** | **I, III** | **I, V** | **I, V** | **I, V** | **I, V** |

A caracterização de B1 por MO se pautou pelas mesmas características microestruturais utilizadas para classificar as amostras de referência (Estados I ao VI), discutido em seção 4.1.1. Para tal, foram analisadas duas amostras (ver esquema em Figura 4-17):

- B1A: Retirada de anel imediatamente acima do segmento B1
- B1B: Retirada de anel imediatamente abaixo do segmento B1.

A partir da Figura 4-17, nota-se que B1A (amostra acima do segmento de *blind test*) e A1 (amostra que representou o Estado I) foram retiradas do mesmo anel. No entanto, a micrografia de A1 (Figura 4-1 (a) e (b)) aparenta ser mais limpa do que de B1A (Figura 4-18 (a) e (b)). B1A apresenta semelhança com a Figura 2-10 (Estado II do modelo de QUEIROZ (2017)) devido à presença dos precipitados secundários e de um início de espessamento interdendrítico. Portanto, embora esteja localizada no mesmo anel

que A1 (estado de referência I), B1A se assemelharia mais com Estado II. Com base em Figura 4-18 (c) e (d), B1B (amostra retirada em anel abaixo do segmento B1) apresentou estrutura dendrítica mais refinada do que B1A, mas ainda sim pouco semelhante à A1 (Figura 4-1 (a) e (b))

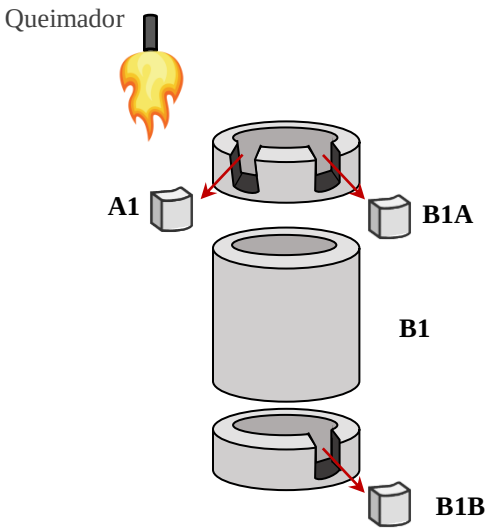
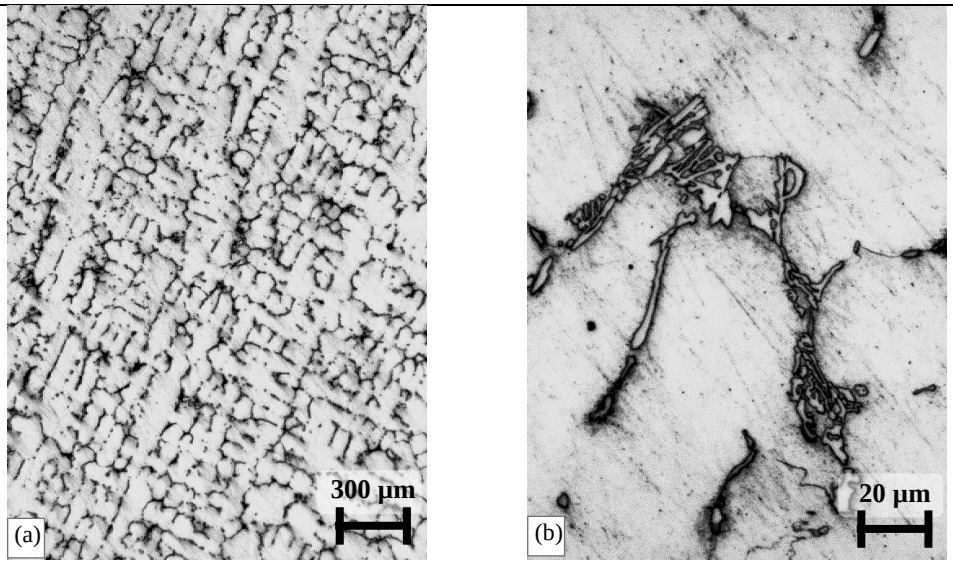



**Figura 4-17.** Esquema de retirada das amostras B1A e B1B com relação a B1 e ao queimador.

| | |
|---|---|
| **B1A** |   |

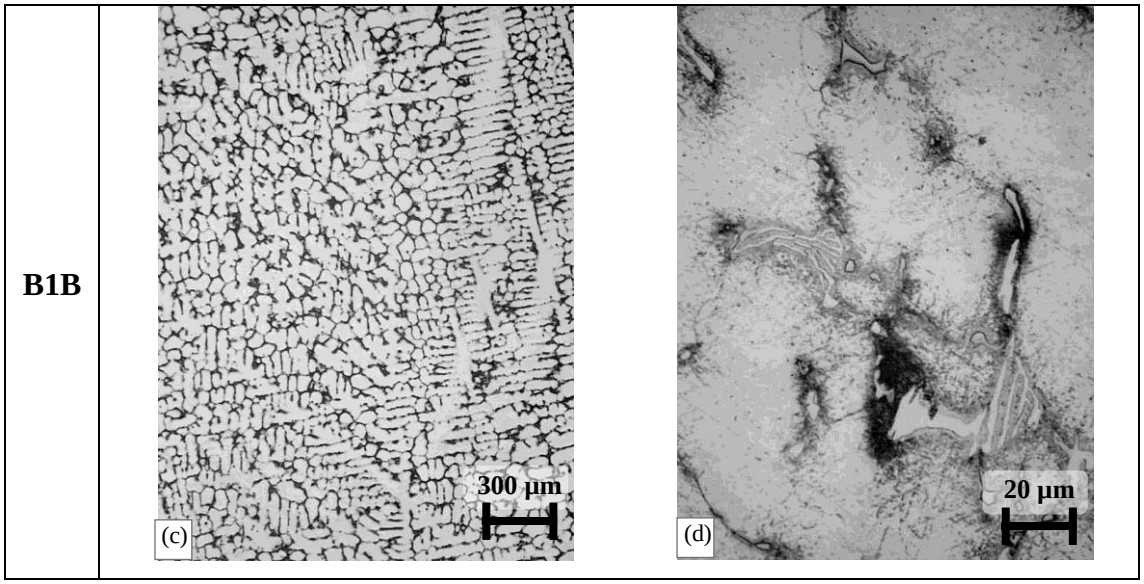
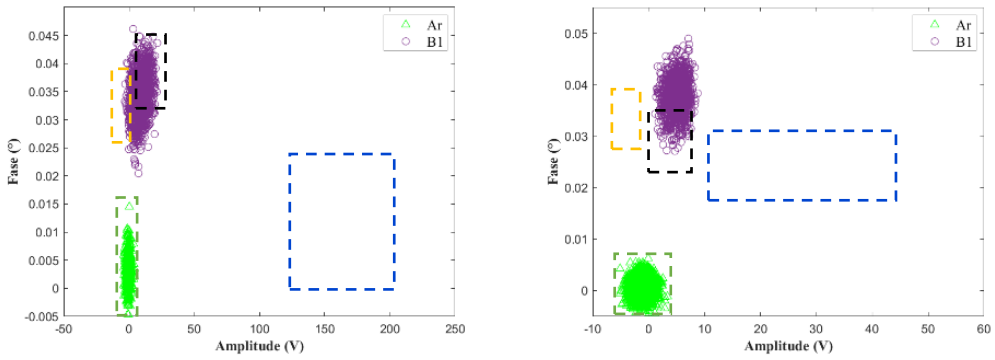


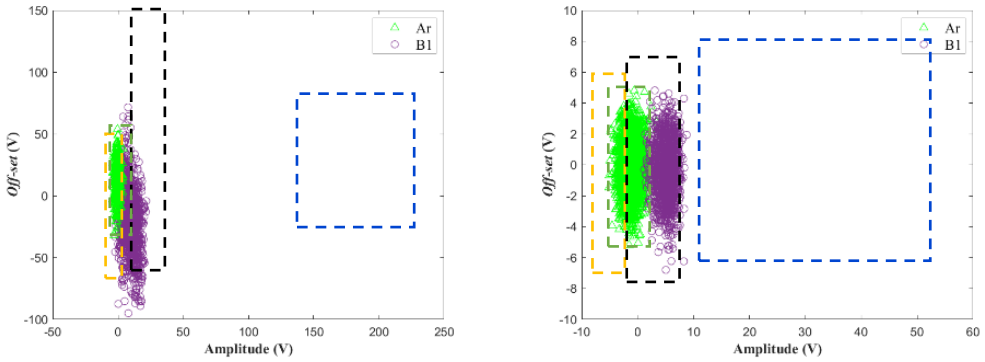

**Figura 4-18.** Micrografias por MO de: (a) B1A em 50 x, (b) B1A em 500x; (c) B1B em 50x e (d) B1B em 500x.

O Figura 4-19 mostra como a resposta magnética de B1 se encaixa melhor na região de nuvens do Estado I (preto) do que do Estado II (amarelo). Então, podemos entender que a amostra B1 está em situação intermediária aos estados I e II e, desta forma, passível de confusão por parte dos classificadores.

**Sem Saturação** **Com Saturação**




(a) (b)




(c) (d)

**Figura 4-19.** Gráficos da amostra B1: (a)Amplitude x Fase sem saturação magnética; (b) Amplitude x Fase com saturação magnética; (c) Amplitude x Off-set sem saturação magnética e (d) Amplitude x Off-set com saturação magnética. As regiões tracejadas indicam os estados Ar, I, II e VI (C1) treinados pelo SVM.

Para avaliar a **acurácia** dos classificadores no *Blind Test*, a Tabela 4-7 possui a relação da identificação do segmento de *Blind Test* e sua porcentagem de acerto para os Estados I e II. Tendo em vista a boa performance dos classificadores na fase de teste no treinamento (Anexo EAnexo AAnexo E), esperava-se uma boa acurácia neste tipo de ensaio.

Contudo, a Tabela 4-7 mostra que pouquíssimos classificadores cogitaram o Estado II para a amostra B1. Apenas C0 apresentou porcentagem expressiva e foi justamente C0 que fugiu completamente à análise visual dos gráficos, contrariando o que se esperava a partir de uma análise preliminar das "nuvens" nos gráficos. Além de C0, os classificadores C1, C5 e C7 também teriam condições de identificar o Estado II mas não o fizeram, pelo contrário, classificaram como Estado I.

**Tabela 4-7.** Acurácia dos classificadores em ensaio Blind Test (para os estados I e II).

| | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I, II, III, IV, V, VI | I, II, VI | I, III, VI | I, IV, VI | I, V, VI | I, II, III, VI | I, IV, V, VI | I, II, V, VI | I, III, V, VI | I, III, V | |
| B1 | 0,00% | 99,93% | 100,00% | 100,00% | 99,33% | 100,00% | 100,00% | 99,85% | 99,93% | 100,00% | I |
| | 99,85% | 0,07% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,07% | 0,00% | 0,00% | II |

Por outro lado, os classificadores C2, C3, C4, C6, C8 e C9 não seriam mesmo capazes de classificar a segmento B1 como Estado II já que o referido estado não fazia parte do aprendizado deles. Desta forma, seria considerado como acerto caso os

classificadores C2, C3, C4, C6, C8 e C9 recorressem aos estados apontados na Tabela 4-8, que consiste no resultado dos ensaios do estado de referência II através dos classificadores C0 ao C9.

**Tabela 4-8.** Matriz de confusão para identificação do Estado II para os classificadores C0 ao C9.

| | | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | I, II, III, IV, V, VI | I, II, VI | I, III, VI | I, IV, VI | I, V, VI | I, II, III, VI | I, IV, V, VI | I, II, V, VI | I, III, V, VI | I, III, V |
| II | Ar | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| | I | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| | II | 75,82% | 100,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 79,87% | 0,00% | 97,39% | 0,00% | 0,00% |
| | III | 24,05% | 0,00% | 100,00% | 0,00% | 0,00% | 20,13% | 0,00% | 0,00% | 100,00% | 100,00% |
| | IV | 0,13% | 0,00% | 0,00% | 100,00% | 0,00% | 0,00% | 100,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| | V | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 100,00% | 0,00% | 0,00% | 2,61% | 0,00% | 0,00% |
| | VI | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |

Ao comparar Tabela 4-5 com Tabela 4-8, percebe-se que os classificadores, ao analisarem a amostra B1 (em Tabela 4-5), não recorreram aos estados previstos na classificação do Estado II (Tabela 4-8). Por exemplo, na ausência do Estado II em seu aprendizado, C3 deveria identificar amostra de Estado II como IV e C4, como Estado V, conforme Tabela 4-5. Ao inspecionar B1, no entanto, C4 e C5 o classificaram como Estado I como mostra Tabela 4-8

Por se assemelhar com A1, a resposta magnética de B1 foi classificada pelo aprendizado de máquina como Estado I na maioria dos classificadores com altíssima porcentagem. Tal fato prova que, muito embora por microscopia ótica B1 seja um estado intermediário parecido com Estado II, sua resposta magnética é mais parecida com a do Estado I.

# 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu verificar a eficiência de classificadores usados para caracterizar os estados de envelhecimento de segmentos de aço HP 26Cr34Ni0,92Nb. Assim, foram criados diferentes classificadores e avaliada a sua assertividade com relação ao estado de envelhecimento de cada segmento analisado por MO sua microsestrutura.

De acordo com as micrografias em mosaico ao longo da espessura do tubo, há indícios de que a evolução microestrutural avance de forma gradual, onde em uma pequena amostra - e consequentemente em um segmento - exista mais de uma condição de envelhecimento. Portanto, os dados obtidos com a varredura de uma amostra de

referência podem não refletir exatamente apenas um estado e, desta forma, podem prejudicar a classificação.

Embora apresentem resposta magnética similar entre si, as amostras A1 (estado de referência I) e B1A (amostra *blind test*) possuem microestrutura pouco parecida entre si. Além disso, ambas as amostras foram retiradas do mesmo anel, o que indica que a relação da altura da coluna de reforma com determinada condição de evolução microestrutural não é o único determinante.

A "nuvem" característica do Estado de envelhecimento VI diferencia-se notavelmente das nuvens correspondentes aos outros estados de envelhecimento. Isto foi evidenciado ao analisar o sinal coletado de acordo com os parâmetros de fase, amplitude e *off-set*. Dessa forma, a inclusão do Estado VI no aprendizado de um classificador eleva percentualmente sua acurácia.

O *off-set* apresentou-se como um parâmetro que gerou superposição entre as "nuvens" correspondentes aos estados de envelhecimento I, II, III, IV e V. Apesar desta superposição a acurácia nos classificadores não teve uma queda significativa já que a variação destes parâmetros é menor com relação aos parâmetros de amplitude e fase.

Os dez classificadores propostos atenderam à expectativa de acerto e confusão com relação à sobreposição das "nuvens" dos estados de referência, como mostrou a Tabela 4-1. A partir da referida tabela, a pior acurácia foi a de C0 (85,3%). C0 é o classificador que compreendeu os seis estados de evolução microestrutural e, portanto, era esperado que apresentasse o pior desempenho dentre os demais classificadores.

No geral, a precisão dos classificadores foi satisfatória e dentro do esperado. Como mostra o Anexo E, a confusão na classificação atendeu a previsão visual presente na Tabela 4-6, com exceção à C0, o que sugere que as fronteiras calculadas pela técnica de *SVM* são mais complexas do que a representação visual das nuvens apresentadas nos gráficos.

A fim de assegurar a aplicabilidade desta técnica em condições reais, uma amostra de classificação desconhecida (B1) foi ensaiada por correntes parasitas usando a sonda híbrida com e sem saturação magnética e seus dados submetidos aos dez classificadores. A partir dos dados coletados, conclui-se que o estado de envelhecimento deste segmento está entre os estados I e II, sendo coerente com os resultados obtidos por microscopia óptica, no qual se observa de que a amostra B1 possa estar compreendida em um estado intermediário aos estados I e II, do ponto de vista microestrutural, sendo mais próxima ao Estado II.

# 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTURO

A fim de criar classificadores com base de dados robusta, sugere-se aumentar o número de segmentos de referência e de *blind test* de modo a consolidar os campos de dados possíveis, incluindo também segmentos de mais de uma coluna de reforma. Desta forma, procura-se minimizar erro ao classificar regiões de estado intermediário, como visto em B1.

Para entender a evolução microestrutural axial da coluna de reforma, sugere-se obter maior número de micrografias de um mesmo anel. Além disso, para minimizar o erro de classificação de um segmento com base nas amostras de suas extremidades (como ocorreu na amostra de *blind test*), propõem-se utilizar técnica de réplica para analisar a micrografia dos próprios segmentos que são analisados por correntes parasitas.

A identificação dos estados de envelhecimento de referência foi feita com base em comparação visual das estruturas típicas da micrografia (morfologia e distribuição) por microscopia ótica e, por isso, passível de interpretação divergente entre diferentes analisadores. Por esta razão, sugere-se buscar uma relação de quantificação de fase através de mapeamento de composição química por MEV e tratamento de imagens para realizar a caracterização prévia.

Também como trabalho futuro, propõe-se o estudo da contribuição de cada estrutura presente nos aços HP-Nb na resposta magnética de modo a entender a variação dos resultados de ensaios de correntes parasitas com os nuances das micrografias.

Tendo em vista que quando usada a sonda híbrida com saturação magnética, os dados baseados no parâmetro *Offset* não apresentam separação clara entres alguns dos estados de envelhecimento na classificação, sugere-se a avaliação do classificador incluindo-se apenas os parâmetros de Fase e Amplitude no aprendizado por *SVM*.

Por fim, com intuito de trazer maior compreensão à classificação de dados por *SVM* e à análise do seu resultado, é incentivado o estudo aprofundado do modo como as fronteiras das classes de dados são calculadas.

# 7 REFERÊNCIAS


ABENDI – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>. Acesso em: 22 Julho 2019.

ALVES, S. D. C. Reforma a vapor do metano para produção de hidrogênio: estudo termodinâmico e protótipo de modelo matemático de reator com membrana, 2005. 198f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química – UFU, Uberlândia, 2005.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 530 - Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A608: Standard Specification for Centrifugally Cast Iron-Chromium-Nickel High-Alloy Tubing for Pressure Application at High Temperatures, 2018.

ARENAS, M. P. Caracterização por ensaios magnéticos não destrutivos de aços HP provenientes de fornos de reforma. 2013. 84f. Dissertação de Mestrado - Inst. Alberto Luiz Coimbra - COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

ARENAS, M. P. Caracterização magnética da microestrutura de diferentes estados de envelhecimento de uma liga austenítica HP modificada ao Nb-Ti . 2017. 100f. Tese de Doutorado - Inst. Alberto Luiz Coimbra - COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

ASM HANDBOOK COMITTEE. **Metals Hand Book:** Nondestructive Evaluation and Quality Control. ed. 9, v. 17, 1989.

CALLISTER, W. D. J. **Materials Science and Engineering - An Introduction**. 5th. ed. Salt Lake City: Wiley, 1999.

DA SILVEIRA, T. L.; LE MAY, I. Reformer Furnaces: Materials, Damage Mechanisms and Assessment. **Arabian Journal for Science and Engineering.** Section B: Engineering, v. 31, p. 99-119, 2006.

DA SILVEIRA, R. M. S. Caracterização da camada de óxido formada na superfície externa das colunas de fornos de reforma a vapor. 2017. 98f. Dissertação de Mestrado - Inst. Alberto Luiz Coimbra - COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro 2017.

DA SILVEIRA, R. M. S. *et al*. Characterization of the oxide scale formed on external surface of hp reformer tube. **Journal of Materials Research and Technology**, V. 7, P. 578-583, 2018.

DE ALMEIDA, L. H. *et al*. Microstructural characterization and geometrical analysis of welded joints of high temperature stainless steel tubes. Burke MG, Clark EA, Palmiere, **Microstructural Science**, v. 24: Understanding microstruture: key to advances in materials. Materials Park: ASM; 1996. p.193-8.

DE ALMEIDA, L. H. Microstructural characterization of modified 25Cr–35Ni. **Elsevier**, v.15, Dezembro 2003.

DEY, A. Machine Learning Algorithm - A Review. **International Journal of Computer Science and Information Technologies**, v. 7, p. 1174-1179, 2016.

DUTRA, C. C. G. Análise de Dados de Inspeção não Destrutiva de Tubos de Reforma a Vapor Utilizando Treinamento de Máquina. 2019. 57f. Projeto de Graduação - Escola Politécnica -UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.

GARCAÍ-MARTNÍ, J.; GÓMEZ-GIL, J.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. **Sensors**, v. 11, p. 2525-2565, 2011.

HEVNER, K.; GROUP, Q. I. Effective Iintegrity Management Programs for Steam Reformers. **Inspectioneering Journal**, v. 20, Dezembro 2014.

INFOMET-1. 03 - Contribuição do Cromo. Disponivel em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=103>. Acesso em: 08 Setembro 2019.

INFOMET-2. 2 - Elementos de liga nos aços resistentes ao calor. Disponivel em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=117>. Acesso em: 07 Outubro 2019.

INFOMET-3. Aços Resistentes ao Calor - Introdução. Disponivel em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=116>. Acesso em: 08 Outubro 2019.

INFOMET-4. Aços Resistentes ao Calor - Conclusões. Disponivel em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=120>. Acesso em: 07 Outubro 2019.

INSPECTIONEERING. Non Destructive Testing. Disponivel em: <https://inspectioneering.com/tag/nondestructive+testing>. Acesso em: 2019 Julho 22.

LE MAY; DA SILVEIRA, T. L.; VIANNA, C. H. Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 66, p. 233-241, 1996.

NDE-ED-1. Present State of Eddy Current Inspection. **https:** //www.nde-ed.org/. Disponivel em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Introduction/presentstateofET.php>. Acesso em: 23 Julho 2019.

NDE-ED-2. Self-Inductance and Inductive Reactance. Disponivel em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/selfinductance.htm>. Acesso em: 18 Julho 2019.

NDE-ED-3. Basic Principles of Eddy Current Inspection. **nde-ed.org**. Disponivel em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Introduction/IntroductiontoET.php>. Acesso em: 03 Março 2019.

NDE-ED-4. Mutual Inductance. https: //www.nde-ed.org. Disponivel em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/mutualinductance.php>. Acesso em: 03 Março 2019.

NDE-ED-5. Eddy Current Instruments. Disponivel em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Instrumentation/ecinstruments.php>. Acesso em: 23 Julho 2019.

NUSSENZVEIG, M. **Curso de Física Básica - Eletromagnetismo**. 1ª. ed. São Paulo: Blücher, 1997.

PEREIRA, J. M. B. et al. Novel scanning dc-susceptometer for characterization of heat-resistant steels with different states of aging. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 442, p. 311-318, 2017.

PEREZ, I. U. *et al*. Short Duration Overheating in a Steam Reformer: Consequences to the Catalyst Tubes, **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 13, p. 779–786, 2013.

PETROBRÁS. Curso de Formação de Operadores de Refinaria - Processos de Refino, Curitiba, 2002.

QUEIROZ, F. S. Caracterização microestrutural em função da temperatura de serviço de tubos de aços hp-modificados ao nb e ti envelhecidos em fornos de reforma a vapor, . 2017. 86f. Dissertação de Mestrado - Inst. Alberto Luiz Coimbra - COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro 2017.

QUICKEL, G. *et al*. Failure Analysis and Remaining Life Assessment of Methanol Reformer Tubes, 07 Outubro 2009. **Journal of Failure Analysis and Prevention.** v. 9, p.511-516, 2009.

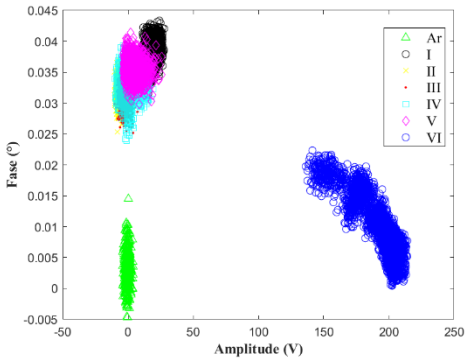
RAMSDEN, E. **Hall-Efect Sensors:** Theory and Applications. Estados Unidos da América: Elsevier Inc., 2006.

SHANNON, B. E.; JASKE, C. E.; SMITH, M. C. Optimizing Reformer Tube Life throught Advanced Inspection and Remainning Life. **Process Safety**, v. 29, p. 299-304, 2010.

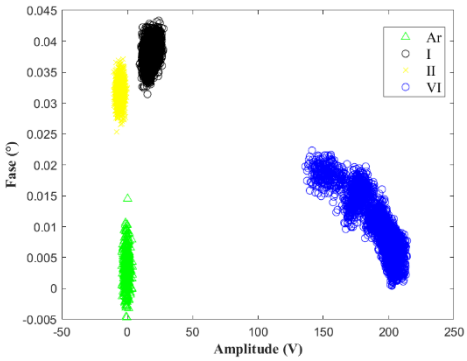
SOARES, G. D. A. *et al*. Niobium Additions in HP Heat-Resistant Cast Stainless steels. **Materials Characterization**, v. 29, p. 387-396, 1992.

# 8 ANEXOS

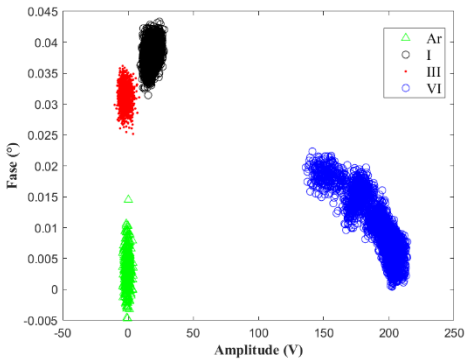
## Anexo A GRÁFICOS DE AMPLITUDE X FASE SEM SATURAÇÃO MAGNÉTICA DE TODOS OS CLASSIFICADORES



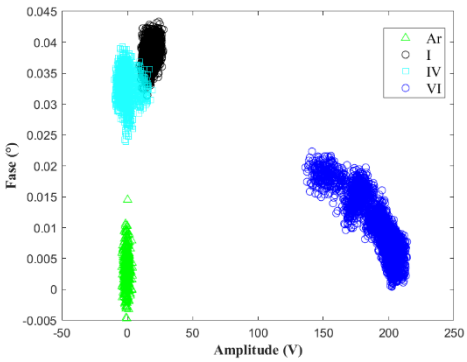

C0 – 85,3% de acurácia



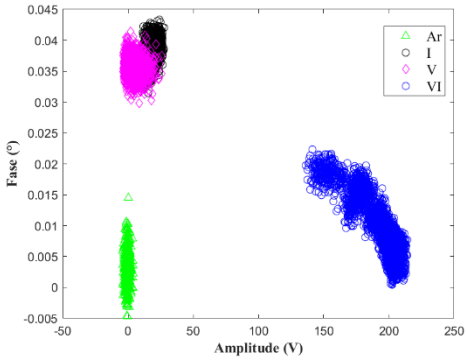

C1 – 100% de acurácia



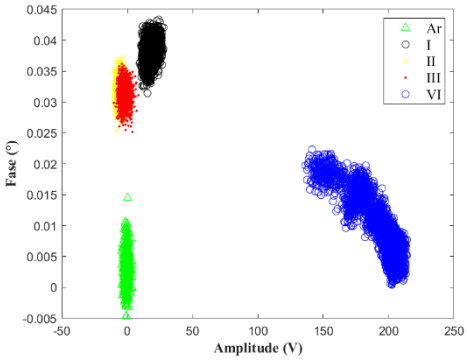

C2 – 100% de acurácia



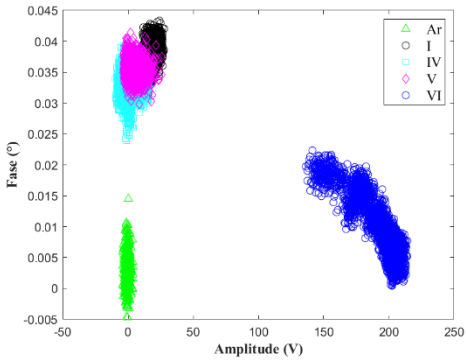

C3 – 99,7% de acurácia



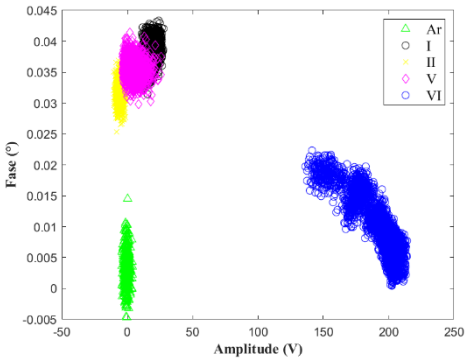

C4 – 98,7% de acurácia



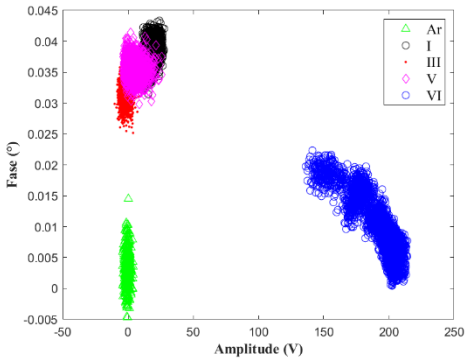

C5 – 98,1% de acurácia



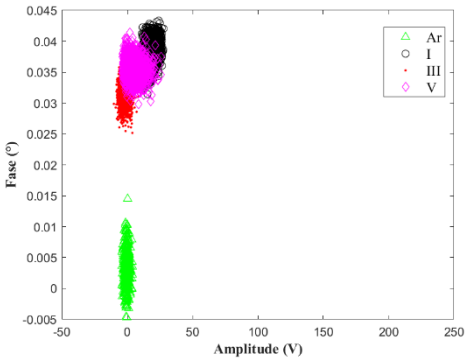

C6 – 94,4% de acurácia




C7 – 97,7% de acurácia

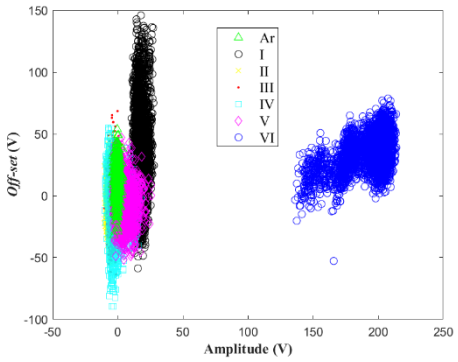



C8 – 97,3% de acurácia

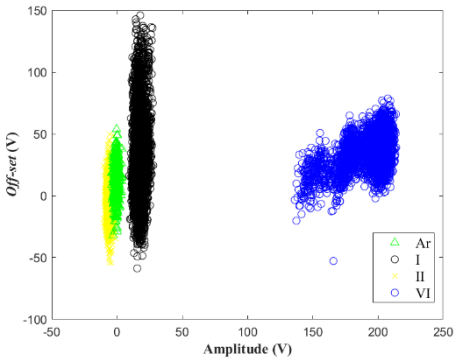



C9 – 96,7% de acurácia

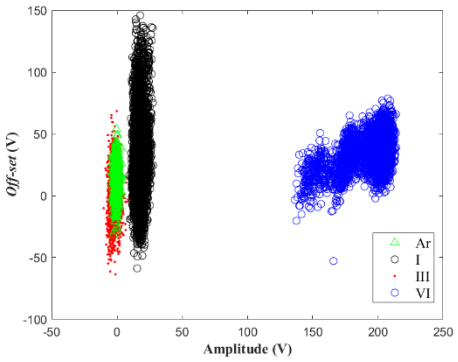
## Anexo B GRÁFICOS DE AMPLITUDE X *OFF-SET* SEM SATURAÇÃO MAGNÉTICA DE TODOS OS CLASSIFICADORES



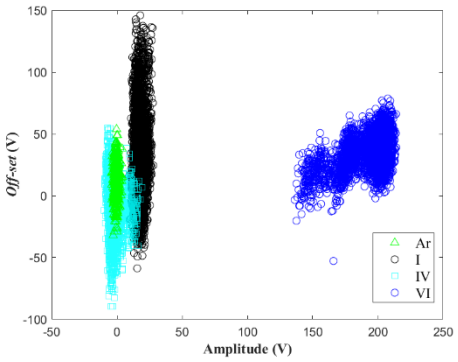

C1 – 83,5% de acurácia



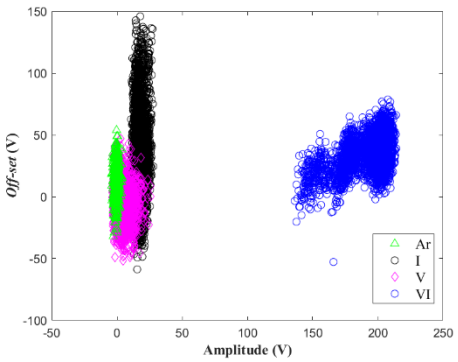

C1 – 100% de acurácia



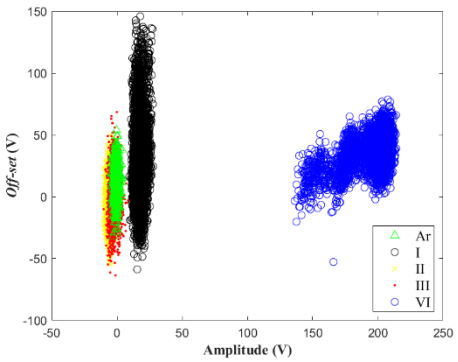

C2 – 100% de acurácia



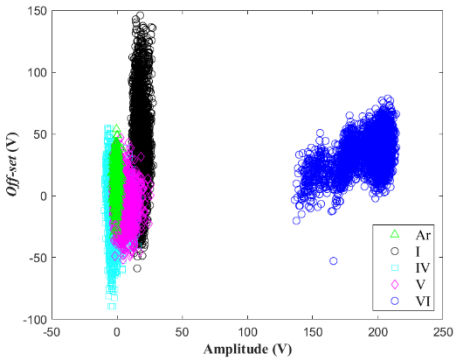

C3 – 99,7% de acurácia



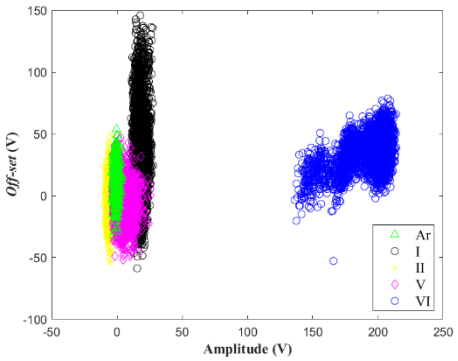

C4 – 98,7% de acurácia



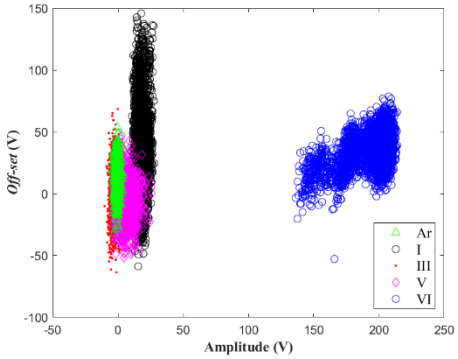

C5 – 98,1% de acurácia



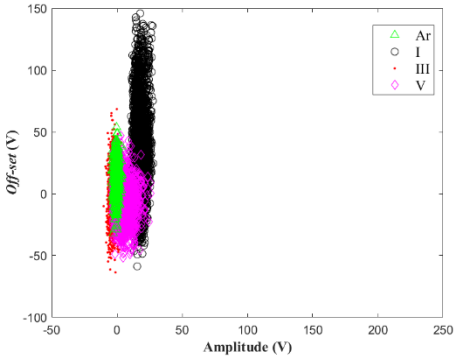

C6 – 94,4% de acurácia




C7 – 97,7% de acurácia

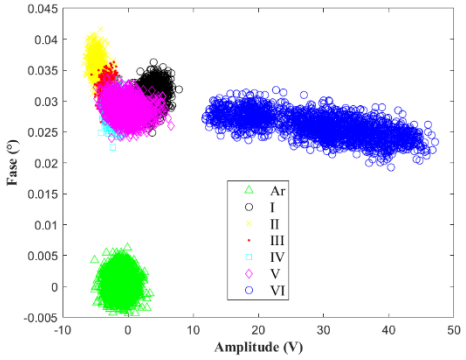


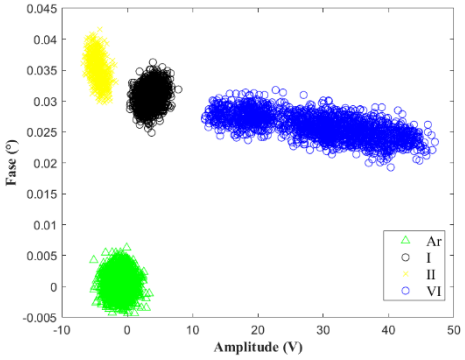

C8 – 97,3% de acurácia



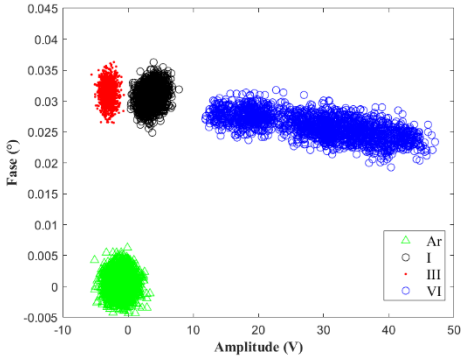

C9 – 96,7% de acurácia

## Anexo C GRÁFICOS DE AMPLITUDE X FASE COM SATURAÇÃO MAGNÉTICA DE TODOS OS CLASSIFICADORES

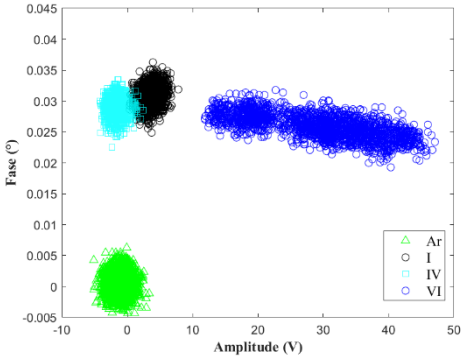


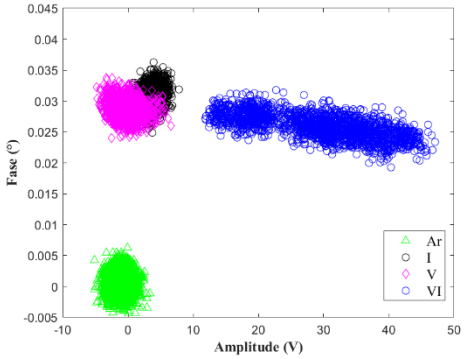

C1 – 100% de acurácia



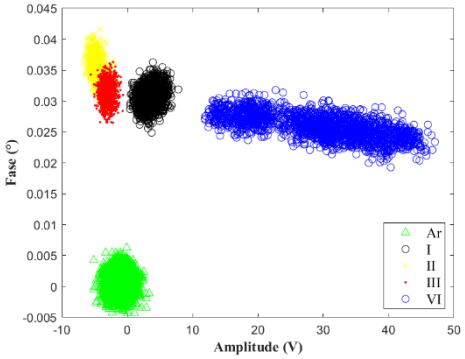

C2 – 100% de acurácia



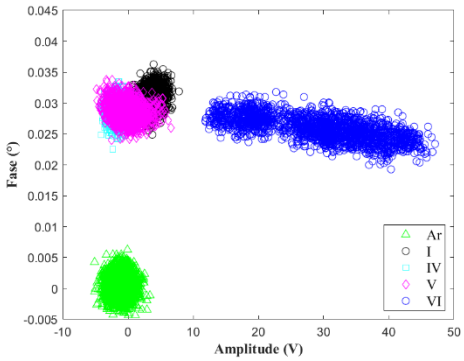

C3 – 99,7% de acurácia



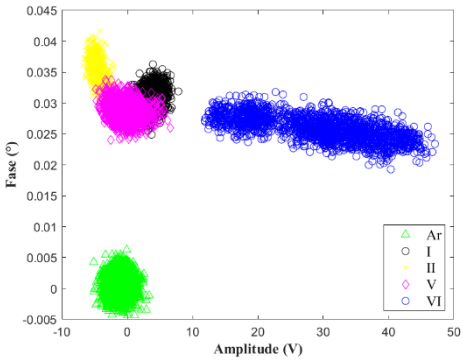

C4 – 98,7% de acurácia



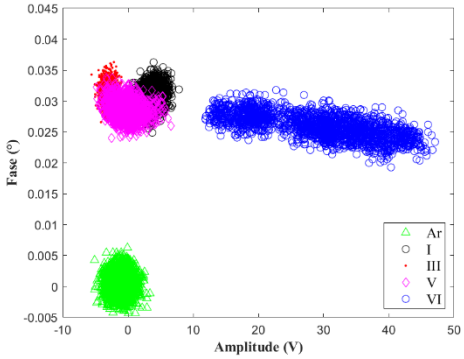

C5 – 98,1% de acurácia



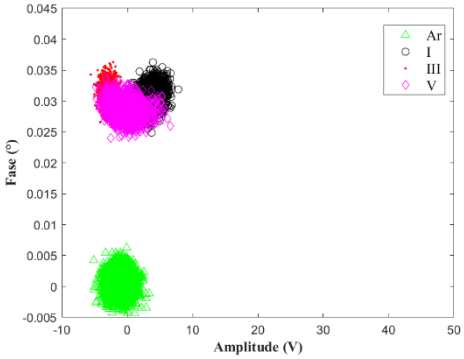

C6 – 94,4% de acurácia




C7 – 97,7% de acurácia

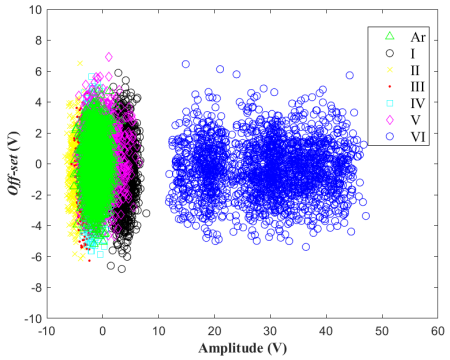



C8 – 97,3% de acurácia

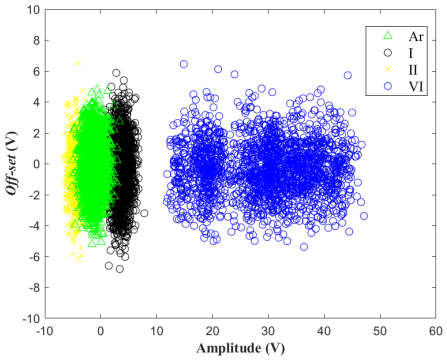



C9 – 96,7% de acurácia

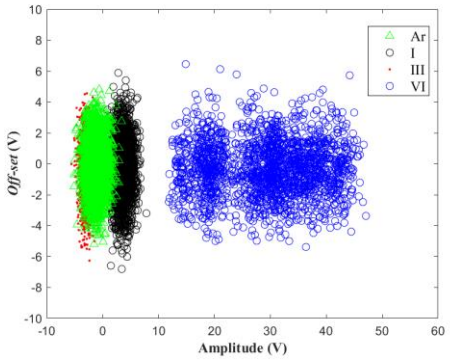
## Anexo D GRÁFICOS DE AMPLITUDE X *OFF-SET* COM SATURAÇÃO MAGNÉTICA DE TODOS OS CLASSIFICADORES



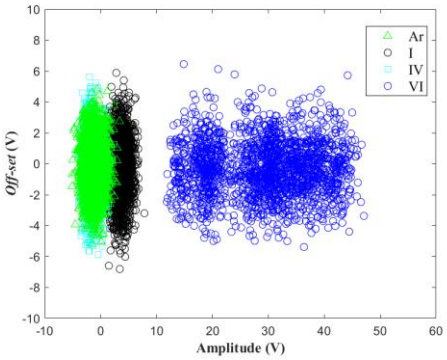

C0 – 85,3% de acurácia



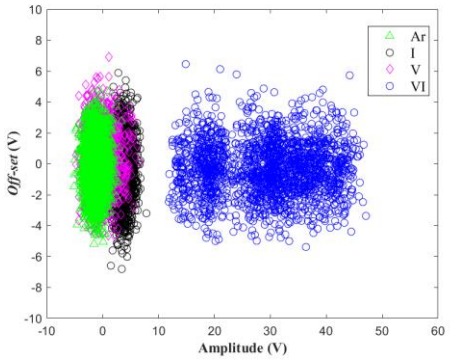

C1 – 100% de acurácia



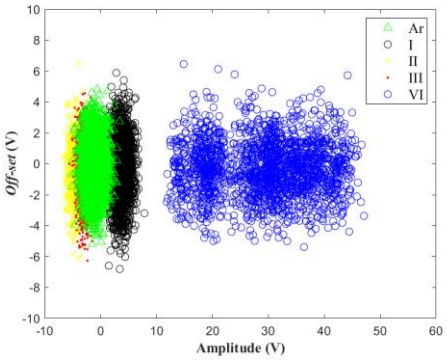

C2 – 100% de acurácia



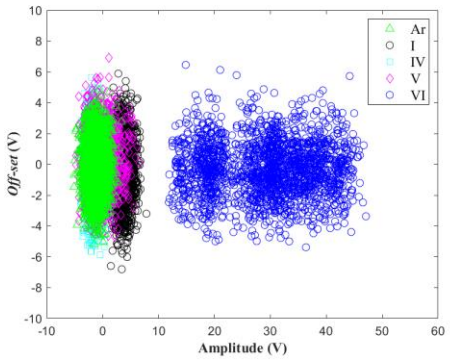

C3 – 99,7% de acurácia

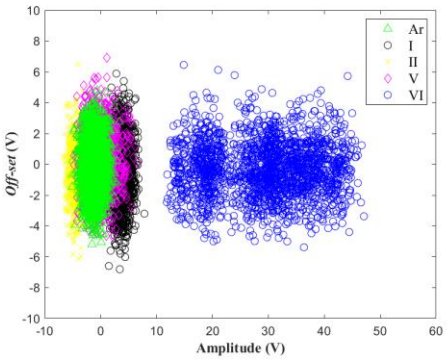



C4 – 98,7% de acurácia

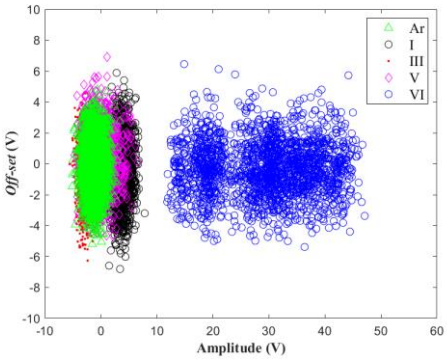



C5 – 98,1% de acurácia

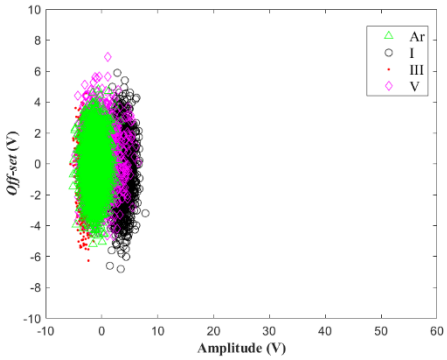


C6 – 94,4% de acurácia



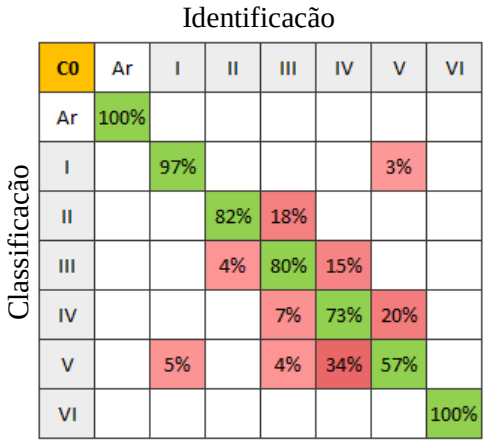

C7 – 97,7% de acurácia



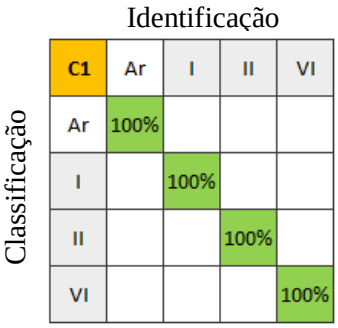

C8 – 97,3% de acurácia

C9 – 96,7% de acurácia

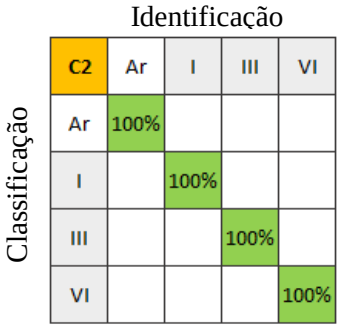
Anexo E **MATRIZ CONFUSÃO DE TODOS OS CLASSIFICADORES NA ETAPA DE TESTE**



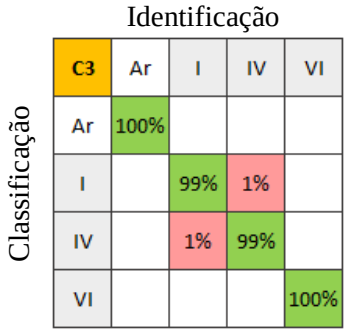

C0 – 85,3% de acurácia



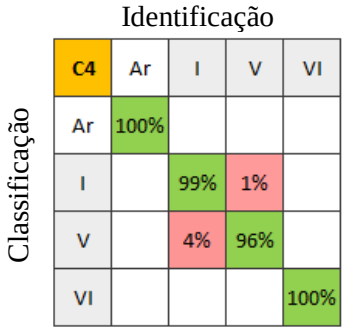

C1 – 100% de acurácia



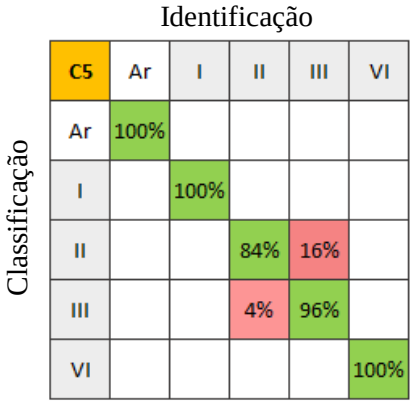

C2 – 100% de acurácia




C3 – 99,7% de acurácia




C4 – 98,7% de acurácia




C5 – 98,1% de acurácia

Identificação

Classificação

| C6 | Ar | I | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|
| Ar | 100% | | | | |
| I | | 98% | 1% | 1% | |
| IV | | | 89% | 11% | |
| V | | 7% | 9% | 84% | |
| VI | | | | | 100% |

C6 – 94,4% de acurácia

Identificação

Classificação

| C7 | Ar | I | II | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|
| Ar | 100% | | | | |
| I | | 97% | | 3% | |
| II | | | 97% | 3% | |
| V | | 5% | 1% | 94% | |
| VI | | | | | 100% |

C7 – 97,7% de acurácia

Identificação

Classificação

| C8 | Ar | I | III | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|
| Ar | 100% | | | | |
| I | | 98% | | 2% | |
| III | | | 95% | 5% | |
| V | | 4% | 4% | 92% | |
| VI | | | | | 100% |

C8 – 97,3% de acurácia

Identificação

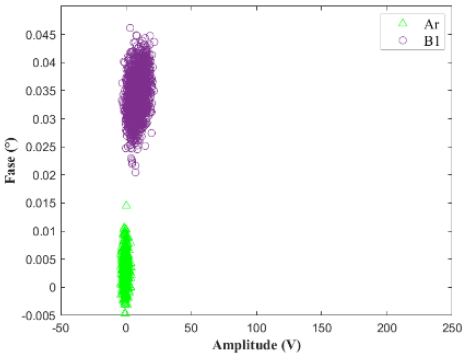
Classificação

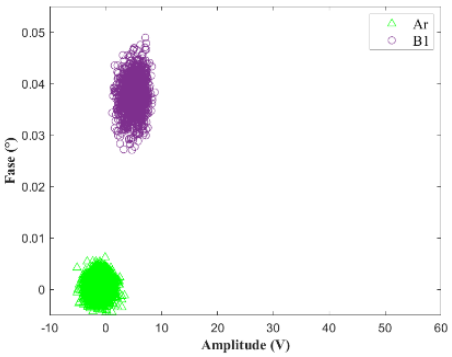
| C9 | Ar | I | III | V |
|---|---|---|---|---|
| Ar | 100% | | | |
| I | | 98% | | 2% |
| III | | | 94% | 6% |
| V | | 5% | 4% | 91% |

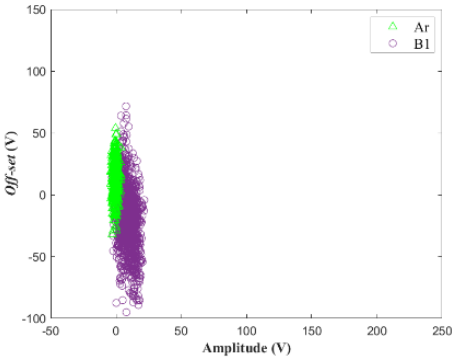
C9 – 96,7% de acurácia

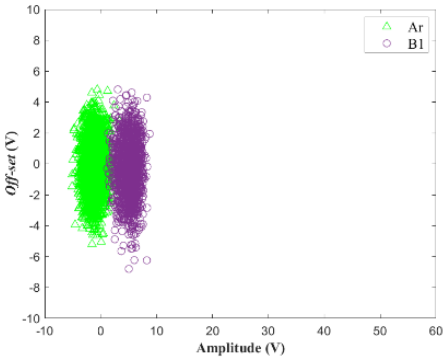
Anexo F **GRÁFICOS DE B1.**

**Sem Saturação** **Com Saturação**



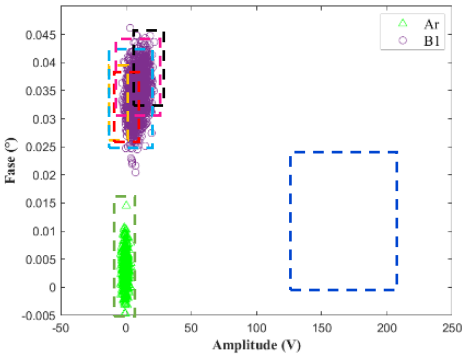



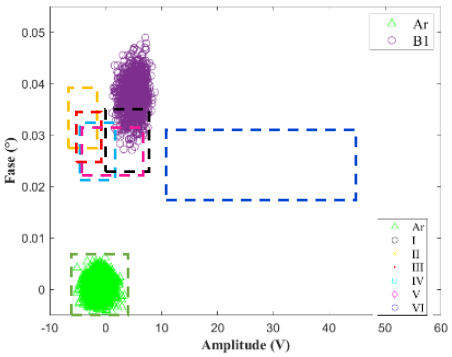



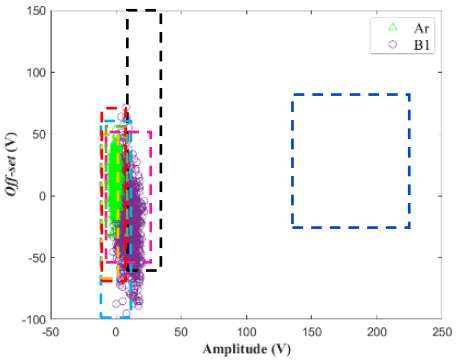



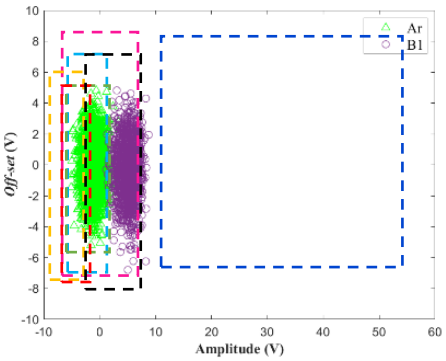
Anexo G **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C0 (ESTADOS I, II, III, IV, V E VI).**

**Sem Saturação** **Com Saturação**



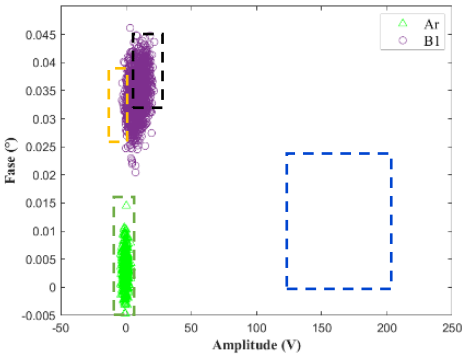



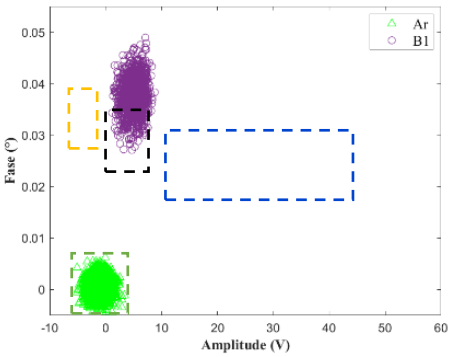



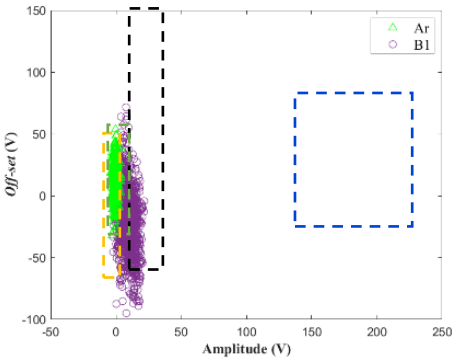



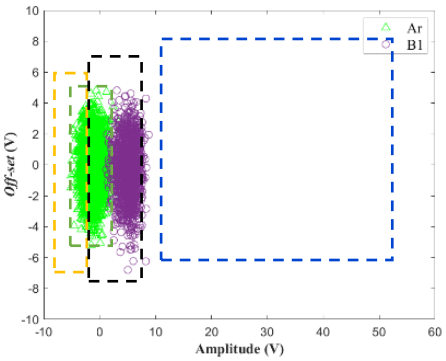
Anexo H **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C1 (ESTADOS I, II E VI).**

**Sem Saturação** **Com Saturação**



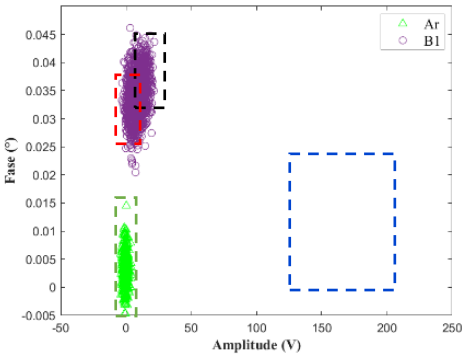



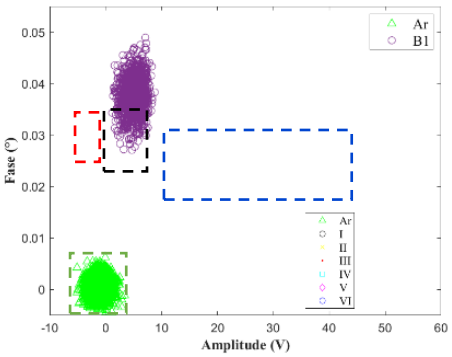



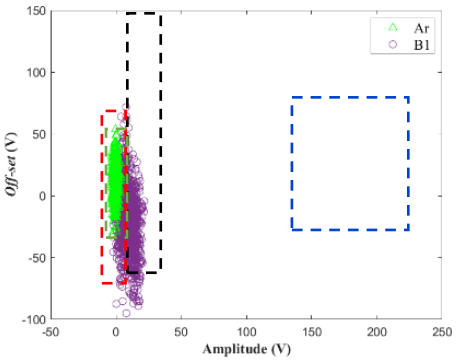



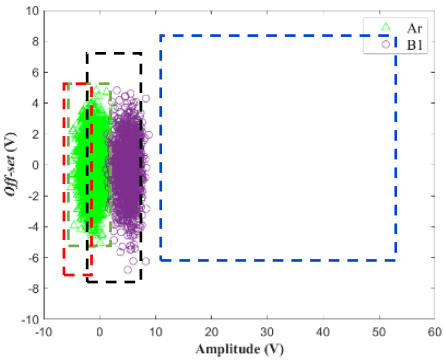
Anexo I **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C2 (ESTADOS I, III E VI).**

**Sem Saturação** **Com Saturação**



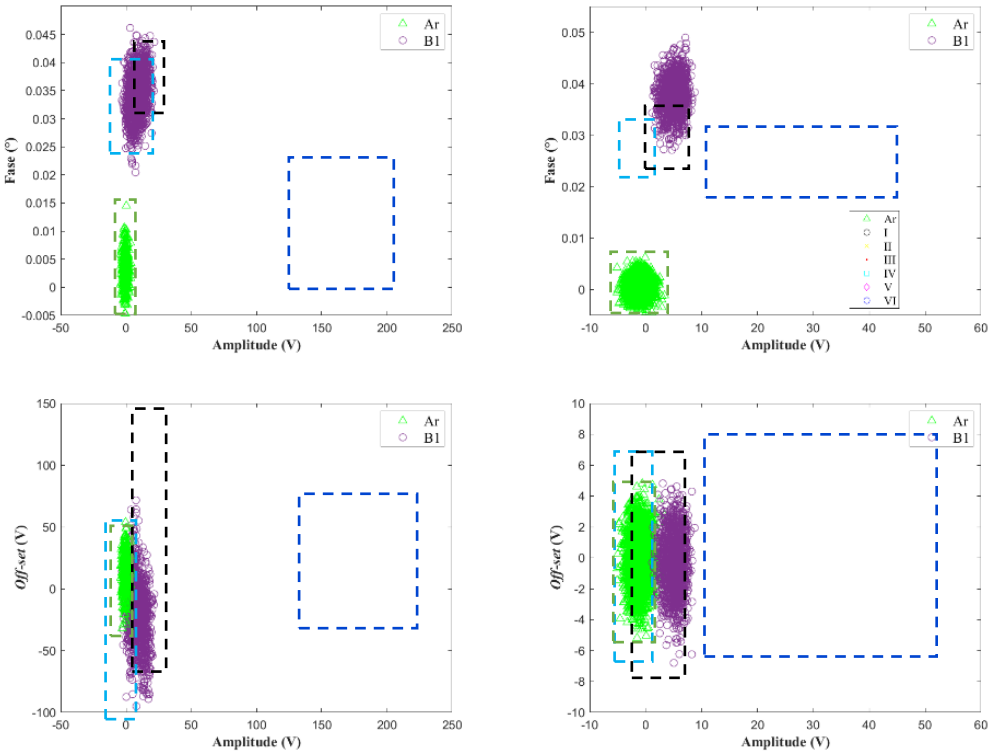



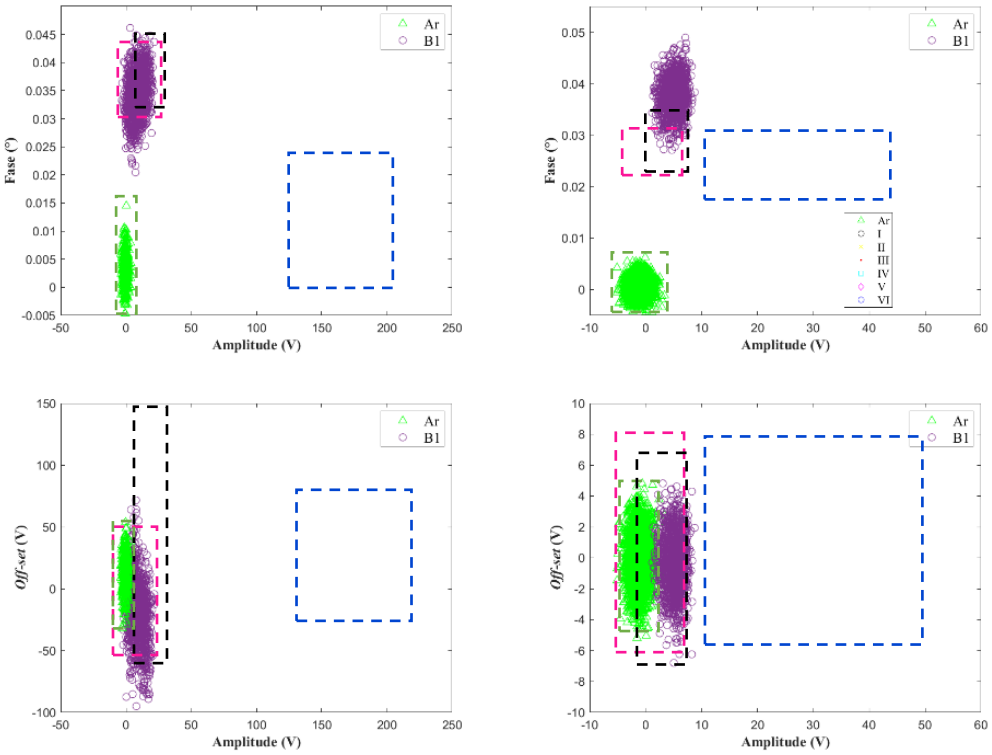
Anexo J **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C3 (ESTADOS I, IV E VI).**

**Sem Saturação** **Com Saturação**



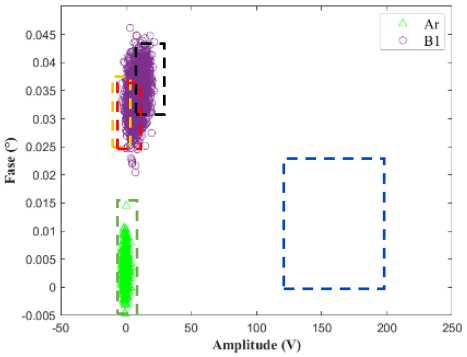
Anexo K **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C4 (ESTADOS I, V E VI).**

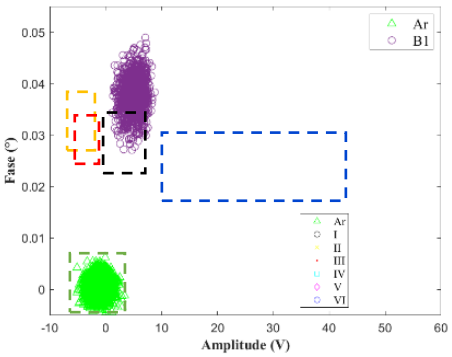
**Sem Saturação** **Com Saturação**

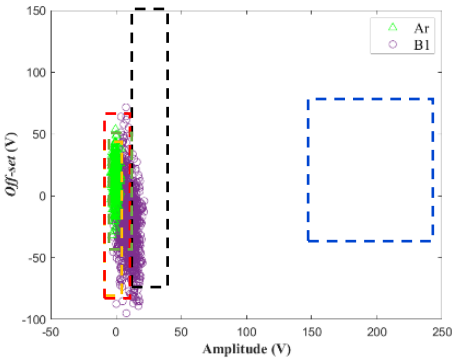


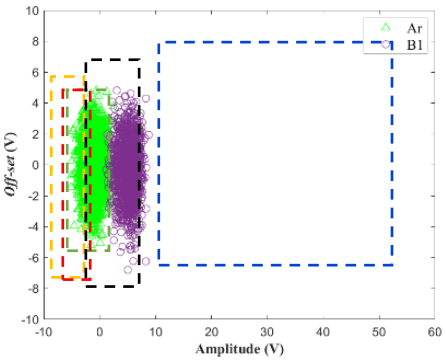
Anexo L **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C5 (ESTADOS I, II, III E VI).**

**Sem Saturação** **Com Saturação**



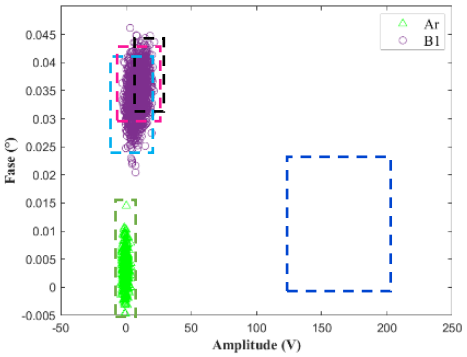



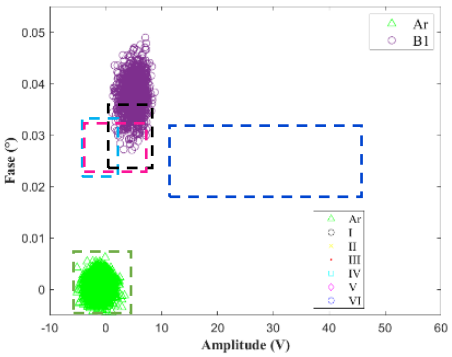



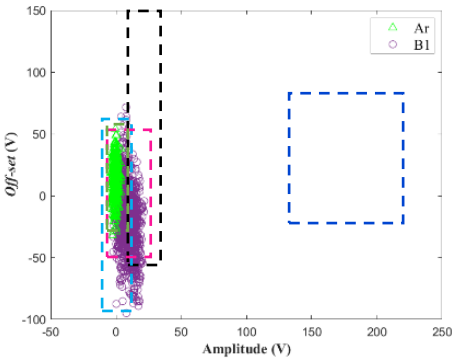



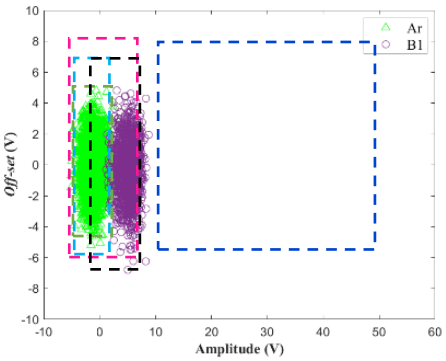
Anexo M **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C6 (ESTADOS I, IV, V E VI).**

**Sem Saturação** **Com Saturação**



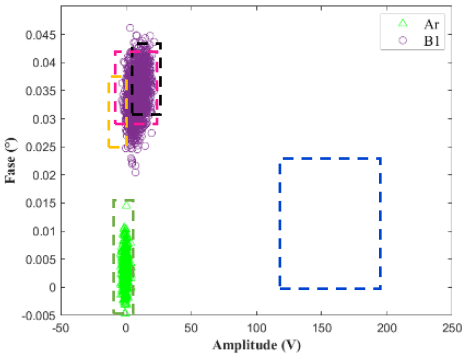



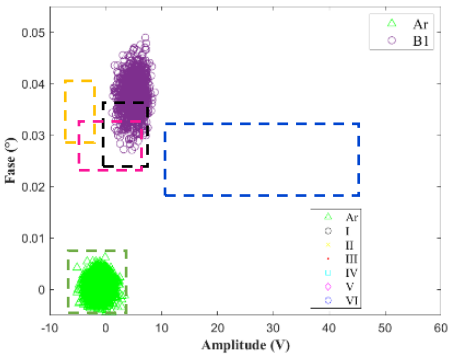



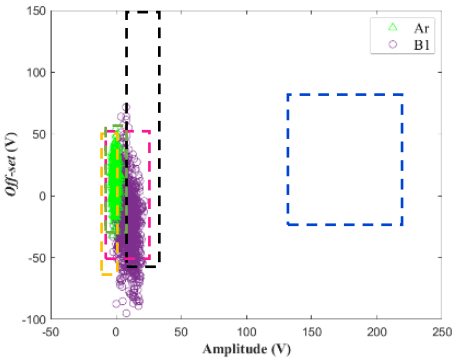



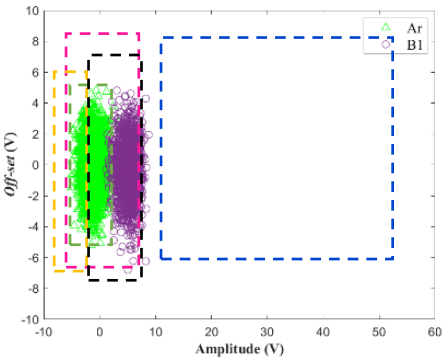
Anexo N **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C7 (ESTADOS I, II, V E VI).**

**Sem Saturação** **Com Saturação**



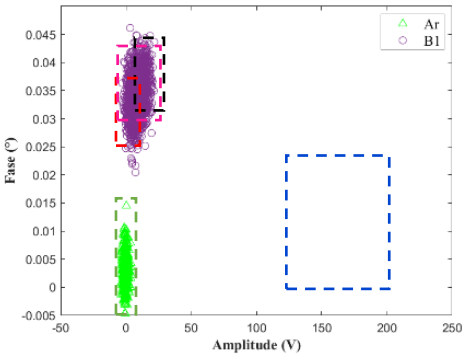



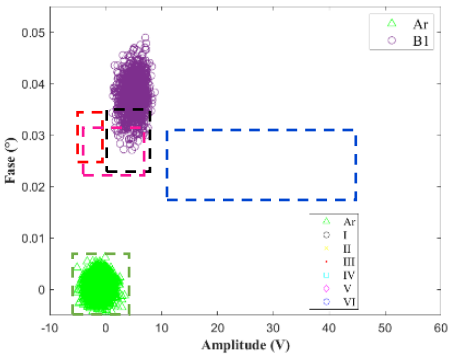



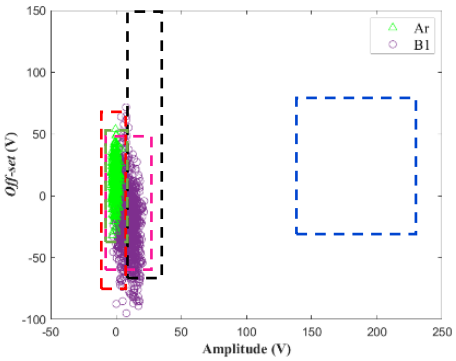



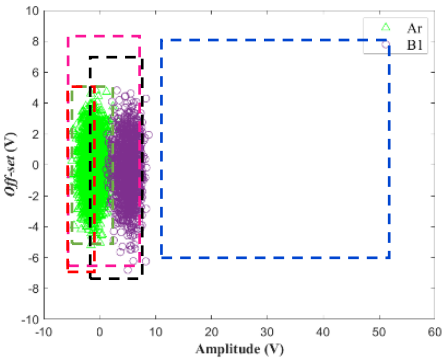
Anexo O **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C8 (ESTADOS I, III, V E VI).**

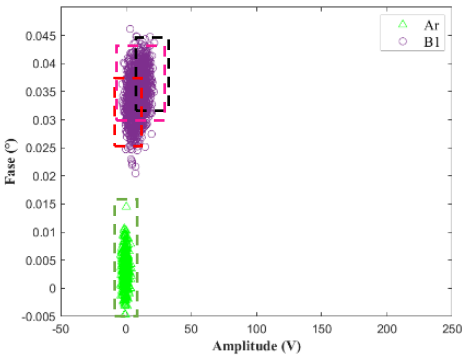
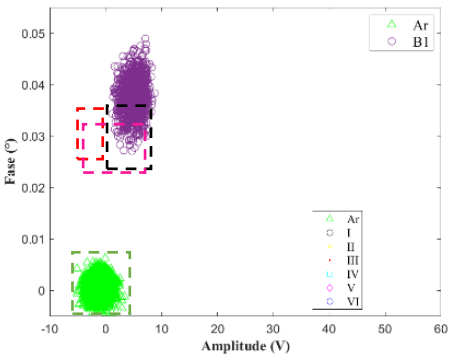
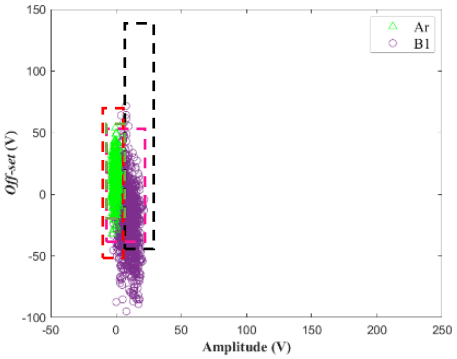
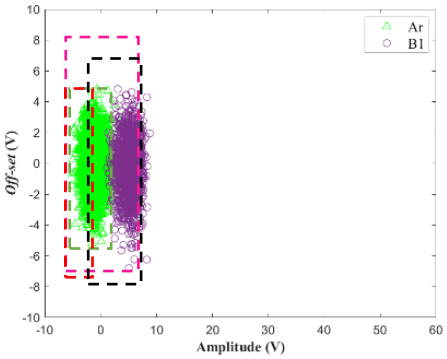
**Sem Saturação** **Com Saturação**



Anexo P **CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRA BLIND TEST B1 PELO CLASSIFICADOR C9 (ESTADOS I, III, V).**

**Sem Saturação** **Com Saturação**