

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Fernando Henrique Costa Saboia

**AVALIAÇÃO DO PROCESSAMENTO DE MICROGRAFIAS DIGITAIS
NA ESTIMAÇÃO DA SENSITIZAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS
AUSTENÍTICOS EMPREGADOS EM PLANTAS DE COMBUSTÍVEIS E
BIOCOMBUSTÍVEIS**

Maracanaú, Ceará

2017

Fernando Henrique Costa Saboia

AVALIAÇÃO DO PROCESSAMENTO DE MICROGRAFIAS DIGITAIS NA
ESTIMAÇÃO DA SENSITIZAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS
EMPREGADOS EM PLANTAS DE COMBUSTÍVEIS E BIOCOMBUSTÍVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Energias Renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Luis Bezerra Ramalho

Maracanaú, Ceará

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S113a Saboia, Fernando Henrique Costa.
AVALIAÇÃO DO PROCESSAMENTO DE MICROGRAFIAS DIGITAIS NA ESTIMAÇÃO DA SENSITIZAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS EMPREGADOS EM PLANTAS DE COMBUSTÍVEIS E BIOCOMBUSTÍVEIS / Fernando Henrique Costa Saboia. - 2017.
80 f. : il.
- Dissertação (Mestrado) Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis, Campus Maracanaú, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Geraldo Luis Bezerra Ramalho.
1. Processamento Digital de Imagens. 2. Micrografia. 3. Aço Inoxidável Austenítico. 4. Sensitização. 5. Segmentação de Imagens. I. Título.

CDD 620.91

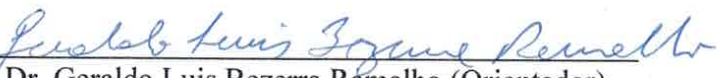
FERNANDO HENRIQUE COSTA SABOIA

AVALIAÇÃO DO PROCESSAMENTO DE MICROGRAFIAS DIGITAIS NA
ESTIMAÇÃO DA SENSITIZAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS
EMPREGADOS EM PLANTAS DE COMBUSTÍVEIS E BIOCOMBUSTÍVEIS

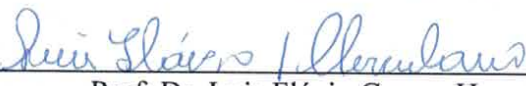
Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 7 / 8 / 2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Geraldo Luis Bezerra Ramalho (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE


Prof. Dr. Sérgio Souto Maior Tavares
Universidade Federal Fluminense - UFF


Prof. Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará - UFC

Ao meu irmão Rafael.
À minha irmã Juliana.
À minha mãe Cristina.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) e ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), pela oportunidade de formação profissional.

Ao Professor e orientador Dr. Geraldo Luis Bezerra Ramalho, por sua valiosa orientação, inestimável apoio e confiança. Sem ele este trabalho não seria possível.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) e ao Laboratório de Engenharia de Soldagem - ENGESOLDA, ambos da Universidade Federal do Ceará, pelo apoio técnico e parceria na realização desta pesquisa. Ao Professor Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, coordenador do LACAM e ao Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano, engenheiro do LACAM, por sua valiosa contribuição.

Ao Professor Dr. Francisco Nélio Costa Freitas, ao Professor Dr. Marcelo Monteiro Valente Parente e ao Professor Dr. Sérgio Souto Maior Tavares por contribuírem positivamente com críticas e sugestões.

Ao Laboratório de Materiais (LMAT) do IFCE *campus* Maracanaú, ao Professor Me. Francisco José dos Santos Oliveira, coordenador do LMAT e aos bolsistas colaboradores Junior, Ana Paula e Ícaro pelo apoio técnico.

A todos os professores do PPGER, por terem contribuído direta e indiretamente para execução e conclusão deste trabalho.

Aos colegas de mestrado.

Aos estimados amigos pelo apoio.

Resumo

Sensitização é o fenômeno de formação de precipitados responsável por tornar os aços inoxidáveis suscetíveis aos processos de corrosão e deterioração. Torna-se importante a correta estimativa do grau de sensitização dos aços inoxidáveis utilizados na indústria de combustíveis e biocombustíveis com a finalidade de manter equipamentos disponíveis e confiáveis, evitando perda de produção e de manutenção, de acordo com a produção sustentável, salvaguardando a sociedade e o meio ambiente das falhas estruturais advindas de problemas de corrosão e deterioração dos equipamentos deste setor. Esta dissertação avalia a metodologia do processamento digital de micrografias por segmentação de imagens para a estimativa do grau de sensitização comparando com a metodologia de ensaio de corrosão padronizado pela ISO 12732 e à estimativa de sensitização por análise microestrutural normatizada pela ASTM A-262. Foi analisado um banco de dados que contém as microestruturas e os resultados de ensaios de corrosão por DL EPR (do inglês *Double Loop Electropotentiokinetic Reactivation*) dos aços AISI 304 e AISI 316. As micrografias foram processadas por segmentação de imagem utilizando dois algoritmos com metodologias diferentes. O primeiro algoritmo utiliza o princípio de limiarização global do nível de *pixels* em escala de cinza. O segundo algoritmo usa uma técnica de análise morfológica dos elementos de imagem. Ambos geram imagens binárias que contém os *pixels* relativos às evidências de precipitados responsáveis pela sensitização. O grau de sensitização estimado por meio de imagem, proposto nesta pesquisa, contabiliza a relação entre área sensitizada e área total de cada micrografia processada no intervalo [0,1]. Denominamos DoS_{SG} , o método de estimativa do grau de sensitização por imagem segmentada obtida por limiarização global. Denominamos DoS_{SM} , o método de estimativa do grau de sensitização por imagem segmentada obtida por análise morfológica. Para avaliar os métodos propostos, os índices de sensitização estimados são correlacionados aos resultados de ISO 12732, que denominamos DoS_{ISO} . As análises dos resultados mostram que o DoS_{SG} e o DoS_{SM} foram correlatos respectivamente em 79 % e 83 % aos resultados de ensaios de corrosão da norma ISO 12732. Nos experimentos de classificação do grau de sensitização comparados ao DoS_{ISO} , por curva ROC (do inglês *Receiver Operating Characteristic*), foram alcançados desempenho de 83,3 % (DoS_{SG}) e 88,9 % (DoS_{SM}) para as amostras do aço AISI 304 e 79,6 % (DoS_{SG}) e 83,3 % (DoS_{SM}) para as amostras do aço AISI 316. Nos experimentos de classificação do grau de sensitização comparados ao DoS_{ASTM} , por curva ROC, foram alcançados desempenho de 85,5 % (DoS_{SG}) e 71,4 % (DoS_{SM}) para as amostras do aço AISI 304 e 79,6 % (DoS_{SG}) e 83,3 % (DoS_{SM}) para as amostras do aço AISI 316.

Palavras-chaves: Processamento Digital de Imagens; Micrografia; Aço Inoxidável Austenítico; Sensitização; Segmentação de Imagens.

Abstract

Sensitization is the precipitate formation phenomenon responsible for making stainless steels susceptible to corrosion and deterioration processes. The correct estimation of the degree of sensitization of stainless steels used in fuel and biofuel industry is important in order to maintain available and reliable equipment, avoiding production and maintenance losses, according to sustainable production, safeguarding society and the environment of structural failures arising from corrosion problems and deterioration of equipment in this sector. This dissertation evaluates the methodology of the processing of micrographs by segmentation of images for the estimation of the degree of sensitization comparing to the methodology of corrosion test standardized by ISO 12732 and methodology of microstructural analysis standardized by ASTM A-262. A database containing the microstructures and results of DL EPR (Double Loop Electropotentiokinetic Reactivation) corrosion tests of AISI 304 and AISI 316 steels was analyzed. Micrographs were processed by image segmentation using two algorithms with different methodologies. The first algorithm uses the principle of global thresholding of the level of grayscale pixels. The second algorithm uses a technique of morphological analysis of image elements, both generate binary images that contain the pixels related to the precipitates evidence responsible for the sensitization. The estimated degree of sensitization by means of image, proposed in this research, counts the relation between the sensitized area and the total area of each micrograph processed in the interval $[0,1]$. We call DoS_{SG} , the method of estimating the degree of sensitization of segmented image obtained by global thresholding. We denote by DoS_{SM} , the method of estimating the degree of sensitization of segmented image obtained by global thresholding and morphological analysis. To evaluate the proposed methods, the estimated sensitization indices are correlated to the results of ISO 12732. The analyzes of the results show that the DoS_{SG} and the DoS_{SM} were respectively correlated in 79 % and 83 % to the results of corrosion tests of ISO 12732. In classification experiments of the degree of sensitization comparing to DoS_{ISO} , by ROC (Receiver Operating Characteristic) a performances of 83,3 % (DoS_{SG}) and 88,9 % (DoS_{SM}) for the AISI 304 and 79,6 % (DoS_{SG}) and 83,3 % (DoS_{SM}) for the AISI 316 steel. In classification experiments of the degree of sensitization comparing to DoS_{ASTM} , by ROC, a performances of 85,5 % (DoS_{SG}) and 71,4 % (DoS_{SM}) for the AISI 304 and 79,6 % (DoS_{SG}) and 83,3 % (DoS_{SM}) for the AISI 316 steel.

Key-words: Image Digital Processing, Micrography; Austenitic Stainless Steel; Sensitization; Image Segmentation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de fases binário da liga Fe-Cr, p 267, Adaptado de Talbot e Talbot (2007).	24
Figura 2 – Microestrutura do aço inoxidável austenítico.	27
Figura 3 – Diagrama de fases de um aço inoxidável austenítico com 10 %Ni, 0,04 %N e 0,04 %C, p 150. Adaptado de Lippold e Kotecki (2005).	28
Figura 4 – Gráfico TTT mostrando o efeito da variação do teor de carbono na formação de precipitados $M_{23}C_6$, p 204. Adaptado de Chiaverini (2012).	29
Figura 5 – Sensitização em baixas temperaturas LTS, p 206. Adaptado de Lippold e Kotecki (2005).	30
Figura 6 – Grão sensitizado. P 203. Adaptado de Lippold e Kotecki (2005).	31
Figura 7 – Classificação do DoS por meio da norma ASTM A-262.	33
Figura 8 – Curva de polarização do ensaio DL EPR. Adaptado de Majidi e Streicher (1984).	34
Figura 9 – Falha em cordão de solda e imagem renderizada resultante do processamento de imagem (PADILLA <i>et al.</i> , 2013).	35
Figura 10 – Recorte da micrografia do aço AISI 304L sensitizado, DoS <i>Ditch</i> .	36
Figura 11 – Histograma do nível de <i>pixels</i> e segmentação de imagem. Adaptado de Otsu (1975).	37
Figura 12 – Segmentação de retinografia (ZANA; KLEIN, 2001).	37
Figura 13 – Micrografia com evidências de sensitização em contornos de grãos.	38
Figura 14 – Procedimento para a obtenção da estimativa do DoS_{SG} e do DoS_{SM} .	40
Figura 15 – Exemplo de curva ROC.	42
Figura 16 – Microestrutura e resultados do ensaio de corrosão do aço AISI 304 retirados do banco de dados cedido pelo ENGESOLDA.	45
Figura 17 – Microestrutura e resultados do ensaio de corrosão do AISI 316 retirados do banco de dados cedido pelo ENGESOLDA.	46
Figura 18 – Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} em função dos valores crescentes do DoS_{ISO} (AISI 304).	49
Figura 19 – Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} em função dos valores crescentes do DoS_{ISO} (AISI 316).	50
Figura 20 – Gráficos de dispersão dos resultados do DoS_{SG} para os aços AISI 304 e AISI 316.	50
Figura 21 – Exemplo de micrografia de amostra com o $DoS_{ISO} - Step$ e respectiva imagem binária gerada pelo algoritmo de segmentação global.	51
Figura 22 – Gráficos de dispersão dos resultados do DoS_{SM} para os aços AISI 304 e AISI 316.	52

Figura 23 – Exemplo de micrografia de amostra com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ e respectiva imagem binária gerada pelo algoritmo de segmentação morfológica. . .	53
Figura 24 – Análise de correlação entre os valores DoS_{SG} , DoS_{SM} e os valores DoS_{ISO} . . .	54
Figura 25 – Desempenho do DoS_{SG} obtido por intermédio do limiar da norma ISO 12732 no aço AISI 304 e AISI 316.	56
Figura 26 – Desempenho do DoS_{SM} obtido por intermédio do limiar da norma ISO 12732 no aço AISI 304 e AISI 316.	56
Figura 27 – Desempenho do DoS_{SG} obtido por intermédio dos limiares obtidos por análise de dispersão do aço AISI 304 e AISI 316.	57
Figura 28 – Amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ do aço AISI 304 classificadas como <i>Dual</i> pelo DoS_{SG}	58
Figura 29 – Amostra com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ do aço AISI 304 classificada como <i>Ditch</i> pelo DoS_{SG}	59
Figura 30 – Amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ do aço AISI 316 classificadas como (a,b) <i>Dual</i> e (c) <i>Ditch</i> pelo DoS_{SG}	60
Figura 31 – Amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ do aço AISI 316 classificadas como <i>Ditch</i> pelo DoS_{SG}	61
Figura 32 – Desempenho do DoS_{SM} obtido por intermédio dos limiares obtidos por análise de dispersão do aço AISI 304 e AISI 316.	61
Figura 33 – Amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ do aço AISI 304 classificadas como <i>Ditch</i> pelo DoS_{SM}	63
Figura 34 – Amostra com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ do aço AISI 316 classificada como <i>Ditch</i> pelo DoS_{SM}	64
Figura 35 – Desempenho do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ASTM} , em análise do aço AISI 304 e AISI 316.	64
Figura 36 – Amostras com o $\text{DoS}_{ASTM} - \text{Step}$ dos aços AISI 304 e AISI 316 classificadas como <i>Dual</i> pelo DoS_{SG}	66
Figura 37 – Desempenho do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ASTM} , em análise do aço AISI 304 e AISI 316.	66
Figura 38 – Amostras com o $\text{DoS}_{ASTM} - \text{Step}$ dos aços AISI 304 e AISI 316 classificadas como <i>Dual</i> pelo DoS_{SM}	68
Figura 39 – Curvas ROC do DoS_{SG} e do DoS_{SM} comparados ao DoS_{ISO}	69
Figura 40 – Curvas ROC do DoS_{SG} e do DoS_{SM} comparados ao DoS_{ASTM}	69
Figura 41 – Resultados DoS_{SG} do aço AISI 316L.	76
Figura 42 – Resultados DoS_{SM} do aço AISI 316L.	77
Figura 43 – Amostra com estimativa $\text{DoS}_{ASTM} - \text{Step}$ classificada como sensitizada pelo DoS_{SG} e pelo DoS_{SM} . Imagens binárias com contornos de grãos e maclas.	78
Figura 44 – Matriz de confusão e medidas de desempenho.	79

Figura 45 – Modelo de curva ROC. Adaptado de Fawcett (2006).	80
Figura 46 – Gráfico genérico das medidas de dispersão dos resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM}	81

Lista de tabelas

Tabela 1 – Efeito dos Elementos Químicos por Chiaverini (2012).	25
Tabela 2 – Estrutura da Matriz de Confusão.	41
Tabela 3 – Composição química nominal (%p) dos aços AISI 304 e AISI 316. . . .	43
Tabela 4 – Tratamentos térmicos de envelhecimento, em que {-} indica os tratamentos não utilizados.	43
Tabela 5 – Valores do DoS_{ISO} do banco de dados cedido pelo ENGESOLDA e classificados por meio da norma ISO 12732.	47
Tabela 6 – Classificação das amostras seguindo os padrões da norma ASTM A-262. .	47
Tabela 7 – Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} , em ordem crescente, comparados aos respectivos valores de referência do DoS_{ISO} para o aço AISI 304.	48
Tabela 8 – Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} , em ordem crescente, comparados aos respectivos valores de referência do DoS_{ISO} para o aço AISI 316.	49
Tabela 9 – Limiares do DoS_{ISO} , DoS_{SG} e DoS_{SM} para as estimativas <i>Step</i> , <i>Dual</i> e <i>Ditch</i>	55
Tabela 10 – Matriz de Confusão do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ISO} para o aço AISI 304.	57
Tabela 11 – Matriz de Confusão do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ISO} para o aço AISI 316.	59
Tabela 12 – Matriz de Confusão do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ISO} para o aço AISI 304.	62
Tabela 13 – Matriz de Confusão do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ISO} para o aço AISI 316.	63
Tabela 14 – Matriz de Confusão do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ASTM} para o aço AISI 304.	65
Tabela 15 – Matriz de Confusão do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ASTM} para o aço AISI 316.	65
Tabela 16 – Matriz de Confusão do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ASTM} para o aço AISI 304.	67
Tabela 17 – Matriz de Confusão do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ASTM} para o aço AISI 316.	67
Tabela 18 – Composição química (%p) do aço AISI 316L (BRADY; CLAUSER; VACCARI, 2002).	76

Lista de abreviaturas e siglas

AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço (<i>American Iron and Steel Institute</i>)
AP	Área de Precipitados
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
CPA	Curva de Polarização Anódica
CPC	Curva de Polarização Catódica
DL EPR	Reativação Eletropotenciocinética de Duplo Ciclo (<i>Double Loop Electropotentiokinect Reactivation</i>)
ER	Eletrodo de Referência
ET	Eletrodo de Trabalho
FN	Falso Negativo
FP	Falso Positivo
LTS	Sensitização em Baixa Temperatura (<i>Low-Temperature Sensitization</i>)
LRC	Limite Redefinido de Classes para estimativa DoS
ROC	Característica de Operação do Receptor (<i>Receiver Operating Characteristic</i>)
TTT	Temperatura - Tempo – Transformação
VN	Verdadeiro Negativo
VP	Verdadeiro Positivo

Lista de símbolos

Análise de Desempenho

A_C	Acurácia
E_{SPE}	Especificidade
P_C	Precisão
S_{ENS}	Sensibilidade
F_1	<i>F-score</i>

Especificações de Imagens

Θ	Ângulo do elemento estruturante
B_I	Imagem Binária
N_C	Nível de cinza de <i>pixel</i>
L_S	Limiar de Segmentação
p_i	<i>Pixel</i> original de uma imagem
p_{bin}	Novo <i>pixel</i> após segmentação
λ	Comprimento do elemento estruturante
A_T	Área Total da Micrografia
A_S	Área Sensitizada

Componentes Químicos

C	Carbono
Cr	Cromo
Cr_2O_3	Óxido de Cromo
Cu	Cobre
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio

Nb	Nióbio
Ni	Níquel
SO ₂	Dióxido de Enxofre
Ti	Titânio
Fe	Ferro

Corrosão

i_a	Corrente de Anodização
i_{pass}	Corrente de Passivação
i_r	Corrente de Reativação
M ₂₃ C ₆	Precipitado de carbono
DoS	Grau de Sensitização (<i>Degree of Sensitization</i>)

Estimativas de Sensitização

DoS _E	DoS estimado pela relação A_S/A_T
DoS _{ISO}	DoS calculado pelo ensaio de corrosão DL EPR
DoS _{SM}	DoS _E calculado por imagens obtidas pelo algoritmo de segmentação morfológica
DoS _{SG}	DoS _E calculado por imagens obtidas pelo algoritmo de segmentação global
DoS _{ASTM}	DoS estimado pela classificação ASTM A-262

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Motivação	18
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Objetivos específicos	21
1.3	Organização do texto	21
2	Fundamentos Teóricos	23
2.1	Aços Inoxidáveis	23
2.2	Aços Inoxidáveis Austeníticos	26
2.3	Corrosão em Aços Inoxidáveis	30
2.4	Sensitização	31
2.4.1	Estimativa do DoS por Análise Microestrutural	32
2.4.2	Estimativa do DoS por Ensaio de Corrosão	33
2.5	Segmentação de Imagem	35
3	Materiais e Métodos	38
3.1	Segmentação de Imagens para Estimativa DoS	38
3.2	Estimativa do DoS	39
3.3	Avaliação de Desempenho da Estimativa DoS por Segmentação de Imagens	40
3.4	Descrição do Banco de Dados	43
3.4.1	Composição Química dos Aços	43
3.4.2	Tratamentos Térmicos	43
3.4.3	Características Microestruturais e Resultados DoS _{ISO}	44
4	Resultados e Discussões	48
4.1	Resultados do DoS _{SG} e do DoS _{SM} .	48
4.1.1	Análise de Correlação entre as Estimativas do DoS _{SG} e do DoS _{SM} ao Padrão DoS _{ISO}	53
4.1.2	Limiares entre os Valores do DoS _{SG} e do DoS _{SM} para Estimativa <i>Step, Dual e Ditch</i> .	54
4.2	Análise de desempenho do DoS _{SG} e do DoS _{SM} por intermédio da Matriz de Confusão.	55
4.2.1	Análise de desempenho do DoS _{SG} e do DoS _{SM} por intermédio dos limiares da norma ISO 12732.	55
4.2.2	Análise de desempenho do DoS _{SG} comparado ao DoS _{ISO}	57
4.2.3	Análise de desempenho do DoS _{SM} comparado ao DoS _{ISO}	61
4.2.4	Análise de desempenho do DoS _{SG} comparado ao padrão DoS _{ASTM}	64
4.2.5	Análise de desempenho do DoS _{SM} comparado ao padrão DoS _{ASTM}	66
4.3	Análise de Desempenho por Curvas ROC.	68

5	Conclusões	70
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	70
	Referências	71
	APÊNDICE A Experimento independente	76
	APÊNDICE B Interpretação da matriz de confusão e da curva ROC	79
	APÊNDICE C Interpretação do gráfico das medidas de dispersão do DoS _{SG} e do DoS _{SM}	81

1 Introdução

O setor produtivo de combustíveis fósseis, biocombustíveis, energia geotérmica e energia solar apresentam condições de severidade moderada e elevada, que tornam os equipamentos deste setor suscetíveis a problemas de corrosão, deterioração e falhas estruturais (OSTERMAN, 2012; CHENG *et al.*, 2017; NOGARA; ZARROUK, 2017a; THANGAVELU; AHMED; ANI, 2016; HU *et al.*, 2012).

Os equipamentos utilizados nestes setores devem apresentar características metalúrgicas de boa qualidade, especificamente resistência mecânica e resistência à corrosão (BAI *et al.*, 2016; LIPPOLD; KOTECKI, 2005; OSTERMAN, 2012; SRINIVASAN *et al.*, 2015).

Destes equipamentos podemos citar os vasos de pressão, linhas de vapor, tubulações e reservatórios utilizados na indústria de biocombustíveis, que são fabricados em aços inoxidáveis, mas devido à severidade do meio de aplicação, podem apresentar o fenômeno de sensitização, ocorrendo problemas de corrosão (LIMA; SANKARÉ, 2014; LIPPOLD; KOTECKI, 2005; OSTERMAN, 2012; SAUCEDO-MUÑOZ *et al.*, 2009; SEDRIKS; Electrochemical Society., 1996; SRINIVASAN *et al.*, 2015).

Na indústria de produção de combustíveis e biocombustíveis há uma predileção para utilização dos aços inoxidáveis austeníticos, que se deve às características de elevada resistência à corrosão uniforme e localizada, elevada resistência mecânica, ductilidade e soldabilidade (BAI *et al.*, 2016; BERENJANI *et al.*, 2014; CHIAVERINI, 2012; GENTIL, 2011; NASSAR; NASSAR, 2016; SILVA; MEI, 2011; MOMBER, 2016).

Estima-se que, nas usinas de biodiesel, 80 % dos equipamentos são constituídos de aço inoxidável, dos quais 50 % são compostos do aço AISI 304L e 35 % do aço AISI 316L. Em componentes como destiladores, vasos de pressão, tubulações, decantadores e tanques de armazenamento são utilizados preferencialmente o aço AISI 316 e o aço AISI 316L (OSTERMAN, 2012).

Os aços inoxidáveis também são utilizados na produção de energia por fontes geotérmicas, que devido às condições de operação de elevadas temperaturas, acidez e pressão, há ocorrência de problemas de deterioração por corrosão de seus equipamentos de produção (NOGARA; ZARROUK, 2017a; NOGARA; ZARROUK, 2017b).

Observaram-se fenômenos de corrosão e deterioração de equipamentos na produção de energia solar concentrada (CSP, do inglês *Concentrated Solar Plants*) que devido às temperaturas elevadas, entre 400 °C e 550 °C, e às pressões elevadas ocorreram problemas de corrosão localizada e corrosão sob tensão (CHENG *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2016).

O fenômeno de sensitização, que é a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, torna esses equipamentos suscetíveis aos processos de corrosão e queda de resistência mecânica, gerando riscos de falhas estruturais, que podem resultar em danos sociais, econômicos e ambientais (BAI *et al.*, 2016; LIMA; SANKARÉ, 2014; LEWELLYN; HUDD, 2013; AL-ATTAB; ZAINAL, 2010).

Logo torna-se necessário monitorar e classificar o grau de sensitização (DoS, do inglês *Degree of Sensitization*), a fim de assegurar o desempenho, disponibilidade e confiabilidade destes equipamentos. Alguns métodos são inspeção visual, análise microestrutural e ensaios de corrosão (CÍHAL *et al.*, 2007; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015; WOLYNEC, 2003).

1.1 Motivação

Avaliação do DoS faz parte do estudo do comportamento dos materiais, sendo que as metodologias utilizadas para classificação do DoS consistem em análises de imagens (micrografias) e resultados de ensaios de corrosão realizados em laboratórios, onde os laudos são elaborados por um operador treinado, cuja interpretação implicará nas condições de projetos de construção, montagem, operação e manutenção dos equipamentos. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015; MAJIDI; STREICHER, 1984; GENTIL, 2011; LIU *et al.*, 2016; NASSAR; NASSAR, 2016; POMMIER *et al.*, 2016).

A *American Society for Testing and Materials*-ASTM apresenta a norma ASTM 262 prática A como metodologia de análise visual micrográfica para estimativa DoS, que classifica o DoS das amostras analisadas em *Step*, *Dual* e *Ditch* (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015). Soma-se a este procedimento, análises laboratoriais de corrosão por polarização (PEREZ, 2016; SRINIVASAN *et al.*, 2015).

A prática A da ASTM A-262 depende do trabalho e habilidade de um operador para a interpretação de micrografias, que por vezes, podem apresentar resultados divergentes dos ensaios de corrosão. Assim torna-se pertinente utilizar uma metodologia de inspeção e classificação DoS confiável e isenta de subjetividade (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015; PEREZ, 2016; RAHIMI; ENGELBERG; MARROW, 2011; SRINIVASAN *et al.*, 2015).

O teste Strauss, prática E da ASTM A-262, é utilizado para avaliar a sensitização por carbonetos de cromo, por meio de inspeção visual com a finalidade de verificar a formação de fissuras em amostras aquecidas em solução de sulfato de cobre e dobradas em 180 ° (AYDOĞDU; AYDINOL, 2006).

A norma ISO 12732 (2009) padroniza o método de medição do DoS de aços inoxidáveis e ligas de níquel por meio do ensaio de corrosão de reativação potenciocinética

de ciclo duplo (DL EPR, do inglês *Double Loop Electropotentiokinetic Reactivation*).

O DL EPR quantifica o DoS por meio de um índice entre $[0,1]$, que é obtido pela razão entre a densidade de corrente reativa pela densidade de corrente anódica. [Cíhal et al. \(2007\)](#) determinaram os limiares entre $[0,1]$ para estimar o DoS em *Step*, *Dual* e *Ditch*.

Diversos autores têm buscado avaliar condições de resistência à corrosão associando características inerentes de cada liga metálica e o meio de aplicação. [Jiang et al. \(2016\)](#) avaliaram a resistência à corrosão dos aços AISI 304 e AISI 304L envelhecidos a 700°C , condição que simula o efeito da sensibilização na resistência à corrosão por pites e à corrosão intergranular.

[Nassar e Nassar \(2016\)](#) avaliaram o efeito dos diferentes níveis de temperatura na formação de precipitados que podem afetar a resistência à corrosão de ligas utilizadas em ambientes ácidos, enquanto [Pommier et al. \(2016\)](#) estudaram a formação de precipitados em ligas de aço inoxidável austenítico na faixa de temperatura entre 1050°C a 1100°C e seus efeitos nas propriedades mecânicas e propriedades de resistência à corrosão.

Esses métodos possuem em comum o uso de técnicas de preparação metalográfica e ensaios de corrosão que consomem tempo de preparação e os resultados podem ser influenciados por algumas variáveis, a saber temperatura ambiente, tempo de exposição e concentração das soluções químicas ([JIANG et al., 2016](#); [SRINIVASAN et al., 2015](#); [MURI et al., 2014](#)).

As imagens obtidas pelo procedimento metalográfico são repassadas ao profissional responsável por gerar o laudo da estimativa DoS, que realiza a análise visual das micrografias em busca de padrões de imagem que representam os precipitados e interpreta a micrografia para estimar o DoS segundo a norma ASTM A-262.

Uma revisão bibliográfica prévia mostrou que pesquisadores de áreas diversas estão utilizando algoritmos para processamento digital de imagens que geram respostas quantitativas e qualitativas reproduzidas por meio das imagens processadas.

Algumas dessas imagens possuem características semelhantes às das micrografias, a saber, estruturas lineares conectadas ou não e de diferentes calibres. [Colomé-Serra et al. \(1992\)](#) utilizaram o método de segmentação de imagem de biopsia renal para a quantificação de parâmetros de medição da superfície intersticial, volume intersticial, número de seções transversais capilares peritubulares.

Na área da metalmecânica, [Costa et al. \(2004\)](#) utilizaram algoritmos de processamento de imagens para a estimativa do DoS do aço AISI 304L utilizando micrografias e [Sharifzadeh et al. \(2008\)](#) utilizaram essa técnica para detecção e classificação de defeitos como poros, trincas e corrosão na superfície de metais.

A segmentação é um passo importante do processamento de imagens por ser

responsável pela separação entre os objetos presentes na imagem e com o fundo homogêneo. A exemplo, [Otsu \(1975\)](#) e [Vincent \(1993\)](#) realizaram estudos para aumentar a robustez de algoritmos de segmentação de imagem, utilizando arquivos em escala de cinza para gerar imagens binárias contendo elementos específicos para compor a imagem final.

[Otsu \(1975\)](#) apresentou uma técnica de limiarização global de *pixels* por meio da análise de histograma de intensidades. Por meio da contagem de *pixels* que representa brilho e contraste é construído um histograma bimodal dos níveis de cinza o que permite determinar o limiar de segmentação entre fundo da cena e o objeto.

[Zana e Klein \(2001\)](#) utilizaram algoritmos de identificação morfológica na segmentação de estruturas lineares conectadas a rede de vasos em retinografias digitais com objetivo de facilitar o diagnóstico de doenças oculares. Esses algoritmos funcionam identificando a morfologia de elementos lineares, a partir de parâmetros de comprimento, espessura e angulação.

[Tarquini e Favalli \(2010\)](#) e [Asmussen *et al.* \(2015\)](#) implementaram metodologia de segmentação de imagens com reconhecimento morfológico em estudos de petrografias para classificação e laudos de formações geológicas.

Considerando que as micrografias pertencentes aos aços sensitizados apresentam diferentes padrões morfológicos dos carbonetos localizados no contorno de grão ([AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015](#); [BAI *et al.*, 2016](#); [BERENJANI *et al.*, 2014](#)), alguns autores têm buscado um modo de automatizar o processo de identificação de precipitados por meio de algoritmos processamento digital de imagens ([COSTA *et al.*, 2004](#)).

Observada a importância de estimar o DoS dentro dos padrões da norma ASTM A-262 e paralelamente aos ensaios de corrosão realizados em laboratório, este trabalho avalia a utilização de metodologia de processamento de micrografias digitais por segmentação de imagens para obter a estimativa DoS de aços inoxidáveis austeníticos.

Visando automatizar processos de monitoramento e garantir a confiabilidade e a repetibilidade, deve-se investigar se a metodologia de análise de imagens para classificação do DoS é eficaz para avaliação das micrografias.

Observa-se a importância de evitar erros de classificação do DoS ou de ratificar laudos técnicos e facilitar essas atividades que hoje são realizadas por profissionais da área, através de análise visual, que requerem tempo, treinamento e habilidade.

1.2 Objetivos

Avaliar métodos de estimativa do DoS por contagem de *pixels* de imagens binárias geradas por algoritmos de segmentação de imagens, a partir de micrografias, comparando-os

à metodologia padronizada de estimativa DoS por ensaio de corrosão DL EPR (do inglês *Double Loop Electropotentiokinect Reactivation*) e por análise microestrutural.

1.2.1 Objetivos específicos

- Determinar o método de segmentação de imagem a ser utilizado na estimativa DoS por processamento de micrografias.
- Estimar o DoS dos aços inoxidáveis utilizando algoritmo de processamento digital das micrografias por segmentação de imagem.
- Avaliar as estimativas DoS obtidas por algoritmo de processamento digital de imagens segmentadas comparando-as com os valores DoS obtidos em ensaios de corrosão por DL EPR e as estimativas por análise microestrutural.

1.3 Organização do texto

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde a Seção 2.1 mostra uma breve revisão dos tipos de aços inoxidáveis, com ênfase nas características dos aços inoxidáveis austeníticos. Explicam-se os fenômenos de sensitização, procedimentos de estimativa de sensitização pela norma ISO 12732 e ASTM A-262. Explana-se a utilização de algoritmos de processamento digital de imagens e suas aplicações.

No Capítulo 3 está descrito como foi realizado o método científico desta pesquisa. Relatando as características do banco de dados, tais como ligas metálicas, tratamentos térmicos aplicados, características microestruturais e ensaios de corrosão, sendo explicado os procedimentos de segmentação de imagem pelo DoS_{SG} e pelo DoS_{SM} .

No Capítulo 4, estão descritos os resultados e discussões, relatando a análise microestrutural e os resultados de ensaios de corrosão por DL EPR do banco de dados. Descreve-se e comparam-se os métodos de segmentação, verificando-se o desempenho das estimativa do DoS por imagens segmentadas, utilizando os resultados do ensaio de corrosão como referência e análise de sensitização por micrografias.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas pela comparação dos métodos avaliados nesta pesquisa com as metodologias padronizadas pela norma ISO 12732 e ASTM A-262.

O Apêndice A apresenta a utilização de amostras de aço AISI 316L, que são independentes do banco de dados utilizado no escopo desta pesquisa. Com este experimento independente visamos verificar se o DoS_{SG} e o DoS_{SM} estimam a sensitização de amostras além do banco de dados inicial.

O Apêndice B descreve como é realizada a interpretação das matrizes de confusão e das curvas ROC (do inglês *Receiver Operating Characteristic*) que são utilizadas para averiguar o desempenho de um método classificador para mineração de dados.

O Apêndice C descreve como os resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} foram organizados em gráficos de medidas de dispersão, que foram utilizados para identificar os limiares das estimativa *Step*, *Dual* e *Ditch* por micrografias digitais.

2 Fundamentos Teóricos

Observando que o problema de deterioração dos equipamentos utilizados no setor de petróleo, gás e biocombustíveis envolve a utilização dos aços inoxidáveis, iniciam-se os fundamentos teóricos na Seção 2.1, com a breve abordagem de definições e características metalúrgicas dos aços inoxidáveis.

Especificamente, na Seção 2.2, são apresentadas as características metalúrgicas dos aços inoxidáveis austeníticos suscetíveis aos processos de corrosão por sensitização, salientando-se a formação microestrutural, os efeitos dos elementos de liga e a resistência à corrosão.

A Seção 2.3 explica sucintamente o que é o processo de deterioração por corrosão pelo mecanismo básico de quebra da camada de passivação e como é possível verificar e estudar esse processo por ensaios de corrosão para detecção dos fenômenos de sensitização. Nesta seção é apresentado o fundamento do ensaio DL EPR, que servirá de referência para o estudo das metodologias de processamento de micrografias digitais por segmentação de imagens para estimativa do DoS.

O fenômeno de sensitização é explicado na Seção 2.4, onde são apresentadas as normas regulamentadoras para estimar e classificar o DoS. Estão descritos: sensitização, norma ASTM A-262 e norma ISO 12732.

Na Seção 2.5 são apresentadas algumas metodologias de processamento de imagens, dentre elas as metodologias de Otsu (1975) e Zana e Klein (2001) que foram utilizadas nesta pesquisa.

2.1 Aços Inoxidáveis

Aços são ligas metálicas contendo principalmente ferro (Fe) e carbono (C), havendo a presença de outros elementos devido o processo de fabricação (CHIAVERINI, 2012). Os aços inoxidáveis são ligas metálicas contendo principalmente adição de cromo (Cr), a partir de 10 % (CHIAVERINI, 2012).

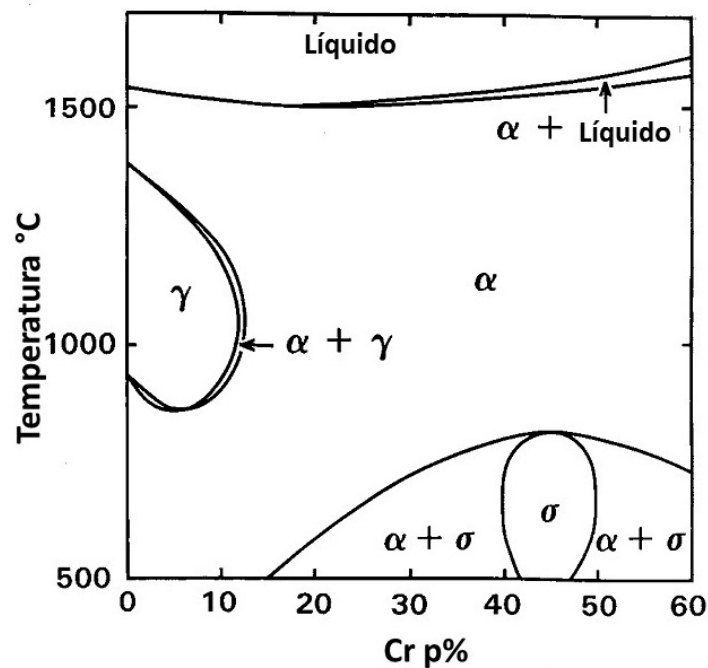
A resistência à corrosão de ligas Fe-Cr está associada ao fenômeno de passivação, que é a formação da camada de óxido de cromo (Cr_2O_3) denominada camada de passivação, que pode ser localizadamente prejudicada pela formação de carbonetos de cromo devido ao teor de carbono elevado existente na liga. (GENTIL, 2011; LEWELLYN; HUDD, 2013; SILVA; MEI, 2011; SRINIVASAN *et al.*, 2015; TALBOT; TALBOT, 2007).

O teor máximo especificado de carbono se situa entre 0,03 % e 1,20 % com a

finalidade de assegurar tenacidade para aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, assim como dureza e resistência ao desgaste para os aços inoxidáveis martensíticos (BRADY; CLAUSER; VACCARI, 2002).

Na Figura 1, por meio do diagrama de fases binário da liga Fe-Cr, observa-se a formação microestrutural básica, salientando-se a formação do campo austenítico (loop γ), que está na faixa de temperatura de 840 °C a 1400 °C. Enfatiza-se que é necessário a adição de outros elementos químicos para estabilizar (aumentar) o campo de formação austenítica.

Figura 1 – Diagrama de fases binário da liga Fe-Cr, p 267, Adaptado de Talbot e Talbot (2007).



A adição de outros elementos químicos modifica as propriedades das ligas. A Tabela 1 descreve sucintamente o efeito da adição de alguns elementos químicos para aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 1 – Efeito dos Elementos Químicos por Chiaverini (2012).

Elemento Químico	Efeito da adição do elemento químico
Carbono (C)	Aumenta dureza do material. Aumenta o campo austenítico. Favorece a formação de precipitados devido sua baixa solubilidade no campo austenítico (Cr ₃ C, Cr ₂₃ C ₆ e Cr ₇ C ₃). Favorece a ocorrência do fenômeno de sensitização.
Níquel (Ni)	Aumenta a formação do campo austenítico. Para 18% de Cr é necessário ao menos 10% de níquel para formação austenítica a temperatura ambiente. Baixa a solubilidade de carbono
Molibdênio (Mo)	Estabiliza a fase ferrítica. Aumenta resistência a corrosão localizada. Favorece a formação de ferrita delta.
Titânio (Ti) e Níobio (Nb)	Substituem o Cr na formação de precipitados.
Nitrogênio (N)	Aumenta as propriedades de resistência mecânica e estabiliza a austenita.

De acordo com a variação da composição química, os aços inoxidáveis são classificados por sua microestrutura em: aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos, ferrítico-austeníticos e endurecíveis por precipitação (LLEWELLYN; HUDD, 1998; SILVA; MEI, 2011). Dentre esses, citam-se algumas características dos aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos e austeníticos:

Martensíticos: Ligas Fe-Cr (11 %Cr a 18 %Cr). São endurecíveis por tratamento térmico e são magnéticos. Podem ser aplicados em elevadas temperaturas devido à elevada resistência à queda de dureza no revenimento, conferida pelo cromo e boa resistência à corrosão. (LLEWELLYN; HUDD, 1998; SILVA; MEI, 2011).

Ferríticos: São ligas Fe+Cr não endurecíveis por tratamento térmico. São aços empregados por sua resistência à corrosão, em especial, resistência às trincas de corrosão sob tensão e apresentam tenacidade média a baixa (SILVA; MEI, 2011).

Para aplicação em ambientes corrosivos, especialmente quando há corrosão sob tensão fraturante na presença de cloretos, utilizam-se ligas com adição de molibdênio e redução de elementos intersticiais (C e N), pois a redução destes elementos favorece a diminuição da formação de carbonetos e nitretos, que são prejudiciais para resistência à corrosão (SILVA; MEI, 2011).

Austeníticos: Ligas Fe-Cr-Ni. São não-magnéticos, caracterizados por elevada resistência à corrosão, elevada tenacidade e boa soldabilidade. O campo austenítico é estabilizado pela presença de Ni. A resistência à corrosão é aumentada devido à adição de Mo e Cr, da qual a resistência à corrosão intergranular e a resistência à corrosão em condição como soldado são elevadas. Apresentam boa resistência à corrosão em ambientes que contêm cloretos e sulfetos (BERENJANI *et al.*, 2014; SILVA; MEI, 2011).

Austeno-Ferríticos: São as ligas compostas pelas microestruturas ferrítica e austenítica. Apresentam a combinação de características de resistência mecânica e de resistência à corrosão com preço relativamente mais baixo (CHIAVERINI, 2012).

2.2 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos, série 300, classificação segundo *American Iron and Steel Institute* – AISI, são utilizados na composição estrutural de equipamentos que operam em ambientes severos, como na indústria de combustíveis e de biocombustíveis (BERENJANI *et al.*, 2014; LIMA; SANKARÉ, 2014; PAPAVINASAM *et al.*, 2011).

Segundo Lippold e Kotecki (2005) alguns elementos químicos específicos são adicionados aos aços inoxidáveis austeníticos com a função de melhorar suas características. A exemplo, a adição de Nb e Ti reduz a formação de precipitados de cromo ($M_{23}C_6$, M_6C) responsáveis pela sensitização; a adição de N provoca o endurecimento por solução sólida e melhora a resistência à corrosão (BAI *et al.*, 2016; BERENJANI *et al.*, 2014; SAUCEDO-MUÑOZ *et al.*, 2009).

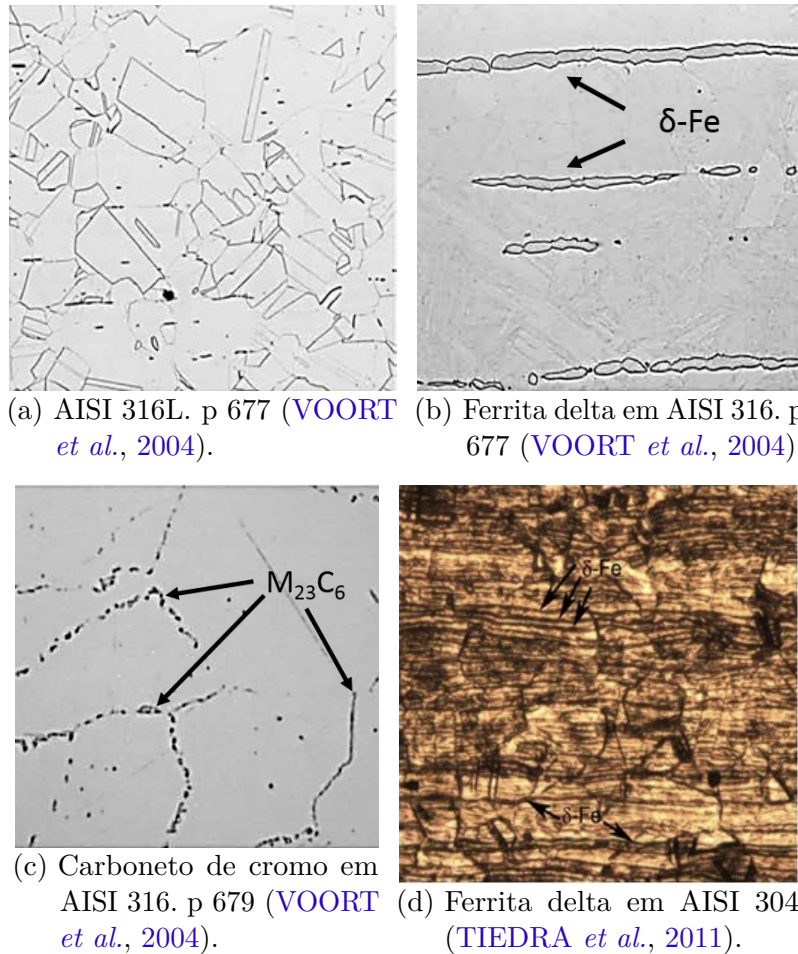
Considerando que o carbono é o elemento químico responsável por retirar cromo da matriz do grão formando zonas de depleção de Cromo, que é uma das características responsáveis pelo fenômeno de sensitização, foi criada uma classe de aços inoxidáveis austeníticos com menor teor de carbono, do inglês, *low carbon*, grau L, com a finalidade de disponibilizar aços com menor suscetibilidade à sensitização. Dessa maneira o aço AISI 316L possui maior resistência à corrosão que o aço AISI 316 (LIMA; SANKARÉ, 2014; LIPPOLD; KOTECKI, 2005; SILVA; MEI, 2011).

Na Figura 2a, observa-se a microestrutura austenítica, que é resultado do balanço existente de elementos químicos ferritizantes e austenitizantes, sendo a austenita favorecida principalmente pela adição de Ni (BERENJANI *et al.*, 2014; TIEDRA *et al.*, 2011; VOORT *et al.*, 2004).

A Figura 2b, 2c e 2d mostram a formação de ferrita delta e precipitação de carbonetos devido à segregação de elementos ferritizantes ocasionada por temperaturas elevadas, que podem ocorrer em processos de fabricação, como laminação a quente e soldagem (BERENJANI *et al.*, 2014; TIEDRA *et al.*, 2011; VOORT, 1991; VOORT *et al.*,

2004).

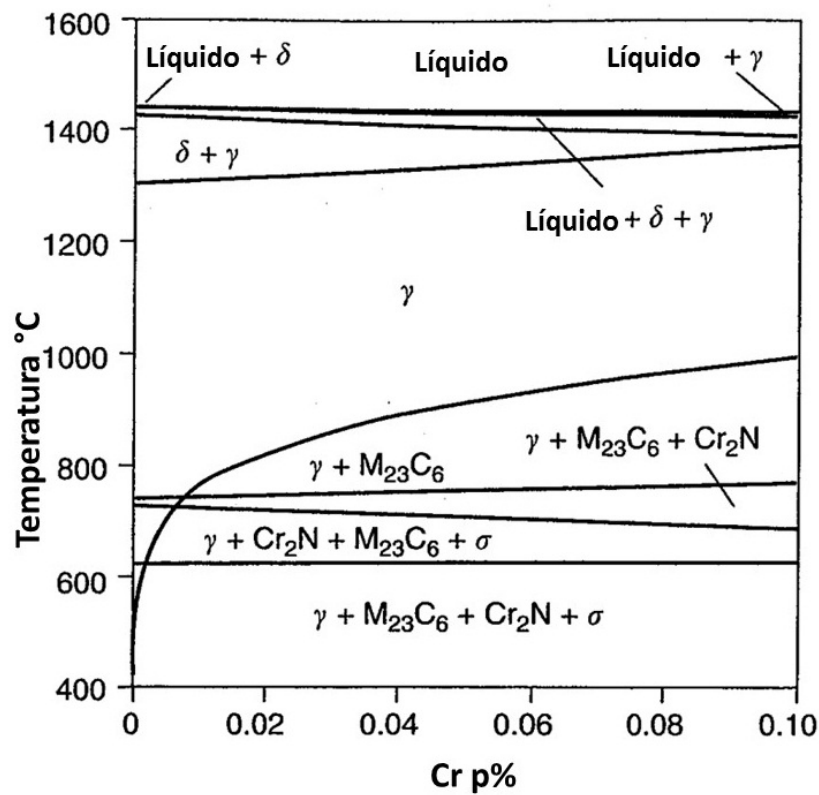
Figura 2 – Microestrutura do aço inoxidável austenítico.



A formação microestrutural é diretamente influenciada pela composição química, temperatura e tempo. O diagrama de fases mostra a formação de fases em função da composição química em uma dada temperatura, enquanto os diagramas de Temperatura-Tempo-Transformação (TTT) disponibilizam a transformação das fases em função do tempo e temperatura (CHIAVERINI, 2012; LIPPOLD; KOTECKI, 2005; SILVA; MEI, 2011; VOORT, 1991).

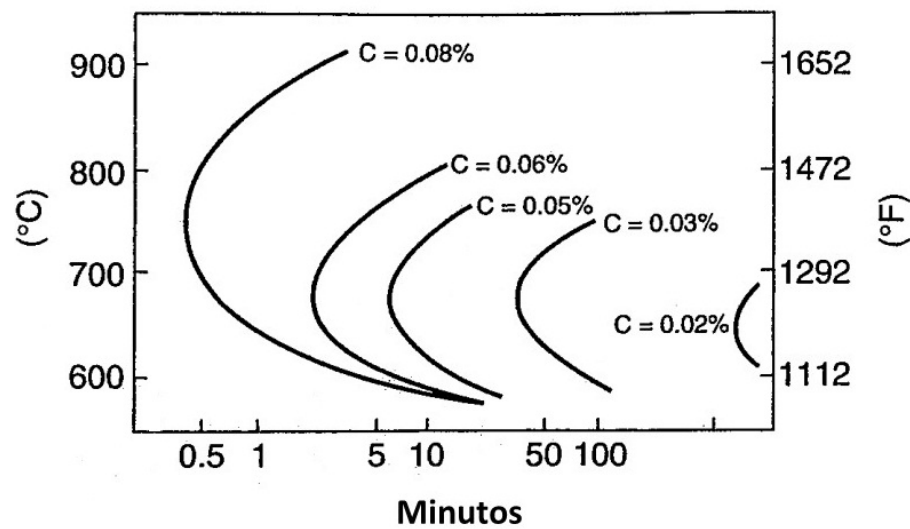
A Figura 3 mostra o diagrama de fases de um aço inoxidável austenítico (10 % Ni e 0,04 % C) considerando Cr como elemento variável de composição. Observa-se que a variação de temperatura e composição química, no caso Cr, são fatores que modificam a formação de fases e precipitados.

Figura 3 – Diagrama de fases de um aço inoxidável austenítico com 10 %Ni, 0,04 %N e 0,04 %C, p 150. Adaptado de [Lippold e Kotecki \(2005\)](#).



A formação de carbonetos é difusional, sendo necessário analisar o fator tempo, cujas informações podem ser obtidas pelo diagrama TTT. Na Figura 4, ilustra-se o gráfico TTT, que mostra o efeito da variação do teor de carbono na formação de precipitados $M_{23}C_6$ nos aços inoxidáveis austeníticos. Observa-se que quanto menor o teor de carbono mais tempo é necessário para iniciar a formação dos precipitados ([CHIAVERINI, 2012](#)).

Figura 4 – Gráfico TTT mostrando o efeito da variação do teor de carbono na formação de precipitados $M_{23}C_6$, p 204. Adaptado de Chiaverini (2012).

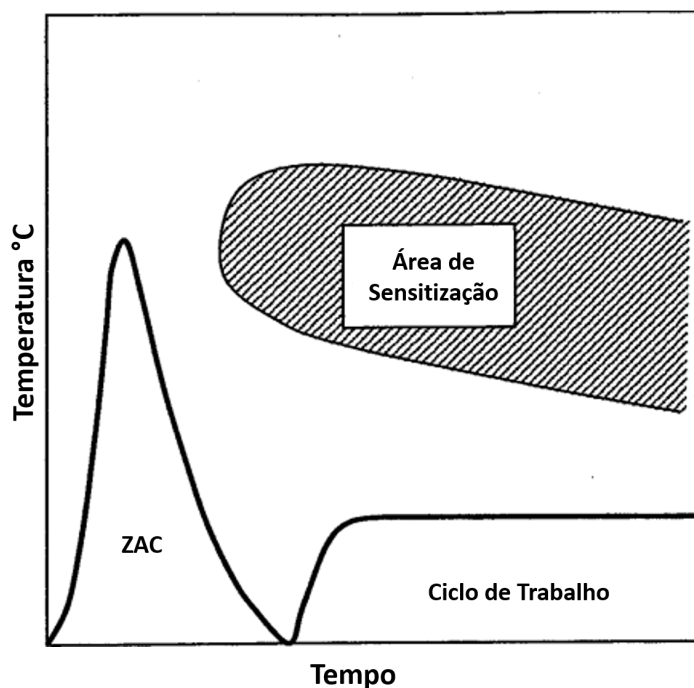


Os aços inoxidáveis austeníticos são empregados em equipamentos e ferramentas que por vezes são fabricados por processos de soldagem, sendo este procedimento responsável por um elevado aporte térmico (BERENJANI *et al.*, 2014; TIEDRA *et al.*, 2011; PARVATHAVARTHINI *et al.*, 2009; SILVA; FARIAS; SANT'ANA, 2009).

Considerando que temperaturas elevadas favorecem a formação de precipitados, torna-se necessário evitar expor essas ligas às temperaturas elevadas por períodos prolongados. Para estes casos e situações similares, os diagramas TTT auxiliam na previsão do tempo de execução de procedimentos que elevem a temperatura dos aços (BERENJANI *et al.*, 2014; TIEDRA *et al.*, 2011; PARVATHAVARTHINI *et al.*, 2009).

A Figura 5 ilustra o ciclo de temperatura na fabricação de um equipamento por soldagem e faixa de temperatura de operação, onde, nestas condições, existe a possibilidade de precipitação devido ao pico de temperatura de soldagem, que pode favorecer a formação de “embriões” de carbonetos, que podem se propagar e aumentar ao longo dos contornos de grãos, mesmo em baixas temperaturas, mas por tempo prolongado. Esse fenômeno é denominado de Sensitização em Baixas Temperaturas – LTS (do inglês *low temperature sensitization*) (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

Figura 5 – Sensitização em baixas temperaturas LTS, p 206. Adaptado de Lippold e Kotecki (2005).



2.3 Corrosão em Aços Inoxidáveis

Corrosão é a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química e/ou eletroquímica do meio ambiente associado ou não a esforços mecânicos. Este processo pode causar alterações químicas prejudiciais ao material e desgaste, o que prejudica a empregabilidade de determinados componentes, diminuição de eficiência de determinados equipamentos e em casos extremos, causar acidentes devido à falha de componentes deteriorados por corrosão (TIEDRA *et al.*, 2011; GENTIL, 2011; JAMBO; FÓFANO, 2008).

O elemento químico Cr é o responsável pela formação da camada de passivação (DAVIS, 1994; SILVA; MEI, 2011), que em conjunto com outros elementos químicos como Nb, Ti e Mo tem suas propriedades de resistência à corrosão melhorada (STANSBURY; BUCHANAN, 2000).

A camada de passivação é o filme de óxido resultado de uma reação química de oxidação do metal com o meio que se encontra. Esse óxido é o estado energético mais estável do metal (GENTIL, 2011; MURI *et al.*, 2014).

A resistência à corrosão do aço inoxidável depende, não exclusivamente, da existência, qualidade e estabilidade da camada de passivação, que estão relacionados aos fenômenos de polarização anódica e catódica (STANSBURY; BUCHANAN, 2000).

As características da camada de passivação são influenciadas pela composição

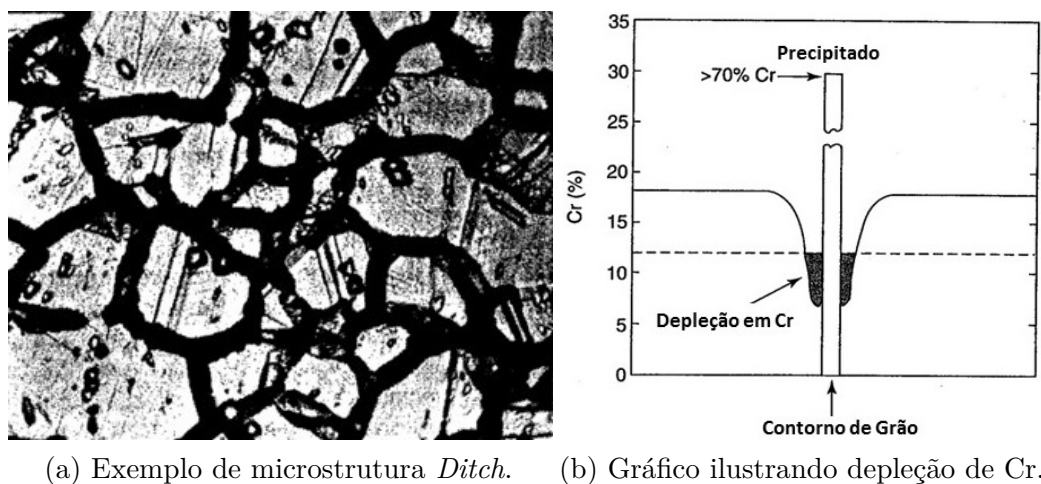
química e tratamento térmico do aço, temperatura e características do meio de aplicação. A exemplo, o aumento do teor de Cr diminui o potencial necessário para a formação da camada de passivação e aumenta o potencial necessário para a quebra desta camada, enquanto Ni favorece a formação dessa camada, Mo aumenta a resistência aos processos de corrosão localizada (CHIAVERINI, 2012; TALBOT; TALBOT, 2007).

Para obtenção dessas características de formação da camada de passivação e resistência à corrosão utilizam-se potenciostatos que simulam reações anódicas e reações catódicas. Estes ensaios são utilizados para qualificar as ligas metálicas, realizar-se um comparativo entre essas ligas, estimar meios de aplicação e fornecer informações para auxiliar em medidas preventivas de corrosão (JONES; RANDLE, 2010; MURI *et al.*, 2014).

2.4 Sensitização

A sensitização é um fenômeno de precipitação de carbonetos de cromo ($M_{23}C_6$, M_6C) formados preferencialmente nos contornos de grão dos aços inoxidáveis, cujo exemplo pode ser visualizado na Figura 6a (LIMA; SANKARÉ, 2014; POMMIER *et al.*, 2016; SAUCEDO-MUÑOZ *et al.*, 2009; SILVA; MEI, 2011; SRINIVASAN *et al.*, 2015).

Figura 6 – Grão sensitizado. P 203. Adaptado de Lippold e Kotecki (2005).



(a) Exemplo de microestrutura Ditch. (b) Gráfico ilustrando depleção de Cr.

A formação dos precipitados é considerada a causa da redução de resistência à corrosão por meio do enfraquecimento ou quebra da camada de passivação, pois acumulam Cr retirando-o da matriz do grão gerando uma zona de depleção de Cr.

A Figura 6b mostra um gráfico exemplificando um aumento da concentração de Cr no precipitado e a depleção em Cr nas circunvizinhanças dos precipitados (LIMA; SANKARÉ, 2014; POMMIER *et al.*, 2016; SAUCEDO-MUÑOZ *et al.*, 2009; SILVA; MEI, 2011; SRINIVASAN *et al.*, 2015).

Pesquisas de análise de sensitização mostraram que em aços inoxidáveis austeníticos, esse fenômeno ocorre quando aquecidos à temperatura de 550 °C a 850 °C e são resfriados lentamente (PARVATHAVARTHINI; DAYAL, 2010).

A sensitização decorrente da formação de fases secundárias ou de precipitados no contorno de grão é uma das causas de corrosão intergranular, contudo, se observada a formação de ferrita delta, que ocorre dentro dos grãos austeníticos, que pode ser decorrente da formação dendrítica resultante do resfriamento rápido em processos de soldagem, por exemplo, pode ocorrer corrosão transgranular (TIEDRA *et al.*, 2011).

2.4.1 Estimativa do DoS por Análise Microestrutural

A ocorrência dos carbonetos pode ser identificada através de procedimento metalográfico que indica dissolução destes por meio de ataque eletrolítico e verificação por microscopia ótica. A ASTM criou um procedimento para identificação dos carbonetos e classificação DoS por meio da norma ASTM A-262.

Essa norma descreve a metodologia de preparação e classificação do nível de sensitização (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015; SRINIVASAN *et al.*, 2015). Para obtenção das amostras é necessário realizar o procedimento de preparação metalográfica e caracterização microestrutural voltada para identificação dos indícios de sensitização.

O procedimento metalográfico é a etapa de preparação da liga metálica a ser analisada, no qual são retiradas amostras, que são lixadas e polidas para revelação microestrutural, na qual se utiliza um reagente químico, cuja escolha depende da resistência ao ataque químico e complexidade microestrutural da liga metálica (VOORT *et al.*, 2004).

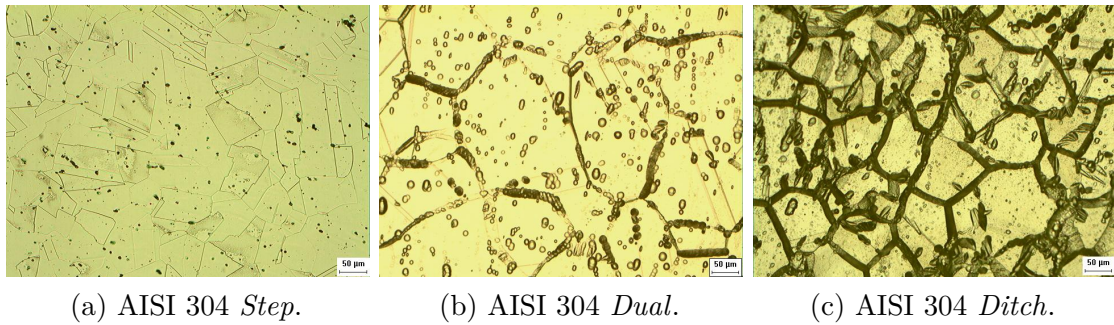
A norma ASTM A-262 indica a utilização do ataque eletroquímico por ácido oxálico para identificação da dissolução dos carbonetos, fase σ e microestrutura austenítica. Neste procedimento é utilizado potencial elétrico entre 1 a 6 volts, corrente contínua, com duração de 15 a 60 segundos (VOORT *et al.*, 2004; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015).

A caracterização microestrutural para classificação do DoS por carbonetos de cromo está baseada na identificação do arrancamento destes precipitados, promovido pelo ataque eletrolítico, por meio de microscopia ótica. Os parâmetros normatizados pela ASTM A-262 são:

- *Step*: Observa-se que a amostra não apresenta o arrancamento de precipitados, como ilustrado na Figura 7a.
- *Dual*: Verifica-se o arrancamento intermitente de precipitados de carboneto nos contornos de grão, como ilustrado na Figura 7b.

- *Ditch*: Quando observado o mínimo de um grão com arrancamento contínuo de carbonetos em seu contorno, como ilustrado na Figura 7c.

Figura 7 – Classificação do DoS por meio da norma ASTM A-262.



2.4.2 Estimativa do DoS por Ensaio de Corrosão

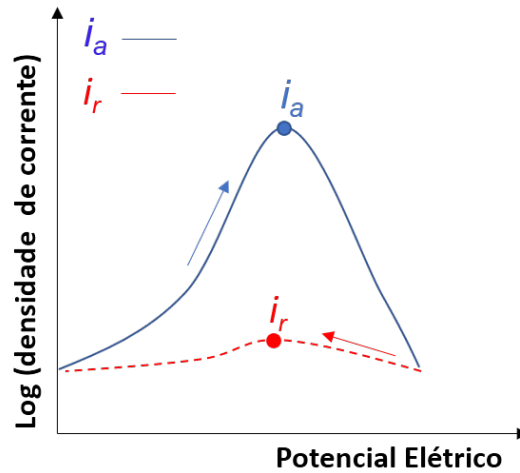
As medições eletroquímicas são utilizadas no estudo do mecanismo de corrosão e da suscetibilidade de metais à corrosão, entre os quais são traçados gráficos relacionando potencial e densidade de corrente. Por meio destas informações é possível determinar, por exemplo, potencial de corrosão, potencial de formação de pite e taxa de corrosão (GENTIL, 2011; TALBOT; TALBOT, 2007; WOLYNEC, 2003).

Para quantificar o nível de sensitização de um aço é utilizado um método de ensaio eletroquímico, feito em laboratório, que é minucioso e de custo elevado, denominado DL EPR (do inglês *Double Loop Electropotentiokinect Reactivation*), procedimento normatizado pela ISO 12732 (2009).

Na realização do ensaio DL EPR (ISO 12732, 2009) utiliza-se uma célula eletroquímica típica de três eletrodos, na qual se aplica uma diferença de potencial sobre um eletrodo de trabalho (ET) e o eletrodo de referência (ER) (WOLYNEC, 2003; MURI *et al.*, 2014; RAHIMI; ENGELBERG; MARROW, 2011).

A norma ISO 12732 (2009) recomenda que a amostra em análise preparada como ET seja polarizada potenciocineticamente desde seu potencial de corrosão até o potencial de passivação (polarização direta). A partir deste ponto a polarização deve ser invertida até atingir novamente o potencial de corrosão. Dessa maneira se obtém duas curvas resultantes da polarização direta e da polarização inversa ilustradas na Figura 8:

Figura 8 – Curva de polarização do ensaio DL EPR. Adaptado de Majidi e Streicher (1984).



Os resultados dos ensaios DL EPR são compostos de densidade de corrente reativa (i_r) e densidade de corrente anódica (i_a) em função do potencial elétrico aplicado. A relação entre (i_r) e (i_a) do ensaio DL EPR resulta

$$\text{DoS} = \frac{i_r}{i_a} \quad (2.1)$$

A relação entre os valores máximos de i_r e i_a dada por (i_r/i_a) quantifica o DoS, quanto mais próximo de um, mais sensitizada a liga estará. Este procedimento é conhecido como Método de Cihal (SAUCEDO-MUÑOZ *et al.*, 2009; MURI *et al.*, 2014; CÍHAL *et al.*, 2007; MAJIDI; STREICHER, 1984; SRINIVASAN *et al.*, 2015; WOLYNEC, 2003).

A norma ISO 12732, determina os limiares do DoS por DL EPR em três níveis de sensitização (MURI *et al.*, 2014; CÍHAL *et al.*, 2007; RAHIMI; ENGELBERG; MARROW, 2011):

- *Step*: $\text{DoS} < 0,01$.
- *Dual*: $0,01 < \text{DoS} < 0,05$.
- *Ditch*: $\text{DoS} > 0,05$.

A utilização deste ensaio permite determinar o DoS e estimar a suscetibilidade de ligas metálicas à corrosão, sendo importante determinar o DoS dos aços utilizados na indústria de petróleo, gás e biocombustíveis para entender e projetar os equipamentos com boas características de resistência à corrosão e evitar danos e possíveis falhas estruturais (BAI *et al.*, 2016; TIEDRA *et al.*, 2011; OSTERMAN, 2012; SAUCEDO-MUÑOZ *et al.*, 2009; SRINIVASAN *et al.*, 2015).

2.5 Segmentação de Imagem

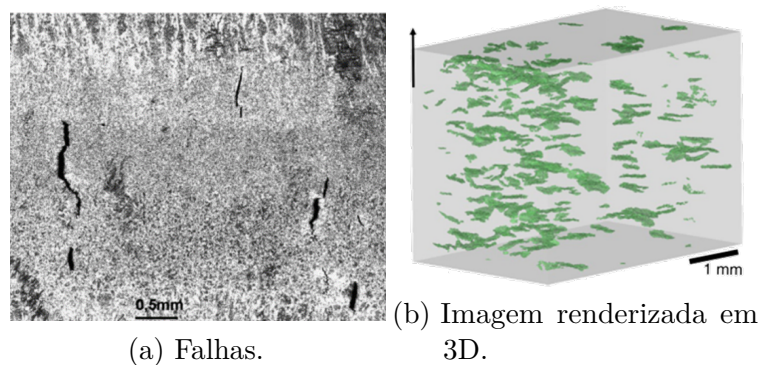
Em diversas áreas tem-se utilizado análises de imagens para discussão de resultados e obtenção de laudos. Isso porque essas imagens ilustram padrões que podemos inferir diversas características de uma condição em análise.

São exemplos de utilização de imagens para estudos e diagnóstico: determinação de cardiopatia e problemas oculares através de angiografia, caracterização mineralógicas de solos, rochas e afins por meio de petrografias, problemas de deterioração de equipamentos utilizados na indústria e análises metalúrgicas feitas por micrografias (ASMUSSEN *et al.*, 2015; FRANCUS, 1998; MEDEIROS *et al.*, 2010; PADILLA *et al.*, 2013; COSTA *et al.*, 2004; ZANA; KLEIN, 2001).

Asmussen *et al.* (2015) utilizaram a técnica de segmentação de imagem para petrografia, na qual há dificuldade de determinação de grãos, contornos de grãos de minerais e sua respectiva quantificação em micrografias. A técnica auxiliou detectar áreas similares, homogêneas delimitadas por sub-regiões permitindo a diferenciação dos grãos assim como determinar os contornos existentes. Costa *et al.* (2004) utilizaram a técnica de processamento de imagem para detectar o fenômeno de sensitização do aço inoxidável AISI 304L.

Padilla *et al.* (2013) correlacionaram dados de imagens de Raio-X de falhas existentes em cordões de solda subaquática, utilizaram processamento de imagem, parametrizaram as características de iluminação e ruído, utilizaram os artifícios de segmentação para processar imagens contendo as falhas, renderizaram a imagem em três dimensões para mostrar as falhas através da densidade facilitando o processo de inspeção de falhas em cordões de solda, imagens ilustradas na Figura 9.

Figura 9 – Falha em cordão de solda e imagem renderizada resultante do processamento de imagem (PADILLA *et al.*, 2013).



Na segmentação de imagem, tem-se a divisão da imagem em regiões de interesse. Nelas são analisados os *pixels* e a relação existente entre eles, seja por contraste, brilho, textura e posição. Desse modo, os *pixels* são agrupados de acordo com suas informações

mais comuns por meio de um limiar (do inglês *Thresholding* - TH) como nível, cor e textura (OTSU, 1975; WATT; POLICARPO, 1998; XU *et al.*, 2016; ZANA; KLEIN, 2001).

Por meio da limiarização das regiões de interesse é gerada uma imagem binária, onde a técnica é dividida em diversas metodologias, a saber, histogramas (global), intensidades e cores de *pixels*, detecção de descontinuidades, detecção de pontos, detecção de linhas e detecção de bordas (WATT; POLICARPO, 1998).

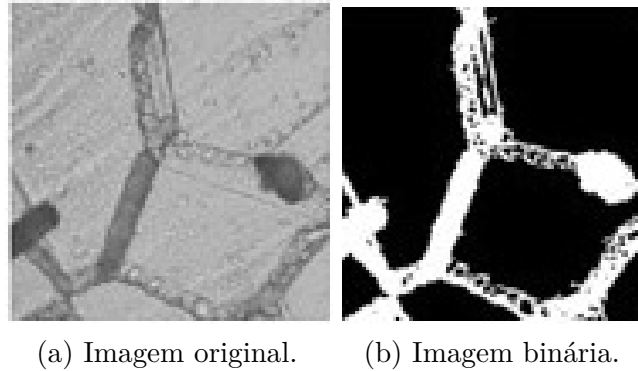
O princípio comum dos algoritmos de segmentação é a limiarização do nível de cinza (N_C) de *pixels*. Com abordagens diferentes, os métodos analisam o N_C de cada *pixel* (p_i) que compõe a imagem original, gerando um limiar de segmentação do nível de cinza (L_S). A partir do limiar L_S a limiarização substitui o p_i por um novo *pixel* (p_{bin}) com valor 0 ou 1, dado por:

$$p_{bin} = \begin{cases} 1 \rightarrow N_C(p_i) > L_S \\ 0 \rightarrow N_C(p_i) < L_S \end{cases}, \quad (2.2)$$

produzindo como resultado uma imagem binária.

A Figura 10a e a Figura 10b ilustram respectivamente a imagem original e o resultado após aplicação do algoritmo para detecção dos *pixels* referentes a área sensitizada no contorno de grão.

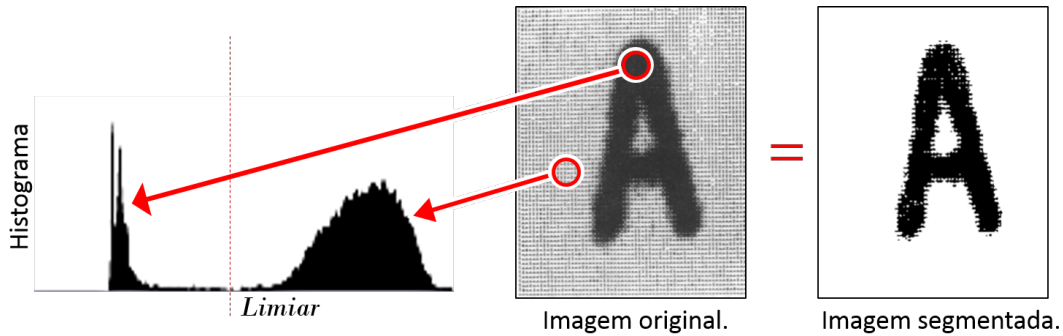
Figura 10 – Recorte da micrografia do aço AISI 304L sensitizado, DoS *Ditch*.



A escolha da técnica depende de fatores como aplicação, praticidade de implementação, usabilidade, desempenho e simplicidade. Duas metodologias destacam-se por essas características, a saber, segmentação global proposto por Otsu (1975) e segmentação de reconhecimento morfológico proposto por Zana e Klein (2001).

Na segmentação global de imagens em escala cinza, os *pixels* são analisados pelo nível de cinza por meio de um histograma. Dessa maneira, determina-se o limiar, a partir do qual é gerada uma imagem binária, como ilustrado na Figura 11 (OTSU, 1975; WATT; POLICARPO, 1998).

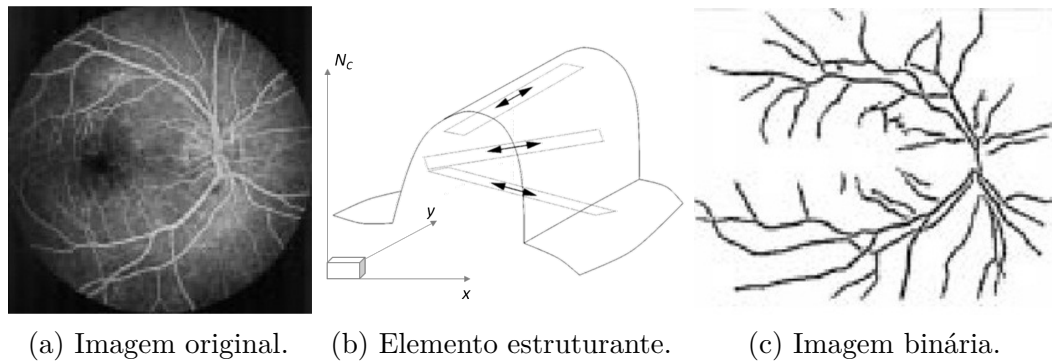
Figura 11 – Histograma do nível de *pixels* e segmentação de imagem. Adaptado de Otsu (1975).



O algoritmo de segmentação global de imagem proposto por Otsu (1975) gera um histograma de nível de cinza e a partir da busca automática por um limiar subótimo são filtrados os *pixels* abaixo deste limiar produzindo uma imagem B_I .

Zana e Klein (2001) utilizaram um algoritmo especializado, baseado em Morfologia Matemática, para a segmentação de imagens de exames médicos de vasos sanguíneos da retina, a exemplo ilustrada na Figura 12a.

Figura 12 – Segmentação de retinografia (ZANA; KLEIN, 2001).



Este algoritmo combina a limiarização por nível de cinza (N_C) e o reconhecimento morfológico de tamanho (λ) e ângulo (θ) do elemento estruturante, no intervalo fechado de $[0^\circ, 179^\circ]$ do plano (xy) , cujas características estão ilustradas na Figura 12b.

A Figura 12c ilustra o resultado do algoritmo que combina a filtragem e a segmentação de imagens utilizando padrões de elementos filamentosos em várias direções, cuja base segue a morfologia de vasos sanguíneos como se observa na imagem original na Figura 12a. As propriedades morfológicas analisadas na retinografia são linearidade, comprimento, curvatura, brilho e nível de cinza. O procedimento segue o passo a passo: reconhecer o objeto da imagem, marcar as morfologias de objetos padrão, registrar o padrão e reconstruir as imagens com objetos marcados e sem os elementos filtrados.

3 Materiais e Métodos

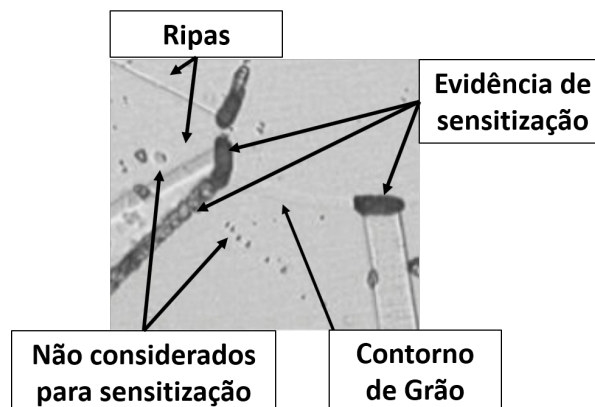
Observado ser recorrente a utilização de aços inoxidáveis austeníticos na indústria de combustíveis e biocombustíveis, foi adquirido um banco de dados de amostras dos aços AISI 304 e AISI 316 por concessão do Laboratório de Engenharia de Soldagem (ENGESOLDA) da Universidade Federal do Ceará.

O banco de dados contém registros microestruturais e resultados de DoS por ensaios de corrosão DL EPR. As micrografias pertencentes a este banco de dados foram utilizadas para a estimativa do DoS por contagem de *pixels* das imagens binárias geradas por meio de dois algoritmos de segmentação de imagem, cujos resultados foram avaliados por análise de desempenho e por curvas ROC (do inglês, *Receiver Operating Characteristic* comparados às normas ISO 12732 e ASTM A-262

3.1 Segmentação de Imagens para Estimativa DoS

Os algoritmos foram utilizados como ferramenta intermediária para estimativa do DoS por processamento de micrografias. A finalidade destes algoritmos é gerar uma imagem binária (B_I) a partir da segmentação de uma imagem original, contendo os elementos de imagem relacionados à sensitização por carbonetos de cromo, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Micrografia com evidências de sensitização em contornos de grãos.



Considerando as características do nível de sensitização evidenciadas em micrografias, denominadas de *Step*, *Dual* e *Ditch*, registradas por microscopia ótica, optou-se por um algoritmo de segmentação global (OTSU, 1975) e por um algoritmo de segmentação com reconhecimento morfológico (ZANA; KLEIN, 2001).

O primeiro é comum na maioria de programas de manipulação de imagens e não possui parâmetros de ajustes. O segundo é mais especializado, depende de características

da imagem processada, como comprimento e espessura dos contornos de grão e *ditches*. No entanto, esse parâmetro pode ser determinado com o conhecimento prévio do nível de ampliação utilizado na captura das micrografias. Além disso, ambos os métodos de segmentação são baseados em operações presentes em muitos programas de processamento de imagens, inclusive gratuitos como o Image J.

O objetivo de estimar o DoS por meio da segmentação de imagens está fundamentado na relação entre a área sensitizada (A_S) e área total (A_T) estimada a partir da imagem B_I , na qual convencionamos $p_{bin} = 1$ para os elementos de sensitização presentes na imagem B_I . A área A_T é obtida pela contagem de todos os *pixels* da imagem e a área A_S é obtida por

$$A_S = \#\{p_{bin} | p_{bin} = 1\} \quad (3.1)$$

em que $\#\{\cdot\}$ expressa a cardinalidade do conjunto de *pixels*, tal que $p_{bin} = 1$.

Denominamos o DoS estimado por imagem (DoS_E) o valor resultante da proporção

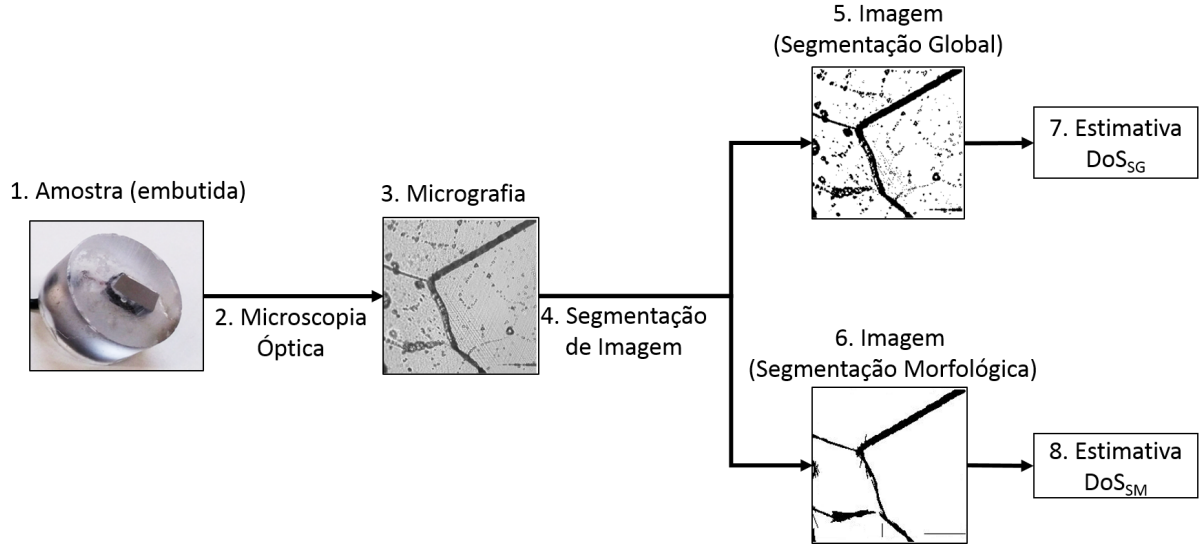
$$\text{DoS}_E = \frac{A_S}{A_T} \quad (3.2)$$

cujo resultado é um índice no intervalo $[0,1]$, que está relacionado aos elementos de sensitização observados nas imagens B_I obtidas pela segmentação das micrografias.

Denominamos DoS_{SG} os resultados DoS_E obtidos pela contagem de *pixels* da imagem B_I gerada pelo algoritmo segmentação global de [Otsu \(1975\)](#). Denominados DoS_{SM} os resultados DoS_E obtidos pela contagem de *pixels* da imagem B_I gerada pelo algoritmo de segmentação morfológica de [Zana e Klein \(2001\)](#), enquanto os valores DoS obtidos pelo ensaio de corrosão DL EPR denominamos DoS_{ISO} .

3.2 Estimativa do DoS

O fluxograma ilustrado na Figura 14 elucida o método de obtenção das estimativas do DoS_{SG} e do DoS_{SM} . A partir de uma amostra tratada termicamente e embutida (1), por meio de microscopia óptica (2), as micrografias são registradas (3), que pelo algoritmo de segmentação global (5) e morfológica (6) são obtidas as imagens binárias, destas imagens são geradas as estimativas do DoS_{SG} (7) e do DoS_{SM} (8).

Figura 14 – Procedimento para a obtenção da estimativa do DoS_{SG} e do DoS_{SM} .

3.3 Avaliação de Desempenho da Estimativa DoS por Segmentação de Imagens

Utilizamos a correlação linear de Pearson, definida na Equação 3.3 para verificar a relação entre os resultados estimados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} com os valores padrões DoS_{ISO} .

$$R = \frac{\sum_{n=0}^N (x_n - x_{med})(y_n - y_{med})}{\sqrt{\left[\sum_{n=0}^N (x_n - x_{med})^2\right] \left[\sum_{n=0}^N (y_n - y_{med})^2\right]}} \quad (3.3)$$

em que x_n e y_n correspondem aos valores de DoS_{SG} ou DoS_{SM} e os valores de DoS_{ISO} , respectivamente. x_{med} e y_{med} são os valores médios de x e de y .

O coeficiente de correlação R fornece uma indicação do quanto o comportamento da estimativa por imagem está relacionado à estimativa da sensibilidade por um método eletroquímico. Os índices gerados pelo DoS_{SG} e pelo DoS_{SM} estão no mesmo intervalo do DoS_{ISO} , contudo a escala de amplitude não possui a mesma correspondência. Portanto, não é considerado o coeficiente de ajuste R^2 nesta avaliação.

Outra forma de avaliação do desempenho da estimação do DoS por imagens é realizada comparando o DoS_{SG} e o DoS_{SM} com os valores padrão DoS_{ISO} por meio da análise por matriz de confusão, exemplificada na Tabela 2.

Tabela 2 – Estrutura da Matriz de Confusão.

		DoS _E (Predição de Classe)		
		<i>Step</i>	<i>Dual</i>	<i>Ditch</i>
DoS _{ISO} (Classe Real)	<i>Step</i>	Previsto <i>Step</i> Real <i>Step</i>	Previsto <i>Dual</i> Real <i>Step</i>	Previsto <i>Ditch</i> Real <i>Step</i>
	<i>Dual</i>	Previsto <i>Step</i> Real <i>Dual</i>	Previsto <i>Dual</i> Real <i>Dual</i>	Previsto <i>Ditch</i> Real <i>Dual</i>
	<i>Ditch</i>	Previsto <i>Step</i> Real <i>Ditch</i>	Previsto <i>Dual</i> Real <i>Ditch</i>	Previsto <i>Ditch</i> Real <i>Ditch</i>

Os dados estão agrupados em classes, padronizadas como *Step*, *Dual* e *Ditch*. Nesta matriz são confrontados dados preditos pelos algoritmos (DoS_{SG} e DoS_{SM}) com os dados de referência obtidos pelo ensaio DL EPR (DoS_{ISO}). Neste trabalho a classificação é realizada por um processo empírico de determinação subótima dos limiares, já que a quantidade de dados não favorece a aplicação de um algoritmo de aprendizagem de máquina.

Convencionamos que a classe estimada é condição positiva (P) e a classe não estimada é a condição negativa (N), enquanto a ocorrência da condição (positiva ou negativa) é predição verdadeira e a não ocorrência de uma condição (positiva ou negativa) é predição falsa, sendo gerado os seguintes valores preditivos:

- Verdadeiros Positivos (VP): Número de verdadeiras predições da ocorrência de uma classe.
- Falsos Positivos (FP): Número de falsas predições da ocorrência de uma classe.
- Verdadeiros Negativos (VN): Número de verdadeiras predições da não ocorrência de uma classe.
- Falsos Negativos (FN): Número de falsas predições da não ocorrência de uma classe.

As classes são analisadas individualmente, a fim de verificar a robustez do algoritmo em estimar a sensitização dos aços analisados em níveis *Step*, *Dual* ou *Ditch*. Esta análise é quantificada pelas medidas de desempenho: sensibilidade (S_{ENS}), especificidade (E_{SPE}), acurácia (A_C) e *F-score* (F₁).

Sensitividade (S_{ENS}): Mensura a proporção das predições da ocorrência de uma classe estimada pelo algoritmo. Resultando em:

$$S_{ENS} = \frac{VP}{P}. \quad (3.4)$$

Especificidade (E_{SPE}): Mensura a proporção das predições de não ocorrência de uma classe estimada pelo algoritmo. Resultando em:

$$E_{SPE} = \frac{VN}{N}. \quad (3.5)$$

Acurácia (A_C): Mensura a proporção das predições de ocorrências e não ocorrências de uma classe considerando todas as predições. Resultando em:

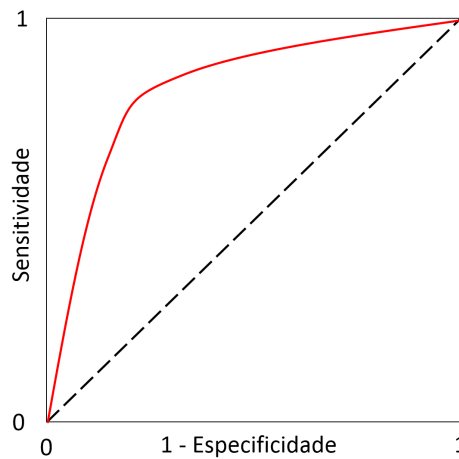
$$A_C = \frac{VP + VN}{P + N}. \quad (3.6)$$

F-score (F_1): Retorna a média ponderada entre P_C e S_{ENS} , resultando em um índice dentro do intervalo $[0;1]$. Melhor desempenho em 1 e pior desempenho em 0. Resultando em:

$$F_1 = \frac{2VP}{2VP + FP + FN}. \quad (3.7)$$

Somaram-se a esses resultados, a análise de desempenho dos algoritmos por meio das curvas ROC (do inglês, *Receiver Operating Characteristic*), como ilustrada na Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de curva ROC.



Os dados são organizados para ratificar o desempenho dos métodos em classificar uma amostra como sensitizada ou não sensitizada. As curvas ROC de melhor desempenho apresentam-se distantes da diagonal de referência. Quantifica-se a robustez do método por meio do cálculo da área sob a curva.

3.4 Descrição do Banco de Dados

Nesta Seção estão descritas as características do banco de dados, cedido pelo ENGESOLDA, utilizado para estimativa de DoS por segmentação de imagens, identificando-se quais ligas metálicas compõem este banco de dados, os tratamentos térmicos, as micrografias e resultados DoS_{ISO} .

3.4.1 Composição Química dos Aços

Os aços AISI 304 e AISI 316 foram retirados de componentes utilizados tipicamente em equipamentos da indústria petroquímica e de biocombustíveis, tais componentes referenciados como flanges e joelhos de conexões. A composição química típica desses aços está descrita na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química nominal (%p) dos aços AISI 304 e AISI 316.

Liga	C ¹	Cr	Ni	Mn	Mo	N ²
AISI 304	0,08	18,00	8 – 12	1,50	-	0,03
AISI 316	0,08	16 - 18	10 – 14	1,50	2 - 3	0,03

¹Máximo teor de carbono.

²Máximo teor de nitrogênio.

3.4.2 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos de envelhecimento utilizados para obtenção do banco de dados desta pesquisa estão listados na Tabela 4, que discrimina a temperatura e o tempo empregados, assim como os aços em seus respectivos tratamentos.

Tabela 4 – Tratamentos térmicos de envelhecimento, em que {-} indica os tratamentos não utilizados.

Temperatura (°C)	Tempo (horas)					
	1	5	10	50	100	200
400	304/316	304/316	-	316	-	-
500	-	-	-	-	304	-
600	-	304	-	-	304	304
700	-	304/316	304/316	304/316	304/316	304/316

A temperatura máxima utilizada foi de 700°C para evitar a cura (*healing*), que é difusão do Cr na matriz dos grãos e que poderia causar as discrepâncias entre a estimativa do

DoS por análise microestrutural e pelo ensaio de corrosão (SILVA *et al.*, 2011; FRANGINI; CRISTOFARO, 2003; BARBOSA *et al.*, 2012; TAVARES *et al.*, 2003).

3.4.3 Características Microestruturais e Resultados DoS_{ISO}

Os ensaios de corrosão por DL EPR foram realizados de acordo com as recomendações da norma ISO 12732 (2009). Uma célula de três eletrodos foi utilizada, formada por um eletrodo de trabalho (amostra do aço analisado), um contra eletrodo (Platina) e um eletrodo de referência (Prata/Cloreto de Prata). A solução eletrolítica utilizada é composta de 0,50M H₂SO₄ + 0,01M KSCN (JIANG *et al.*, 2016; MAJIDI; STREICHER, 1984; TERADA *et al.*, 2008).

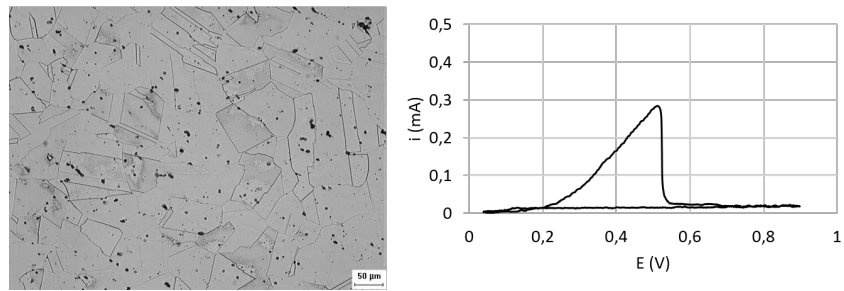
O procedimento metalográfico foi executado de acordo com a norma ASTM A-262. Para a preparação da superfície das amostras foram utilizadas lixas para aço (grana 80, 100, 200, 300, 600 e 1200) e polidas com diamante sintético (3, 2 e 1 micra) em lixadeiras e politrizes manuais de bancada.

A revelação microestrutural foi realizada com ataque eletroquímico por meio dos procedimentos recomendados pela norma ASTM A-262. Utilizou-se como reagente o ácido oxálico (10 gramas de ácido para 100 mililitros de água) e 6 volts em corrente contínua (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015; VOORT *et al.*, 2004).

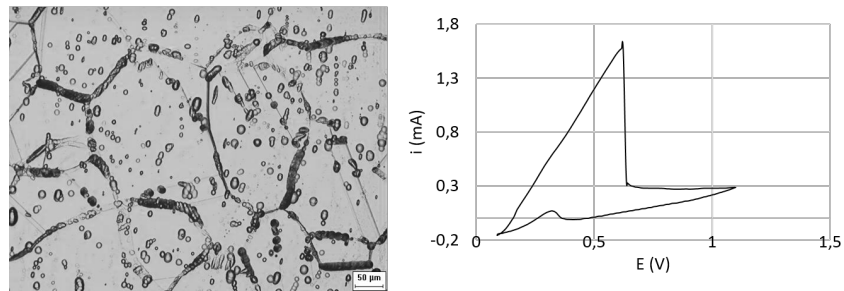
As micrografias foram registradas com aumento de 200x e 500x, com dimensão de 640 x 479 *pixels*, cujo o banco de dados contem um registro micrográfico para cada aumento e amostra. Os aumentos foram escolhidos de acordo com as recomendações da norma ASTM A-262 para a estimativa do DoS.

A Figura 16 e a Figura 17 ilustram as microestruturas e os respectivos gráficos dos ensaios DL EPR com as estimativas do DoS_{ISO} – *Step*, DoS_{ISO} – *Dual* e DoS_{ISO} – *Ditch*. Esses resultados são apenas parte das amostras do banco de dados cedido pelo ENGESOLDA utilizado nesta pesquisa.

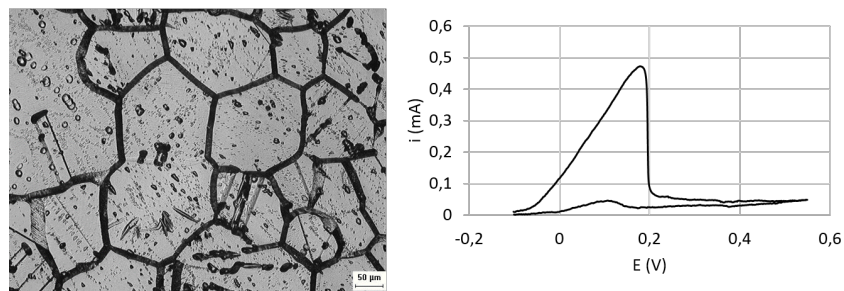
Figura 16 – Microestrutura e resultados do ensaio de corrosão do aço AISI 304 retirados do banco de dados cedido pelo ENGESOLDA.



(a) AISI 304 [$\text{DoS}_{ISO} = 0,0000$].

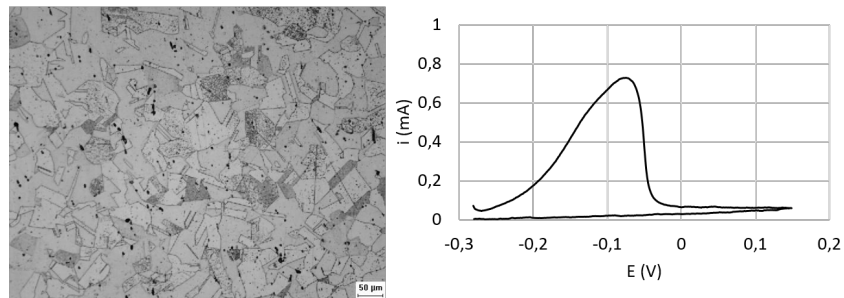


(b) AISI 304 [$\text{DoS}_{ISO} = 0,0273$].

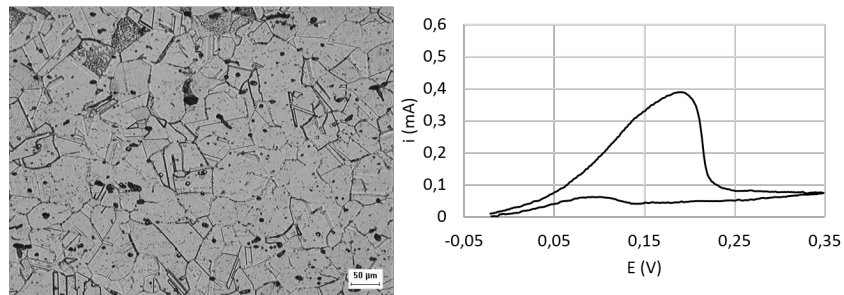


(c) AISI 304 [$\text{DoS}_{ISO} = 0,0607$].

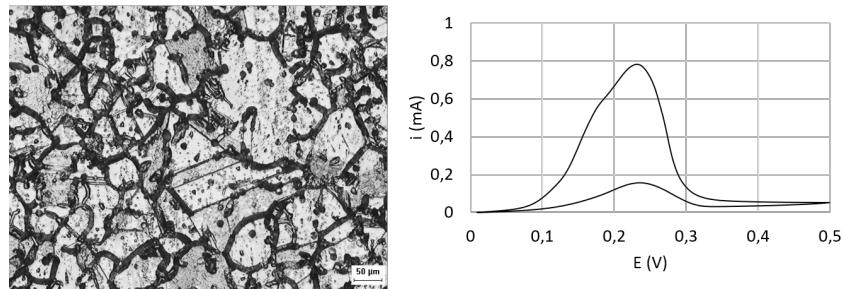
Figura 17 – Microestrutura e resultados do ensaio de corrosão do AISI 316 retirados do banco de dados cedido pelo ENGESOLDA.



(a) AISI 316 [DoS = 0,000].



(b) AISI 316 [DoS = 0,0491].



(c) AISI 316 [DoS = 0,1758].

A Tabela 5 lista os valores do DoS_{ISO} dos aços AISI 304 e AISI 316 cuja classificação segue os limiares de classes estabelecidos pela norma ISO 12732. Estes serão os valores de referência a serem comparados com os valores do DoS_{SG} e DoS_{SM} .

Tabela 5 – Valores do DoS_{ISO} do banco de dados cedido pelo ENGESOLDA e classificados por meio da norma ISO 12732.

AISI 304		AISI 316	
<i>Step</i>	0,0000	<i>Step</i>	0,0000
<i>Step</i>	0,0000	<i>Step</i>	0,0000
<i>Dual</i>	0,0198	<i>Step</i>	0,0000
<i>Dual</i>	0,0219	<i>Dual</i>	0,0159
<i>Dual</i>	0,0237	<i>Dual</i>	0,0167
<i>Dual</i>	0,0312	<i>Dual</i>	0,0476
<i>Ditch</i>	0,0607	<i>Dual</i>	0,0491
<i>Ditch</i>	0,0759	<i>Ditch</i>	0,0790
<i>Ditch</i>	0,0773	<i>Ditch</i>	0,1077
<i>Ditch</i>	0,0802	<i>Ditch</i>	0,1126
<i>Ditch</i>	0,1411	<i>Ditch</i>	0,1758
-	-	<i>Ditch</i>	0,4351

A Tabela 6 lista as amostras dos aços AISI 304 e AISI 316, os períodos e as temperaturas do tratamento térmico de envelhecimento, com as respectivas estimativas *Step*, *Dual* e *Ditch* padronizadas pela norma ASTM A-262.

Tabela 6 – Classificação das amostras seguindo os padrões da norma ASTM A-262.

AISI	Amostras	Temperatura (°C)	Tempo (h)	DoS_{ASTM}^1
304	1-3	700	200, 200, 10	<i>Ditch</i>
	4-7	600, 700, 600, 600,	100, 50, 200, 5,	<i>Dual</i>
	8-11	500, 700, 400, 400	100, 5, 1, 5	<i>Step</i>
316	12-14	700, 700, 500	100, 200, 1,	<i>Ditch</i>
	15-19	700	10, 50, 100, 100, 200,	<i>Dual</i>
	20-23	400	1, 5, 50, 5	<i>Step</i>

¹Estimativa do DoS segundo a norma ASTM A-262.

4 Resultados e Discussões

Este capítulo descreve os resultados de correlação e de desempenho das estimativas do DoS_{SG} e do DoS_{SM} resultantes da contagem de *pixels* de imagens binárias (B_I) obtidas por algoritmos de segmentação de imagem, ambos contrapostos às estimativas padronizadas e extraídas do banco de dados cedido pelo ENGESOLDA.

Os resultados dos ensaios de corrosão estão classificados com base na norma ISO 12732, que denominados DoS_{ISO} e as evidências microestruturais de sensitização, estão classificadas com base na norma ASTM A-262, denominamos DoS_{ASTM} .

4.1 Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} .

Os valores de estimativa do DoS_{SG} e do DoS_{SM} foram organizados na Tabela 7 relativos ao aço AISI 304 e na Tabela 8 relativos ao aço AISI 316. A segunda coluna enumera os valores de referência do DoS_{ISO} , reproduzidos da Tabela 5, na página 47.

Tabela 7 – Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} , em ordem crescente, comparados aos respectivos valores de referência do DoS_{ISO} para o aço AISI 304.

AISI 304		
DoS_{ISO}	DoS_{SG}	DoS_{SM}
0,0000	0,0716	0,0973
0,0000	0,0598	0,1000
0,0198	0,1101	0,1235
0,0219	0,1466	0,1142
0,0237	0,1882	0,1603
0,0312	0,0535	0,1049
0,0607	0,2815	0,1745
0,0759	0,1722	0,1329
0,0773	0,4353	0,2423
0,0802	0,1587	0,1220
0,1411	0,4157	0,2343

Tabela 8 – Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} , em ordem crescente, comparados aos respectivos valores de referência do DoS_{ISO} para o aço AISI 316.

AISI 316		
DoS_{ISO}	DoS_{SG}	DoS_{SM}
0,0000	0,1995	0,0933
0,0000	0,1454	0,0488
0,0000	0,1350	0,0392
0,0159	0,1638	0,0618
0,0167	0,1490	0,0586
0,0476	0,1222	0,0639
0,0491	0,1835	0,0488
0,0790	0,1607	0,0686
0,1077	0,3273	0,1672
0,1126	0,1615	0,0714
0,1758	0,4551	0,1871
0,4351	0,4469	0,2124

Para facilitar essa análise, a Figura 18 e a Figura 19 ilustram os valores do DoS_{ISO} , **em ordem crescente** e os resultados correspondentes do DoS_{SG} e do DoS_{SM} dos aços AISI 304 e AISI 316 respectivamente. As marcações *Step*, *Dual* e *Ditch* estão baseadas na ISO 12732 para os resultados DoS_{ISO} .

Figura 18 – Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} em função dos valores crescentes do DoS_{ISO} (AISI 304).

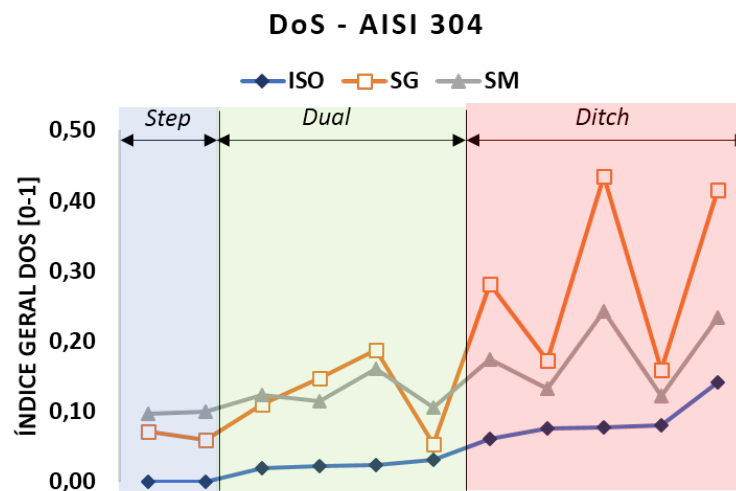
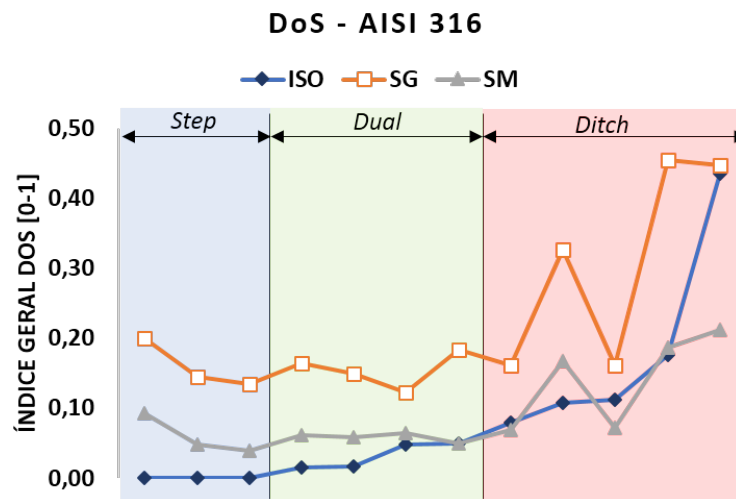
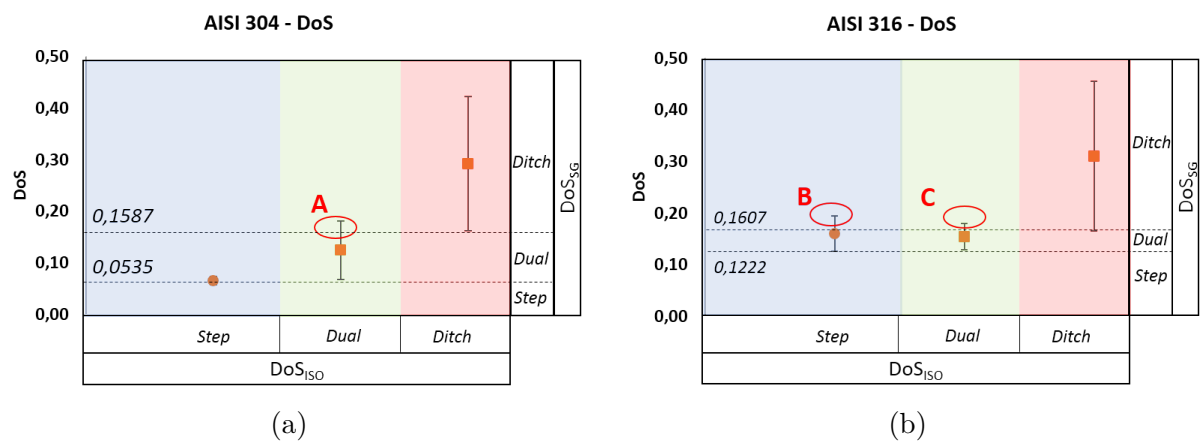


Figura 19 – Resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} em função dos valores crescentes do DoS_{ISO} (AISI 316).



A Figura 20 ilustra as medidas de dispersão dos resultados do DoS_{SG} , que estão agrupadas na horizontal segundo a classificação da norma ISO 12732. As linhas tracejadas demarcam os limiares do DoS_{SG} para que a sensitização das amostras seja estimada com maior desempenho. O método de interpretação destes gráficos está descrito no Apêndice C, página 81.

Figura 20 – Gráficos de dispersão dos resultados do DoS_{SG} para os aços AISI 304 e AISI 316.



A Figura 20a mostra os valores 0,0535 e 0,1587 como valores mínimos do DoS_{SG} , que adotamos para as amostras do aço AISI 304 serem estimadas respectivamente como *Dual* e *Ditch*.

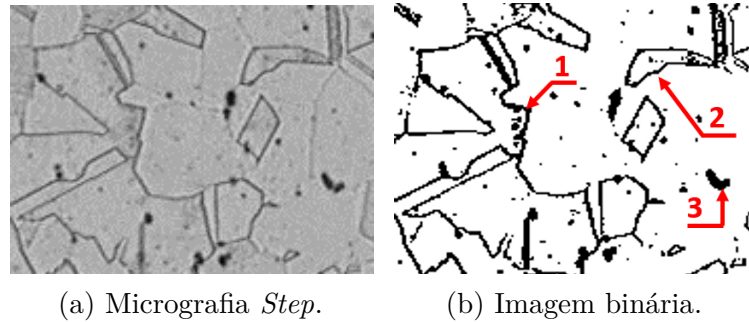
A Figura 20b mostra os valores 0,1222 e 0,1607 como valores mínimos do DoS_{SG} , que adotamos para as amostras do aço AISI 316 serem estimadas respectivamente como *Dual* e *Ditch*.

A marcação (A) na Figura 20a indica a ocorrência de amostras do aço AISI 304 classificadas como *Dual* pela norma ISO 12732, porém estão dentro da faixa *Ditch* pelos resultados do DoS_{SG} .

A Figura 20b, as marcações (B) e (C) indicam a ocorrência de amostras do aço AISI 316 classificadas como *Step* e *Dual* por meio da norma ISO 12732, porém estão dentro da faixa *Ditch* pelos resultados do DoS_{SG} .

A Figura 21a ilustra uma micrografia com $DoS_{ISO} - Step$ e a Figura 21b ilustra exemplos de contornos de grãos (1), maclas (2) e marcas de polimento (3), em destaque, gerados na imagem binária, que foi obtida pelo algoritmo de segmentação global. Essa ocorrência foi observada tanto para o aço AISI 304 quanto para o aço AISI 316.

Figura 21 – Exemplo de micrografia de amostra com o $DoS_{ISO} - Step$ e respectiva imagem binária gerada pelo algoritmo de segmentação global.

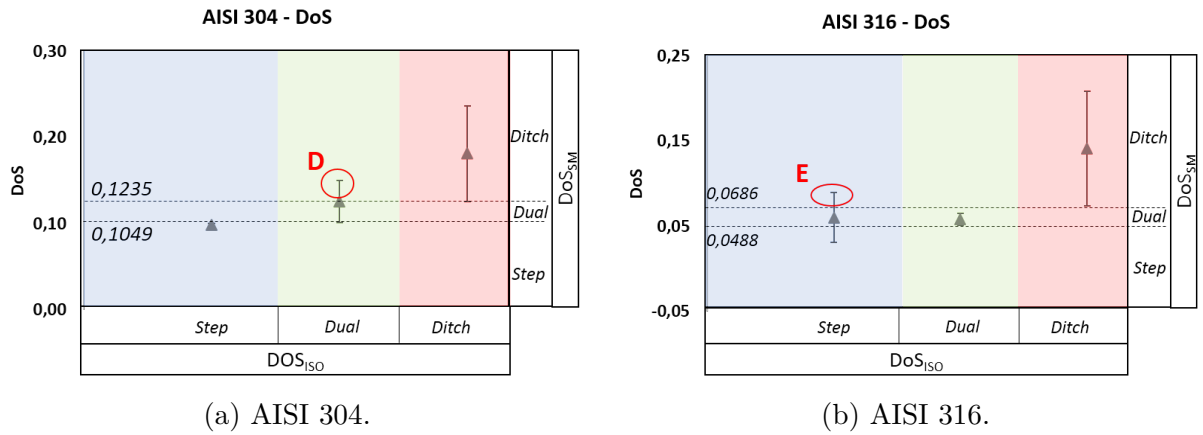


Verificamos que os elementos destacados representam 38 % da contagem dos *pixels* escuros da imagem binária, que são contabilizados como elementos de sensitização, contribuem para os elevados valores do DoS_{SG} e que gera o erro de classificação de amostras não sensitizadas como amostras sensitizadas.

O aparecimento dos contornos de grãos, maclas e marcas de polimento está relacionado à característica principal do algoritmo, que considera apenas a limiarização global por nível de *pixels* e não parametriza a morfologia dos elementos de uma imagem (OTSU, 1975).

A Figura 22 ilustra as medidas de dispersão dos resultados do DoS_{SM} , cujas amostras estão agrupadas na horizontal segundo a classificação da norma ISO 12732. As linhas tracejadas demarcam os limiares do DoS_{SM} para que a sensitização das amostras seja estimada com maior desempenho.

Figura 22 – Gráficos de dispersão dos resultados do DoS_{SM} para os aços AISI 304 e AISI 316.



A Figura 22a mostra os valores 0,1049 e 0,1235 como valores mínimos do DoS_{SM} , que adotamos para as amostras do aço AISI 304 serem estimadas respectivamente como *Dual* e *Ditch*.

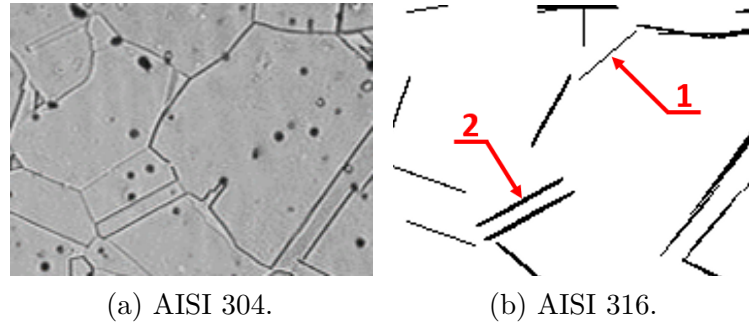
A Figura 22b mostra os valores 0,0488 e 0,0686 como valores mínimos do DoS_{SM} , que adotamos para as amostras do aço AISI 316 serem estimadas respectivamente como *Dual* e *Ditch*.

A marcação (D) na Figura 22a indica a ocorrência de amostras do aço AISI 304 classificadas como *Dual* por meio da norma ISO 12732, porém estão dentro da faixa *Ditch* pelos resultados do DoS_{SM} .

A Figura 22b, a marcação (E) indica a ocorrência de amostras do aço AISI 316 classificadas como *Step* através da norma ISO 12732, porém estão dentro da faixa *Ditch* pelos resultados do DoS_{SM} .

A Figura 23a ilustra uma micrografia com $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ e a Figura 21b ilustra os exemplos dos contornos de grãos (1) e maclas (2), em destaque, gerados na imagem binária, que foi obtida pelo algoritmo de segmentação morfológica. Essa ocorrência foi observada tanto para o aço AISI 304 quanto para o aço AISI 316.

Figura 23 – Exemplo de micrografia de amostra com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ e respectiva imagem binária gerada pelo algoritmo de segmentação morfológica.



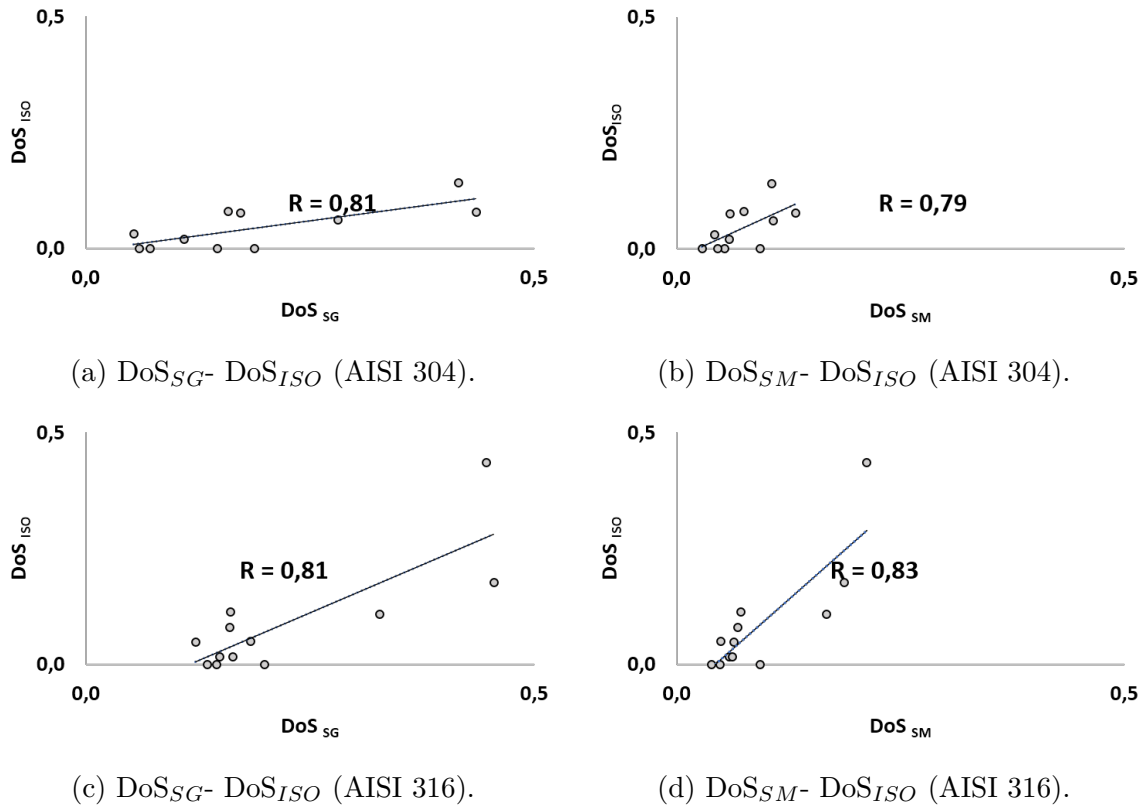
Os elementos em destaque, na Figura 23, representam 29 % da contagem dos *pixels* escuros, que são contabilizados como elementos de sensitização, como consequência, as amostras não sensitizadas apresentam os resultados do DoS_{SM} no mesmo nível de amostras sensitizadas.

A imagem binária obtida pelo algoritmo de segmentação morfológica apresentou menor quantidade de elementos não relativos à sensitização que as imagens binárias obtidas apenas por limiarização global porque a segmentação morfológica está fundamentada na limiarização global por nível de *pixels* e no reconhecimento morfológico (ZANA; KLEIN, 2001).

A elevada quantidade de *pixels* relativos aos contornos de grãos, maclas e marcas de polimento existentes nas imagens binárias geradas pelos algoritmos de segmentação produziu elevados resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} para amostras não sensitizadas, que torna ser necessário implementar procedimento de filtragem de contornos de grãos e maclas nos algoritmos de segmentação de imagem.

4.1.1 Análise de Correlação entre as Estimativas do DoS_{SG} e do DoS_{SM} ao Padrão DoS_{ISO}

Com objetivo de verificar a relação entre os resultados obtidos por meio dos algoritmos de segmentação de imagem (DoS_{SG} e DoS_{SM}) e os resultados obtidos através dos ensaios de corrosão (DoS_{ISO}) foi realizada análise de correlação, ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Análise de correlação entre os valores DoS_{SG} , DoS_{SM} e os valores DoS_{ISO} .

A Figura 24a ilustra a análise de correlação entre o DoS_{SG} e o DoS_{ISO} , enquanto a Figura 24b ilustra a análise de correlação entre o DoS_{SM} e o DoS_{ISO} , ambas as figuras para o aço AISI 304. Por meio da correlação obtiveram-se os coeficientes de correlação de Pearson $R=0,81$ (DoS_{SG}) e $R=0,79$ (DoS_{SM}).

A Figura 24c ilustra a análise de correlação entre o DoS_{SG} e o DoS_{ISO} , enquanto a Figura 24d ilustram a análise de correlação entre o DoS_{SM} e DoS_{ISO} , as ambas figuras para o aço AISI 316. Por meio da correlação obtiveram-se os coeficientes de correlação de Pearson $R=0,81$ (DoS_{SG}) e $R=0,83$ (DoS_{SM}).

Os coeficientes de correlação de Pearson obtidos mostraram que o DoS_{SG} e o DoS_{SM} apresentaram-se correlatos aos valores DoS_{ISO} em proporção direta. O melhor resultado de correlação foi obtido pelo DoS_{SM} do aço AISI 316.

4.1.2 Limiares entre os Valores do DoS_{SG} e do DoS_{SM} para Estimativa *Step*, *Dual* e *Ditch*.

Foram determinados limiares para estimativa *Step*, *Dual* e *Ditch* para o DoS_{SG} e para o DoS_{SM} . Os valores estão listados na Tabela 9 que foram obtidos por meio dos gráficos de dispersão da Figura 20, página 50 e da Figura 22, página 52, Também estão listados os limiares de referência utilizados pela norma ISO 12732.

Tabela 9 – Limiares do DoS_{ISO} , DoS_{SG} e DoS_{SM} para as estimativas *Step*, *Dual* e *Ditch*.

Modelos	Valor mínimo	Estimativa	Limiar (<i>Step-Dual</i>)	Estimativa	Limiar (<i>Dual-Ditch</i>)	Estimativa	Valor máximo
DoS_{SG} (AISI 304)	0	<i>Step</i>	0,0500	<i>Dual</i>	0,1500	<i>Ditch</i>	1
DoS_{SM} (AISI 304)	0		0,1040		0,1200		1
DoS_{SG} (AISI 316)	0		0,1200		0,1600		1
DoS_{SM} (AISI 316)	0		0,0488		0,0670		1
DoS_{ISO} (ISO 12732)	0		0,0100		0,0500		1

4.2 Análise de desempenho do DoS_{SG} e do DoS_{SM} por intermédio da Matriz de Confusão.

A metodologia de análise da matriz confusão foi utilizada para avaliar o desempenho do DoS_{SG} e do DoS_{SM} em gerar as estimativas de sensitização baseados no processamento digital de imagens binárias (B_I) geradas por algoritmos de segmentação global e por algoritmo de reconhecimento morfológico.

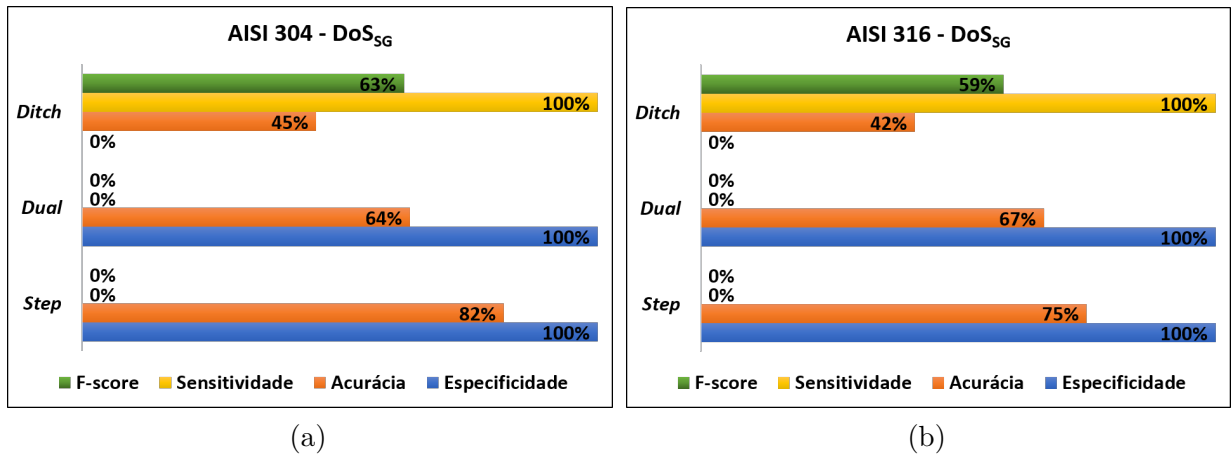
Os dados obtidos por DoS_{SG} e por DoS_{SM} foram comparados aos dados de referência DoS_{ISO} , cuja comparação foi realizada com base nos limiares da estimativa de sensitização dados pela norma ISO 12732 e limiares ajustados com base nos resultados obtidos por processamento de imagem.

Os resultados DoS_{SG} e DoS_{SM} foram comparados às estimativas de sensitização geradas por análise microestrutural com base na norma ASTM A-262, que denominamos DoS_{ASTM} .

4.2.1 Análise de desempenho do DoS_{SG} e do DoS_{SM} por intermédio dos limiares da norma ISO 12732.

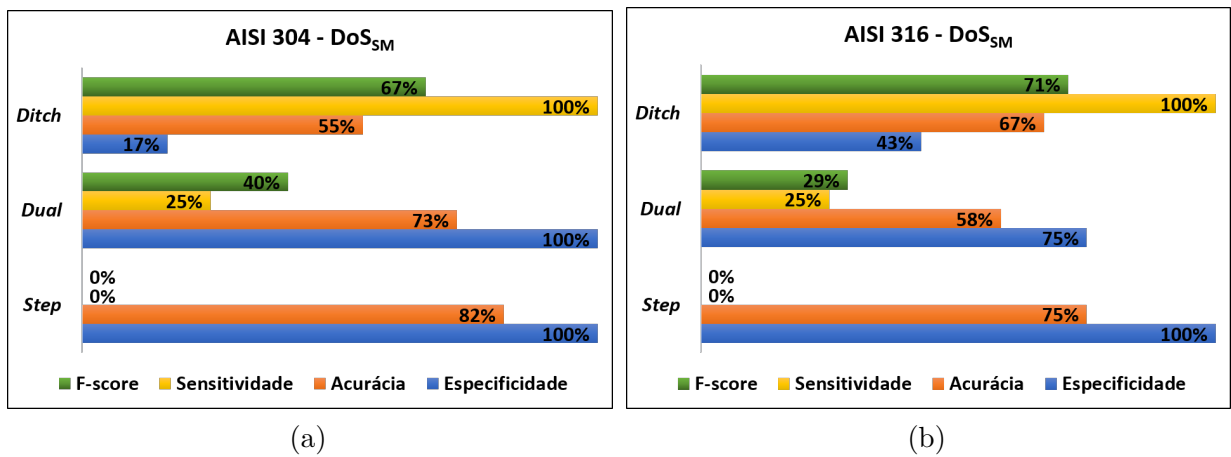
A Figura 25 mostra o desempenho do DoS_{SG} mediante os limiares padrão definidos pela norma ISO 12732 em análise do aço AISI 304 e AISI 316. Observa-se o baixo desempenho dado pela acurácia, especificidade e *F-score*, que reforça que esses limiares não devem ser utilizados.

Figura 25 – Desempenho do DoS_{SG} obtido por intermédio do limiar da norma ISO 12732 no aço AISI 304 e AISI 316.



Resultado semelhante foi observado para o DoS_{SM} , ilustrado na Figura 26. Observa-se o aumento nos valores de *F-score*, que mensura o desempenho geral dos algoritmos, entretanto, com valores abaixo de 80 %, que mostra não ser adequado utilizar os limiares definidos pela norma ISO 12732 para a estimativa do DoS_{SM} .

Figura 26 – Desempenho do DoS_{SM} obtido por intermédio do limiar da norma ISO 12732 no aço AISI 304 e AISI 316.

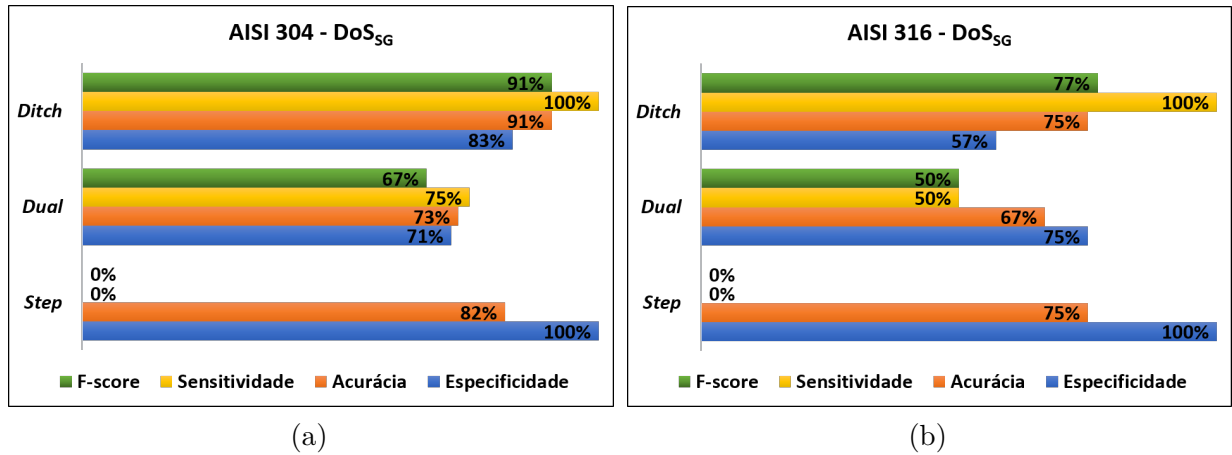


O DoS_{SG} e o DoS_{SM} apresentaram baixo desempenho na estimativa de sentização com a utilização dos limiares de classificação DoS definidos pela norma ISO 12732. Este resultado era esperado, pois os limiares definidos pela norma ISO 12732 são aplicados para ensaios de corrosão, enquanto os resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} apresentaram escala de valores diferentes.

4.2.2 Análise de desempenho do DoS_{SG} comparado ao DoS_{ISO}

A Figura 27 mostra o desempenho do DoS_{SG}, para os aços AISI 304 e AISI 316, como as utilização dos limiares descritos na Tabela 9 obtidos através dos gráficos de dispersão.

Figura 27 – Desempenho do DoS_{SG} obtido por intermédio dos limiares obtidos por análise de dispersão do aço AISI 304 e AISI 316.



O DoS_{SG} permitiu classificar corretamente as amostras com o DoS_{ISO} – *Ditch* nos dois aços analisados. As mostras com o DoS_{ISO} – *Step* foram classificadas como *Dual*, que resultou em 0 % de sensibilidade e 0 % de F-score. Esses erros de classificação contribuíram para menores acurácia e especificidade.

A Figura 27a mostra que o DoS_{SG} apresentou melhor desempenho para o aço AISI 304, com 91 % de F-score, enquanto no aço AISI 316, ilustrado na Figura 27b, apresentou 77 % de F-score.

A análise da matriz de confusão do DoS_{SG} do o aço AISI 304, descrita na Tabela 10, confirma a ocorrência de duas amostras com o DoS_{ISO} – *Step* classificadas como DoS_{SG}– *Dual* e uma amostra com o DoS_{ISO} – *Dual* classificada como DoS_{SG}– *Ditch*. Como resultado de sensibilidade, foi obtido 0 % para classe *Step*, 75 % para classe *Dual* e 100 % para classe *Ditch*.

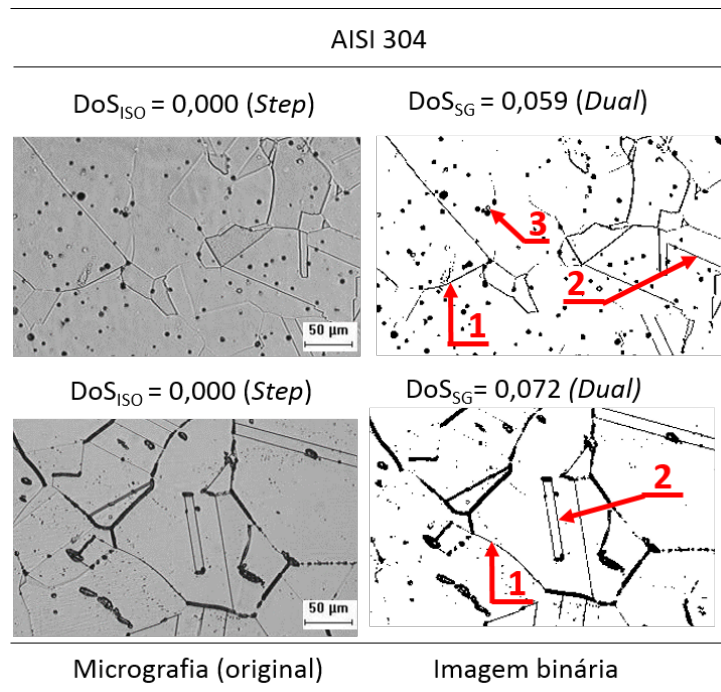
Tabela 10 – Matriz de Confusão do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ISO} para o aço AISI 304.

		Matriz de Confusão		
		DoS _{SG}		
DoS _{ISO}	Step	0	2	0
	Dual	0	3	1
	Ditch	0	0	5
		Step	Dual	Ditch

A Figura 28 ilustra as micrografias e as imagens binárias das amostras com o $DoS_{ISO} - Step$ do aço AISI 304 classificadas como $DoS_{SG} - Dual$. Em destaque, observam-se exemplos dos contornos de grãos (1), maclas (2) e marcas de polimento (3) que contribuíram para aumentar o resultado DoS_{SG} , devido à elevada quantidade de *pixels* presente nas imagens binárias.

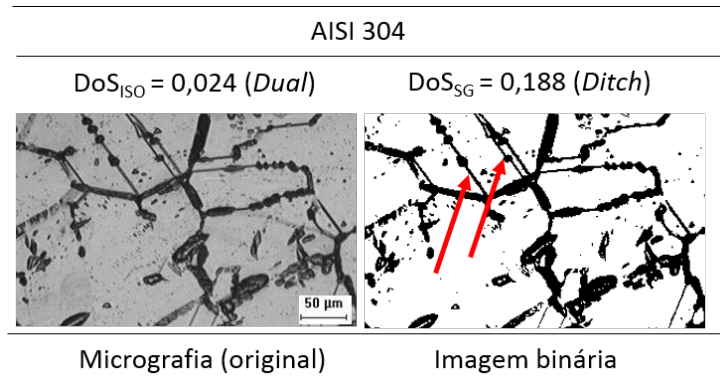
A segunda amostra, ilustrada na Figura 28, apresenta disparidade entre as classificações normatizadas pela ASTM A-262, que classifica essa amostra como *Dual*, e pela ISO 12732, que classifica essa amostra como *Step*. Entretanto, observamos que o DoS_{SG} classificou a amostra de acordo com a norma ASTM A-262.

Figura 28 – Amostras com o $DoS_{ISO} - Step$ do aço AISI 304 classificadas como *Dual* pelo DoS_{SG} .



A Figura 29 ilustra a micrografia e a imagem binária de uma amostra com o $DoS_{ISO} - Dual$ do aço AISI 304 classificada como *Ditch* pelo DoS_{SG} . A elevada quantidade de *pixels* reforçada pela ocorrência dos contornos de maclas, em destaque na imagem binária, contribuíram para elevar o resultado do DoS_{SG} , que gerou o erro da classificação.

Figura 29 – Amostra com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ do aço AISI 304 classificada como *Ditch* pelo DoS_{SG} .



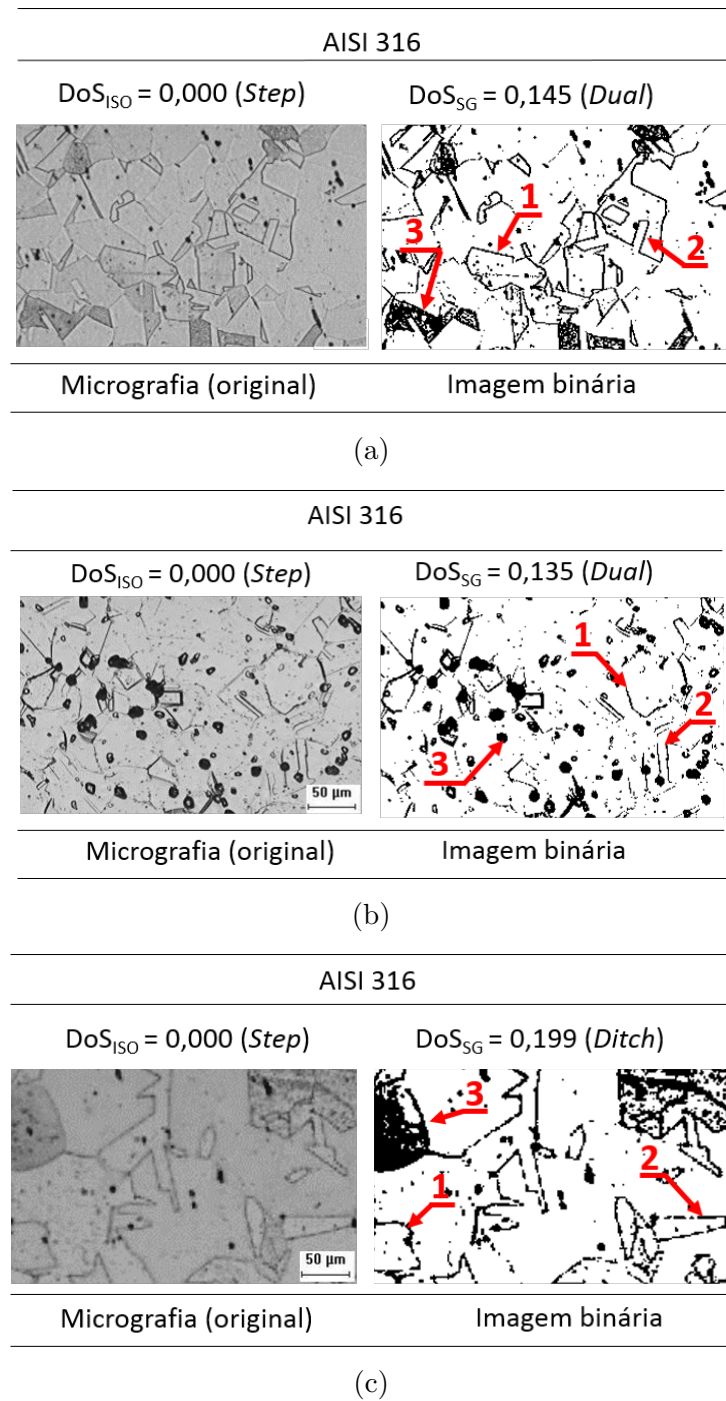
A análise da matriz de confusão do DoS_{SG} do aço AISI 316, descrita na Tabela 11, confirma a ocorrência de duas amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ classificadas como $\text{DoS}_{SG} - \text{Dual}$, uma amostra com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ classificada como $\text{DoS}_{SG} - \text{Ditch}$ e duas amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ classificadas como $\text{DoS}_{SG} - \text{Ditch}$. Como resultado, foi obtido 0 % de sensibilidade para classe *Step*, 50 % para classe *Dual* e 100 % para classe *Ditch*.

Tabela 11 – Matriz de Confusão do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ISO} para o aço AISI 316.

Matriz de Confusão				
		DoS_{SG}		
		<i>Step</i>	<i>Dual</i>	<i>Ditch</i>
DoS_{ISO}	<i>Step</i>	0	2	1
	<i>Dual</i>	0	2	2
	<i>Ditch</i>	0	0	5

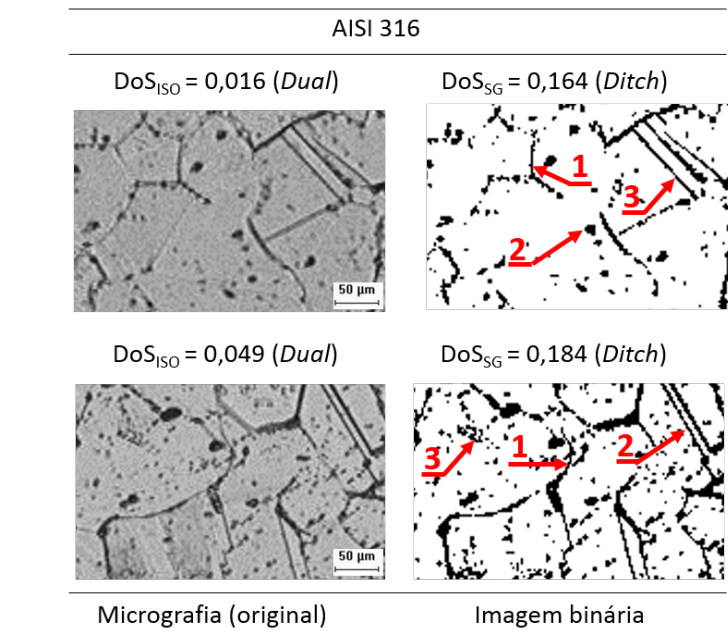
A Figura 30 ilustra as micrografias e as imagens binárias das amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ classificadas como *Dual* e *Ditch* pelo DoS_{SG} . Os elementos presentes nas imagens binárias, em destaque, contornos de grãos (1), maclas (2) e marcas de polimento (3) aumentaram a quantidade de *pixels*, que consequentemente elevaram o valor do DoS_{SG} , que gerou o erro da classificação.

Figura 30 – Amostras com o $DoS_{ISO} - Step$ do aço AISI 316 classificadas como (a,b) *Dual* e (c) *Ditch* pelo DoS_{SG} .



A Figura 31 ilustra as micrografias e as imagens binárias das amostras com o $DoS_{ISO} - Dual$ do aço AISI 316 que foram classificadas como *Ditch* pelo DoS_{SG} . Estas ilustrações mostram, em destaque, que as imagens binárias apresentaram quantidade elevada de *pixels* relativos aos contornos de grãos (1), maclas (2), marcas de polimento (3) que favoreceram a superestimativa do DoS_{SG} nestas amostras.

Figura 31 – Amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ do aço AISI 316 classificadas como *Ditch* pelo DoS_{SG} .

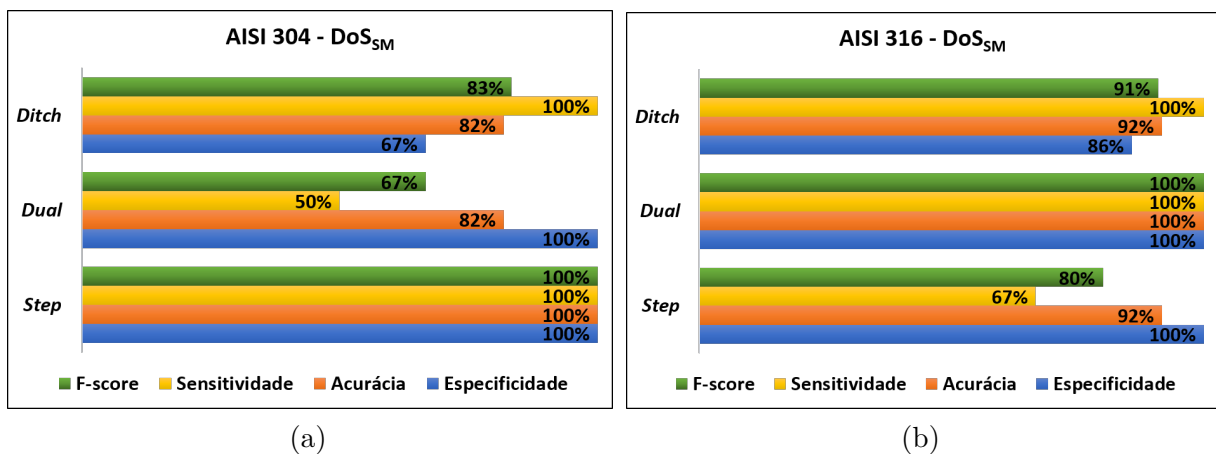


Com base nas estimativas padronizadas do DoS_{ISO} e nos resultados do desempenho do DoS_{SG} para o aço AISI 304 e AISI 316, verificamos que o DoS_{SG} apresentou o mesmo desempenho nos dois aços analisados.

4.2.3 Análise de desempenho do DoS_{SM} comparado ao DoS_{ISO}

A Figura 32 ilustra o desempenho do DoS_{SM} dos aços AISI 304 e AISI 316, com a utilização dos limiares descritos na Tabela 9. Verifica-se o aumento do desempenho comparado aos resultados obtidos pelo DoS_{SG} .

Figura 32 – Desempenho do DoS_{SM} obtido por intermédio dos limiares obtidos por análise de dispersão do aço AISI 304 e AISI 316.



A Figura 32a mostra que o DoS_{SM} do aço AISI 304 permitiu classificar corretamente todas amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ e o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Ditch}$, que resultou em 100 % de sensibilidade, classificou duas amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ como $\text{DoS}_{SM} - \text{Ditch}$, que resultou em 50 % de sensibilidade para esta classe e reduziu os valores de acurácia e $F\text{-score}$.

A Figura 32b mostra que o DoS_{SM} do aço AISI 316 permitiu classificar corretamente todas amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ e o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Ditch}$ e classificou uma amostra com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Step}$ como $\text{DoS}_{SM} - \text{Ditch}$.

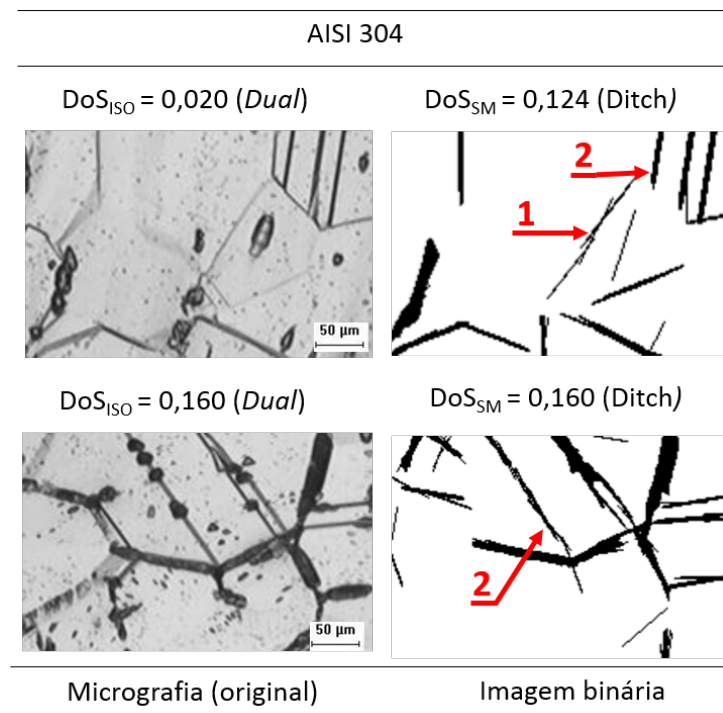
A análise da matriz de confusão do DoS_{SM} do aço AISI 304, descrita na Tabela 12, confirma a ocorrência de duas amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ classificadas como $\text{DoS}_{SM} - \text{Ditch}$. Como resultado, foi obtido 50 % de sensibilidade para a classe *Dual* devido às duas amostras classificadas como $\text{DoS}_{SM} - \text{Ditch}$ e 100 % de sensibilidade para as classes *Step* e *Ditch*.

Tabela 12 – Matriz de Confusão do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ISO} para o aço AISI 304.

Matriz de Confusão				
		DoS_{SM}		
		<i>Step</i>	<i>Dual</i>	<i>Ditch</i>
DoS_{ISO}	<i>Step</i>	2	0	0
	<i>Dual</i>	0	2	2
	<i>Ditch</i>	0	0	5

A Figura 33 ilustra as micrografias e as imagens binárias das amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - \text{Dual}$ do aço AISI 304 que foram classificadas como *Ditch* pelo DoS_{SM} , grifadas na Tabela 12. O elevado número de *pixels* justifica o erro nesta classificação, cuja quantidade foi influenciada pela existência dos contornos de grãos (1) e maclas (2) presentes na imagem binária destacados nesta ilustração.

Figura 33 – Amostras com o $\text{DoS}_{ISO} - Dual$ do aço AISI 304 classificadas como *Ditch* pelo DoS_{SM} .



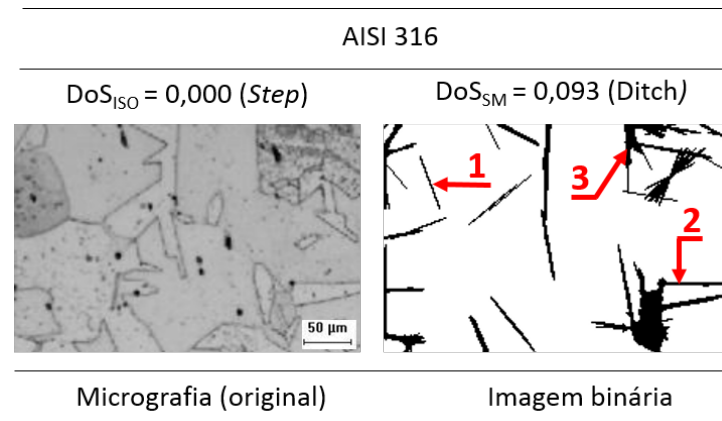
A análise da matriz de confusão do DoS_{SM} do aço AISI 316, descrita na Tabela 13, confirma a ocorrência de uma amostra com o $\text{DoS}_{ISO} - Step$ classificadas como $\text{DoS}_{SM} - Ditch$. Como resultado, foi obtido 67 % de sensibilidade para a classe *Step* devido a uma amostra classificada como *Ditch* e 100 % de sensibilidade para as classes *Dual* e *Ditch*.

Tabela 13 – Matriz de Confusão do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ISO} para o aço AISI 316.

Matriz de Confusão				
		DoS_{SM}		
		<i>Step</i>	<i>Dual</i>	<i>Ditch</i>
DoS_{ISO}	<i>Step</i>	2	0	1
	<i>Dual</i>	0	4	0
	<i>Ditch</i>	0	0	5

A Figura 34 apresenta a micrografia e a imagem binária de uma amostra *Step*, grifada na Tabela 13, que foi classificada como *Ditch* pelo DoS_{SM} , que é resultado do elevado número de *pixels* relativos aos contornos de grãos (1), maclas (2) e marcas de polimento (3) destacados na imagem binária. Este foi o único erro que impediu o resultado de 100 % de acerto em todas estimativas de sensibilidade para o DoS_{SM} .

Figura 34 – Amostra com o $\text{DoS}_{\text{ISO}} - \text{Step}$ do aço AISI 316 classificada como *Ditch* pelo DoS_{SM} .



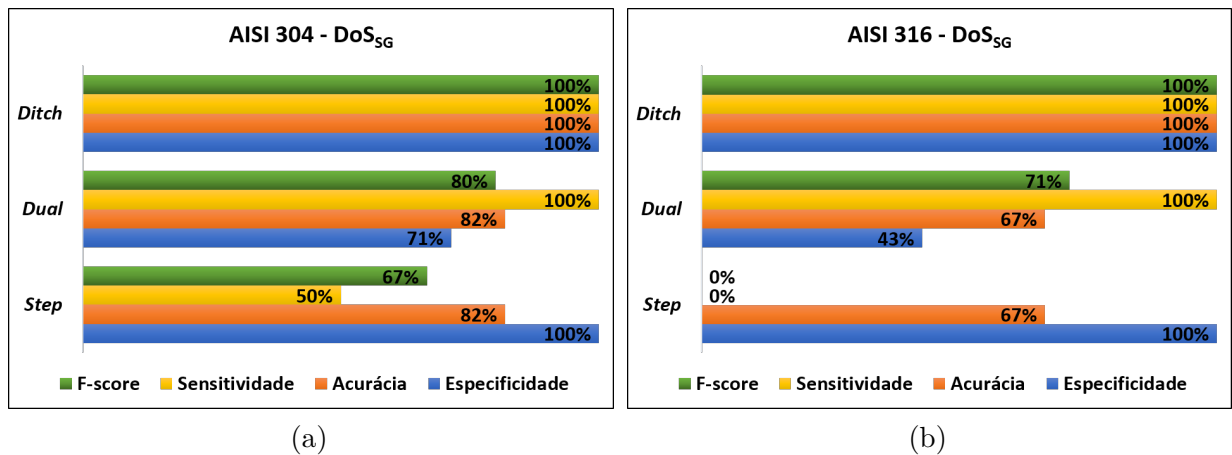
O DoS_{SM} exibiu melhor resultado que o DoS_{SG} , cujo desempenho foi reforçado pela classificação correta do $\text{DoS}_{\text{ISO}} - \text{Step}$. Como resultado, foi obtido 100 % de sensibilidade e especificidade para a classe *Step* do AISI 304.

O DoS_{SM} exibiu 100 % de sensibilidade para a classe *Ditch* nos dois aços analisados e uma amostra da classe *Dual* do aço AISI 304 foi classificada como *Ditch*. Acrescenta-se que todas as amostras que apresentaram precipitados nos contornos dos grãos foram classificadas como sensitizadas.

4.2.4 Análise de desempenho do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ASTM}

A Figura 35 ilustra o desempenho da classificação usando o DoS_{SG} estimado para os aços AISI 304 e AISI 316, comparado com a estimativa do DoS normatizada pela ASTM A-262 (método de estimativa por análise microestrutural que denominamos por DoS_{ASTM}).

Figura 35 – Desempenho do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ASTM} , em análise do aço AISI 304 e AISI 316.



A Tabela 14 mostra que o DoS_{SG} do aço AISI 304 permitiu classificar corretamente duas amostras com o $\text{DoS}_{ASTM-Step}$ e todas as amostras com o $\text{DoS}_{ASTM-Dual}$ e $\text{DoS}_{ASTM-Ditch}$, entretanto, duas amostras com o $\text{DoS}_{ASTM-Step}$ foram classificadas como $\text{DoS}_{SG-Dual}$. Como resultado, foi obtido 50 % de sensibilidade para a classe *Step* e 100 % de sensibilidade e especificidade para as classes *Dual* e *Ditch*.

Tabela 14 – Matriz de Confusão do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ASTM} para o aço AISI 304.

Matriz de Confusão				
		DoS_{SG}		
		<i>Step</i>	<i>Dual</i>	<i>Ditch</i>
DoS_{ASTM}	<i>Step</i>	2	2	0
	<i>Dual</i>	0	4	0
	<i>Ditch</i>	0	0	3

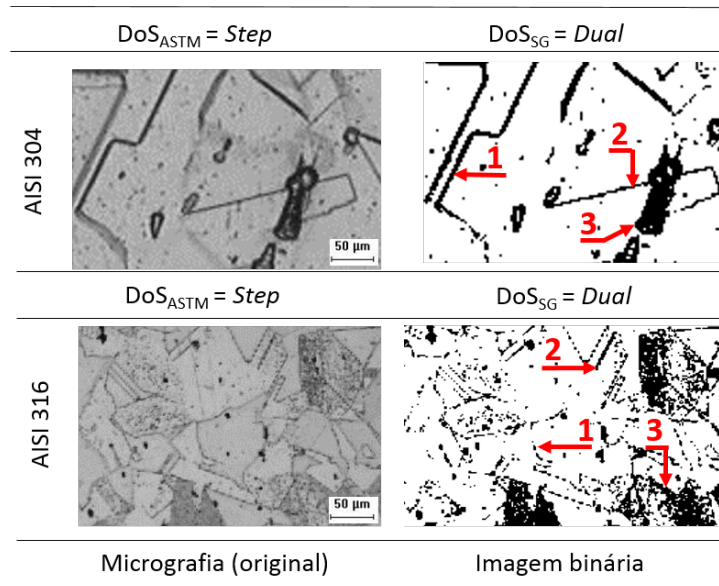
A Tabela 15 mostra que o DoS_{SG} permitiu classificar corretamente todas as amostras do aço AISI 316 com o $\text{DoS}_{ASTM-Dual}$ e com o $\text{DoS}_{ASTM-Ditch}$, entretanto, as amostras com o $\text{DoS}_{ASTM-Step}$ foram classificadas como $\text{DoS}_{SG-Dual}$. Como resultado, foi obtido 0 % de sensibilidade para classe *Step* e 100 % de sensibilidade e especificidade para as classes *Dual* e *Ditch*.

Tabela 15 – Matriz de Confusão do DoS_{SG} comparado ao padrão DoS_{ASTM} para o aço AISI 316.

Matriz de Confusão				
		DoS_{SG}		
		<i>Step</i>	<i>Dual</i>	<i>Ditch</i>
DoS_{ASTM}	<i>Step</i>	0	4	0
	<i>Dual</i>	0	5	0
	<i>Ditch</i>	0	0	3

O DoS_{SG} resultou em uma superestimativa do DoS de algumas amostras com o $\text{DoS}_{ASTM-Step}$, classificando-as como *Dual*. Isto ocorreu por que as imagens binárias apresentaram *pixels* de outros elementos não relacionados à sensitização, a saber contornos de grãos (1), maclas (2) e marcas de polimento (3). A Figura 36 ilustra exemplos desse resultado.

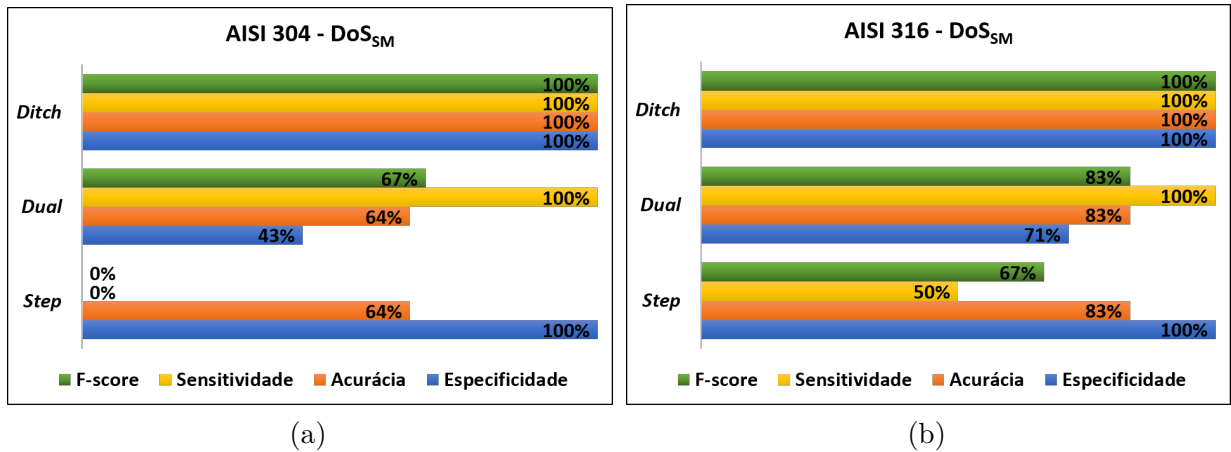
Figura 36 – Amostras com o DoS_{ASTM} – *Step* dos aços AISI 304 e AISI 316 classificadas como *Dual* pelo DoS_{SG} .



4.2.5 Análise de desempenho do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ASTM}

A Figura 37 ilustra o desempenho do DoS_{SM} dos aços AISI 304 e AISI 316, baseado na estimativa do DoS normatizada pela ASTM A-262. O DoS_{SM} permitiu classificar corretamente todas as amostras com a estimativa DoS_{ASTM} – *Dual* e DoS_{ASTM} – *Ditch*.

Figura 37 – Desempenho do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ASTM} , em análise do aço AISI 304 e AISI 316.



A Tabela 16 mostra que o DoS_{SM} permitiu classificar corretamente todas as amostras com o DoS_{ASTM} – *Dual* e com o DoS_{ASTM} – *Ditch*, porém as amostras com o DoS_{ASTM} – *Step* foram classificadas como DoS_{SM} – *Dual* no aço AISI 304. Como resultado, foi obtido 0 % de sensibilidade para a classe *Step* e 100 % de sensibilidade para as classes *Dual* e *Ditch*.

Tabela 16 – Matriz de Confusão do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ASTM} para o aço AISI 304.

Matriz de Confusão				
		DoS_{SM}		
		<i>Step</i>	<i>Dual</i>	<i>Ditch</i>
DoS_{ASTM}	<i>Step</i>	0	4	0
	<i>Dual</i>	0	4	0
	<i>Ditch</i>	0	0	3

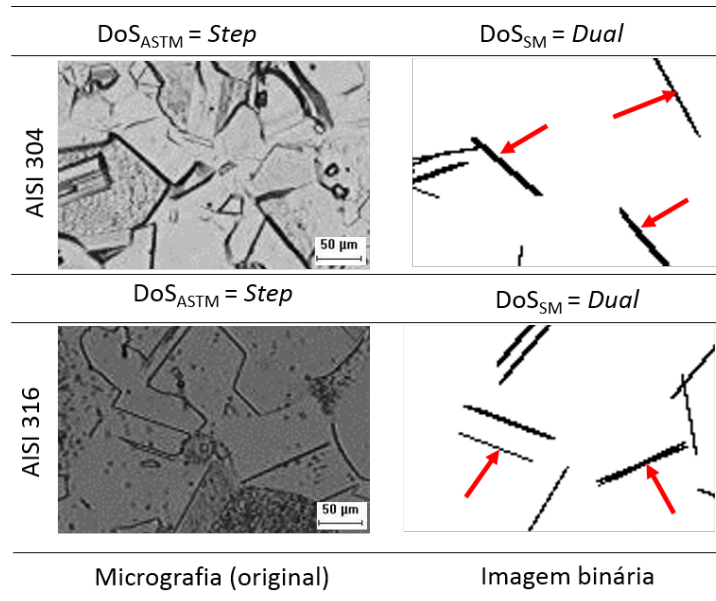
A Tabela 17 mostra que o DoS_{SM} permitiu classificar duas as amostras com o DoS_{ASTM} – *Step* como DoS_{SM} – *Dual* no aço AISI 316. Como resultado, foi obtido 0 % de sensibilidade para esta classe, entretanto todas as amostras sensitizadas e duas amostras com o DoS_{ASTM} – *Step* foram corretamente classificadas.

Tabela 17 – Matriz de Confusão do DoS_{SM} comparado ao padrão DoS_{ASTM} para o aço AISI 316.

Matriz de Confusão				
		DoS_{SM}		
		<i>Step</i>	<i>Dual</i>	<i>Ditch</i>
DoS_{ASTM}	<i>Step</i>	2	2	0
	<i>Dual</i>	0	5	0
	<i>Ditch</i>	0	0	3

O DoS_{SM} apresentou resultado semelhante ao obtido pelo DoS_{SG} ao utilizar a referência ASTM A-262. Houve uma superestimação da sensitização de amostras com o DoS_{ASTM} – *Step*, classificando-as como DoS_{SM} – *Dual*. Este resultado está relacionado à elevada quantidade de *pixels* relativos aos contornos de maclas, em destaque, existentes na imagem binária ilustrada na Figura 38.

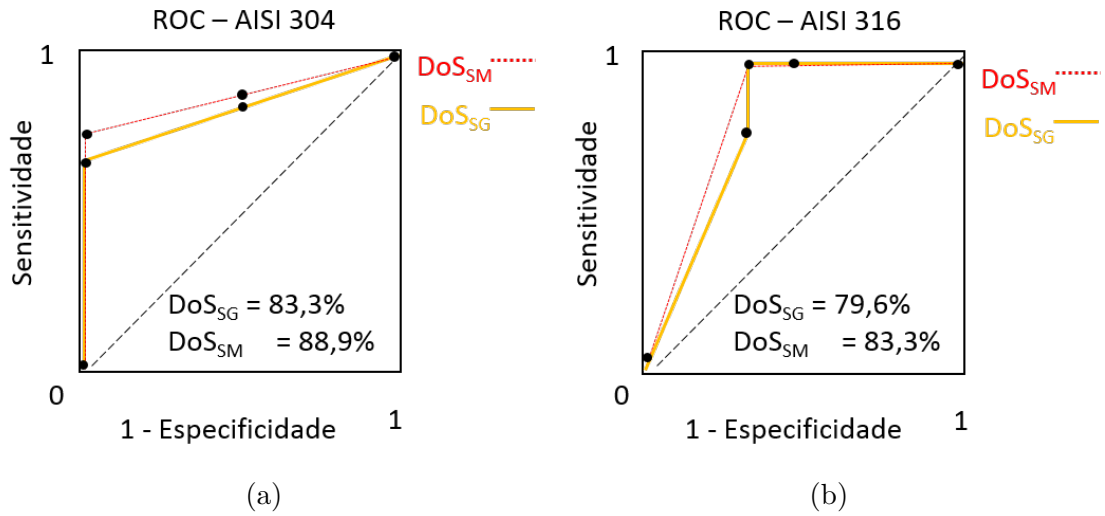
Figura 38 – Amostras com o $\text{DoS}_{ASTM} = \text{Step}$ dos aços AISI 304 e AISI 316 classificadas como *Dual* pelo DoS_{SM} .



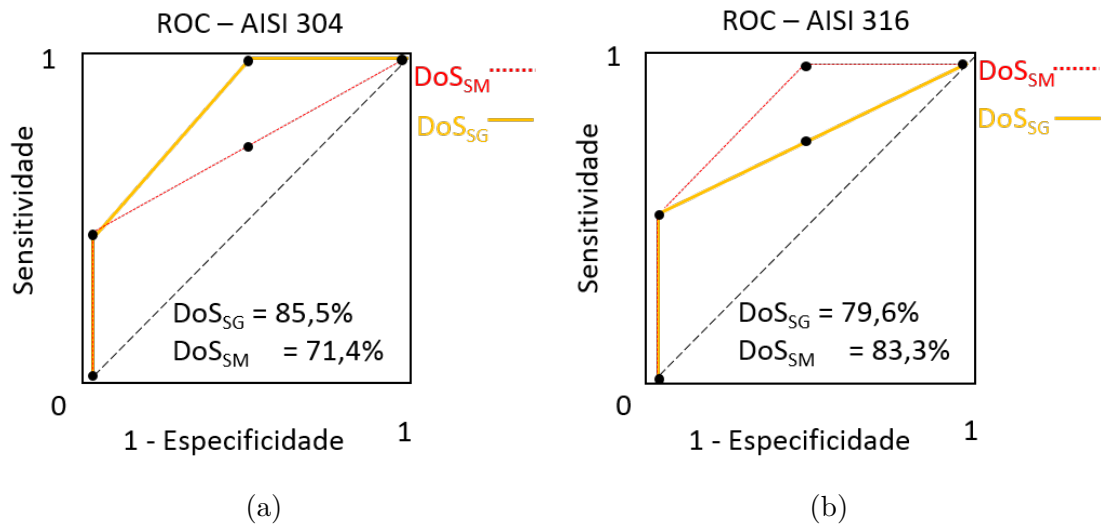
4.3 Análise de Desempenho por Curvas ROC.

Os resultados de sensibilidade e especificidade foram utilizados para plotar as curvas ROC (do inglês, *Receiver Operating Characteristic*) ilustradas na Figura 39 e Figura 40. Por meio da área sob as curvas verificou-se o desempenho das estimativas DoS_{SG} e DoS_{SM} cujo o DoS_{ISO} e o DoS_{ASTM} foram utilizados como referência, respectivamente.

Analisando áreas sob as curvas ROC do DoS_{SG} e do DoS_{SM} com referência no DoS_{ISO} , temos 83,3 % de desempenho do DoS_{SG} e 88,9 % de desempenho do DoS_{SM} doo aço AISI 304, conforme ilustrado na Figura 39a. A Figura 39b exibe um resultado de 79,6 % de desempenho do DoS_{SG} e 83,3 % de desempenho do DoS_{SM} do aço AISI 316.

Figura 39 – Curvas ROC do DoS_{SG} e do DoS_{SM} comparados ao DoS_{ISO} .

Analisando as curvas ROC do DoS_{SG} e do DoS_{SM} com referência no DoS_{ASTM} , temos que a Figura 40a ilustra 85,5 % de desempenho do DoS_{SG} e 71,4 % de desempenho do DoS_{SM} do aço AISI 304. A Figura 40b ilustra 79,6 % de desempenho do DoS_{SG} e 83,3 % de desempenho do DoS_{SM} do aço AISI 316.

Figura 40 – Curvas ROC do DoS_{SG} e do DoS_{SM} comparados ao DoS_{ASTM} .

Salientamos que o DoS_{SG} e o DoS_{SM} obtidos das amostras dos aços AISI 304 e AISI 316 deste banco de dados, padronizado pela norma ISO 12732 e ASTM A-262, classificaram corretamente as amostras sensitizadas.

5 Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram ser possível estimar o DoS por contagem de *pixels* das imagens binárias geradas por algoritmos de segmentação de imagens aplicados em micrografias de amostras sensibilizadas.

O DoS_{SM} apresentou o melhor desempenho na estimativa DoS de amostras sensibilizadas, pois o algoritmo de segmentação utilizado neste método gera imagens binárias mais semelhantes com as evidências de sensibilização nos contornos de grão.

As estimativas DoS_{SG} e DoS_{SM} para amostras *Step* não apresentaram um bom desempenho, quando comparados às demais classes. Os valores DoS elevados para as classes *Step* foram influenciados pelo excesso de contornos de grãos não sensibilizados, maclas e marcas de polimento e de ataque químico, presentes nas micrografias digitais segmentadas.

Apesar disso, o processamento digital de micrografias por segmentação de imagens para estimativa da sensibilização pode ser utilizado como ferramenta auxiliar de inspeção de equipamentos fabricados com as ligas estudadas. Além disso, pode ser aplicado na mineração de dados em bancos de imagens micrográficas.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Analisar a influência da morfologia de carbonetos, dos tratamentos térmicos, da variação de composição química e do tamanho de grão na estimativa DoS por contagem de *pixels* de imagens segmentadas com objetivo de aumentar o banco de dados para análise e o desempenho dos métodos.

Implementar um método de segmentação de imagem com a filtragem de contornos de grãos e maclas objetivando aumentar a sensibilidade e especificidade para estimativa *Step*, conseqüentemente promover melhorias no desempenho dessas metodologias para a estimativa de amostras não sensibilização.

Referências

AL-ATTAB, K.; ZAINAL, Z. Performance of high-temperature heat exchangers in biomass fuel powered externally fired gas turbine systems. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 35, n. 5, p. 913–920, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A262 - 15 Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels**. West Conshohocken: PA, 2015.

ASMUSSEN, P. *et al.* Semi-automatic segmentation of petrographic thin section images using a “seeded-region growing algorithm” with an application to characterize weathered subarkose sandstone. **Computers and Geosciences**, v. 83, p. 89–99, 2015.

AYDOĞDU, G.; AYDINOL, M. Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of aisi 316l type stainless steel. **Corrosion Science**, Elsevier, v. 48, n. 11, p. 3565–3583, 2006.

BAI, G. *et al.* Influences of niobium and solution treatment temperature on pitting corrosion behaviour of stabilised austenitic stainless steels. **Corrosion Science**, Elsevier Ltd, v. 108, p. 111–124, 2016.

BARBOSA, B. *et al.* Influence of microstructure on pitting corrosion resistance of alloy 904l superaustenitic stainless steel. **Corrosion**, NACE International, v. 68, n. 8, p. 739–746, 2012.

BERENJANI, I. *et al.* Improved pitting corrosion resistance of S . S 316L by Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding. v. 6, n. 5, p. 35–48, 2014.

BRADLEY, A. P. The use of the area under the roc curve in the evaluation of machine learning algorithms. **Pattern recognition**, Elsevier, v. 30, n. 7, p. 1145–1159, 1997.

BRADY, G. S.; CLAUSER, H. R.; VACCARI, J. A. **Materials Handbook: An Encyclopedia for Managers, Technical Professionals, Purchasing and Production Managers, Technicians and Supervisors** (McGraw-Hill handbooks). McGraw-Hill, 2002.

CHENG, L. *et al.* Crack characterisation using invariable feature extraction in stainless steel specimen used for absorber tubes of csp applications via emat. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 101, p. 771–781, 2017.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2012. 599 p.

CÍHAL, V. *et al.* Trends in the electrochemical polarization potentiodynamic reactivation method - EPR. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v. 21, n. 1, p. 47–54, 2007.

COLOMÉ-SERRA, M. *et al.* Image analysis: Utility of grey level granulometry to measure renal interstitial chronic damage. In: IEEE. **Engineering in Medicine and Biology**

Society, 1992 14th Annual International Conference of the IEEE. , 1992. v. 5, p. 1934–1935.

COSTA, R. C. S. *et al.* Avaliação da sensitização do aço inoxidável aisi 304l através de imagens micrográficas. 2004.

DAVIS, J. Asm international, handbook committee. stainless steels. **ASM specialty handbook. ASM International**, 1994.

FAWCETT, T. An introduction to roc analysis. **Pattern recognition letters**, Elsevier, v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006.

FRANCUS, P. An image-analysis technique to measure grain-size variation in thin sections of soft clastic sediments. **Sedimentary Geology**, v. 121, n. 3, p. 289–298, 1998.

FRANGINI, S.; CRISTOFARO, N. D. Analysis of the galvanostatic polarization method for determining reliable pitting potentials on stainless steels in crevice-free conditions. **Corrosion Science**, Elsevier, v. 45, n. 12, p. 2769–2786, 2003.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 392 p.

HU, E. *et al.* Corrosion behaviors of metals in biodiesel from rapeseed oil and methanol. **Renewable energy**, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 371–378, 2012.

ISO 12732. Corrosion of Metals and Alloys—Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Measurement Using the Double Loop Method (Based on Cihal’s Method). International Organization for Standardization Geneva, Switzerland, 2009.

JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S. **Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle**. 1^a. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008. 372 p.

JIANG, J. *et al.* Effects of aging time on intergranular and pitting corrosion behavior of Cu-bearing 304L stainless steel in comparison with 304L stainless steel. **Corrosion Science**, 2016.

JONES, R.; RANDLE, V. Sensitisation behaviour of grain boundary engineered austenitic stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 16, p. 4275–4280, 2010.

KOHAVI, R.; PROVOST, F. Glossary of terms. **Machine Learning**, v. 30, n. 2-3, p. 271–274, 1998.

LEWELLYN, D. T.; HUDD, R. **Steels: Metallurgy and Applications**. : Butterworth-Heinemann, 2013. 404 p.

LIMA, M. S. F. de; SANKARÉ, S. Microstructure and mechanical behavior of laser additive manufactured AISI 316 stainless steel stringers. **Materials & Design**, v. 55, p. 526–532, 2014.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2005. 357 p.

LIU, Y. *et al.* Electrochemical polarization study on crude oil pipeline corrosion by the produced water with high salinity. **Engineering Failure Analysis**, v. 60, p. 307–315, 2016.

- LLEWELLYN, D.; HUDD, R. Steels: metallurgy and applications. In: **Steels**. Woburn, Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 1998. p. 291–379.
- MAJIDI, A. P.; STREICHER, M. A. The Double Loop Reactivation Method for Detecting Sensitization in AISI 304 Stainless Steels. **CORROSION**, v. 40, n. 11, p. 584–593, 11 1984.
- MEDEIROS, F. *et al.* On the Evaluation of Texture and Color Features for Nondestructive Corrosion Detection. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, Springer International Publishing, v. 2010, n. 1, 2010.
- MOMBER, A. Quantitative performance assessment of corrosion protection systems for offshore wind power transmission platforms. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 94, p. 314–327, 2016.
- MURI, P. *et al.* Experimental Procedures and Sensitization Diagnostics of AISI304 Steel by Double Loop Electrochemical Potentiodynamic Reactivation Method. **Electrochimica Acta**, v. 124, p. 183–189, 2014.
- NASSAR, E.; NASSAR, A. Corrosion Behaviour of Some Conventional Stainless Steels at Different Temperatures in the Electrolyzing Process. **Energy Procedia**, v. 93, p. 102–107, 2016.
- NOGARA, J.; ZARROUK, S. J. Corrosion in geothermal environment: Part 1: Fluids and their impact. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, 2017.
- NOGARA, J.; ZARROUK, S. J. Corrosion in geothermal environment part 2: Metals and alloys. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, 2017.
- OSTERMAN, K. Stainless Steels Cost-Efficient Materials for the Global Biofuels Industries. 2012.
- OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. **Automatica**, v. 11, n. 285–296, p. 23–27, 1975.
- PADILLA, E. *et al.* Image analysis of cracks in the weld metal of a wet welded steel joint by three dimensional (3D) X-ray microtomography. **Materials Characterization**, Elsevier Inc., v. 83, p. 139–144, 2013.
- PAPAVINASAM, S. *et al.* Corrosion of Metals in Biofuels. 2011.
- PARVATHAVARTHINI, N.; DAYAL, R. Time–temperature-sensitization diagrams and critical cooling rates of different nitrogen containing austenitic stainless steels. **Journal of Nuclear Materials**, v. 399, n. 1, p. 62–67, 2010.
- PARVATHAVARTHINI, N. *et al.* Sensitization control in AISI 316L(N) austenitic stainless steel: Defining the role of the nature of grain boundary. **Corrosion Science**, v. 51, n. 9, p. 2144–2150, 2009.
- PENCINA, M. J.; D’AGOSTINO, R. B.; VASAN, R. S. Evaluating the added predictive ability of a new marker: from area under the roc curve to reclassification and beyond. **Statistics in medicine**, Wiley Online Library, v. 27, n. 2, p. 157–172, 2008.

- PEREZ, N. **Electrochemistry and Corrosion Science**. 2nd. ed. Boston: Springer, 2016. 455 p.
- POMMIER, H. *et al.* Intergranular damage during stress relaxation in AISI 316L-type austenitic stainless steels: Effect of carbon, nitrogen and phosphorus contents. **Acta Materialia**, Elsevier Ltd, v. 103, p. 893–908, 2016.
- RAHIMI, S.; ENGELBERG, D. L.; MARROW, T. J. A new approach for DL-EPR testing of thermo-mechanically processed austenitic stainless steel. **Corrosion Science**, v. 53, n. 12, p. 4213–4222, 2011.
- SAUCEDO-MUÑOZ, M. L. *et al.* Evaluation of toughness deterioration by an electrochemical method in an isothermally-aged N-containing austenitic stainless steel. **Materials Characterization**, Elsevier Inc., v. 60, n. 2, p. 119–124, 2009.
- SEDRIKS, A. J.; Electrochemical Society. **Corrosion of stainless steels**. New York: Wiley, 1996.
- SHARIFZADEH, M. *et al.* Detection of steel defect using the image processing algorithms. **Multitopic Conference 2008 INMIC 2008 IEEE International**, p. 125–127, 2008.
- SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. B. **Aços e Ligas Especiais**. 3^a. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2011. 664 p.
- SILVA, C. C.; FARIAS, J. P.; SANT'ANA, H. B. de. Evaluation of AISI 316L stainless steel welded plates in heavy petroleum environment. **Materials and Design**, Elsevier Ltd, v. 30, n. 5, p. 1581–1587, 2009.
- SILVA, G. D. *et al.* Influence of heat treatments on toughness and sensitization of a ti-alloyed supermartensitic stainless steel. **Journal of materials science**, Springer, v. 46, n. 24, p. 7737, 2011.
- SRINIVASAN, N. *et al.* Near boundary gradient zone and sensitization control in austenitic stainless steel. **Corrosion Science**, v. 100, p. 544–555, 2015.
- STANSBURY, E. E.; BUCHANAN, R. A. **Fundamentals of electrochemical corrosion**. Ohio: ASM international, 2000.
- TALBOT, D. E.; TALBOT, J. D. **Corrosion Science and Technology**. 2 edition. ed. London: CRC Press, 2007. 552 p.
- TARQUINI, S.; FAVALLI, M. A microscopic information system (MIS) for petrographic analysis. **Computers & Geosciences**, v. 36, n. 5, p. 665–674, 2010.
- TAVARES, S. *et al.* Influence of the starting condition on the kinetics of sensitization and loss of toughness in an aisi 304 steel. **Journal of materials science**, Springer, v. 38, n. 17, p. 3527–3533, 2003.
- TERADA, M. *et al.* Investigation on the intergranular corrosion resistance of the AISI 316L(N) stainless steel after long time creep testing at 600°C. **Materials Characterization**, v. 59, n. 6, p. 663–668, 2008. ISSN 10445803.
- THANGAVELU, S. K.; AHMED, A. S.; ANI, F. N. Impact of metals on corrosive behavior of biodiesel–diesel–ethanol (bde) alternative fuel. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 94, p. 1–9, 2016.

- TIEDRA, P. D. *et al.* Use of EPR test to study the degree of sensitization in resistance spot welding joints of AISI 304 austenitic stainless steel. **Corrosion Science**, v. 53, n. 4, p. 1563–1570, 2011.
- VINCENT, L. Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 2, n. 2, 1993.
- VOORT, G. F. V. **Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels**. Ohio: ASM international, 1991. 594 p.
- VOORT, G. F. V. *et al.* Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels. 2004.
- WATT, A. H.; POLICARPO, F. **The Computer Image**. Ohio: Addison-Wesley, 1998.
- WOLYNIEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: EDUSP, 2003. 163 p.
- WU, S. *et al.* Fe 2 o 3 films on stainless steel for solar absorbers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 58, p. 574–580, 2016.
- XU, Y. *et al.* 3-D modelling and statistical properties of surface pits of corroded wire based on image processing technique. **Corrosion Science**, v. 111, p. 275–287, 2016.
- ZANA, F.; KLEIN, J.-C. Segmentation of Vessel-Like Patterns Using Mathematical Morphology and Curvature Evaluation. **IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING**, v. 10, n. 7, 2001.

APÊNDICE A – Experimento independente

Com o objetivo de testar o DoS_{SG} e o DoS_{SM} em amostras independentes do banco de dados utilizados nesta pesquisa, empregamos amostras do aço AISI 316L com os três níveis de DoS_{ASTM} (*Step*, *Dual* e *Ditch*).

A Tabela 18 enumera a composição química típica das amostras utilizadas neste experimento, que foram solubilizadas e submetidas ao tratamento térmico de envelhecimento à temperatura de 700 °C com períodos de 300, 450, 800 e 1600 minutos.

Tabela 18 – Composição química (%p) do aço AISI 316L (BRADY; CLAUSER; VACCARI, 2002).

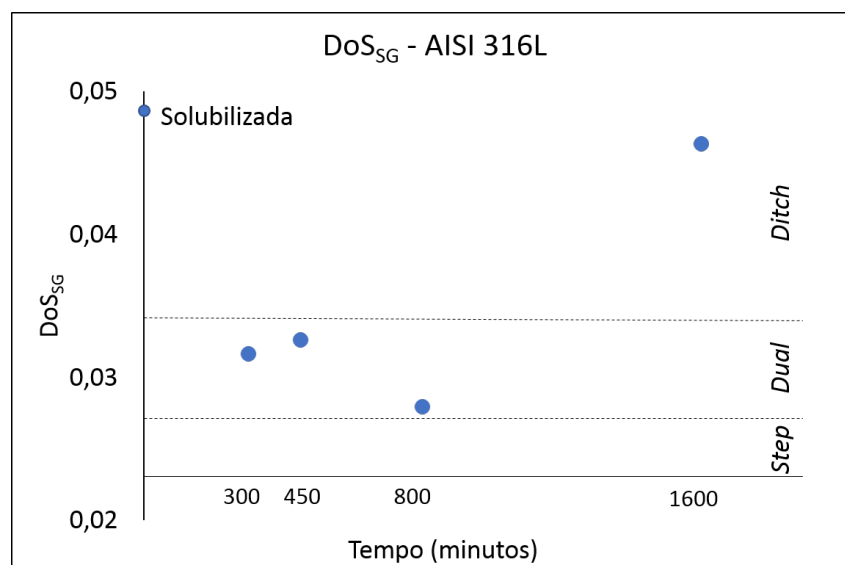
Liga	C ¹	Cr	Ni	Mn	Mo	N ²
AISI 316L	0,03	16 - 18	10 – 14	1,50	3	0,03

¹Máximo teor de carbono.

²Máximo teor de nitrogênio.

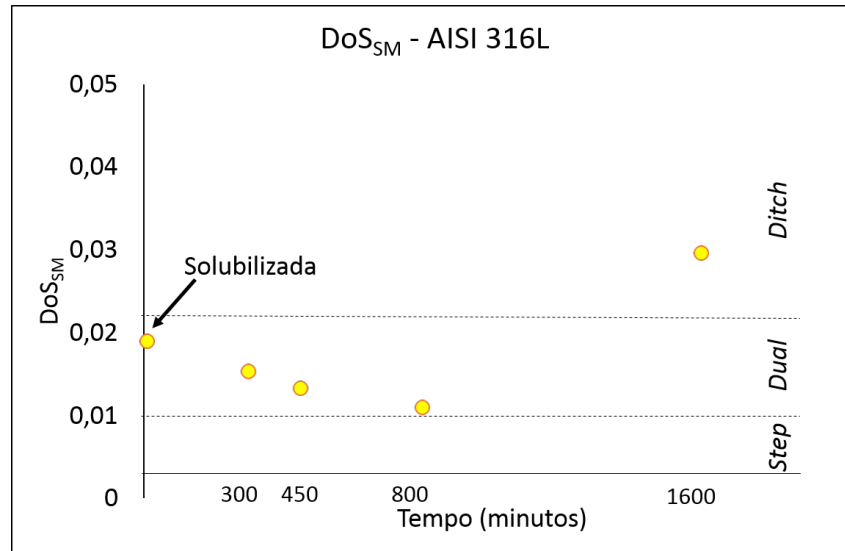
A Figura 41 ilustra os resultados do DoS_{SG} , cujas amostras com resultado DoS_{SG} –*Dual* apresentaram-se na faixa de resultados distintos do resultado DoS_{SG} –*Ditch*, porém a amostra solubilizada (DoS_{ASTM} –*Step*) foi estimada como DoS_{SG} –*Ditch*.

Figura 41 – Resultados DoS_{SG} do aço AISI 316L.



A Figura 42 ilustra os resultados do DoS_{SM} , cujas amostras com resultado $\text{DoS}_{SG} - \text{Dual}$ apresentaram-se na faixa de resultados distintos do resultado $\text{DoS}_{SG} - \text{Ditch}$, porém a amostra solubilizada ($\text{DoS}_{ASTM} - \text{Step}$) foi estimada como $\text{DoS}_{SG} - \text{Dual}$.

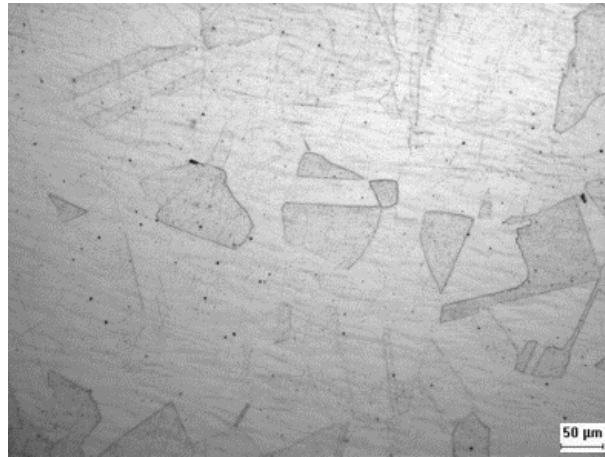
Figura 42 – Resultados DoS_{SM} do aço AISI 316L.



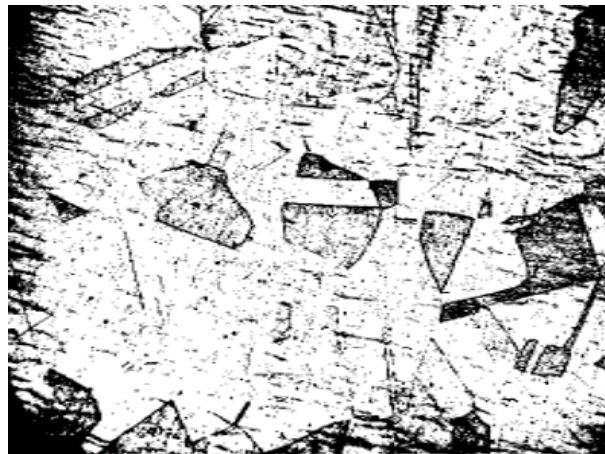
Segundo a classificação DoS regulamentada pela norma ASTM A-262, verificamos que o DoS_{SG} e o DoS_{SM} separaram devidamente as amostras *Dual* e *Ditch*, porém a amostra $\text{DoS}_{ASTM} - \text{Step}$ foi estimada como sensitizada.

A amostra *Step* foi estimada como sensitizada porque as imagens binárias apresentaram *pixels* dos contornos de grãos e maclas, ilustradas na Figura 43, que resultou nos elevados resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} .

Figura 43 – Amostra com estimativa $\text{DoS}_{ASTM-Step}$ classificada como sensitizada pelo DoS_{SG} e pelo DoS_{SM} . Imagens binárias com contornos de grãos e maclas.



(a) Micrografia original.



(b) Micrografia digital por segmentação global.



(c) Micrografia digital por segmentação morfológica.

APÊNDICE B – Interpretação da matriz de confusão e da curva ROC

A matriz de confusão, ilustrada na Figura 44, possibilita averiguar o desempenho de um método classificador para mineração de dados. Nesta matriz são mapeadas e confrontadas as instâncias das classes reais e as instâncias das classes preditas pelo classificador (BRADLEY, 1997; FAWCETT, 2006).

Figura 44 – Matriz de confusão e medidas de desempenho.

		Classes Reais	
		P	N
Classes de Predição	P	Verdadeiro Positivo (VP)	Falso Positivo (FP)
	N	Falso Negativo (FN)	Verdadeiro Negativo (VN)

{

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{P + N}$$

$$Sensitividade = \frac{VP}{P}$$

$$Especificidade = \frac{VN}{N}$$

$$F - score = \frac{2VP}{2VP + FP + FN}$$

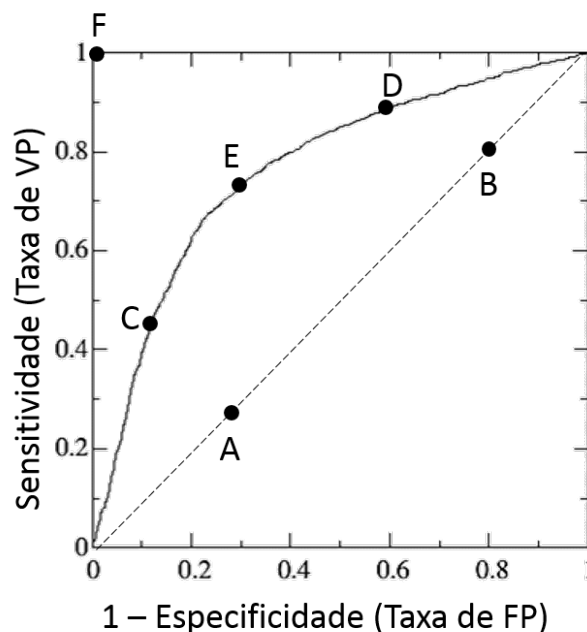
P = Classe de positivo.
N = Classe de negativo.

Denomina-se verdadeiro positivo (VP) o número de predições verdadeiras de uma classe positiva, falso positivo (FP) o número de predições falsas de uma classe positiva, falso negativo (FN) o número de predições falsas de uma classe negativa e verdadeiro negativo (VN) o número de predições verdadeiras de uma classe negativa (KOHAVI; PROVOST, 1998; FAWCETT, 2006). Com estas predições obtêm-se as medidas de desempenho: acurácia, sensibilidade, especificidade e *F-score*.

A acurácia mensura a taxa de VP e VN entre todas as instâncias positivas e negativas, a sensibilidade mensura a taxa de VP entre as instâncias positivas, a especificidade mensura a taxa de VN entre as instâncias negativas e o *F-score* resulta em um índice no intervalo [0,1], cujo melhor desempenho é 1 (KOHAVI; PROVOST, 1998).

A relação entre as taxas de VP (sensitividade) e a taxa de FP (1 - especificidade) pode ser visualizada por meio das Curvas de Características de Operação do Receptor (ROC, do inglês *Receiver Operating Characteristic*), ilustrada na Figura 45.

Figura 45 – Modelo de curva ROC. Adaptado de Fawcett (2006).



A diagonal tracejada indica a aleatoriedade de um classificador em retornar dados positivos ou negativo, ou seja, qualquer ponto sobre esta linha não representa um bom classificador (FAWCETT, 2006). O ponto A apresenta baixa taxa de FP, entretanto, baixa taxa de VP. O ponto B apresenta maior taxa de VP, porém, elevada taxa de FP.

A curva hipotética que contém os pontos C, D e E indica um classificador que apresenta melhor desempenho que o classificador representado pela diagonal tracejada. Os pontos sobre esta curva apresentam melhor relação entre taxas de VP e taxas de FP comparados aos pontos A e B.

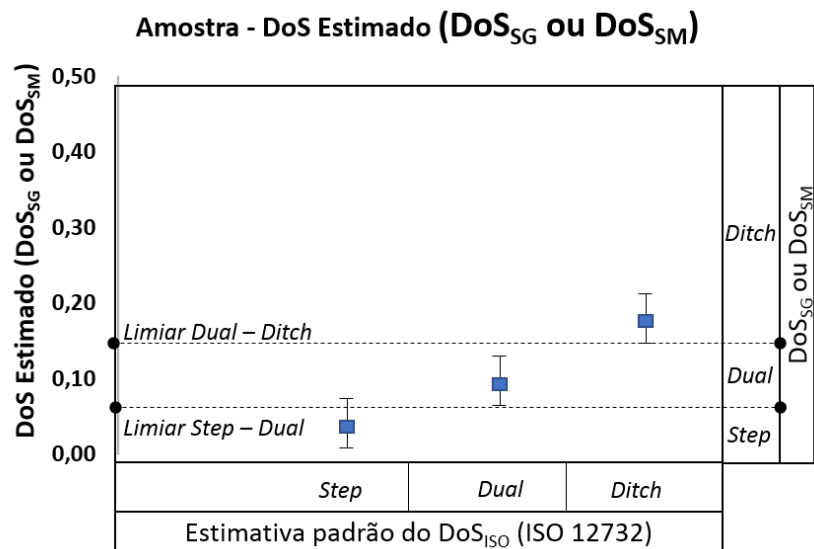
O ponto C apresenta baixa taxa de FP, entretanto, apresenta baixa taxa de VP. O ponto D apresenta maior taxa de VP, entretanto, possui elevada taxa de FP. O ponto E apresenta melhor relação entre taxa de VP e taxa de FP. Assim, a curva ROC com melhor desempenho será aquela que se aproximar do ponto F, cujo este ponto representa máxima taxa de VP com menor taxa de FP (FAWCETT, 2006).

A comparação de dois ou mais classificadores pode ser realizada quantificando-se o desempenho do classificador por meio da área sob a curva ROC. O classificador com melhor desempenho será representado por aquele que possuir maior área calculada sob a curva, da qual a maior área é obtida pela curva que mais se aproximar do ponto F (PENCINA; D'AGOSTINO; VASAN, 2008).

APÊNDICE C – Interpretação do gráfico das medidas de dispersão do DoS_{SG} e do DoS_{SM}

A Figura 46 ilustra um gráfico genérico utilizado para analisar as medidas de dispersão dos resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} , que estão agrupados no eixo das abscissas pela estimativa do DoS padronizado pela norma ISO 12732 (DoS_{ISO}).

Figura 46 – Gráfico genérico das medidas de dispersão dos resultados do DoS_{SG} e do DoS_{SM} .



Para cada estimativa do DoS_{ISO} (*Step*, *Dual* e *Ditch*) têm-se a média, um desvio padrão mínimo e máximo para o DoS_{SG} e DoS_{SM} (eixo das ordenadas). O desvio padrão mínimo da estimativa *Dual* (limiar *Step-Dual*) e o desvio padrão mínimo da estimativa *Ditch* (limiar *Dual-Ditch*) foram utilizados como limiar para a estimativa do DoS_{SG} e do DoS_{SM} .

As amostras com o DoS_{SG} e o DoS_{SM} abaixo do limiar *Step-Dual* são estimadas como *Step*, as amostras com o DoS_{SG} e o DoS_{SM} entre limiar *Step-Dual* e o limiar *Dual-Ditch* são estimadas como *Dual* e as amostras com o DoS_{SG} e o DoS_{SM} acima do limiar *Dual-Ditch* são estimadas como *Ditch*.