

ROSINEI BATISTA RIBEIRO

**ANÁLISE MORFOLÓGICA DE PITES EM AÇOS INOXIDÁVEIS
AUSTENÍTICOS ABNT 304 E 310S SUBMETIDOS À NÉVOA SALINA**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Norberto Codaro

Co-Orientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein

Guaratinguetá

2004

DADOS CURRICULARES

ROSINEI BATISTA RIBEIRO

NASCIMENTO	15.06.1971 – Lorena – S.P.
FILIAÇÃO	Jorge Antonio Ribeiro Ana Batista Bento dos Santos Ribeiro
1992/1994	Tecnologista em Mecânica “Processos de Produção” Instituto de Ensino Superior de Cruzeiro – IESC
1996	Adequação Curricular em Engenharia Química Industrial Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL
1997/1999	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista – UNESP – FEG
1999/2000	Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Qualidade, nível de especialização. Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL
2000/2004	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado. Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá - Universidade Estadual Paulista – UNESP – FEG.

DEDICATÓRIA

Dedico esta obra

A minha esposa Daniela A. S. Ribeiro pelo companheirismo e paciência oferecida ao longo do trabalho.

Aos meus pais Jorge Antonio Ribeiro e Ana Batista Bento dos Santos Ribeiro pela humildade, carinho, educação moral e humanística.

Ao meu sogro Antonio Carlos da Silva e sogra Maria de Lourdes Rodrigues Silva, cunhados Luciano Silva, Antonio Carlos da Silva Júnior, Gabrielle Silva, Luciane Villela Silva e sobrinho João Lucas Villela Silva.

A minha irmã Rosana Batista Ribeiro e cunhado Gilbert Silva, sobrinhos Renam M. B. Ribeiro, Jorge Luiz B. Ribeiro e Rayana F. R. Lourenço.

A toda comunidade, guetos e amigos da Vila do Sapé, Horto Florestal, Santa Edwiges e Vila Passos, especialmente á Escola de Primeiro e Segundo Grau Luiz de Castro Pinto – Vila Passos – Lorena – SP...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por sua companhia em todos os momentos da minha vida.

Ao Prof. Dr. Eduardo Norberto Codaro pela orientação profissional, sólida, apoio e dedicação oferecida durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein pela transparência, incentivo, empenho e seus conhecimentos transmitidos nos resultados e na discussão oferecida ao trabalho.

A todos os professores e funcionários do DQF, em especial às funcionárias M.Sc. Conceição Aparecida Matsumoto Dutra e Dona Ana Maria pela colaboração, qualidade e amizade. Aos alunos do Laboratório de Eletroquímica e Corrosão, pela amizade e cooperação, em especial M.Sc. José Wilson da Silva “Pastor”, Profa. M.Sc. Silmara Baldissera e M.Sc. Lucíola.

A todos os professores, alunos e funcionários das Faculdades Integradas Teresa D`Ávila – Rede Salesianas, em especial à Diretora Geral Irmã Dra. Olga de Sá, Prof. Gentil Vianna, Profa. Carolina Arantes Barcellos, Prof. José Luiz Alves Miranda, Prof. Nelson Tavares Matias, Prof. Glauco Azevedo, Prof. Stela Maris, Profa. Maria Odete Araújo e ao Prof. Jorge Luiz Rosa pelo apoio, incentivo e simplicidade nas idéias oferecidas na realização do trabalho.

As estagiárias Sabrina de Fátima Ferreira Mariotto e Débora Cristina Diniz do Instituto Superior de Pesquisa e Iniciação Científica das Faculdades Integradas Teresa D`Ávila – Rede Salesianas pelo apoio e ajuda no fechamento do trabalho.

Aos membros da banca de qualificação e defesa de tese, Prof. Dr. Eduardo Norberto Codaro, Prof. Dr. Aécio Zangrandi, Profa. Dra. Ana Paula Rosifini Alves Claro, Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein, Prof. Dr. Hamilton de Felipe, Prof. Dr. Gilberto Jardim e Prof. Dr. Koshun Iha pela aceitação, convite para participação deste evento e suas contribuições para a elaboração deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do DMT, especial aos funcionários Manoel, Neto, Sr. Wilson, Célio, Prof. Dr. Humberto Rodrigues e Prof. Dr. Marcelo Pereira.

A TEKNO S.A., unidade de Guaratinguetá, pela presteza nos serviços e apoio a todos os momentos na execução dos ensaios de corrosão em névoa salina, em especial aos funcionários do Laboratório Central de Química: Sr. Castro, Ana Maria, Rodrigo, José Benedito “Ditinho” e Danilo.

As funcionárias da Biblioteca, Regina Horta, Ana Lúcia e Regina Amorim pela atenção sempre presente e cooperação na confecção dos painéis e artigos quando solicitados.

As funcionárias e secretárias da secção de Pós-Graduação, pela presteza e qualidade dos serviços junto à tese de doutorado.

Ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica “Projetos e Materiais” – PROAP – UNESP - FEG, pelo auxílio e colaboração ao autorizar os pedidos de recursos financeiros para participação e apresentação em eventos técnicos e científicos.

A Congregação, direção geral, conselho departamental da FAENQUIL-DEMAR, pelo apoio e colaboração ao autorizar meus pedidos de afastamento funcional durante o período de doutoramento.

Aos funcionários do DEMAR-FAENQUIL pelo apoio e incentivos nos momentos difíceis ocorridos ao longo desta jornada.

Aos amigos Geraldo Prado, Prof. André Alves Prado, Isnaldi Souza, Maurício Monteiro, Bento Ferreira, Fernando Vernilli, Gilbert Silva, Everaldo Bruno, Bento Ferreira, Carlos Bernardo, João Donizete, Equipe do Garra Futebol Clube e Roseli Marins pela colaboração e dicas importantes durante o desenvolvimento das atividades experimentais.

Aos alunos Emerson A. Raymundo, Elias Cunha, Marcos Vargas, Jefferson Nogueira “Cipó” e em especial ao Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro responsável pelo Laboratório de Estudos da Usinagem pelos ensaios de rugosidade realizados.

A empresa TENARIS - CONFAB Tubos S.A. unidade de Pindamonhangaba - SP, pelo fornecimento da chapa de aço inoxidável ABNT 310S para realização dos ensaios.

Este trabalho teve apoio financeiro das seguintes entidades:

FAPESP – através dos processos nº 98/14969 – 1 e
01/00759 – 0 e o PROAP – CNPq – UNESP - FEG

RIBEIRO. R. B. **Análise morfológica de pites em aços inoxidáveis ABNT 304 e 310S submetidos a exposição em névoa salina.** 2004. 256f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2004

RESUMO

Este projeto de pesquisa teve como objetivo estudar toda evolução que governa o crescimento, distribuição e classificação dos pites em aços inoxidáveis austeníticos ABNT 304 e 310S obtidos no estado como recebido e tratados, submetidos a diferentes tempos de exposição em névoa salina. A originalidade deste trabalho baseou-se no desenvolvimento de uma técnica para caracterização morfológica e da corrosão localizada associando com os aspectos de descrição de formas, tamanho, parâmetros específicos e populacionais. O aço inoxidável 304 apresentou morfologia irregulares> região de transição A> cônicos> hemisféricos> região de transição B, sendo que irregulares e região de transição A em maiores quantidades no sistema. Na liga tratada a cada tempo de exposição, a quantidade de pites é da mesma ordem, ou seja, região de transição A> irregulares> cônicos> hemisféricos> região de transição B, sendo que os pites na região de transição A e irregulares estão presentes em maior quantidades no sistema. O aço inoxidável 310S, como recebido, exibiu a seguinte morfologia: pites hemisféricos> região de transição A> região de transição B> irregulares> cônicos, sendo que os pites estão presentes em maiores quantidades em: hemisféricos e região de transição A. A quantidade de pites na liga tratada a cada tempo de exposição é da mesma ordem: região de transição B> hemisféricos> região de transição A> cônicos> irregulares. O aço inoxidável 304 apresentou maior resistência à corrosão por pite do que o aço inoxidável 310S, e também diferenças na distribuição, classificação e mediana dos tamanhos dos pites, conforme os resultados obtidos na avaliação estatística da superfície e perfis dos mesmos.

PALAVRAS-CHAVE: Corrosão por pites, aço inoxidável austenítico, corrosão salina, processamento e análise de imagens, análise microestrutural.

RIBEIRO. R. B. Pits morphologic analysis in ABNT 304 and 310S stainless steels submitted to exposition in saline mist. 2004. 260f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2004

ABSTRACT

This research project has had as objective to study all evolution that governs the growth, distribution and classification of pits in ABNT 304 and 310S austenitic stainless steels obtained in the state as-received and treated, submitted to different times of exposition in saline mist. The originality of this work has been based on the development of a technique for morphologic characterization and of located corrosion associating with the shape description, size, specific and population parameters. The 304 stainless steel has presented the following morphology: irregular> transition region A> conic> hemispherical> transition region B, in which irregular and transition region A are in larger amounts in the system. In the treated alloy at each exposition time, the pits amount is at the same order, in other words, transition region A> irregular> conic> hemispherical> transition region B, in which the pits in the transition region A and irregular are present in larger amounts in the system. The 310S stainless steel, as received, has exhibited the following morphology: hemispherical pits> transition region A> transition region B > irregular> conic, in which the pits are present in larger amounts in: hemispherical pits and transition region A. The pits amount in the treated alloy at each time of exposition has the same order: transition region B> hemispherical> transition region A> conic> irregular. The 304 stainless steel has presented pit corrosion resistance larger than the 310S stainless steel, and also differences in the distribution, classification and pits sizes medium, according to the results obtained in the statistical evaluation of their surface and profiles.

KEYWORD: Pit corrosion, Austenitic stainless steel, Saline corrosion, Processing and image analysis, Microstructure Analysis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 38

1.1 – OBJETIVO 40

1.2 - JUSTIFICATIVA 40

CAPÍTULO 2 ORIGINALIDADE 42

2.1 – DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL
PARA A CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E A EVOLUÇÃO
POR PITES NOS MATERIAIS 42

2.2 – PARÂMETROS DIMENSIONAIS E MORFOLÓGICOS
(FATORES DE FORMA) 43

2.3 – PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DO PERFIL DAS
IMAGENS 47

CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 51

3.1 – FENOMENOLOGIA DA CORROSÃO LOCALIZADA POR PITES 56

3.2 – PRÍNCÍPIOS DA FORMAÇÃO DA CORROSÃO POR PITES 58

3.3 – EXAMINAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS PITES 60

3.4 - DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO DOS PITES 63

3.5 – MODELO PARA A AVALIAÇÃO DOS PITES 62

3.6 – PENETRAÇÃO DOS PITES	63
3.7 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	64
3.8 – INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS E AS ESTIMATIVAS DOS INTERVALOS CALCULÁVEIS DA CORROSÃO LOCALIZADA	67
3.9 – AÇOS INOXIDÁVEIS	68
CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS	72
4.1 – ABORDAGEM GERAL NA SELEÇÃO DOS MATERIAIS	73
4.2 – ANÁLISE QUÍMICA	74
4.3 – CONDIÇÕES DE TRATAMENTO TÉRMICO IMPOSTAS	75
4.4. – ENSAIOS DE CORROSÃO EM NÉVOA SALINA	77
4.5 – ENSAIOS DE RUGOSIDADE	78
4.6 – ANÁLISE MATERIALOGRÁFICA	81
4.7 – ENSAIO DE MICRODUREZA	82
4.8 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E MICROANÁLISE DISPERSIVA DE ENERGIA	83
4.9 – PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DE IMAGENS	83
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
5.1 – CONDIÇÕES DE TRATAMENTOS TÉRMICOS	87
5.1.1. - Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304	87
5.1.2. - Aço Inoxidável Austenítico ABNT 310S	89
5.2 – ENSAIOS DE RUGOSIDADE	93
5.2.1 - Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304	93
5.2.2 - Aço Inoxidável Austenítico ABNT 310S	95

5.3 – ENSAIOS DE MICRODUREZA	97
5.4 – ANÁLISE DOS PARÂMETROS MORFOLOÓGICOS E DOS DADOS ESTATÍSTICOS DOS PITES EM DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS 304 E 310S TRATADOS	98
5.5 – MICROSCOPIA ÓPTICA E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS DA CORROSÃO POR PITES	109
5.5.1 - Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304	109
5.5.2 - Aço Inoxidável Austenítico ABNT 310S	116
5.6 – ANÁLISE DA FRAÇÃO CORROÍDA NO AÇO INOXIDAVEL 304 VERSUS TEMPOS DE EXPOSIÇÃO EM DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS	122
5.7 – ANÁLISE DA DENSIDADE DE PITES NO AÇO INOXIDAVEL 304 VERSUS TEMPOS DE EXPOSIÇÃO EM DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS	126
5.8 - ANÁLISE DA FRAÇÃO CORROÍDA NO AÇO INOXIDAVEL 310S VERSUS TEMPOS DE EXPOSIÇÃO EM DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS	129
5.9 - ANÁLISE DA DENSIDADE DE PITES NO AÇO INOXIDAVEL 310S VERSUS TEMPOS DE EXPOSIÇÃO EM DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS	133
5.10 – OCORRÊNCIA DA CORROSÃO LOCALIZADA NO AÇO INOXIDAVEL 304 ASSOCIADA COM A MICROESTRUTURA	137
5.11 - OCORRÊNCIA DA CORROSÃO LOCALIZADA NO AÇO INOXIDAVEL 310S ASSOCIADA COM A MICROESTRUTURA	143
5.12 – CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA E DIMENSIONAL DOS PITES AÇO INOXIDAVEL 304 TRATADOS, APÓS SEREM SUBMETIDOS AOS TESTES DE CORROSÃO EM NÉVOA SALINA	148

5.13 - CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA E DIMENSIONAL DOS PITES AÇO INOXIDÁVEL 310S TRATADOS, APÓS SEREM SUBMETIDOS AOS TESTES DE CORROSÃO EM NÉVOA SALINA	188
5.14 – CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS E DIMENSIONAIS NOS AÇOS INOXIDÁVEIS 304 E 310S TRATADOS	227
5.15 – AVALIAÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS EM AÇOS INOXIDÁVEIS 304 E 310S TRATADOS, APÓS OS TESTES DE CORROSÃO VIA NÉVOA SALINA	229
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES	235
CAPÍTULO 7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	238
CAPÍTULO 8 REFERÊNCIAS	239
ANEXOS A	249

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 1	Quadro teste para a análise geométrica dos pites	44
FIGURA 2	Distribuição das formas geométricas para a imagem teste	45
FIGURA 3	Diagrama para determinação dos objetos e a razão de aspecto da corrosão por pites nos materiais (Largura / Profundidade) versus retangularidade	46
FIGURA 4	Seqüência de processamento digital e análise de imagens nos perfis corroídos em Ti-6Al-4V e Al 7050.	48
FIGURA 5	Diferentes tipos e formas de corrosão: (1) corrosão geral em superfície lisa ou plana, (2) corrosão geral com superfície irregular, (3) corrosão local e superfície lisa, (4) corrosão local com superfície irregular, (5) pites largos, (6) pites médios, (7) pites profundos e (8) presenças de microtrincas	54
FIGURA 6	Estágios da formação da corrosão localizada: quebra do filme, formação, iniciação, crescimento e trinca completa iniciando a ruptura	54
FIGURA 7	Ataque localizado devido às descontinuidades em camadas ou depósitos na superfície do aço, (a) corrosão uniforme, (b) ataque localizado devido a descontinuidades, (c) aumento da taxa pelo aumento do fornecimento de oxigênio e (d) formação de microtrincas pelo depósito.	60
FIGURA 8	Formas geométricas dos pites (a) profundos ou estreitos, (b) elíptico, (c) largo e/ou raso, (d) superficial, (e) irregular ou profundo, (f) orientação microestrutural na forma horizontal e vertical	61

FIGURA 9	Modelo de avaliação e classificação dos pites	63
FIGURA 10	Modelos para determinar os parâmetros morfológicos dos pites densidade, tamanho e profundidade	64
FIGURA 11	Curva da taxa da corrosão localizada em tubos da liga de alumínio 5052 mostrando a relação direta entre profundidade máxima dos pites [mm] em função do tempo de exposição [anos]	66
FIGURA 12	Comportamento da corrosão localizada em tubos de ferro fundido e aço carbono e estimativa de intervalos da profundidade dos pites em função do tempo de exposição	70
FIGURA 13	Alterações na composição química a partir do aço inoxidável austenítico 304, visando suas propriedades	75
FIGURA 15	Corpos de prova, após a preparação superficial e submetida aos testes de corrosão via névoa salina.	74
FIGURA 16	Espectrômetro de absorção atômica utilizada na análise química	74
FIGURA 17	Forno utilizado nos tratamentos térmicos.	76
FIGURA 18	Testes de corrosão via névoa salina	77
FIGURA 19	Parâmetro de rugosidade – Ra	79
FIGURA 20	Textura da superfície usinada, perfil da superfície arbitrária e parâmetros de rugosidade.	78
FIGURA 21	Ensaio e a determinação dos parâmetros de Rugosidade	80
FIGURA 22	Equipamentos usados para a caracterização microestrutural dos materiais	82
FIGURA 23	Microdurômetro usado no ensaio de microdureza	82
FIGURA 24	Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV	84

FIGURA 25	Seqüência de processamento digital e análise de imagens para cada perfil do aço inoxidável 304. (a) Imagem Binária; (b) Imagem a, após a aplicação do filtro “Thresold”; (c) Imagem b, após a aplicação do filtro “Fill – Holes”; (d) Imagem c, após a delimitação dos pites pela aplicação do filtro “Watershed”.	85
FIGURA 26 (a)	Micrografia do aço inoxidável 304, no estado como recebida.	88
FIGURA 26 (b)	Micrografia do aço inoxidável 304 tratado a 1065°C – 1 hora, resfriado em água e gelo.	88
FIGURA 27 (a)	Micrografia do aço inoxidável 304 tratado a 820°C – 1 hora, resfriamento ao ar.	89
FIGURA 27 (b)	Micrografia do aço inoxidável 304 tratado a 620°C – 24 horas, resfriamento ao ar.	89
FIGURA 28 (a)	Micrografia do aço inoxidável 310S, no estado como recebida.	90
FIGURA 28 (b)	Micrografia do aço inoxidável 310S, no estado como recebida.	90
FIGURA 29 (a)	Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 1065°C – 1 hora, resfriamento ao ar.	90
FIGURA 29 (b)	Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 1065°C – 1 hora, resfriamento ao ar aumento.	90
FIGURA 30 (a)	Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 820°C – 1 hora, resfriamento ao ar .	91
FIGURA 30 (b)	Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 820°C – 1 hora, resfriamento ao ar .	91

FIGURA 31 (a)	Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 620°C – 24 horas, resfriamento ao ar.	92
FIGURA 31 (b)	Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 620°C – 24 horas, resfriamento ao ar.	92
FIGURA 32 (a)	Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 670°C – 5 horas, resfriamento ao ar .	93
FIGURA 32 (b)	Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 670°C – 5 horas, resfriamento ao ar.	93
FIGURA 33	Comportamento da rugosidade [Ra], após os testes de corrosão no aço inoxidável 304	95
FIGURA 34	Comportamento da rugosidade [Ra], após os testes de corrosão no aço inoxidável 310S	97
FIGURA 36 (a)	Como recebida e exposição de 48 horas em névoa salina	110
FIGURA 36 (b)	Como recebida e exposição de 48 horas em névoa salina	110
FIGURA 37 (a)	Como recebida e exposição de 312 horas em névoa salina	110
FIGURA 37 (b)	Como recebida e exposição de 312 horas em névoa salina	110
FIGURA 38 (a)	Tratada a 1065°C –1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 48 horas em névoa salina.	111
FIGURA 38 (b)	Tratada a 1065°C –1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 48 horas em névoa salina.	111
FIGURA 39 (a)	Tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 312 horas em névoa salina.	111
FIGURA 39 (b)	Tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 312 horas em névoa salina.	111

FIGURA 40 (a)	Tratada a 1065°C –1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.	112
FIGURA 40 (b)	Tratada a 1065°C –1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.	112
FIGURA 41 (a)	Tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.	112
FIGURA 41 (b)	Tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	112
FIGURA 42 (a)	Tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	113
FIGURA 42 (b)	Tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	113
FIGURA 43 (a)	Tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	113
FIGURA 43 (b)	Tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	113
FIGURA 44 (a)	tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	114
FIGURA 44 (b)	Tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	114
FIGURA 45 (a)	Tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	114
FIGURA 45 (b)	Tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	114
FIGURA 46 (a)	Tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.	115

FIGURA 46 (b)	Tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	115
FIGURA 47 (a)	Tratada 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.	115
FIGURA 47 (b)	Tratada 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.	115
FIGURA 48 (a)	Como recebida e exposição de 48 horas em névoa salina	116
FIGURA 48 (b)	Como recebida e exposição de 48 horas em névoa salina	116
FIGURA 49 (a)	Como recebida e exposição de 312 horas em névoa salina	117
FIGURA 49 (b)	Como recebida e exposição de 312 horas em névoa salina	117
FIGURA 50 (a)	Tratada a 1065°C –1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 48 horas em névoa salina .	117
FIGURA 50 (b)	Tratada a 1065°C –1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 48 horas em névoa salina(Aço inox 304)	117
FIGURA 51 (a)	Tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 312 horas em névoa salina	118
FIGURA 51 (b)	Tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 312 horas em névoa salina.	118
FIGURA 52 (a)	Tratada a 1065°C –1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	118
FIGURA 52 (b)	Tratada a 1065°C –1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	118
FIGURA 53 (a)	Tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	119
FIGURA 53 (b)	Tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	119

FIGURA 54 (a)	Tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	119
FIGURA 54 (b)	Tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	119
FIGURA 55 (a)	Tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	120
FIGURA 55 (b)	Tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	120
FIGURA 56 (a)	Tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.	120
FIGURA 56 (b)	Tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	120
FIGURA 57 (a)	Tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.	121
FIGURA 57 (b)	Tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	121
FIGURA 58 (a)	Tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.	121
FIGURA 58 (b)	Tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina	121
FIGURA 59 (a)	Tratada 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.	122
FIGURA 59 (b)	Tratada 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina	122

FIGURA 60	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304 tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.	123
FIGURA 61	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304 tratado a 1065°C – 1 hora em água e gelo.	123
FIGURA 62	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.	124
FIGURA 63	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.	124
FIGURA 64	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304, tratado a 820°C – 1 hora e resfriada ao ar.	125
FIGURA 65	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304, no estado como recebida.	125
FIGURA 66	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.	126
FIGURA 67	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratado a 1065°C, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.	126

FIGURA 68	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratado à 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.	127
FIGURA 69	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada a 820°C durante 1 hora e resfriada ao ar.	127
FIGURA 70	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada à 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.	128
FIGURA 71	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, no estado como recebida.	129
FIGURA 72	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S, no estado como recebida	130
FIGURA 73	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriado em água e gelo.	131
FIGURA 74	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriado ao ar.	131
FIGURA 75	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 820°C durante 1 hora e resfriado ao ar.	132
FIGURA 76	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 620°C durante 24 horas e resfriado ao ar.	132

FIGURA 77	Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 670°C durante 5 horas e resfriado ao ar.	133
FIGURA 78	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, no estado como recebida.	134
FIGURA 79	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo.	135
FIGURA 80	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriada ao ar.	135
FIGURA 81	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 820°C durante 1 hora e resfriada ao ar.	136
FIGURA 82	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar.	136
FIGURA 83	Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 670°C durante 5 horas e resfriada ao ar.	137
FIGURA 84 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, no estado como recebida.	139
FIGURA 84 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304, no estado como recebida .	139
FIGURA 85 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.	139

FIGURA 85 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.	139
FIGURA 86 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.	140
FIGURA 86 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.	140
FIGURA 87 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.	140
FIGURA 87 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304 , tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.	140
FIGURA 88 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar	141
FIGURA 88 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 304, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.	141
FIGURA 89	Análises semi-quantitativa pela Microanálise Dispersiva de Energia – EDS em aço inoxidável 304: (a) Matriz e (b) Precipitados	142
FIGURA 90 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, no estado como recebida.	144
FIGURA 90 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, no estado como recebida .	144
FIGURA 91 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.	144
FIGURA 91 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.	144
FIGURA 92 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.	145

FIGURA 92 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.	145
FIGURA 93 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 820°C – 1 hora e resfriada ao ar.	145
FIGURA 93 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 820°C – 1 hora e resfriada ao ar.	145
FIGURA 94 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.	146
FIGURA 94 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.	146
FIGURA 95 (a)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar	146
FIGURA 95 (b)	A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.	146
FIGURA 96	Análise semi-quantitativa pela Microanálise Dispersiva de Energia – EDS em aço inoxidável 310S: (a) Matriz e (b) Precipitado	147
FIGURA 97	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304 no estado como recebido e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	161
FIGURA 98	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 1065°C –1 hora e resfriado em água e gelo, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	163

FIGURA 99	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 1065°C –1 hora e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	165
FIGURA 100	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 820°C – 1 hora e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	167
FIGURA 101	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 620°C – 24 horas e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	170
FIGURA 102	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 670°C – 5 horas e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	172
FIGURA 103	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, no estado como recebida, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	175
FIGURA 104	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriado em água e gelo, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	177

FIGURA 105	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	180
FIGURA 106	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 820°C – 1 hora e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	182
FIGURA 107	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 620°C – 24 horas e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	185
FIGURA 108	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 670°C – 5 horas e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	187
FIGURA 109	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S no estado como recebido e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	200
FIGURA 110	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 1065°C durante 1 hora e resfriado em água e gelo e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.	203

FIGURA 111	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 1065°C durante 1 hora e resfriado ao ar e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	210
FIGURA 112	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 820°C durante 1 hora ao ar e gelo e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	205
FIGURA 113	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 620°C durante 24 horas e resfriado ao ar e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	208
FIGURA 114	Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 670°C durante 5 horas e resfriado ao ar e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	212
FIGURA 115	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S, no estado como recebida, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	215

FIGURA 116	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	217
FIGURA 117	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriada ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	220
FIGURA 118	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 820°C durante 1 hora e resfriada ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	222
FIGURA 119	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	225
FIGURA 120	Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 670°C durante 5 horas e resfriada ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h	227

FIGURA 121	Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, como recebida em função do tempo de exposição.	230
FIGURA 122	Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 1065°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo em função do tempo de exposição.	231
FIGURA 123	Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 1065°C durante 1 hora e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.	231
FIGURA 124	Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 820°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo em função do tempo de exposição.	232
FIGURA 125	Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar em função do tempo de exposição	232
FIGURA 126	Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 670°C durante 5 horas e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.	233

LISTAS DE TABELAS

TABELA 1	Heterogeneidades que levam à corrosão localizada	55
TABELA 2	Heterogeneidades que levam à corrosão localizada	56
TABELA 3	Profundidade máxima dos pites em função do tempo de exposição em tubos de aço carbono e ferro fundido dútil	68
TABELA 4	Composição química do aço inoxidável ABNT 304 (% peso)	75
TABELA 5	Composição química do aço inoxidável ABNT 310S (% peso)	75
TABELA 6	Diferentes condições de tratamentos térmicos impostas	76
TABELA 7	Valores de Microdureza (Vickers) no aço inoxidável 304, no estado como recebido e tratado	98
TABELA 8	Valores de Microdureza (Vickers) no aço inoxidável 310S, no estado como recebido e tratado	98
TABELA 9	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável 304, estado de recebimento em testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição	100
TABELA 10	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratada à 1065°C durante 1 hora, resfriada em solução água e gelo, submetida em testes de corrosão sob névoa salina em diferentes tempos de exposição	100

TABELA 11	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratado à 1065°C durante 1 hora, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão sob névoa salina em diferentes tempos de exposição	101
TABELA 12	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratada à 820°C durante 1 hora, resfriado ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição	101
TABELA 13	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratada a 620°C durante 24 horas, resfriado ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição	102
TABELA 14	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratada a 670°C durante 5 horas, resfriado ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição	102
TABELA 15	Parâmetros estatísticos dos pites no aço inoxidável 304, submetido a 312 horas de exposição em névoa salina	103

TABELA 16	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, estado como recebido, submetida a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição	103
TABELA 17	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado a 1065°C durante 1 hora, resfriada em solução água e gelo, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição	105
TABELA 18	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado à 1065°C durante 1 hora, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina	105
TABELA 19	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado à 820°C durante 1 hora, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição	106
TABELA 21	Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado a 670°C durante 5 horas, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição	107
TABELA 22	Parâmetros estatísticos dos pites no aço inoxidável tipo 310S, submetido a 312 horas de exposição em névoa salina	109

TABELA 23 (a)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, no estado como recebida	149
TABELA 23 (b)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo	150
TABELA 23 (c)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 1065°C – 1 hora ao ar	150
TABELA 23(d)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 820°C – 1 Hora ao ar	151
TABELA 23 (e)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 620°C – 24 Horas e resfriamento ao ar	151
TABELA 23 (f)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 670°C – 5 Horas resfriada ao ar	152
TABELA 24 (a)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 304, no estado como recebida	153
TABELA 24 (b)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo	154

TABELA 24 (c)	Mediana da largura e profundidade dos de pites no aço inoxidável 304, tratada a 1065°C – 1 hora ao ar	155
TABELA 24 (d)	Mediana da largura e profundidade dos de pites no aço inox 304, tratada a 820°C – 1 Hora ao ar	156
TABELA 24 (e)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada a 620°C – 24 Horas e resfriamento ao ar	157
TABELA 24 (f)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada a 670°C – 5 Horas resfriada ao ar	158
TABELA 25 (a)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, no estado como recebida	189

TABELA 25 (b)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo	190
TABELA 25 (c)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 1065°C – 1 hora ao ar	190
TABELA 25 (d)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 820°C – 1 Hora ao ar	191
TABELA 25 (e)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 620°C – 24 Horas e resfriamento ao ar	191
TABELA 25 (f)	Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 670°C – 5 Horas resfriada ao ar	192
TABELA 26 (a)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, como recebido	193
TABELA 26 (b)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo	194
TABELA 26 (c)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 1065°C – 1 hora ao ar	195
TABELA 26 (d)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 820°C – 1 Hora ao ar	196

TABELA 26 (e)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 620°C – 24 Horas e resfriamento ao ar	197
TABELA 26 (f)	Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 670°C – 5 Horas resfriada ao ar	198

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A corrosão nos materiais apresenta-se diferentes formas que variando de uma condição uniforme até a localizada, sendo que esta última evidencia a forma mais perigosa de ataque pela dissolução local, afetando pequenas áreas e contribuindo para o aceleração da corrosão, resultando na formação de cavidades, defeitos, irregularidades, sulcos, relevos e poros na superfície, promovendo a formação de trincas e falhas nos produtos (JONES, 1992; SZKLARKA - SMIALOWSKA, 1986).

A inspeção visual ou a medida de perda de massa não são técnicas apropriadas para quantificação e a qualificação dos materiais que apresentam corrosão localizada em diferentes ambientes, principalmente os mais resistentes como: aços carbono, aços inoxidáveis, titânio, níquel, cobre, alumínio e suas ligas (ROWE, 1976; CODARO, 2002; MOUTARLIER, 2003).

Portanto, diferentes técnicas têm sido aplicadas para a determinação das medidas e avaliação da corrosão localizada que governam o crescimento dos pites, dentre as quais de destacam: inspeção visual, ensaios não destrutivos, determinação da extensão dos pites e a avaliação da corrosão localizada (ISO 11463, 1995; ROWE, 1976; ASTM E 3-99; ASTM G 31-72).

A análise desses aspectos definem que a velocidade de formação aumenta e a velocidade de crescimento dos pites diminui com o tempo de exposição. Isso não é surpreendente, já que a descrição de um pite é demasiado ampla de acordo com os sistemas normalizados. Os parâmetros e as condições que governam seu desenvolvimento, entretanto, ainda não foram bem definidos e investigados (ASTM G 46-94).

Estudos avaliaram o processo de degradação dos filmes metálicos finos que poderiam ser utilizados para determinar o estado dos filmes nas pinturas e suas conseqüências sobre a proteção das camadas metálicas durante o processo de névoa salina (SCHUTZ, 1997).

As resistências à corrosão de filmes finos de W-Ti-N sobre aço rápido levaram pesquisadores a estudar sistematicamente alguns parâmetros como a morfologia e espessura. A aplicação de diferentes filmes em superfícies rugosas e tipos de deposição dos filmes, após a submissão em testes de corrosão em névoa salina e análise superficial, através

da aplicação de técnica de processamento digital e análise de imagens para determinar o número e a distribuição estatística dos pites (CHENG, 1999; OLIVEIRA, 2000).

Neste contexto, para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa usaram-se conceitos e parâmetros de processamento digital e análise de imagens, já utilizados na análise de formação de pites em materiais resistentes, especialmente no estudo da corrosão por pites na liga Ti-6Al-4V em diferentes condições microestruturais, após serem submetidos a corrosão em névoa salina e imersão estática (CODARO, 2001; CODARO, 2002).

A morfologia e a classificação dos pites foram estudadas em materiais estruturais como o titânio e alumínio e suas ligas em que são solicitados e aplicados em situações severas. O método de processamento digital e análise de imagens têm sido usados para determinar a morfologia dos pites em ligas a base de Al 2024 submetidos a testes de corrosão em solução de cloreto de sódio (CODARO, 2001; CODARO, 2002; RIBEIRO, 2001; SILVA, 2004).

Para o desenvolvimento do trabalho, buscou-se avaliar a originalidade da técnica aplicando ferramentas operacionais de processamento digital e análise de imagens em aços inoxidáveis ABNT 304 e 310S. Este projeto de pesquisa está dividido na seguinte maneira: caracterização superficial e dos perfis dos pites, classificação e distribuição morfológica, mediana do tamanho dos pites relacionando com as mudanças microestruturais e na diferença na composição química dos aços inoxidáveis austeníticos ABNT 304 e 310S, após serem submetidos a diferentes tempos de exposição em névoa salina.

O Laboratório de Análise de Imagens de Materiais, junto com o Grupo de Eletroquímica e Corrosão da UNESP, Campus de Guaratinguetá, estabeleceu uma metodologia que permite selecionar, classificar e quantificar os pites, através de medidas de observação direta e o uso das ferramentas de processamento digital e análise de imagens.

Para esta finalidade, utilizaram-se programas de domínio público e de baixo custo que foram adaptados para analisar superfícies com baixo ou alto relevo, como consequência de uma menor ou maior resistência à corrosão do material. Da análise frontal da superfície obtém-se a densidade de pites, diâmetros máximo, mínimo, médio, área média, desvio padrão e a fração de área corroída. Com a seção transversal se realiza a classificação morfológica, distribuição e dimensionamento total dos pites.

A redação do trabalho está organizada da seguinte forma: capítulo 1, uma breve explanação generalizada com os objetivos e justificativa que motivaram o desenvolvimento deste projeto de pesquisa; capítulo 2, o desenvolvimento da metodologia experimental demonstrando a originalidade da técnica aplicada para classificação morfológica e seleção dos pites.

No capítulo 3, é mostrados a fundamentação teórica e os aspectos gerais do trabalho como: formas da corrosão localizada, técnicas de avaliação dos pites e os aços inoxidáveis. O capítulo 4 trata dos métodos empregados na pesquisa, integrando os resultados da caracterização dos materiais e equipamentos usados. O capítulo 5 apresenta os resultados e discussão; o capítulo 6 aborda as conclusões, comentários finais e referências. Finalmente, o capítulo 7 apresenta o anexo e traz as propostas de trabalhos futuros e de abertura de novas linhas de pesquisa.

1.1 - OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma técnica alternativa para o estudo da morfologia e evolução da corrosão por pites em aços inoxidáveis austeníticos ABNT tipos 304 e 310S, após ensaios normalizados de exposição à névoa salina.

Foi realizada a quantificação e classificação dos pites, bem como o estudo da variação temporal dos parâmetros que determinam a forma e evolução dos pites.

Diferentes condições de tratamentos térmicos foram realizadas junto aos materiais, visando correlacionar as mudanças microestruturais com o crescimento dos pites.

1.2 - JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A inspeção visual e a perda de massa tornam-se técnicas pouco adequadas para a avaliação da corrosão localizada, devido a pequenas áreas e especialmente quando existem pites que crescem, preferencialmente em profundidade.

Este projeto se justifica pelo uso do aço inoxidável e o crescente consumo de materiais estrutural no Brasil.

Desenvolvimento de uma técnica alternativa eficiente e econômica a partir da análise microestrutural, processamento digital e análise de imagens.

A exeqüibilidade desta técnica é caracterizada pela aplicação de critérios rigorosos de microscopia óptica e etapas de preparação metalográfica, para desenvolver um método descritivo que determina a evolução dos pites pela classificação e distribuição da corrosão localizada em função do meio corrosivo, associando-a com as características microestruturais.

A técnica de processamento digital e análise de imagens desenvolvida pelo grupo de Corrosão e Eletroquímica junto com o Laboratório de Análise de Imagens de Materiais da UNESP, Campus de Guaratinguetá possui aplicabilidade em diversos materiais que sofrem corrosão por pites em quaisquer meios, viabilizando a abertura de novas linhas de pesquisas na área da ciência dos materiais, especificamente a corrosão.

CAPÍTULO 2

ORIGINALIDADE

2.1 - DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA A CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E A EVOLUÇÃO DA CORROSÃO POR PITES NOS MATERIAIS

A originalidade desta tese de doutorado não está simplesmente no estudo da corrosão por pites nos aços inoxidáveis austeníticos tipos ABNT 304 e 310S quando submetidos aos testes de corrosão, mas no desenvolvimento da metodologia experimental baseada na aplicação de técnicas de processamento digital e análise de imagens para caracterização morfológica e determinação da cinética que governa toda a evolução temporal e o crescimento dos pites, correlacionando-as com as mudanças microestruturais.

A inspeção visual e as medidas feitas pela mudança de massa não são técnicas apropriadas para avaliar a corrosão localizada, particularmente onde a profundidade de penetração ou de pequena secção transversal no material são aspectos importantes.

A análise de imagens pode ser uma ferramenta alternativa para avaliar a corrosão por pites, através da determinação dos números de pites e suas características morfológicas [CODARO, 2001; CODARO 2002; SILVA 2004].

Os parâmetros estatísticos estão associados com a morfologia e da corrosão a ser considerada e determinada. Os pites podem ser classificados em diversas geometrias: estreitos, profundos, largos e até superficiais, isolados ou juntos. Apresentam características semelhantes a uma superfície rugosa, idêntica à corrosão [ROWE, 1976; ASTM G 46-1998].

As propostas para o desenvolvimento da metodologia experimental neste trabalho baseiam-se em conceitos de preparação metalográfica, utilização das técnicas de microscopia óptica e de processamento digital e análise de imagens visando a examinação, classificação e a evolução da corrosão por pites em materiais estruturais.

Este método apresentou-se eficiente em materiais que possuem tendência a sofrer corrosão localizada, especialmente por pites como aços inoxidáveis austeníticos ABNT 304 e 310S, ligas de alumínio das séries 2xxx e 7xxx e Ti-6Al-4V, com alta e baixa densidade de pites.

2.2 - PARÂMETROS DIMENSIONAIS E MORFOLÓGICOS (FATORES DE FORMA)

A terminologia usada para a definição dos parâmetros associados com a corrosão por pites é apresentada a seguir (GUILLAUMIN, 1995).

A] Parâmetros de Tamanho:

Profundidade dos pites (h), Perímetro dos pites (p), Perímetro convexo dos pites (p_c) e a Área dos pites (A_s).

B] Descrição das formas (GUILLAUMIN, 1995):

$R = p^2/4\pi A_s$ (Parâmetros sensíveis aos pites arredondados) $H = p^2/p_c^2$ (Parâmetros a fim de revelar as anomalias sobre os contornos dos pites) e $E = h^2/A_s$ (Parâmetros sensível para os pites alongados).

C] Parâmetros Específicos (PICKELING, 1995):

Raio da boca do pite (r_m), Raio máximo do pites (r_M), Área da boca do pite medida pela superfície corroída (a_m), Área total do pite (proporcional à perda de massa local e determinada pela corrente Faradaica, através de métodos eletroquímicos, a razão de aspecto (ar) $ar = h/2r_m$ é usada para geometrias simples e é independente do tamanho dos pites.

D] Parâmetros Populacionais [ASTM G 46 – 1998; ISO 11463 – 1995]:

Densidades dos pites/ m^{-2} (A), média de a_m/mm^2 (B) e média de h/mm (C). Estes últimos parâmetros são usados na descrição quantitativa para avaliar o grau da corrosão localizada.

O parâmetro sugerido para descrever a retangularidade (Area-Box) é definido como a relação entre área do pite e a menor área do retângulo (secundário) em que o pite se inscreve.

Entretanto, com o objetivo de testar a eficiência destes parâmetros e visando a classificação geométrica e a evolução temporal que governam o crescimento dos pites criou-

se o um quadro digital de testes para a análise geométrica que incluem figuras representadas pela cor preta, conforme a Figura 1.

O quadro de testes para a análise geométricas é formado por famílias de triângulos (representando pites cônicos), retângulos (pites cilíndricos) e círculos ou semi-círculos (para esférico ou pites hemisféricos), baseado em um comprimento padrão de referência de 50 pixels.

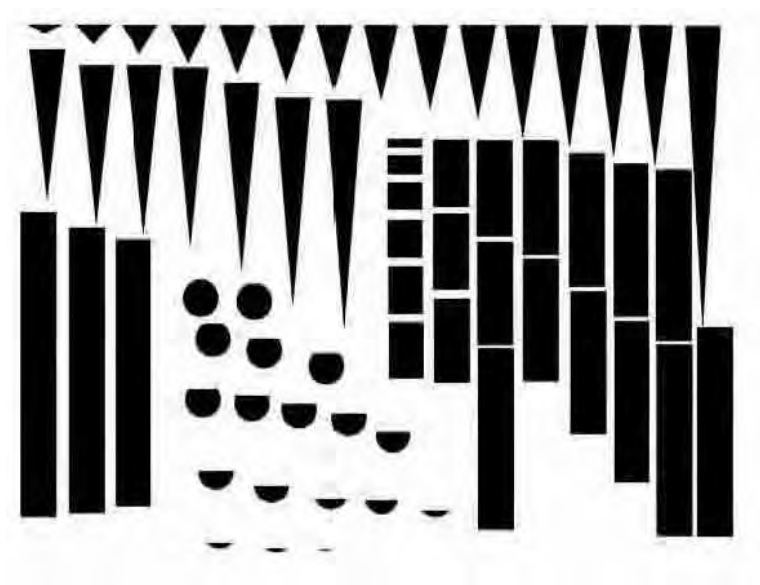
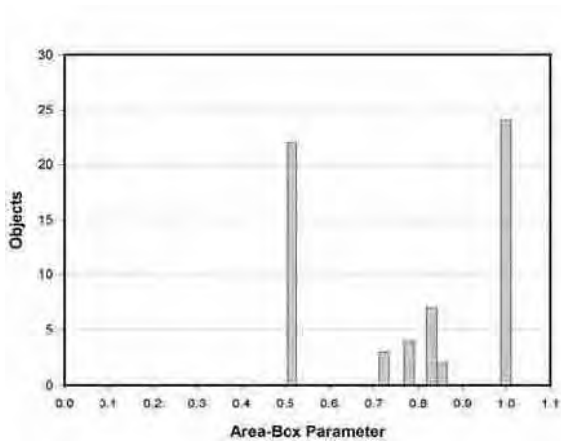
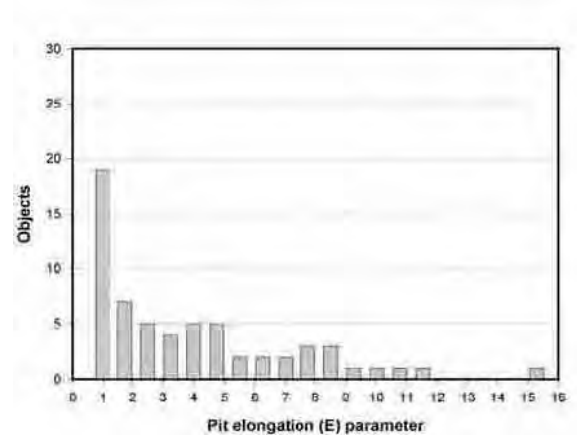


Figura 1 – Quadro teste para a análise geométrica dos pites [CODARO, 2002]

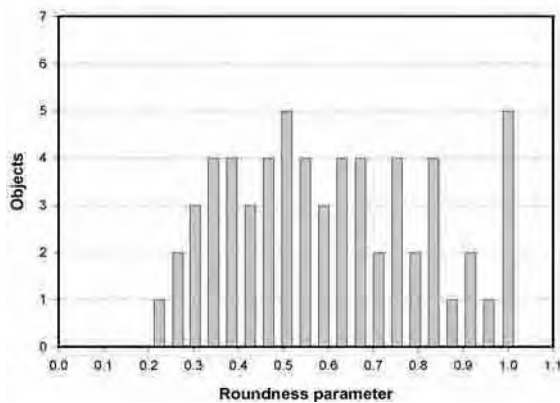
O comprimento da linha de referência é definido pela face horizontal de todos os retângulos, triângulos e o diâmetro de círculos truncados (figura 1). A medida da retangularidade, o parâmetro AB, tem como finalidade a separação ou determinação das três formas geométricas (famílias), resultando numa distribuição com três modos distintos representado pela figura 2(a) que em contrapartida, não foram observados para os outros parâmetros de forma citados, que não permitem identificar essas diferentes famílias, de acordo com as Figuras 2(b), (c) e (d) (WOJNAR, 1999; RUSS, 1998; CODARO, 2001; CODARO, 2002; SILVA, 2004).



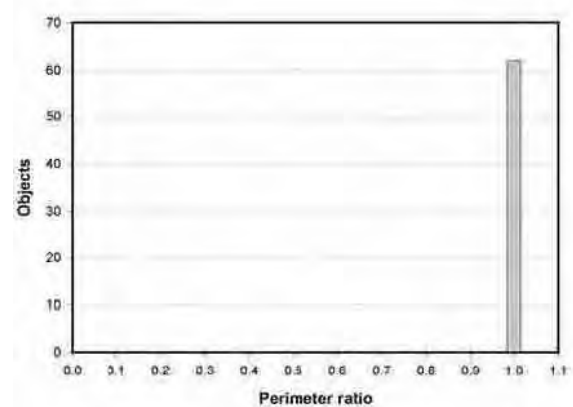
a) Retangularidade



b) Parâmetro de tamanho dos pites



c) Retangularidade



d) Razão do Perímetro

Figura 2 – Distribuição das formas geométricas para a imagem teste, de acordo com a Figura 1 [CODARO, 2002]

Os três grupos populacionais correspondem as seguintes distribuições, observando a figura 2a:

a] A retangularidade (AB) com os valores em torno (próximo) 0.5, representam triângulos simulando pites cônicos;

b) A retangularidade (AB) com valores ao redor de $\pi/4$ corresponde à círculos ou semi-círculos, caracterizando pites esféricos ou hemisféricos;

c) A retangularidade (AB) com valores igual a 1, corresponde a retângulos ou quadrados, representando pites cilíndricos.

Portanto, com o aumento da largura (w) isto corresponderá a forma geométrica equivalente a boca do pite ($2r_m$) com tendências as morfologias cilíndrica, cônica e hemisféricas.

A razão largura/profundidade (AR), aqui denominada razão de aspecto (AR) e a retangularidade determinam exatamente os limites para a classificação geométrica dos pites individuais, podendo ser observado no diagrama e representado pela Figura 3.

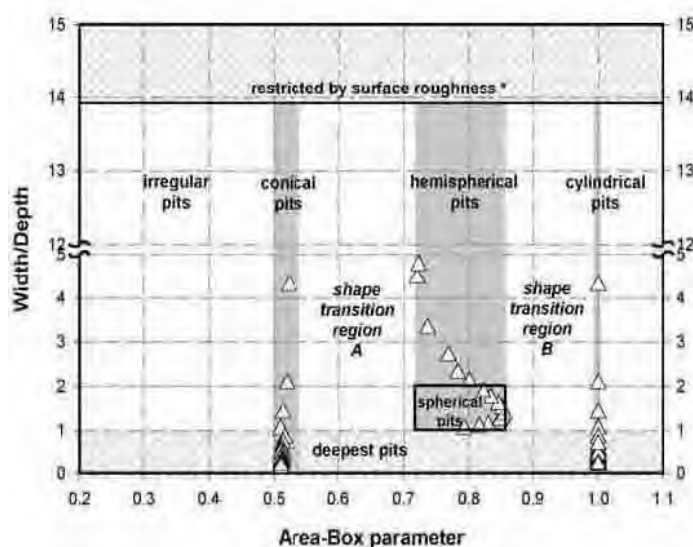


Figura 3 - Diagrama para determinação dos objetos e a razão de aspecto da corrosão por pites nos materiais (Largura-Profundidade) versus retangularidade (CODARO, 2001; CODARO, 2002; RIBEIRO, 2004, SILVA, 2004)

As faixas em cinza na figura 3, correspondem ao espalhamento em relação aos valores teóricos de retangularidade devido à divisa das imagens em pixels, o que leva a uma distorção nos valores das áreas dos objetos para triângulos e círculos.

O diagrama para determinação dos objetos e a razão de aspecto da corrosão por pites nos materiais em função da retangularidade tem como objetivos gerais: (a) classificar a morfologia dos pites, (b) avaliar a cinética temporal que governa o crescimento dos pites e (c) comportamento morfológico do pites em relação a toda extensão (tempo de exposição) ao meio corrosivo.

Para os pites fechados e esféricos, a razão de aspecto (AR) é menor que 2 e a retangularidade (AB) ao redor de $\pi/4$, os pites cilíndricos apresentam valores (AB) próximos de 1, os cônicos individuais são mais alto na faixa 0.5. Os pites hemisféricos

possuem a razão de aspecto (largura/profundidade - AR) acima de 2, e a retangularidade ao redor de $\pi/4$, os pites na geométrica irregular ou não definida apresentam valores menores que 0.5 para a retangularidade.

A região de transição A (pites quase-cônicos e/ou quase-hemisféricos) e B (pites quase-hemisféricos e/ou quase-cilíndricos) representa os pites que tenderam para geometria melhor definidas durante seu crescimento.

Portanto, em materiais metálicos, a presença de defeitos superficiais (inclusões, trincas, microfraturas, precipitados etc.) favorece a nucleação dos pites em diferentes geometrias e induz a mudanças na cinética do sistema.

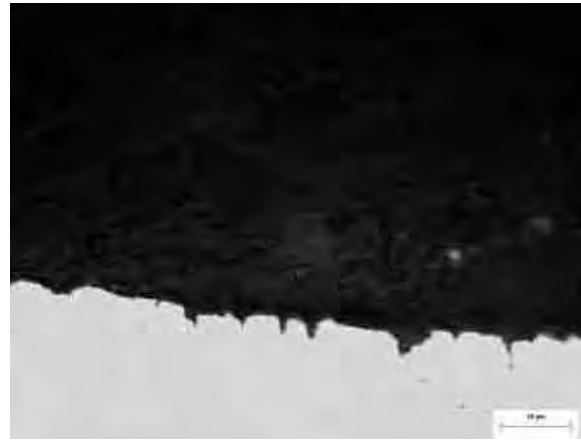
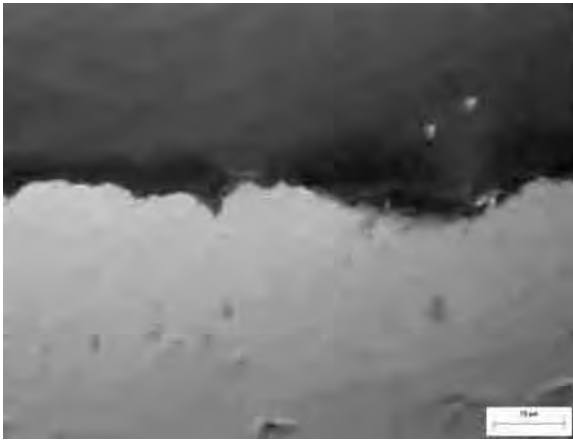
As diferentes geometrias estão relacionadas com a forma original desses defeitos. No entanto, durante o crescimento dos pites essas geometrias podem ser modificadas numa magnitude que dependerá do mecanismo de crescimento, microestrutura local e a natureza do ambiente corrosivo [GENTIL, 1996; CALLISTER, 2002; CODARO, 2001; CODARO, 2002].

2.3 - PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DO PERFIL DAS IMAGENS

Na análise de perfil buscou-se realizar os testes de corrosão, por análise de imagens obtidos por microscopia em campo claro. As características morfológicas dos pites foram determinadas ao acaso, através da secção vertical dos corpos de prova feita cuidadosamente com baixa carga e rotação numa cortadeira de precisão em seguida lixada e polida.

Entretanto, com o objetivo de assegurar a baixa deformação na região do perfil aplicou-se uma resina de epóxi (Brascola Araldite 24h) junto às superfícies corroídas antes do corte e embutimento com a resina fenólica para o polimento mecânico. A resina tem como função proporcionar o contraste e preservar a área degradada.

Foram utilizados em todas as etapas o programa de domínio público tipos UTHSCSA Image Tool 2.00 Alfa 3, com Plugs-ins suíte Reindeer Games "The Image Processing ToolKit" 3.0, and Media Cibernéticos IMAGE PRO PLUS 4.5 [RUSS, 1998] .



a) Ti-6Al-4V perfil das imagens b) Al 7050 perfil das imagens [CODARO, 2002]

Após a aquisição das imagens (figura 4a e 4b) realiza-se a limiarização (Threshold) que visa a delimitar cada perfil (figura 4c e 4d).

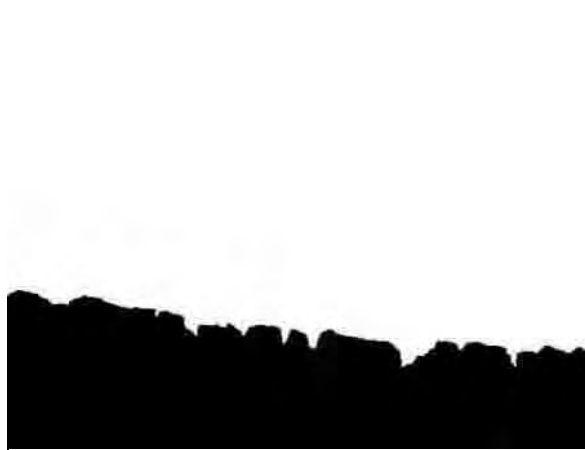


c) Imagem binária da figura a, após aplicação do filtro “threshold” [CODARO, 2002] d) Imagem binária da figura b, após aplicação do filtro “threshold” [CODARO, 2002]

Para a remoção dos buracos e artefatos decorrentes da resina ou próximo da região afetada pela corrosão aplica-se o filtro “Fill Holes” através da função Reindeer Games Plugs-ins (figura 4e e 4f).



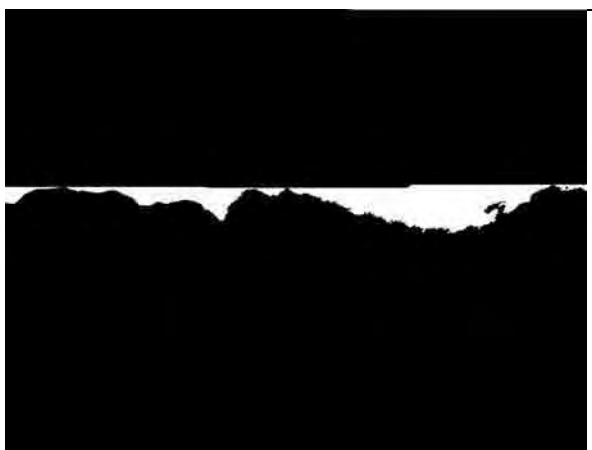
e) Resultado operação do filtro “Fill hole” na figura c [CODARO, 2002].



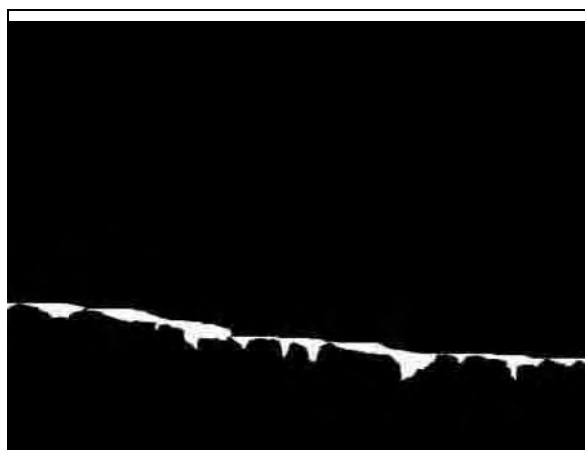
f) Resultado operação do filtro “Fill hole” na figura d [CODARO, 2002].

Esta operação foi realizada em duas etapas para o fechamento dos buracos (artefatos) pretos e brancos sem ocasionar nenhuma modificação nas informações dos perfis [21], entretanto, em uma cópia de cada imagem gerada na última etapa os pites são completos (cheios) pelo desenvolvimento de 50 erosões binárias usando elemento estrutural horizontal - 5x1 IMAGE PRO PLUS Program [RUSS, 1998].

A cada superposição e subtração das imagens feitas pelo filtro “Fill Holes”, a imagem corresponde ao fechamento dos pites separando as cavidades da região corroída (figura 4g e 4h).

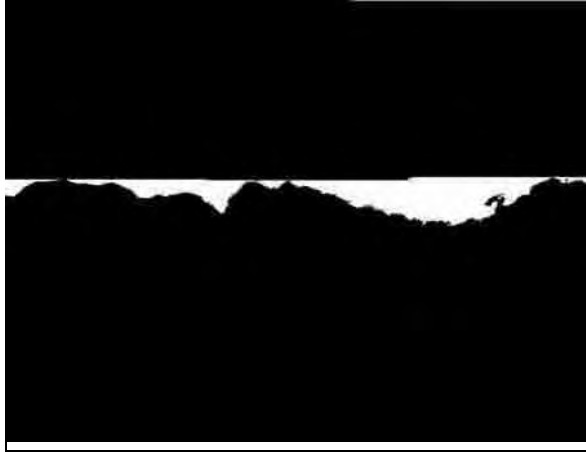


g) Separação dos pites, após a erosão na figura e [CODARO, 2002].

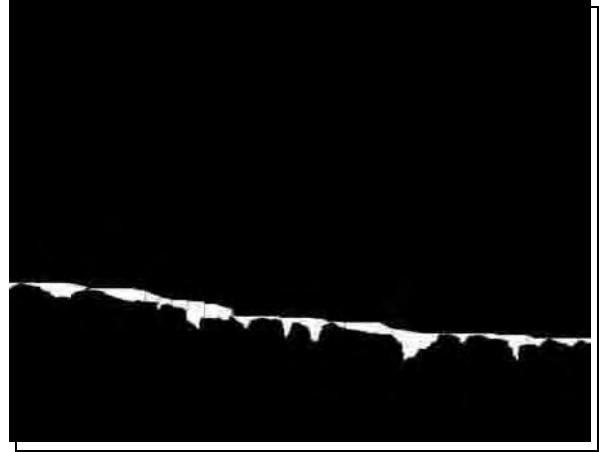


h) Separação dos pites, após a erosão na figura f [CODARO, 2002].

Finalmente, o último passo do processamento foi à aplicação do filtro “Waltershed” visando a delimitação os limites e/ou as fronteiras laterais dos pites (figura 4i e 4j).



i) Pites na figura g delimitado pelo filtro “Waltershed” [CODARO, 2002].



j) Pites na figura h delimitado pelo filtro “Waltershed” [CODARO, 2002].

Figura 4 – Seqüência de processamento digital e análise de imagens nos perfis corroídos em Ti-6Al-4V e Al 7050.

CAPITULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Algumas ligas de aplicação no ramo da engenharia, como os aços inoxidáveis, Al, Ti e suas ligas, por exemplo, são favorecidas com a formação de uma fina camada de óxido passiva. Essas camadas se formam naturalmente sobre a superfície do metal e reduzem a taxa de corrosão. Tais filmes passivos são freqüentemente susceptíveis à avaria localizada resultando fundamentalmente na dissolução acelerada do material ou de alguns de seus componentes [UHLIG, 1967; BRESLIN, 1997; JAYALAKSHMI, 1996] .

Os fatores relacionados com a corrosão localizada podem iniciar ou até acelerar falhas estruturais nos componentes na forma de buracos, poros ou trincas induzindo a fratura. A corrosão por pites pode ser classificada como ataque localizado resultando num mecanismo rápido de penetração e remoção do metal em pequenas áreas.

Os pites ocorrem por intermédio de diversos fatores que influenciam diretamente sua formação tais como: tipo de liga, composição, integridade da camada do filme de óxido, presença de outro material, processos de fabricação favorecendo a produção de descontinuidades, poros, buracos, substâncias químicas e solicitação mecânica.

Os materiais e seus componentes estão sujeitos à corrosão localizada em diferentes ambientes, podendo-se incluir o aço carbono, aço inoxidável, titânio, níquel, alumínio e cobre. As superfícies desses metais e ligas são passivadas quando são expostos a soluções contendo ânions agressivos, como por exemplo, os haletos (Cl^- , F^- , Br^-).

Nestes casos a corrosão por pites pode ser definida como a dissolução local conduzindo a formação de cavidades, trincas e/ou buracos [ERNEST, 1997; NEWMAN, 1984].

A classificação morfológica dos pites nos materiais pode variar desde suas características na forma rasa para a geometria cilíndrica, poros aparentemente com a geometria hemisférica. As características populacionais e o aspecto morfológico dos pites nas ligas dependem dos parâmetros metalúrgicos (estrutura cristalina) e químicos (composição), também do ambiente (brometos, molibdatos e cloretos) e suas respectivas condições de concentração. Os pites provocam o aumento da tensão e a nucleação de trincas num componente em uso [SHREIR, 1978].

A corrosão por pites no alumínio e suas ligas ocorrem devido a quatro fatores: adsorção do ânion; reação química do ânion absorvido com íon de alumínio no retículo de óxido do alumínio; penetração do filme de óxido pela agressividade do íon, resultando na dissolução da fina camada de óxido e ataque direto do metal exposto pelo ânion.

A susceptibilidade do metal para a corrosão por pite como também a taxa pela qual ocorre a corrosão localizada depende da integridade do filme de óxido, entretanto, os pites ocorrem em diversos metais e ligas pelas mais diferentes maneiras. Como exemplo, o aço inoxidável Fe-17Cr é mais susceptível à corrosão por pites em solução de cloretos que o aço inoxidável austenítico AISI 304, o qual em relação à liga Fe-18Cr-8Ni-3Mo possui maior resistência à corrosão por pites (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1992).

De modo geral, o titânio e suas ligas têm resistência superior às dos materiais ora apresentados. É importante evitar a extensa generalização a respeito da tendência de uma liga sofrer corrosão por pites. Deste modo, as ocorrências da formação da corrosão localizada no aço inoxidáveis podem ser observadas em soluções contendo íons de cloretos e brometos, hipocloritos ou ânions de bissulfetos, nas quais a formação de pites tenderá a ser eliminada pela presença dos oxi-ânions tais como NO_3^- ou SO_4^- (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1992).

Na corrosão localizada é difícil prever a localização dos pites sobre a superfície dos metais, a sua distribuição e tamanho dependerá da condição estrutural da superfície metálica e além do ambiente de trabalho (ambiente corrosivo). A taxa de corrosão por pites é aumentada significativamente diante das condições da superfície dos metais (rugosidade), porém torna-se difícil determinar a exata extensão do ataque [FRANKEL, 1998; SILVA, 2003].

Na figura 5, podemos observar os tipos de ataque sobre a superfície dos metais visto que podem alterar suas formas de corrosão desde generalizada para a localizada.

Na figura 6, observa-se o estágio da formação de um pite que se inicia na quebra e pela instabilidade termodinâmica do filme da camada de óxido, tendendo a formação da corrosão por pites, em seguida transformando em corrosão sob tensão, através do mecanismo da propagação de trincas completas.

A morfologia dos pites e a taxa crescimento para a propagação das trincas nos metais e ligas são aspectos muito diferentes e até o momento imprevisíveis. Sua formação é

influenciada pela estrutura metalúrgica do metal e a característica do projeto. Alguns materiais sofrem o ataque localizado nos contornos dos grãos e caminham em direção à corrosão intergranular.

As tabelas 1 e 2 mostram os exemplos de heterogeneidades e fatores que direcionam o metal à corrosão localizada. Diante destes podemos destacar alguns importantes parâmetros que influenciam a formação dos pites na superfície do metal: (a) condições dos ambientes; (b) áreas deformadas mecanicamente que tornam predominantemente anódica comparada com uma região da superfície do metal não deformada em ambientes pouco agressivo ou brando; (c) a sensitização em aços inoxidáveis que favorecerá a formação da corrosão intergranular quando submetidos aos testes de corrosão, como por exemplo, em ácido nítrico.

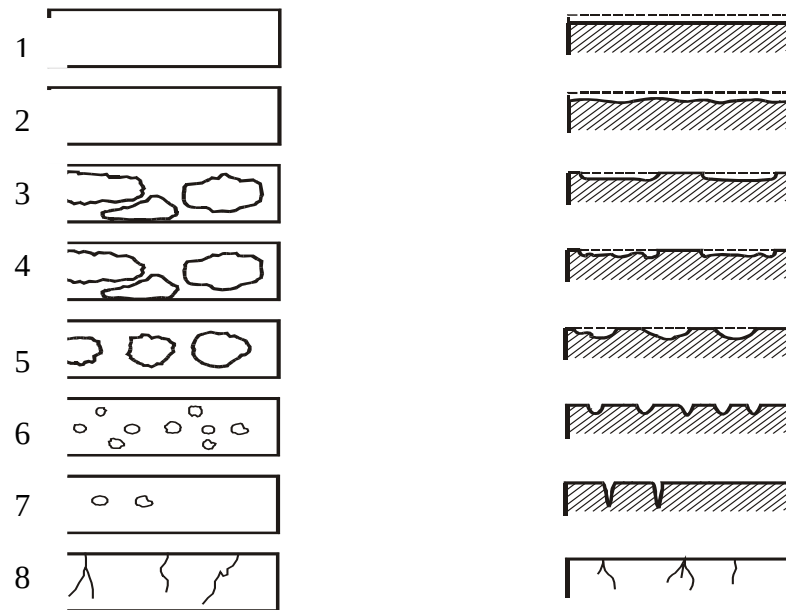


Figura 5 – Diferentes tipos e formas de corrosão: (1) corrosão geral em superfície lisa ou plana, (2) corrosão geral com superfície irregular, (3) corrosão local e superfície lisa, (4) corrosão local com superfície irregular, (5) pites largos, (6) pites médios, (7) pites profundos e (8) presenças de microtrincas [SHREIR, 1978].

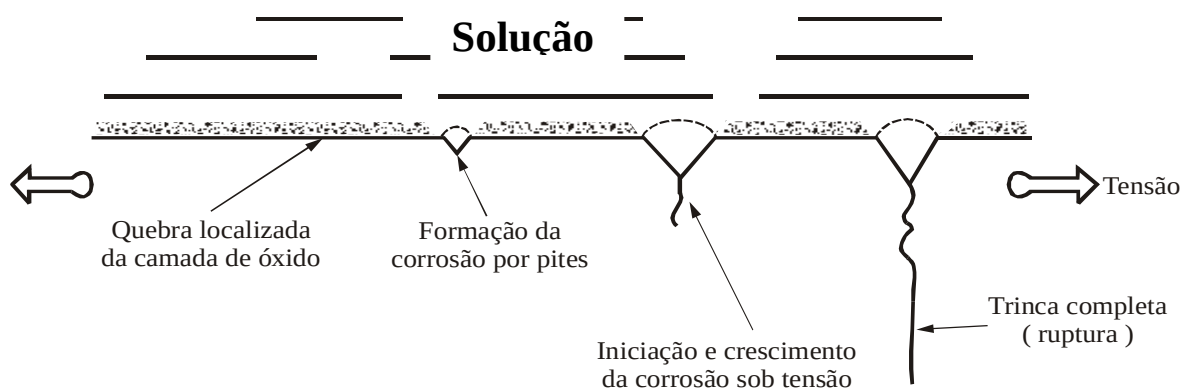


Figura 6 – Estágios da formação da corrosão localizada: quebra do filme, formação, iniciação, crescimento e trinca completa iniciando a ruptura [SHREIR, 1978; BROWN, 1971].

Tabela 1 – Heterogeneidades que levam à corrosão localizada [SHREIR, 1978].

Heterogeneidade (Metal e superfície do metal)	Área do metal predominantemente anódica
Estruturas metalúrgicas diferentes.	Contornos de grãos, fases com características reativas diferentes, solução sólida, compostos intermetálicos, inclusões, segregação, poros, etc.
Diferentes condições metalúrgicas, devido aos tratamentos térmicos e processos de fabricação.	Área adjacente deformada a frio para recozimento, metal sujeito à tensão anódica externa para não deformada.
Corrosão galvânica por concentração diferencial nos cantos ou depósitos sobre a superfície do metal ou uma outra configuração geométrica que resultam em diferentes concentrações dos reagentes anódicos.	Área do metal em contato com baixa concentração dos reagentes catódicos.
Descontinuidades na formação e condução do filme de óxido ou descontinuidades no revestimento metálico.	Área exposta do substrato do metal, neste caso os defeitos do metal passivado resultam numa camada de filme passivo em células ativas passivadas e ainda com intensa corrosão localizada sobre a área ativa.
Metais dissimilares em contato – Corrosão bimetalica.	Prevalecendo em metal com maiores potenciais de corrosão negativos.

Tabela 2 – Heterogeneidades que levam à corrosão localizada [SHREIR, 1978].

Heterogeneidades (Ambiente)	Área do metal predominantemente anódica
Diferenças na aeração ou na concentração de outros reagentes catódicos	Área do metal em contato com baixa concentração
Diferenças na velocidade	Metal em contato com solução de alta velocidade e reatividade química
Diferenças na temperatura	Área do metal em contato com solução em altas temperaturas.
Diferenças no pH ou na concentração do sal	Metal em contato com solução de baixo pH ou alta concentração do sal

3.1 - FENOMENOLOGIA DA CORROSÃO LOCALIZADA POR PITES

O fenômeno da corrosão por pites nos metais e liga está associado com o desenvolvimento ou interação eletroquímica num local adequado, induzindo à degradação da superfície, principalmente ao efeito ambiental a qual é submetida, portanto, a corrosão localizada ocorrerá somente com a presença de espécies aniônicas agressivas que usualmente são íons de cloretos e brometos (FRANKEL, 1998).

Os pites são considerados de natureza autocatalítica, sendo que o estágio de desenvolvimento do pite inicia-se através da nucleação em pontos pré-definidos e/ou preferencialmente em imperfeições, buracos e inclusões, até o estágio de crescimento [FOLEY, 1986].

O processo na formação da corrosão por pites pode ser definido de maneiras dinâmicas associadas aos seguintes aspectos: o processo ocorre inicialmente com a formação do filme passivo e delgado; o processo ocorre em toda estrutura interna do filme; a cinética de crescimento dos pites metaestáveis possui curto período de formação e formam abaixo do potencial crítico do sistema e em seguida passiva-se e o crescimento do pite

estável, ocorre acima de um determinado potencial, denominado potencial crítico do pite [NEWMAN, 1984].

(GALVELE, 1970) definiu também uma regra simples para determinar o valor crítico e o fator $x.i$, onde x é a profundidade dos pites e i é a densidade de corrente, correspondente ao crescimento linear estável da corrosão localizada. A acidificação e os íons de cloretos são aspectos importantes para o desenvolvimento, sustentabilidade e crescimento adequado dos pites.

Este valor pode ser usado para determinar a densidade de corrente requerida no início ou sustentação do pite em relação aos prováveis defeitos, independente do seu tamanho. O modelo proposto baseia-se em reações químicas, como hidrólise, difusão e a migração que é a propriedade fundamental para a ocorrência da formação da corrosão por pites.

Outros fatores determinam a agressividade do ambiente de ataque, tais como a concentração do cloreto que atacará bruscamente o metal devido à alta acidez, então o valor crítico de xi pode ser o fator responsável pela estabilidade durante a formação e crescimento dos pites.

A densidade de corrente dos pites aumenta com a concentração iônica na solução e pela condição de supersaturação, o filme salino forma-se sobre a superfície do pite criando pontos de concentração iônica. É necessário saber que, para que ocorra o crescimento dos pites, é determinante a presença de um filme salino nas áreas geométricas inferiores do pite.

Os valores obtidos formam o equilíbrio da camada de sal sobre a superfície. Diante destas condições podemos destacar: (a) a taxa de crescimento do pite é limitada pelo transporte de massa em todo sistema; (b) os filmes salinos não são necessariamente responsáveis pela estabilidade e crescimento dos pites, o transporte de massa e nenhuma camada salina deveriam estar no interior do pite para o seu estágio de incubação.

Alguns parâmetros possuem fortes efeitos sobre a tendência da formação e na morfologia dos pites, destacando-se: Potencial eletroquímico; efeitos da composição química das ligas; temperatura de tratamento térmico e inibição dos pites.

3.2 - PRINCÍPIOS DA FORMAÇÃO DA CORROSÃO POR PITES

A corrosão pode ser classificada, em oito formas diferentes, desde a forma localizada até generalizada associada a algum processo interativo entre a superfície e o meio com a ruptura da camada passivadora. Considerando suas peculiaridades e suas variáveis, os principais tipos de corrosão são: (a) corrosão por pites, (b) corrosão intergranular, (c) corrosão por frestas, (d) corrosão galvânica, (e) corrosão sob tensão, (f) corrosão sob atrito e (g) fadiga-corrosão (GUIMARÃES, 2002; ZAVAGLIA, 2002; GENTIL, 1996; CALLISTER, 2002).

A corrosão intergranular é um tipo de corrosão que se baseia no ataque corrosivo em toda extensão do material. Nos aços inoxidáveis preferencialmente, ocorre quando tratados entre as temperaturas 500 e 800°C, por períodos de tempos determinados. Esses materiais se tornam mais susceptíveis devido ao fenômeno de sensitização que resulta na precipitação preferencial de partículas de segunda fase (Cr_{23}C_6) em toda extensão dos contornos dos grãos e o empobrecimento de elementos de liga nas regiões adjacentes (CALLISTER, 2002; GUIMARÃES, 2002).

A corrosão por frestas é definida como consequência de diferentes áreas (concentrações) dos íons ou dos gases que são dissolvidas e participam do sistema. O mecanismo baseia-se nas seguintes etapas: (a) consumo do oxigênio dissolvido na solução dentro da fresta; (b) aumento da concentração de cloretos e acidez no eletrolítico; (c) ruptura do filme passivador e (d) propagação da corrosão (AZUMA, 1996).

A corrosão galvânica ocorre quando dois metais ou ligas possuem diferenças em suas composições e são induzidos (mergulhados) numa solução corrosiva ou acoplados eletricamente, ao mesmo tempo [GENTIL, 1996].

A corrosão por pite, é a forma muito atuante nos aços inoxidáveis. Trata-se de um processo que tende à ruptura de um filme passivo sob um determinado valor de pH [BASTOS, 2000; ERNEST, 1997].

Freqüentemente são mencionados que nos aços inoxidáveis a corrosão por pites tende a aumentar sobre a superfície, partindo inicialmente de um revestimento metálico poroso. Definem-se os aspectos morfológicos dos pites com geometrias complexas como, por exemplo, garrafa e/ou frasco em metais e estruturas soldadas.

Esses pites na prática são perigosos, pois correspondem a ambiente instáveis que conseqüentemente são favorecidos pela difusibilidade, especialmente os materiais que possuem precipitados criando regiões de nucleação - boca do pite [ERNEST, 1997].

O mecanismo de formação da corrosão localizada no aço inoxidável em solução contendo cloretos, ocorrerá em sítios (locais) em que os pites iniciarão ou ocorrerão de maneira ao acaso e inevitáveis.

Freqüentemente os pites são alojados no interior das irregularidades (microfrestas) e a sua taxa de propagação é maior que numa superfície menos rugosa (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1999).

A corrosão por pites dependem de vários fatores como: (a) Relação entre as áreas catódicas e anódica; (b) diferenças na aeração; (c) Mudanças no pH em locais catódicos e anódicos e (d) a presença de produtos de corrosão (filmes) sobre a superfície do metal estes formados durante a reação no processo de corrosão (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1999).

Os fundamentos para a iniciação do processo de corrosão nos materiais são definidos pela soma das taxas da reação catódica igual a soma das taxas da reação anódica, como pode ser observado na equação 3, independentemente do tipo de ataque a ser realizado : localizado e/ou uniforme.

$$\sum I_a = \sum I_c$$

Equação 3

Portanto, se o ataque for uniforme assumimos nesta situação que há a predominância única da reação catódica e anódica, desde que a área catódica S_c seja igual a área anódica S_a . Em contrapartida se o ataque for localizado, a área anódica torna-se menor que a catódica $S_a < S_c$ e a razão $i_a:i_c$ será aumentada em consequência da maior agressividade do ataque.

Resumindo, a corrosão localizada pode ser definida como uma forma de ataque que envolve células de corrosão, consistindo em grandes áreas catódicas e pequenas áreas anódicas, de acordo com as Figuras 7 (a), (b), (c) e (d).

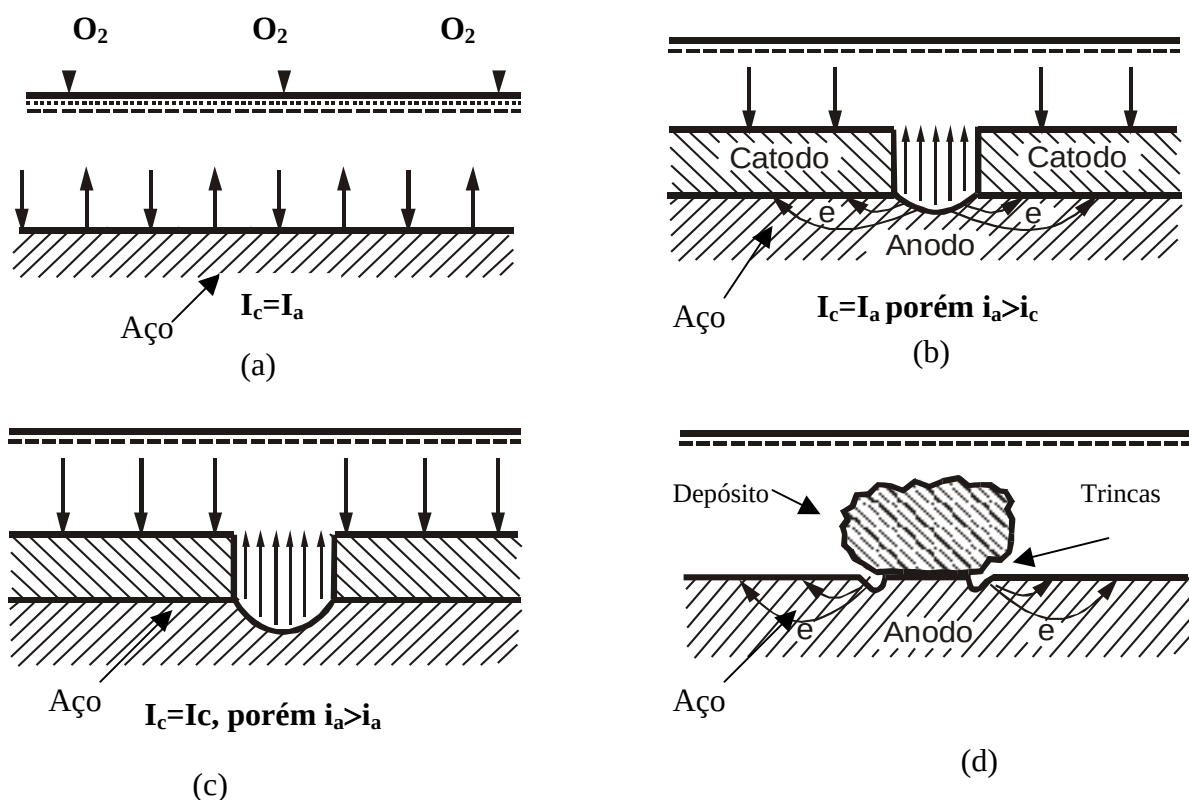


Figura 7 – Ataque localizado devido às discontinuidades em camadas ou depósitos na superfície do aço, (a) corrosão uniforme, (b) ataque localizado devido a discontinuidades, (c) aumento da taxa pelo aumento do fornecimento de oxigênio e (d) formação de microtrincas pelo depósito [SHEIR, 1978].

3.3 - EXAMINAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS PITES

A examinação inicial de uma superfície metálica corroída pode conter informações importantes e deverá receber atenção cuidadosa, isto porque a área degradada é pequena, porém perigosa. As principais técnicas para a identificação e a examinação dos pites são: inspeção visual e os ensaios não destrutivos.

A inspeção visual sobre a superfície do metal corroído com ou sem o auxílio de uma lupa de baixa magnificação (ampliação ou aumento) é uma técnica rudimentar utilizada para determinar a extensão da corrosão e o local exato dos pites.

Para o estudo dos perfis dos pites inicialmente é feito o seccionamento para que se possa determinar a evolução temporal da corrosão localizada nos materiais. Na examinação

para a determinação do tamanho e a distribuição em baixa magnificação (ampliação ou aumento) é recomendável a limpeza total, da superfície do metal, de acordo com a norma ASTM G-46, a qual define que para iniciar uma inspeção de forma adequada deve-se utilizar um aparelho óptico com magnitude (ampliação ou aumento) superiores à 20 vezes.

Para o estudo dos parâmetros de evolução dos pites como: tamanho, forma e densidade, de maneira mais crítica e detalhada recomenda-se a examinação microscópica e o entendimento das característica mecânicas, química e física dos materiais (ISO 11463-1995; ROWE, 1976).

O exame visual da superfície do metal raramente pode determinar a forma geométrica dos pites como pode ser observado em seguida, na figura 8: cilíndrico, esférico, raso, profundo, garrafa e/ou irregulares (ASTM – G 46 - 1997; ISO 11463- 1995).

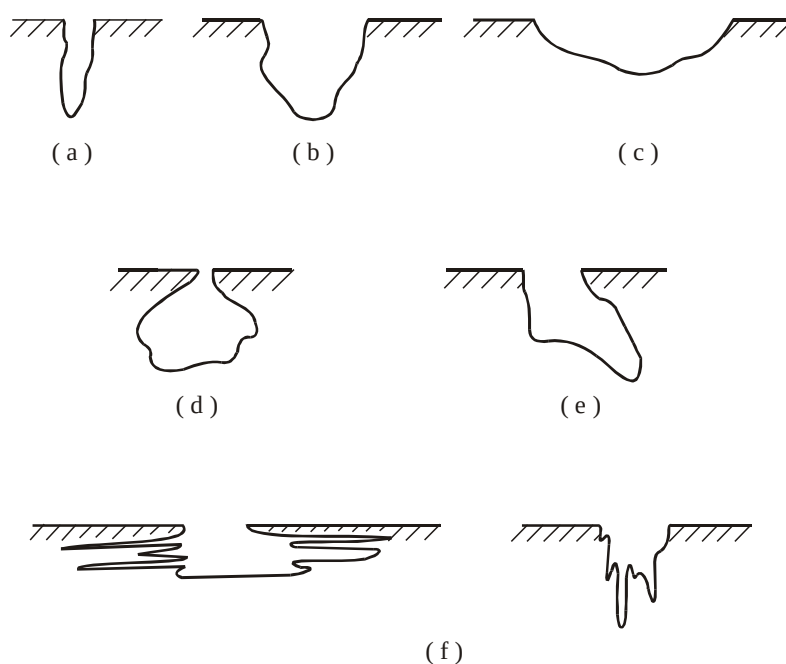


Figura 8 - Formas geométricas dos pites (a) profundos ou estreitos, (b) elíptico, (c) largo e/ou raso, (d) superficial, (e) irregular ou profundo, (f) orientação microestrutural na forma horizontal e vertical (ASTM – G 46 - 1997; ISO 11463- 1995).

Recentemente, foi desenvolvida uma técnica para a determinação do tamanho, forma e o estudo da evolução dos pites nos materiais, que envolve o seccionamento vertical em

relação ao sentido da superfície, preparação metalográfica clássica, análise microscópica e processamento digital e análise de imagens (CODARO, 2002, RIBEIRO, 2003, RIBEIRO 2004).

3.4 - DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO DOS PITES

A corrosão pode ser caracterizada por diversas maneiras e o conhecimento torna-se uma ferramenta de extrema importância, porém a aparência, as formas de ataque e as diferenças em suas morfologias evidenciam dificuldades para os profissionais em ter um indicador com nível de confiabilidade aceitável, pois as técnicas que determinam essas variações nos processos ainda que são desconhecidas ou poucas exploradas.

Pesquisadores definem que os parâmetros a ser avaliados nos materiais são tamanhos e números dos pites por unidade de área. No entanto, o diâmetro e a profundidade apresentam grande dificuldade na sua determinação, devido a certos aspectos como heterogeneidade e rugosidade da superfície do material.

Algumas técnicas são empregadas com eficiência para a determinação da morfologia, extensão e evolução dos pites nos materiais, as quais se destacam: perda de massa, ensaios de rugosidade, extensômetro e a microscopia como: análise metalográfica através de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (ROWE, 1976; ASTM E 3-95; ASTM E 1382 – 99).

A análise metalográfica é uma das principais técnicas para determinar a evolução real da morfologia dos pites, realizando-se o seccionamento do corpo de prova em direção vertical pré-selecionada e embutimento para análise do perfil, em seguida o lixamento, polimento e a microscopia, visando a quantificação dos parâmetros específicos de forma.

3.5 - MODELO PARA A AVALIAÇÃO DOS PITES

A resistência à corrosão por pites nos materiais em termos de densidade, tamanho e profundidade sobre o modelo de avaliação básico, pode ser observado na figura 10.

As colunas A e B relatam a extensão da corrosão localizada na superfície do metal, porém a coluna A é definida como a medida da taxa do número de pites locais por unidade

de área e a coluna B baseia-se na medida do tamanho comum dos pites destes locais. A coluna C refere-se às taxas da intensidade ou profundidade média de ataque real.

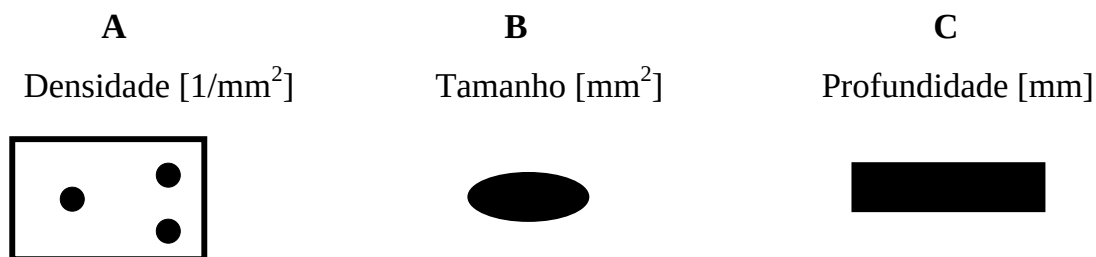


Figura 9 – Modelo de avaliação e classificação dos pites [ASTM-G 46-97; ISO 11463-95].

3.6 - PENETRAÇÃO DOS PITES

A profundidade e os pites mais profundos normalmente são mais significantes que a média da profundidade de todos os pites. A norma ISO 11463 - 1995 define que a quantificação dos pites mais profundos e que a penetração (extensão) do ataque nos materiais sejam expressas em termos de profundidade máxima dos pites ou da média dos dez pites mais profundos (ROWE, 1976).

A penetração metálica pode ser também expressada em termo de um fator do pite, que se baseia pela razão entre profundidade da penetração dos pites e a média, determinada pela perda de massa, como mostra a equação.

$$F.C.L. = P.P.M.M./M.P.M.$$

Equação (4)

Onde:

F.C.L. = Fator da corrosão localizada.

P.P.M.M. = Profundidade da penetração máxima dos pites.

M.P.M. = Média da penetração dos pites ou perda de massa.

3.7 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Os pites usualmente são divididos em dois estágios: iniciação e propagação. A dificuldade de estabelecer critérios de avaliação da corrosão por pites é que às vezes muitos dos pites após sua iniciação e não se propagam tornando encubados no sistema. Outros mesmo em pouca quantidade se propagam numa situação mais extensas que resulta num comprometimento do sistema (ROWE, 1976).

A aplicação da análise estatística nos dados envolvendo os parâmetros de corrosão tem um caráter muito importante na avaliação dos pites e seus aspectos. A probabilidade dos pites iniciarem-se sobre a superfície metálica depende de vários fatores, tais como: heterogeneidades e irregularidades superficiais, agressividade da solução, área do corpo de prova e o tempo de exposição (ASTM G 46 – 1997; CODARO, 2002).

A Figura 10, mostra o procedimento padrão para determinar os valores dos pites em termos de densidade, tamanho e profundidade baseado sobre a carta padrão ([ROWE, 1976 ; ASTM G 46 -1998).

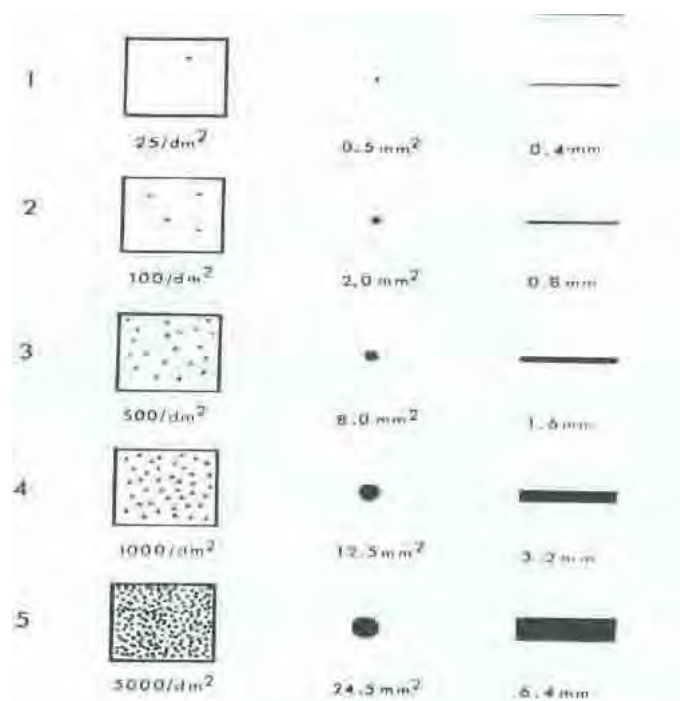


Figura 10 – Modelos para determinar os parâmetros morfológicos dos pites densidade, tamanho e profundidade (ROWE, 1976; ASTM G 46 -1998; ISO 11463-95)

Os testes de corrosão nos materiais podem ser conduzidos para determinar a susceptibilidade dos metais à corrosão por pites, porém isto não fornecerá informações sobre a taxa de propagação e os resultados somente serão válidos para avaliação das condições de exposição durante os testes de corrosão. A probabilidade da corrosão por pites [P] dados em % e depois da exposição de vários corpos de prova num determinado meio e condição pode ser expressa da seguinte maneira [ASM, 1997; PATHAK, 1971]:

$$P = N_p / N \times 100$$

Equação (5)

Onde:

N_p = é o número de pites num corpo de prova

N = é número total de corpo de prova

A relação entre probabilidade de ocorrência dos pites, áreas e tempo de exposição varia com o ambiente, exposição do metal e outros fatores. Alguns parâmetros são importantes para avaliar a morfologia dos pites pela estatística descritiva, como: a relação entre a profundidade máxima dos pites e a área da superfície corroída [ISO 11463-1995; ASM, 1997].

$$D = b \cdot A^a$$

Equação (6)

Onde:

b e a são constantes e obtidos pela relação logarítmica da medida da profundidade e a área dos pites.

Como exemplo, o alumínio exposto em soluções salinas em diferentes concentrações pode se comportar e variar de acordo com o modelo proposto pela raiz cúbica em função do tempo, conforme a equação abaixo e a Figura 10 (ASM, 1997; ROWE, 1976):

$$D = K \cdot t^{1/3}$$

Equação (7)

Onde:

K é uma constante em função da composição da solução salina e do material.

Em resumo, existem vários parâmetros que influenciam as características morfológicas dos pites nos metais e ligas, as quais se destacam: (a) composição e forma do material; (b) condições do ambiente e tempo de exposição; (c) aparência da superfície corroída; (d) identificação dos produtos de corrosão e sua distribuição; (e) caracterização dos pites como: tamanho, forma, densidade, uniformidade na distribuição, profundidade média, máxima e localização dos pites com referência à microestrutura, face, extremidade e trincas; (f) mudanças nas propriedades mecânicas como o resultado de corrosão e método por qual o determine e (g) as informações estatísticas em geral.

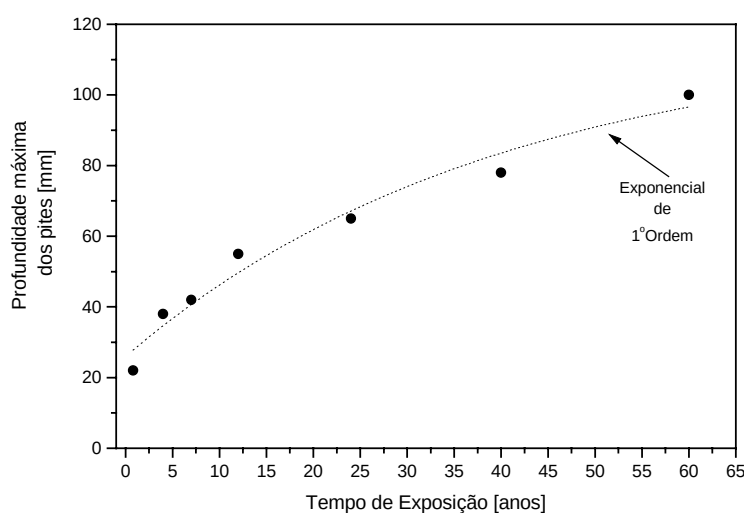


Figura 11 – Curva da taxa da corrosão localizada em tubos da liga de alumínio 5052 mostrando a relação direta entre profundidade máxima dos pites [mm] em função do tempo de exposição [anos] (ROWE, 1976; PATHAK, 1971).

3.8 - INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS E AS ESTIMATIVAS DOS INTERVALOS CALCULÁVEIS DA CORROSÃO LOCALIZADA

O tratamento estatístico dos dados visa evitar erros na interpretação dos resultados e contribui para o cálculo da população e distribuição da profundidade dos pites, extrapolação dos períodos de exposição e outros elementos de probabilidade (CREW, 1976; ASM, 1997).

(CREWS, 1976) definiu um procedimento estatístico para determinar a melhor maneira de tratamento dos dados, estimar seus intervalos e a vida útil em serviço em tubos de ferro fundido dútil e aço carbono exposto ao meio atmosférico em diferentes períodos como: 1, 2, 4 e 8 anos, visando relacionar a profundidade dos pites em função ao tempo de exposição em todas as situações, conforme a norma NBS (National Bureau of Standard).

Portanto, o teste foi feito a partir das seções dos tubos e sua exposição com faixa de corrosividade normalizada e determinada a interpolação dos dados dos pites maiores e menores em relação a sua profundidade nos períodos determinados e ainda em intervalos de 50, 80, 90 e 95%. A regressão linear marcada foi no ponto zero (0) (CREWS, 1976).

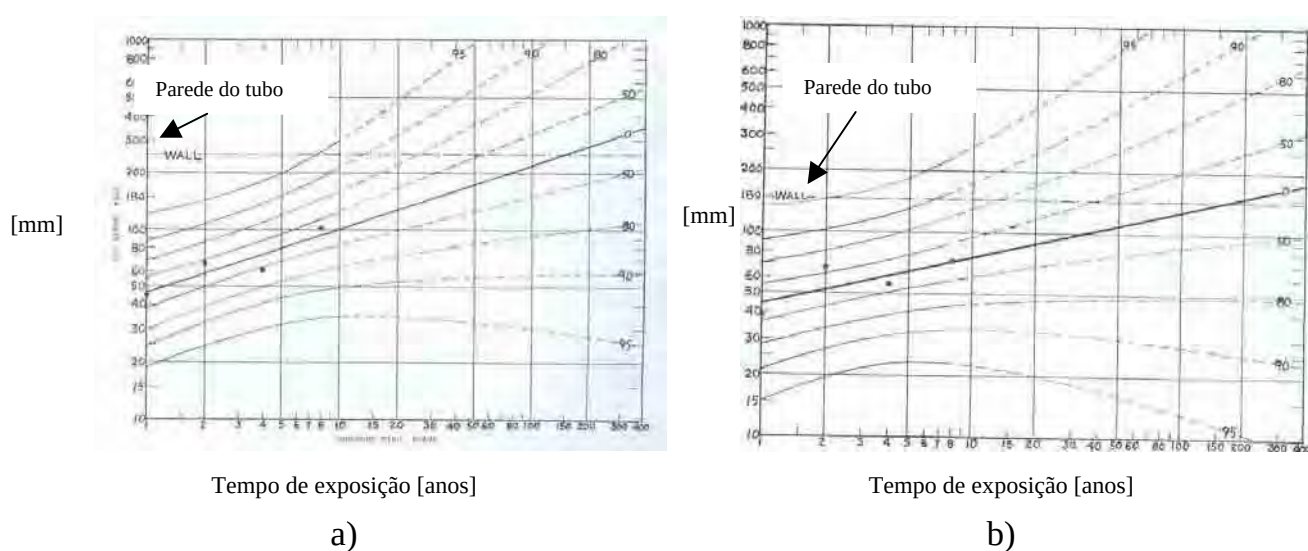


Figura 12 – Comportamento da corrosão localizada em tubos de ferro fundido e aço carbono e estimativa de intervalos da profundidade dos pites em função do tempo de exposição (CREWS, 1976).

Os resultados podem ser vistos as figuras 12 (a) e (b) e a interpretação dos dados para realizar as estimativas dos intervalos é indicada pela fração populacional da profundidade do pite entre os limites fictícios apresentados.

Na figura 12 (a) e na Tabela 3 observa-se que quanto maior o tempo de exposição, maior a profundidade dos pites.

Tabela 3 – Profundidade máxima dos pites em função do tempo de exposição em tubos de aço carbono e ferro fundido dútil [CREWS, 1976].

Tempo de exposição [anos]	Profundidade dos pites [mm] em aço carbono	Profundidade dos pites [mm] em ferro fundido dútil
1	39	45
2	66	66
4	55	60
8	71	102

Por exemplo, 90 (noventa) por cento dos pites mais profundos estão entre a faixa superior fictícia e abaixo da linha dos 90 (noventa) por cento e acima dos 5 (cinco) por cento da linha fictícia e sobre 90 por cento da estimativa da linha (CREWS, 1976).

3.9 - AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas especiais de grande versatilidade quanto a sua aplicação pela elevada resistência mecânica e química. Os aços inoxidáveis podem ser divididos em vários grupos: ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecido por precipitação. Os aços inoxidáveis austeníticos são conhecidos alta resistência mecânica, excelentes propriedades criogênicas, resistência a altas temperaturas, oxidação, corrosão por pites, dureza, ductilidade e formabilidade (STRICHER, 1985; RIBEIRO, 2003, RIBEIRO, 2004).

Os aços inoxidáveis têm sido aplicados como material para a indústria médica para substituição de articulações e elementos de fixação em fraturas e instrumentação cirúrgica.

A multidisciplinalidade na aplicação em setores como químico, petrolíferas, processamento alimentar, leiteira e mecânica pesada permitem aos aços inoxidáveis, após serem submetidos a situações adversas e suportar grandes variações de temperatura como em ambientes criogênicos, reatores nucleares, incineradores hospitalares, alimentícias, barcos, etc. (BRUEMMER, 1990; CARDOSO, 2002).

A solidificação dos aços inoxidáveis dos sistemas Fe-Cr-Ni pode propagar a formação da ferrita e/ou austenita, que é influenciada diretamente pela composição química. Para estudar a evolução destes efeitos dos elementos de liga que compõem os aços inoxidáveis sobre os parâmetros microestruturais, foram desenvolvidos alguns termos, como os efeitos ferritizantes e austenitizantes, favorecendo a formação da ferrita e austenita definindo o cromo e níquel equivalente na composição (TALBOT, 1998; ANDRADE, 2002).

O aço inoxidável austenítico ABNT 304 é o mais produzido e usado pelas indústrias, em torno de 60% em todos os grupos dos inoxidáveis, e pode ser definido como um liga com teores no máximo de 0,08% de carbono, com aproximadamente 18% cromo e 8% de níquel e alguns elementos residuais (BATISTA, 2001; PADILHA, 1994).

Esse aço possui elevada ductilidade, excelente formabilidade (estampagem) a qual responde pela alta trabalhabilidade, imunidade à corrosão sob tensão em solução com presenças de cloretos, excelente resistência à corrosão por pites, boa soldabilidade, baixo custo em relação aos outros aços inoxidáveis na relação à resistência a corrosão, entretanto capacidade de endurecimento pelo processo de conformação mecânica, proporciona a elevação nos indicadores em resistência mecânica (BELEJCHAK, 1997).

A partir do aço inox 304 é possível criar outros aços pela alteração da composição química, como mostra a tabela 14.

Os aços inoxidáveis austenítico 310S são caracterizados pela excelente resistência a altas temperaturas e aplicações nos setores petroquímicos, químicos, nucleares, entretanto, provém de sua alta capacidade a resistência a oxidação, modificações superficiais ou revestimento de camadas finas de alumínio a altas temperaturas (TSAI, 2000).

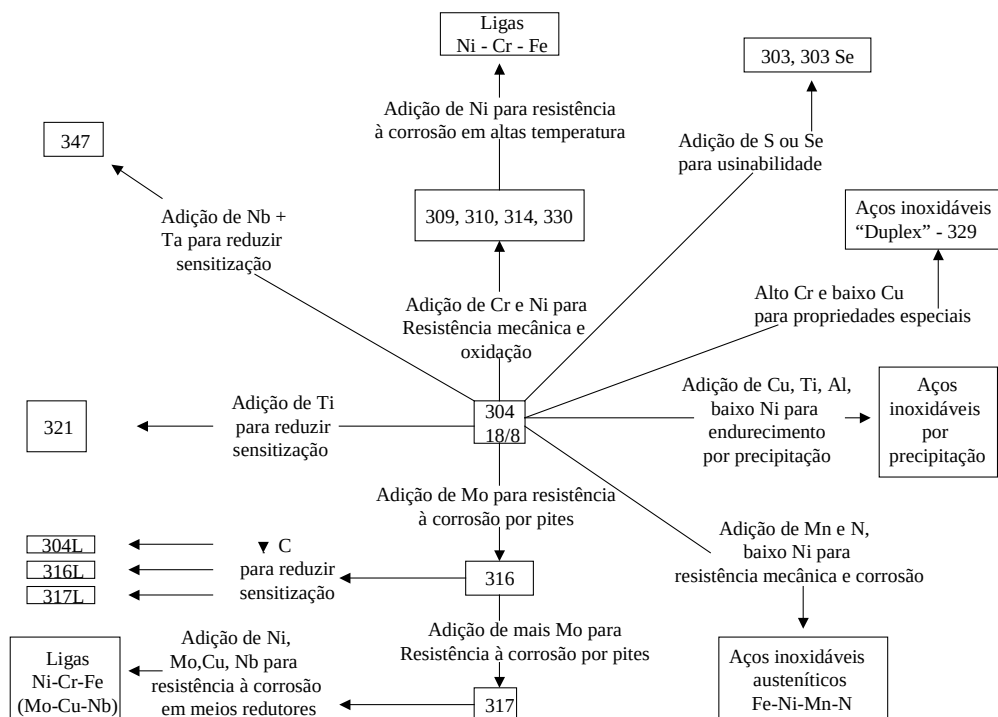


Figura 13 – Alterações na composição química a partir do aço inoxidável austenítico 304, visando suas propriedades (UHLIG, H.H., 1967; PADILHA, 1994).

Estas características permitem sua diversidade na sua aplicação e utilização em diversos setores industriais, como: molas, rebites, parafusos, pregos, pinos, porcas, telas, cabos de navegação, produtos aeronáuticos, ortopédicos, odontológicos, decorativos e áreas afins (HARADA, 1977; KANE, 1993; TALBOT, 1998).

Estes grupos de aços inoxidáveis são essencialmente para-magnéticos em condições de recozimento e somente pode ser endurecido pelo processo de conformação mecânica a frio. Sua classificação mais abrangente e comum tem – se (MARTÍNEZ, 1993) e a alteração da composição química a partir do aço inox 304 pode ser visualizada pela Figura 14 (UHLIG, H.H., 1967; PADILHA, 1994):

Básico: 18:8: ABNT 302 e 304;

Metaestável: ABNT 301;

Alto níquel: ABNT 305;

Alta resistência à corrosão: ABNT 316 e 317;

Estabilizados: ABNT 321, 347 e 348;

Extra baixo carbono: ABNT 304L e 316L;

Para soldagem: ABNT 308 e 309;

Resistência à oxidação: ABNT 302B, 308, 309, 310, 310S e 314;

Para usinagem: ABNT 303 e 303Se

DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA A CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E A EVOLUÇÃO DA CORROSÃO POR PITES NOS MATERIAIS

A originalidade desta tese de doutorado não está apenas no estudo da corrosão por pites nos aços inoxidáveis austeníticos tipos ABNT 304 e 310S quando submetidos aos testes em névoa salina em diferentes tempos de exposição, mas também no desenvolvimento da metodologia experimental aplicando técnicas de processamento digital e análise de imagens, visando à caracterização morfológica e a cinética de crescimento dos pites correlacionando com as mudanças microestruturais.

A inspeção visual e as medidas feitas pela mudança de massa não são técnicas apropriadas para avaliar a corrosão localizada, particularmente onde a profundidade de penetração ou a menor secção transversal no material é aspecto importante. A análise de imagens pode ser uma ferramenta alternativa para avaliar a corrosão por pites, através da determinação dos números de pites e suas característica morfológicas.

Os parâmetros estatísticos estão associados com a morfologia e tipos de corrosão a serem considerados e determinados. Os pites podem ser classificados em diversas geometrias: estreitos, profundos, largos e até superficiais, isolados ou quando juntos apresentam características semelhantes a uma superfície rugosa idêntica a corrosão uniforme.

As propostas para o desenvolvimento da metodologia experimental neste trabalho baseiam-se em conceitos de preparação metalográficas, utilização das técnicas de microscopia ótica e de processamento digital e análise de imagens

visando a examinação, evolução e a classificação da corrosão por pites em materiais estruturais.

Este método apresentou-se caráter eficiente em materiais que apresentam graus de formação de pites como aços inoxidáveis austeníticos tipos ABNT 304 e 310S, titânio, alumínio e suas ligas com alta e baixa densidade de pites, após serem submetidos a diferentes tempos de exposição em névoa salina, respectivamente.

PROPOSTA DE EXEQUIBILIDADE DA TÉCNICA

A terminologia usada para a definição dos parâmetros associados com a corrosão por pites são apresentadas a seguir [C. Guillaumin e J. Gueriau; 1995].

A] Parâmetros de Tamanho

Profundidade dos pites (h), Perímetro dos pites (p), Perímetro convexo dos pites (p_c) e a Área dos pites (A_s).

B] Descrição das formas

$R = p^2/4\pi A_s$ (Parâmetros sensíveis aos pites arredondados) $H = p^2/p_c^2$ (Parâmetros afim de revelar as anomalias sobre os contornos dos pites) e $E = h^2/A_s$ (Parâmetros sensível para os pites alongados).

C] Parâmetros Específicos

Raio ou boca do pite (r_m), Raio máximo do pites (r_M), Área da boca do pite medida pela superfície corroída (a_m), Área total do pite (proporcional a perda de massa local e determinada pela corrente de Faradaic, através de métodos eletroquímicos, a razão de aspecto (ar) $ar = h/2r_m$ é usada para simples geometrias e é independente do tamanho dos pites.

D] Parâmetros Populacionais (de acordo com quadros de avaliação padrão do pites)

Densidades dos pites/ m^{-2} (A), média de a_m/mm^2 (B) e média de h/mm (C). Estes últimos parâmetros só oferecem para descrição quantitativa afim de avaliar o grau da corrosão localizada.

O parâmetro sugerido para descrever a retangularidade (Área-Box) é definido como a relação entre área do pite e a menor área adjacente do retângulo (secundário) que inclui o próprio pite na sua formação.

Entretanto, com o objetivo de testar a eficiência destes parâmetros e visando a classificação geométrica e a evolução temporal que governam o crescimento dos pites criou-se o um quadro digital de testes para a análise geométrica que incluem figuras representadas pelas cores preto e branco (figura 1).

O quadro de testes para a análise geométricas é formado por famílias de triângulos (representando pites cônicos), retângulos (pites cilíndricos) e círculos ou semi-círculos (para esférico ou pites hemisféricos), baseado em um comprimento padrão de referência de 50 pixels.

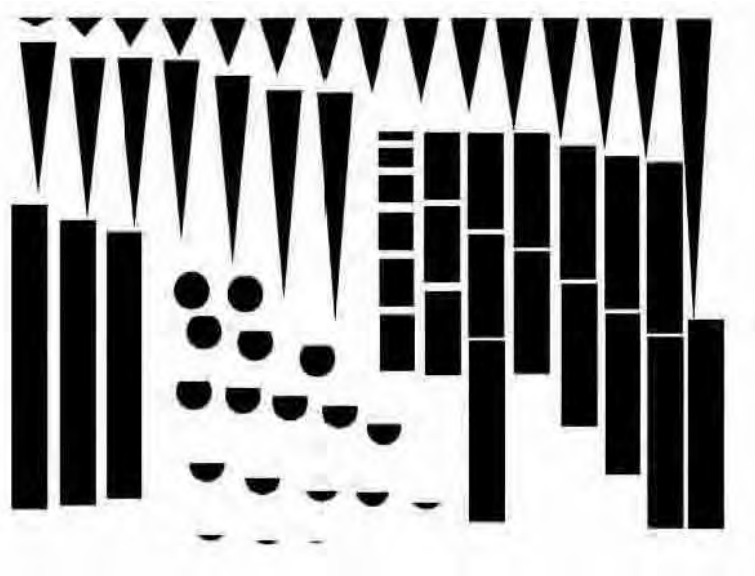
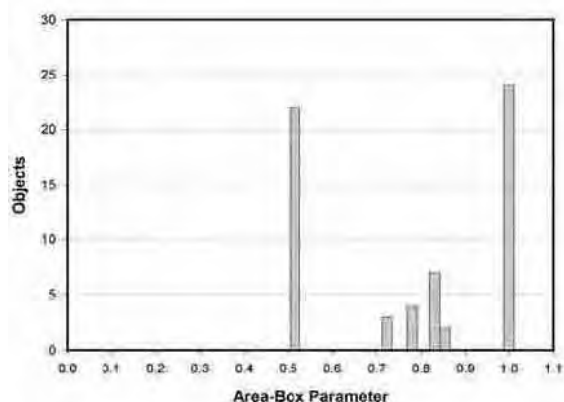


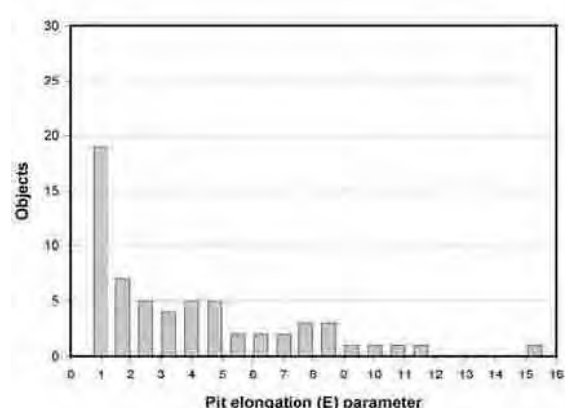
Figura 1 – Quadro teste para a análise geométrica dos pites

O comprimento da linha de referência é definido pela face horizontal de todos os retângulos, triângulos e o diâmetro de círculos truncados (figura 1). A medida da retangularidade, o parâmetro adotado AB tem como finalidade à separação ou determinação das três formas geométricas (famílias), resultando numa distribuição

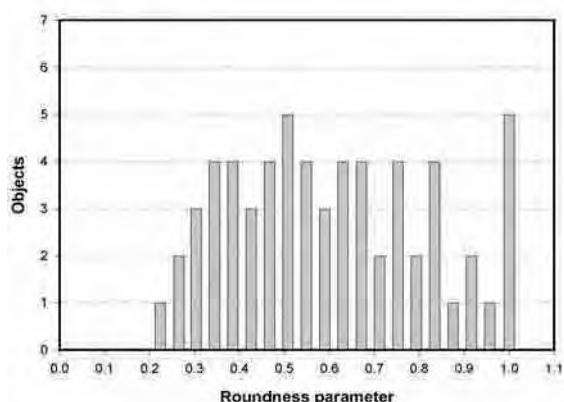
com três modos distintos (figura 2a), em contrapartida, não foi observados para os outros parâmetros de forma citados que não permite identificar essas deferentes formas de famílias (figura 2b, 2c e 2d).



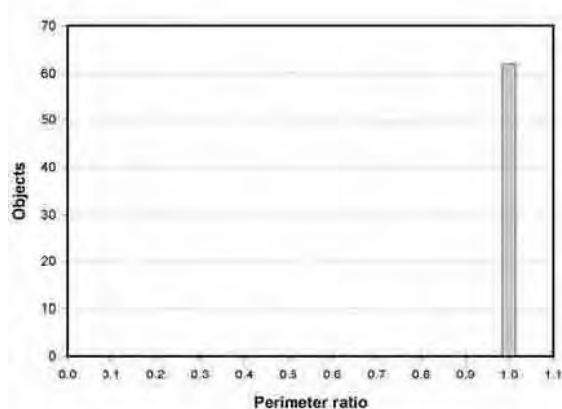
a) Retangularidade



b) Parâmetro de tamanho dos pites



c) Rugosidade



d) Razão do Perímetro

Figura 2 – Distribuição das formas geométricas para a imagem teste, de acordo com a figura 1

Os três grupos populacionais correspondem as seguintes distribuições, observando a figura 2a:

1] A retangularidade (AB) com os valores em torno (próximo) 0.5, apresenta fator de geométrico triangulares e simulando pites cônicos;

b) A retangularidade (AB) com valores ao redor $\pi/4$, apresenta (AB) fatores teóricos geométricos circulares ou semi-círculos, caracterizando pites esféricos ou hemisféricos;

c) A retangularidade (AB) com valores igual a 1, apresenta fator geométrico (AB) retangulares, representando pites cilíndricos.

As distribuições ao redor dos valores teóricos foram feitas a partir da divisão de imagens digitalizadas (pixels) e estabelecendo critérios de vizinhança entre os objetos, gerando resultados e situações inadequados podendo ser visualizados pelas curvas (gráficos) e sistemas computacionais, denominados pelas áreas e suas morfologia em fase de transitória (triangulares e semi-circulares).

Portanto, com o aumento da largura (w) isto corresponderá a forma geométrica equivalente a boca do pite ($2r_m$) com tendências as morfologias cilíndrica, cônica e hemisféricos.

A razão de aspecto entre a largura/profundidade (AR) e a retangularidade, determina exatamente os limites para a classificação geométrica dos pites individuais, podendo ser observado no diagrama (figura 3).

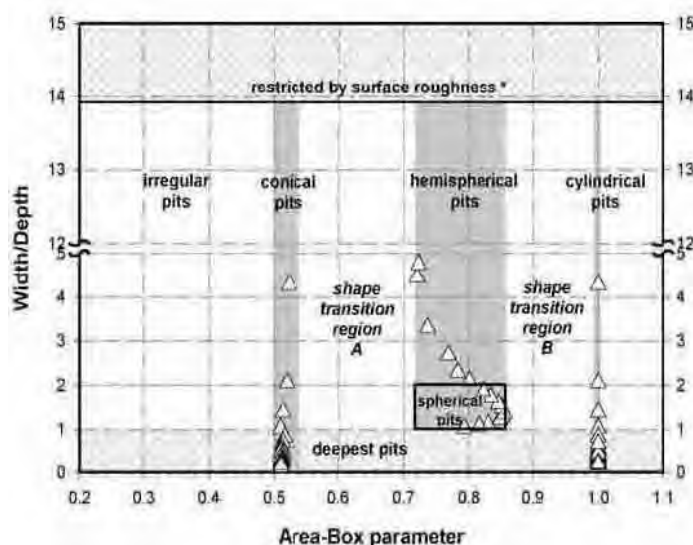


Figura 3 - Diagrama para determinação dos objetos e a razão de aspecto da corrosão por pites nos materiais (Largura/Profundidade) versus retangularidade

O diagrama para determinação dos objetos e a razão de aspecto da corrosão por pites nos materiais em função da retangularidade tem como objetivos gerais: (a) classificar a morfologia dos pites, (b) avaliar a cinética temporal que governam o crescimento dos pites e (c) ao comportamento morfológico do pites em relação a toda extensão (tempo de exposição) ao meio corrosivo.

Para os pites fechados e esféricos, a razão de aspecto (AR) corresponde abaixo 2 e a retangularidade (AB) ao redor de $\pi/4$, os pites cilíndricos apresentam valores (AB) próximo de 1, os cônicos individuais são mais alto na faixa 0.5. Os pites hemisféricos possuem a razão de aspecto (largura/profundidade - AR) mais alto que 2, ora, a retangularidade ao redor de $\pi/4$, os pites na geometria irregular ou não definida apresentam valores menores que 0.5.

As regiões de transição A (pites quase-cônicos e/ou quase-hemisféricos) e B (pites quase-hemisféricos e/ou quase-cilíndricos) é representado por pites no estado metaestável, que tendem a transição geométricas bem definidas.

Portanto, em materiais metálicos, a presença de defeitos superficiais (inclusões, trincas, microfraturas, precipitados etc.) favorecem a nucleação dos pites em diferentes geometrias e induzindo a mudanças na cinética do sistema.

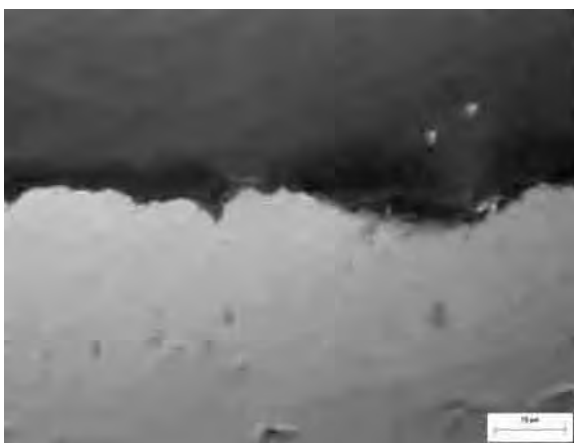
As diferentes geometrias dependem da forma original dos defeitos da superfície e o crescimento dos pites podem ocasionam modificações nestas geometrias, de acordo com mecanismos de crescimento, microestrutura local e a natureza do ambiente corrosivo.

PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DO PERFIL DAS IMAGENS

Na análise de perfil buscou-se realizar os testes de corrosão, por análise de imagens baseado em técnicas de microscopia em campo claro. As características morfológicas dos pites foram determinadas ao acaso, através da secção vertical dos corpos de prova feita cuidadosamente com baixa carga e rotação numa cortadeira de precisão em seguida lixada e polida.

Entretanto, com o objetivo de assegurar a baixa deformação na região do perfil aplicou-se uma resina de epóxi (Brascola Araldite 24h) junto às superfícies corroídas antes do corte e do embutimento com a resina fenólica para o polimento mecânico. A resina tem como função proporcionar o contraste e o dimensionamento da área total degradada.

Foram utilizados em todas as etapas e em ambos os casos no processamento digital das imagens os softwares de domínio publico tipos UTHSCSA Image Tool 2.00 Alfa 3, com Plugs-ins suíte Reindeer Games "The Image Processing ToolKit" 3.0, and Media Cibernéticos IMAGE PRO PLUS 4.5 .



Ti-6Al-4V perfil das imagens



Al 7050 perfil das imagens

Após a aquisição das imagens (figura 4a e 4b) realiza-se o Threshold que visa a delimitar cada perfil (figura 4c e 4d).



c) Imagem binária da figura 4a, após aplicação do filtro “threshold”



d) Imagem binária da figura 4b, após aplicação do filtro “threshold”

Para a remoção dos buracos e artefatos decorrentes da resina ou próximo da região afetada pela corrosão aplica-se o filtro “Fill Holes” através da função Reindeer Games Plugs-ins (figura 4e e 4f).



e) Resultado operação do filtro “Fill hole” na figura 4c

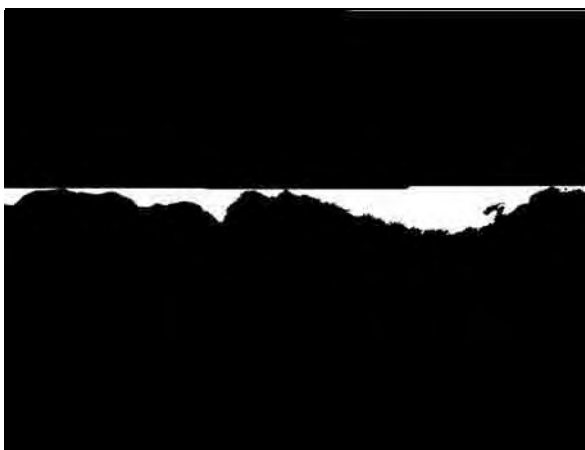


f) Resultado operação do filtro “Fill hole” na figura 4d

Esta operação foi realizada em duas etapas para o fechamento dos buracos (artefatos) pretos e brancos sem ocasionar nenhuma modificação nas informações dos perfis [21], entretanto, em uma cópia de cada imagem gerada na última etapa os

pites ficam completos (cheios) pelo desenvolvimento de 50 erosões binárias usando elemento estrutural horizontal - 5x1 IMAGE PRO PLUS Program.

A cada superposição e subtração das imagens feitas pelo filtro “Fill Holes”, a imagem corresponde ao fechamento dos pites separando as cavidades da região corroída (figura 4g e 4h).

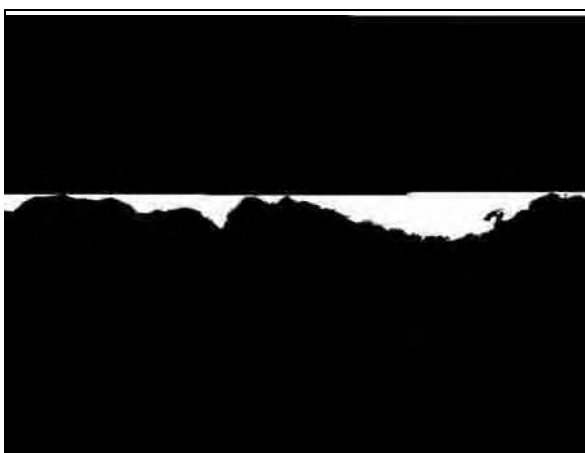


g) Separação dos pites, após a erosão na figura 4e



h) Separação dos pites, após a erosão na figura 4f

Finalmente, o último passo do processamento foi à aplicação do filtro “Watershed” visando a delimitação os limites e/ou as fronteiras laterais dos pites (figura 4i e 4j).



i) Pites na figura 4g delimitado pelo filtro “Watershed”



j) Pites na figura 4h delimitado pelo filtro “Watershed”

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa foram os aços inoxidáveis ABNT 304 e 310S no estado como recebida (laminado) e tratados termicamente (1065°C - 1 hora resfriado em água e gelo, 1065°C – 1 hora resfriado ao ar, 820°C – 1 hora resfriado ao ar, 620°C – 24 horas resfriado ao ar e 670°C – 5 horas resfriado ao ar), após serem submetidos a diferentes tempos de exposição em névoa salina (48, 120, 168, 216 e 312 horas).

Os procedimentos experimentais empregados neste trabalho tiveram os seguintes objetivos:

Desenvolver e estabelecer uma metodologia experimental, visando selecionar, classificar e quantificar os pites através de medidas de observação direta e processamento digital e análise de imagens.

A técnica foi testada com sucesso em ligas de grande aplicação e utilização setores estratégicos como a indústria aeroespacial, a liga Ti-6Al-4V e a liga Al 7050T7451, após serem induzidas às formações dos pites em diferentes testes de corrosão como via névoa salina e imersão, de acordo com as normas ASTM B 117-1995 e ASTM G-31-1972, respectivamente.

As diferentes etapas do trabalho podem ser divididas em:

Análise química e caracterização microestrutural das ligas;

Realização e desenvolvimento de diferentes condições de tratamentos térmicos induzindo a formação do fenômeno de sensibilização;

Testes de corrosão via névoa salina em diferentes tempos de exposição;

Avaliação das características superficiais dos corpos de prova antes e pós-testes de corrosão pela análise e determinação do parâmetro de rugosidade;

Determinação e análise dos parâmetros morfológicos superficiais em diferentes graus (alta e baixa densidade) de formação da corrosão por pites nos aços austeníticos ABNT 304 e 310S tratados termicamente;

Caracterização dos perfis da corrosão localizada, visando a classificação, tamanho e a aplicação eficiente do método para a determinação dos parâmetros

morfológicos que governam o crescimento dos pites nos aços austeníticos ABNT 304 e 310S tratados termicamente.

Na caracterização microestrutural, as técnicas envolvidas visaram investigar a cada condição de tratamento térmico induzidas pelo princípio da formação do fenômeno de sensitização, objetivando avaliar o tipo, a distribuição e a morfologia dos precipitados com os carbeto de cromo.

As investigações e as correlações das propriedades mecânicas e o comportamento microestrutural foram feitas e avaliadas pelas técnicas: microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura - MEV, espectrometria de energia dispersiva - EDS, ensaio de microdureza - HV, ensaios de rugosidade, processamento digital e análise de imagens.

Foram determinados as características e os parâmetros morfológicos superficiais e dos perfis dos pites nos aços austeníticos ABNT 304 e 310S, como por exemplo: fração global corroída, área média, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, razão de aspecto e a densidade de pites com os programas de domínio publico UTHSCSA IMAGE TOOL 3.0, IMAGE J e Media Cybernetics Image Pro plus 4.5/Materials – Pro Analyzer 3.1 – LAIMat-DMT-FEG-UNESP.

Também pites foi estudada a evolução temporal dos pites, objetivando estabelecer um modelo ou equação que permita determinar o mecanismo de crescimento da corrosão localizada nos materiais.

4.1 - ABORDAGEM GERAL NA SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Alguns trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos nos últimos anos, visando descrever o mecanismo da formação da corrosão por pites em materiais de alto e baixo grau de relevo objetivando sua caracterização morfológica superficial e seus perfis. As justificativas adotadas para a seleção dos materiais utilizados neste trabalho foram:

- 1] o uso de ligas de aplicação aeronáuticas, médicas e militares, como Ti-6Al-4V e a liga 7050T7451 em diferentes condições microestruturais;
- 2] O crescimento e o uso dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 310S .

Os aços inoxidáveis austeníticos 304 e 310S foram fornecidos em forma de chapas de 10 mm e 6 mm de espessura, respectivamente. Os corpos de prova foram confeccionados nas dimensões 30mm x 25mm (figura 15) para a realização dos tratamentos térmicos e posteriormente submetidos aos testes de corrosão via névoa salina.



Figura 15 – Corpos de prova para os testes de corrosão

4.2 - ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas nos materiais foram feitas no Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL – DEQUI, de acordo com os procedimentos normalizados e usando um espectrômetro de absorção atômica, modelo A Analyst 800, fabricado pela Perkin-Elmer (figura 16).



Figura 16 - Espectrômetro de absorção atômica utilizada na análise química.

As composições químicas analisadas são apresentadas pelas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Composição química do aço inoxidável ABNT 304 (%).

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	N
<i>Bal.</i>	<i>0,08</i>	<i>1,0</i>	<i>2,0</i>	<i>18,0</i>	<i>10,0</i>	<i>0,10</i>

Tabela 5 – Composição química do aço inoxidável ABNT 310S (%).

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	N
<i>Bal.</i>	<i>0,050</i>	<i>0,557</i>	<i>1,284</i>	<i>24,0</i>	<i>19,386</i>	<i>0,10</i>

4.3 - CONDIÇÕES DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos tiveram como objetivo induzir mudanças microestruturais e precipitação na forma de carbeto, bem como a alteração dos contornos de grãos (matriz-precipitados) contribuindo para a determinação da susceptibilidade à corrosão e o estudo da superfície e dos perfis dos pites.

Os tratamentos térmicos foram realizados no Departamento de Química e Física da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – DQF-FEG-UNESP. O forno usado foi do tipo mufla, fabricado pela Linderberg, conforme Figura 17, sem controle de atmosfera, em cinco condições diferentes variando a temperatura, tempo de encharque, utilizando taxas de aquecimento de 10°C/minuto e resfriamento ao ar ou água e gelo.



Figura 17 – Forno utilizado nos tratamentos térmicos.

As diferentes condições de tratamentos térmicos impostos foram feitas de acordo com (SOLOMON, 1980; SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1980) e são indicadas na tabela 6.

Tabela 6 – Diferentes condições de tratamentos térmicos

Ensaio	Tratamentos térmicos	Resfriamento
01	1065°C - 1 hora	Água e gelo
02	1065°C - 1 hora	Ar
03	1065°C - 1 hora + 820°C - 1 hora	Ar
04	1065°C - 1 hora + 620°C – 24 horas	Ar
05	1065°C - 1 hora + 670°C - 5 horas	Ar
06	Como recebida	

As amostras foram solubilizadas visando quebrar a estrutura típica de macla verificada após o recebimento do material. Entretanto as escolhas dos tratamentos térmicos tiveram como objetivo elevar o grau de sensibilização pela exposição térmica em ciclos estabelecidos e o empobrecimento dos contornos dos grãos pela formação de diferentes morfologias dos precipitados e contribuindo para corrosão localizada (SOLOMON, 1980; SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1980).

4.4 - ENSAIOS DE CORROSÃO EM NÉVOA SALINA

No ensaio de corrosão em névoa salina, a superfície do material é exposta numa solução adequada em ambiente corrosivo. Este ensaio chamado “Salt Spray” foi originalmente desenvolvido para estudar a evolução e performance dos revestimentos metálicos em materiais ferrosos [ASTM B 117-1997; DUTRA, 2002].

Os ensaios no projeto de pesquisa tiveram como objetivos: estudar o mecanismo de aceleração da corrosão, determinar o grau de corrosão e facilidade da realização dos testes para comparar a performance da corrosão localizada num mesmo material [ASM, 1995; BRUCE, 1999].

As amostras antes de serem submetidas aos testes de corrosão em névoa salina em diferentes tempos de exposição foram preparadas metalograficamente utilizando lixas d'água de carbeto de silício (SiC) nas granulometrias # 220, 320, 400, 600, 1000, 1200, 2400 e 4000. O polimento mecânico foi empregado pastas de diamante de 3 e 1µm, impregnado sobre os panos DUR e MOL, respectivamente.

Os testes de corrosão via névoa salina foram realizados no Laboratório Central da TEKNO S.A., unidade de Guaratinguetá. As amostras foram submetidas a diferentes tempos de exposição como: 48, 120, 168, 216 e 312 horas.

A solução usada nos testes foi a NaCl 5% com pH 6,7 e a temperatura do processo controlada na ordem de $35^{\circ}\text{C} \pm 1,7^{\circ}\text{C}$, entretanto, a zona de exposição da cabine era totalmente fechada como ilustrado na Figuras 18 (a) e (b).



a) Névoa salina utilizada durante os testes b) Névoa Salina utilizada durante os testes de corrosão.

Figura 18 – Testes de corrosão via névoa salina [ASTM B 117 - 1998].

4.5 - ENSAIOS DE RUGOSIDADE

Os objetivos dos ensaios de rugosidade foram à determinação e avaliação da agressividade do ataque superficial em que as amostras foram submetidas diante de diferentes tempos de exposição em névoa salina.

(ABNT - NBR 6405-1998) a norma define que a rugosidade nos materiais é baseado pela formação de relevos, sulcos, vales e imperfeições superficiais diante de um processo de fabricação. O parâmetro de rugosidade superficial [$R_a - \mu m$] é baseado no desvio aritmético dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos dos perfis de rugosidade em relação à linha média, dentro de um percurso de medição estabelecida na indicação feita pela Figura 19 [GUIMARÃES, 1999].

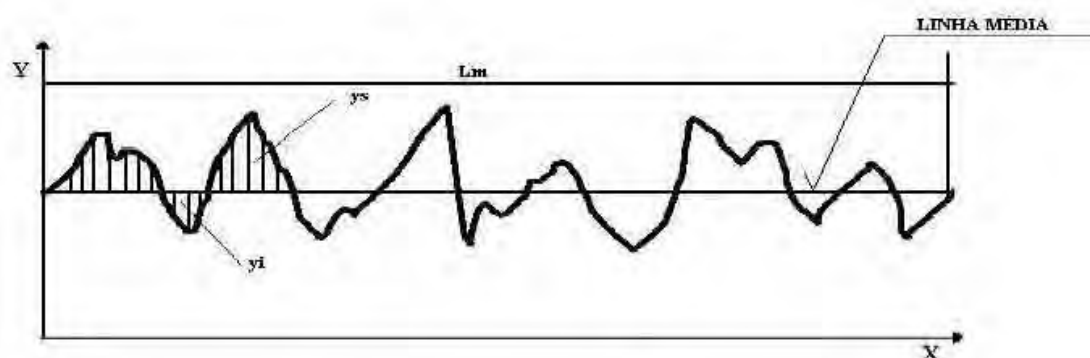


Figura 19 – Parâmetro de rugosidade – R_a (ABNT - NBR 6405, 1998; GUIMARÃES, 1999)

A rugosidade superficial e integridade resultante do processo de manufatura são ambas importantes considerações no processo de manufatura. Em geral, a resistência à fadiga de componente de engenharia aumenta com decréscimo da rugosidade da superfície (AROLA, 2002).

No estudo desenvolvido por (AROLA, 2002) mostra o resultado da textura da superfície sobre a vida em fadiga de um aço de baixa liga de alta resistência que foi examinado em termos de concentração de tensão aparente. A resistência a fadiga é geralmente definida em termos de limite de resistência; os efeitos da integridade

superficial e a rugosidade da superfície são correlacionados com o limite de resistência (AROLA, 2002).

(CUNHA, 2002) relata que o acabamento superficial nos materiais se justifica devido a influência deste nas condições de funcionalidade e na confiabilidade dos componentes mecânicos, sendo, parâmetro estratégico a ser analisado para avaliar a integridade superficial de componentes em processos industriais.

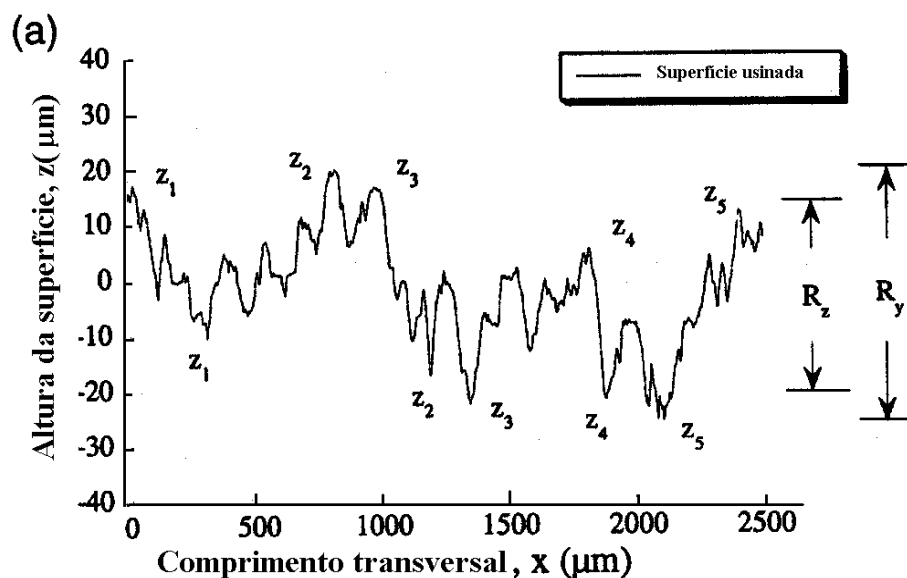


Figura 20 - Textura da superfície usinada, perfil da superfície arbitrária e parâmetros de rugosidade [CUNHA, 2002; PERES, 1998].

(BRUNO, 2002) estudou o processo de usinagem e aplicação da ferramenta estatística de Taguchi, visando a obter como variável resposta o melhor acabamento superficial $[Ra]$ em função do estudo dos efeitos dos parâmetros e análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos no torneamento em aço ABNT 1045 na condição como recebida.

Praticamente, todas as falhas nos produtos em fadiga iniciam-se na superfície para os diferentes tipos carregamento como, por exemplo, flexão e torção. A tensão máxima ocorre na superfície, daí ser lógico o seu início na superfície. As condições superficiais afetam as propriedades em fadiga do material, por exemplo, quando um corpo de prova é submetido ao processo de polimento e as finas camadas de marcas

deixadas na superfície são orientadas paralelamente na direção da tensão de tração, ocorre um aumento do seu limite de fadiga (PERES, 1998).

Verifica-se que quanto maior o acabamento superficial, maior será o limite de fadiga e que quanto maior a rugosidade superficial, maior a quantidade de pontos atuantes como concentradores de tensões, diminuindo o limite de resistência à fadiga [PERES, 1998].

As medidas dos ensaios de rugosidade para a determinação dos parâmetros de rugosidade superficial [Ra] foram realizadas no Laboratório de Estudos da Usinagem no Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Química de Lorena – LEU-DEMAR-FAENQUIL, usando um rugosímetro digital Mitutoyo Surf Test 301, fabricado pela Mitutoyo (Figuras 21 (a) e (b)), diante de vinte campos de medida por amostra, visando determinar o parâmetro de rugosidade superficial [Ra - μm] em relação ao tempo de exposição em névoa salina, conforme a norma ABNT – NBR 6405-1998.



a)



b)

Figura 21– Ensaios e a determinação dos parâmetros de Rugosidade – Ra [μm]

4.6 - ANÁLISE MATERIALOGRÁFICA

As etapas do processo metalográfico foram realizadas no Laboratório de Microscopia de Materiais – Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Química de Lorena – LMM-DEMAR-FAENQUIL em parceria com o Laboratório de Análise de Imagens de Materiais do Departamento de Tecnologia e Materiais da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – LAIMat-DMT-FEG-UNESP, para o início da preparação metalográfica, após a definição dos critérios, realizou-se o seccionamento usando uma cortadeira em nível de precisão tipo ISOMET 1000, fabricada pela BUEHLER empregando discos de corte diamantado e logo após, o embutimento realizado numa prensa modelo TEMPOPRESS II, fabricado pela PANAMBRA – STRUERS, usando resina fenólica.

A preparação superficial usou-se lixas d'água de carbeto de silício – SiC nas granulometrias seqüenciais: # 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2400 e 4000, e em seguida foi feito o polimento mecânico com pastas de diamantes de 3 e 1 μ m, impregnados sobre os panos DUR e MOL e na fase final para a eliminação das deformações ocorridas pelas etapas anteriores, utilizou-se uma suspensão de sílica coloidal tipo OP-U, fabricado pela PANAMBRA-STRUERS impregnado sobre o pano OP-NAP.

O ataque químico realizado teve como objetivo a revelação microestrutural, como contornos dos grãos e precipitados em aços inoxidáveis tipos ABNT 304 e 310S tratados. A solução usada foi 10mL HF (48%), 10mL HNO₃ (65%), 15mL HCl (35%) e duas gotas de glicerol p.a..

A observação da microestrutura foi feita pela técnica de microscópica ótica em campo claro, usando os microscópios metalúrgico modelo DM-IRM 459 (figura 22), fabricado pela LEICA e modelo Epiphot 200, fabricado pela NIKON, respectivamente.



a)



b)

Figura 22– Equipamentos usados para a caracterização microestrutural dos materiais – FAENQUIL-DEMAR-LMM

4.7 - ENSAIOS DE MICRODUREZA

O ensaio teve como objetivo relacionar as mudanças microestruturais induzidas pelas diferentes condições de tratamentos térmicos. Os ensaios de microdureza foram realizados no Laboratório de Microscopia de Materiais – Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Química de Lorena – LMM-DEMAR-FAENQUIL, as amostras foram lixadas e polidas antes do ensaio para a obtenção de uma superfície isenta de irregularidades, imperfeições e artefatos, conforme a norma (ASTM – E 384-1999).



Figura 23– Microdurômetro usado no ensaio de microdureza

Os parâmetros usados foram carga de 100 gf/mm² durante 15 segundos num microdurômetro do modelo Micromet 2004, fabricado pela BUEHLER (Figura 23).

4.8 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV E MICROANÁLISE DISPERSIVA DE ENERGIA - EDS

As análises por microscopia eletrônica de varredura e microanálise dispersiva de energia nos aços inoxidáveis 304 e 310S tratados foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica no Departamento de Engenharia de Materiais – LME-DEMAR-FAENQUIL usando o Microscópio Eletrônico de Varredura tipo VP 1450, fabricado pela LEO (Figura 24) e tiveram os seguintes objetivos: caracterização superficial e dos perfis dos pites, determinação da composição e dos elementos na matriz e nos contornos dos grãos na forma de precipitados.



Figura 24– Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV

4.9 - PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DE IMAGENS

Para a determinação da morfologia superficial dos pites nos aços inoxidáveis, após serem submetidos aos testes de corrosão, foram determinados os seguintes parâmetros: diâmetros máximos, mínimos e médios dos pites [μm]; área corroída [μm^2]; fração global corroída [%]; densidades dos pites [$1/\mu\text{m}^2$] e desvio padrão (RIBEIRO, 2001; RIBEIRO, 2002; RIBEIRO 2003).

Estes parâmetros estatísticos foram avaliados num microscópio ótico tipo Epiphot 200, fabricado pela NIKON. As imagens foram capturadas e digitalizadas numa câmara PIXERA PROFESSIONAL com resolução 640x480x8bites em campo claro com auxílio da luz de xenônio, conforme a norma ASTM 1382-1997.

Para a análise superficial realizou-se a conversão das imagens em escala de cinza e em seguida aplicou-se o comando da segmentação da imagem (threshold) aplicando antes da caracterização dimensional para a análise dos pites, visando a identificação exata dos objetos (pites).

Para a análise dos perfis dos pites foi desenvolvida uma metodologia alternativa baseada em conceitos e aplicação de parâmetros processamento e análise de imagens sobre microscopia ótica e luz refletiva. As características morfológicas dos pites foram determinada em corpos de prova seccionados aleatoriamente em direção vertical, sobre baixa deformação e velocidade de corte por intermédio de uma cortadeira de precisão, modelo Isomet 1000, fabricado pela BUEHLER.

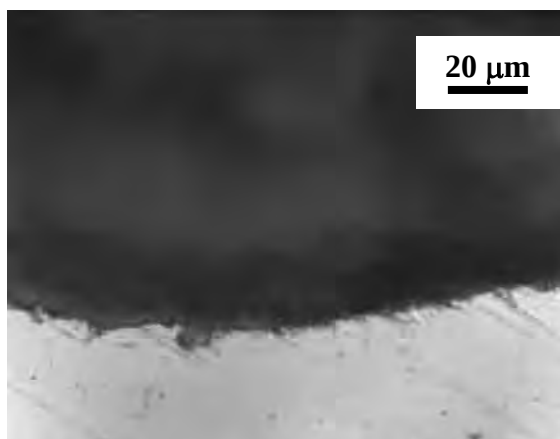
Para preservar a região corroída e o perfil dos pites foi aplicado resina epóxi (Araldite - Brasticola 24horas) antes do seccionamento e posteriormente, realizou-se o embutimento em resina fenólica [RIBEIRO, 2003; CODARO, 2002; SILVA, 2004].

(CODARO, 2002; RIBEIRO, 2003; SILVA, 2003) descreve a metodologia de processamento digital e análise de imagens, após a aquisição das imagens originais (imagem 25a), aplica-se o “Threshold” para delimitar cada aspecto do perfil da imagem original (delimitar cada perfil) e por fim criar uma imagem a ser utilizada futuramente, essa função a ser selecionada apresenta ajustes de limiares no valor correspondente 255 (branco) e o restante da imagem é representando pelo valor zero (imagem 25b).

Para a eliminação dos artefatos, vazios e buracos, aplica-se o “Filtro Fill Hole”, ocasionados pela as áreas preta e branca empregando a função REINDEER GAMES PLUG-INS PACKAGE DO IMAGE TOOLS (figura 25c).

Esta etapa pode ser realizada várias vezes dependendo das características superficiais dos perfis, portanto, para cada cópia da imagem é gerada etapa seqüencial, as quais os pites permaneçam cheios numa sucessão de 50 erosões usando em elemento estrutural horizontal 5x1. Para o fechamento das cavidades dos pites é

subtraído de cada imagem de pites fechados, visando à separação das cavidades dos pites.



a) Imagem original-Binária



b) Imagem a, após a aplicação do filtro “Threshold”



c) Imagem b, após a aplicação do filtro “Fill – Holes”



d) Imagem c, após a delimitação dos pites pela aplicação do filtro “Watershed”.

Figura 25 – Sequência de processamento digital e análise de imagens para cada perfil do aço inoxidável 304. (a) Imagem Binária; (b) Imagem a, após a aplicação do filtro “Thresold”; (c) Imagem b, após a aplicação do filtro “Fill – Holes”; (d) Imagem c, após a delimitação dos pites pela aplicação do filtro “Watershed”.

Na última etapa do processamento digital foi uma filtragem “Watershed” que é definida para delimitar individualmente os contornos dos pites laterais (Figura 25d) (CODARO, 2001; CODARO, 2002; RIBEIRO, 2003; RUSS, 1998; RIBEIRO, 2004; SILVA, 2004).

Em todas as etapas do processamento e análise de imagens nos materiais utilizou-se o software MEDIA CYBERNETICS IMAGE – PRO PLUS 4.5 instalado no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais do Departamento de Materiais e Tecnologia da Unesp, Campus de Guaratinguetá [LAIMat – DMT – FEG-UNESP].

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão exibidos os resultados obtidos para os aços inoxidáveis austeníticos ABNT 304 e 310S tratados termicamente em diferentes condições, após serem submetidos aos testes de corrosão via névoa salina em distintos tempos de exposição.

Para simplificar a análise dos resultados, a análise microestrutural, ensaios de microdureza, ensaios de rugosidade, análise superficial dos pites, processamento digital e análise de imagens, a distribuição, morfologia e o tamanho dos pites foram analisados individualmente e posteriormente correlacionados.

Para a verificação e a validação dos resultados obtidos no processamento digital e análise de imagens dos perfis, os dados foram submetidos à análise estatística, utilizando principalmente a mediana de cada parâmetro determinado nos aços.

Como parte final do trabalho, foi determinado um modelo matemático para correlacionar os dados obtidos e avaliar as tendências dos aspectos geométricos que governam o crescimento temporal dos pites.

5.1 - CONDIÇÕES DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

5.1.1 - AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ABNT 304

A figura 26a é uma micrografia obtida por microscopia ótica em campo claro, atacada com reagente químico a base de ácido fluorídrico, nítrico, clorídrico e glicerol. As micrografias mostram características do material na condição como recebida e o comportamento microestrutural dos grãos austeníticos deformados com presença de grandes irregularidades ou degraus nos contornos de grãos. A causa sendo provavelmente a nucleação das maclas feitas pelas marcas das bandas de deslizamento provenientes do processo de conformação.

A deformação plástica representa um aumento na quantidade de discordâncias e defeitos atômicos responsáveis pelas interações entre os movimentos das

discordâncias, partículas dos precipitados e contornos dos grãos (HERTZBERG, 1996).

Na figura 26b pode-se observar a microestrutura do material solubilizado a temperatura de 1065°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo, mostrando maclas e grãos de austenita parcialmente recristalizados em consequência do processo de solubilização a que foi submetida, indicando a formação de degraus em formas de plaquetas junto aos contornos não há evidências de fases e/ou precipitados intergranulares.

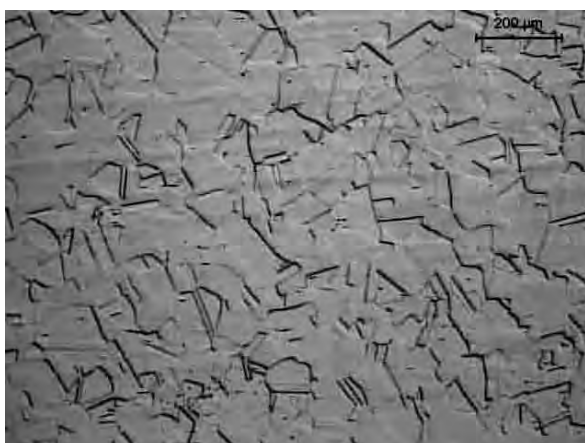


Figura 26a - Micrografia do aço inoxidável 304, no estado como recebida.

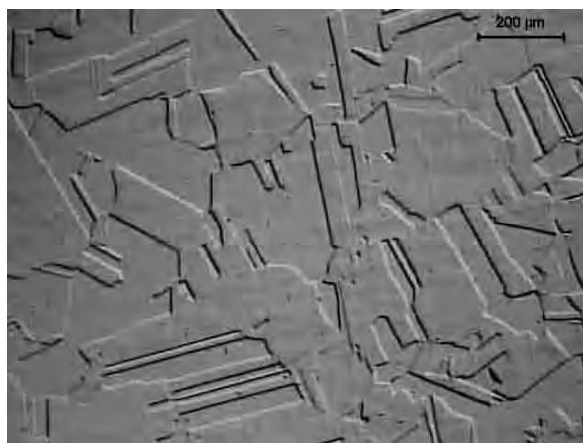


Figura 26b - Micrografia do aço inoxidável 304 tratado a 1065°C – 1 hora, resfriado em água e gelo.

A amostra quando induzida ao tratamento térmico de 820°C durante 1 hora apresentou estrutura não muito diferente da condição solubilizada, porém houve a redução das maclas, o aumento dos contornos com granulação grosseira (espessura) e o tamanho dos grãos, conseqüentemente, decrescendo os valores da microdureza, tornando seu comportamento mais susceptível à corrosão, conforme a Figura 27(a).

A figura 27b apresenta uma microestrutura com elevada presença de precipitado decorrente do tratamento térmico submetido a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar, é evidente a presença de carbeto de cromo como Cr_{23}C_6 e fortes tendências de empobrecimento e mudanças junto aos contornos dos grãos, tornando-o mais susceptível a corrosão localizada.

As difusividades dos elementos estabilizadores na austenita são parâmetros importantes que contribuem para a formação dos carbeto de cromo e que por outro lado, baixas difusividades são positivas, de tal modo que contribuem para o coalescimento mais lento dos precipitados e podendo ocasionar o aumento dos contornos dos grãos durante os tratamentos térmicos de sensitização (HONEYCOMBE, 1981).

A microestrutura na sua maioria é um fator preponderante as alterações significativas ao comportamento e a resistência à corrosão localizada para os aços inoxidáveis austeníticos 304 e 310S.

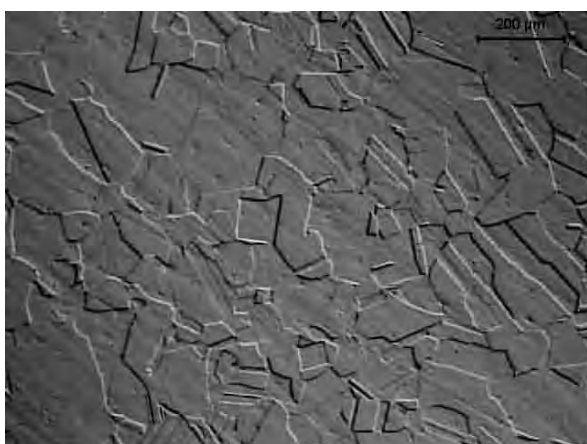


Figura 27a- Micrografia do aço inoxidável 304 tratado a 820°C – 1 hora, resfriamento ao ar. Figura 27b- Micrografia do aço inoxidável 304 tratado a 620°C – 24 horas, resfriamento ao ar.

5.1.2 - AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ABNT 310S

O aço inox 310S apresenta excelente resistência à corrosão e à oxidação. As preocupações referente, a sua utilização se relaciona com a susceptibilidade às formas de corrosão como: por pites e a intergranular (TSAI, 2000).

As figuras 28a e 28b, mostram as microestruturas na condição como recebida caracterizada por grãos de austenita tipicamente na forma de degraus, sendo que o grau

de sensitização nesta condição é estimado a zero, nota-se ainda a presença de regiões deformadas (maclas), o que indica o aumento nos valores da microdureza do material.

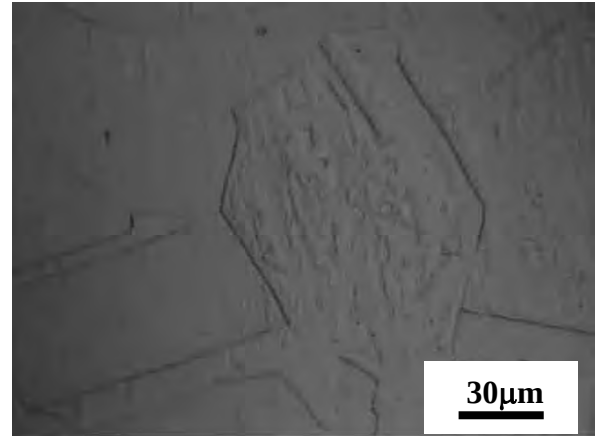
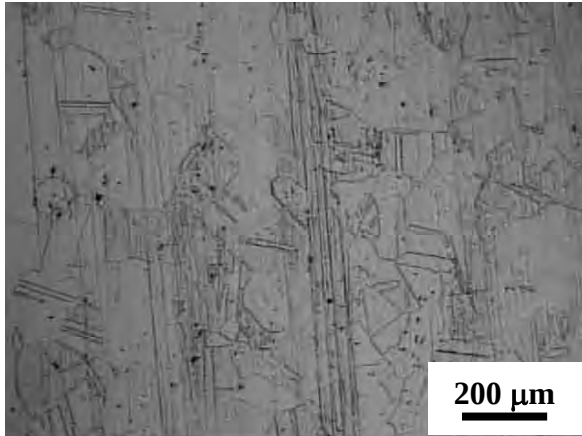


Figura 28a - Micrografia do aço inoxidável 310S, no estado como recebida. Figura 28b - Micrografia do aço inoxidável 310S, no estado como recebida.

Pode se observar nas figuras 29a e 29b, que a amostra após o tratamento térmico a 1065°C durante 1 hora e resfriamento ao ar, apresentou uma microestrutura parcialmente recuperada (recristalizada), porém, ainda com a formação de degraus e regiões de maclas entre a matriz e os contornos de grãos, iniciando a precipitação das fases ricas em cromo.

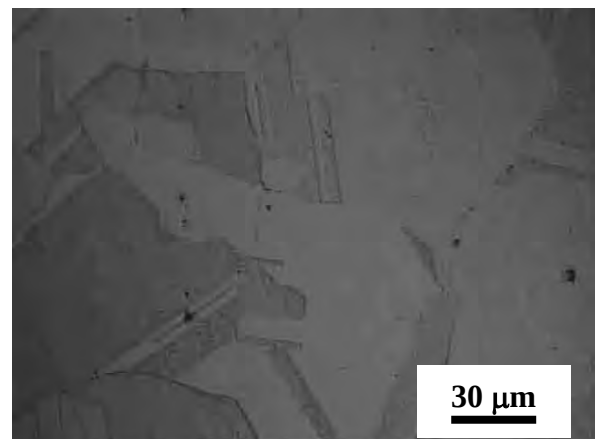
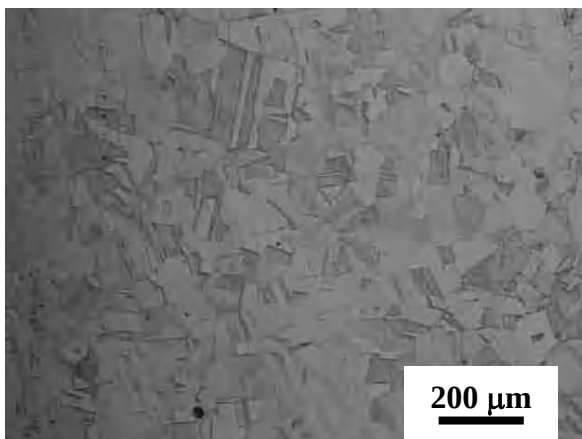


Figura 29a- Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 1065°C – 1 hora, resfriamento ao ar. Figura 29b- Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 1065°C – 1 hora, resfriamento ao ar aumento.

As figuras 30a e 30b, as amostras foram tratadas termicamente a 820°C durante 1 hora e resfriadas ao ar, evidenciamos a isenção das marcas das maclas, crescimento profundo referente ao tamanho dos grãos (coalescimento) com característica mista, devido ao início da formação da precipitação contribuindo para a mudança em toda microestrutura e possíveis alterações no seu comportamento corrosivo.

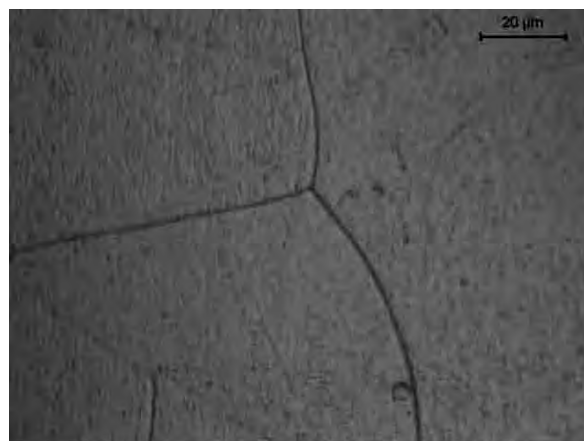
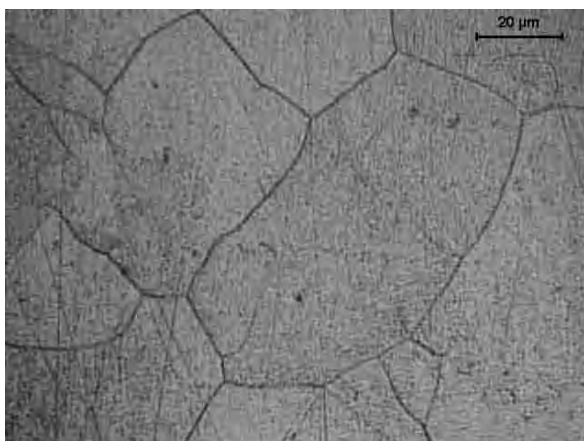


Figura 30a - Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 820°C – 1 hora, resfriamento ao ar .

Figura 30b - Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 820°C – 1 hora, resfriamento ao ar .

As figuras 31a e 31b, as amostras que foram submetidas ao tratamento térmico 620°C durante 24 horas, mostram a microestrutura de caráter original do aço praticamente sensibilizado e a micrografia resulta em contornos de grãos coalescidos com elevada precipitação de carbeto de cromo e na forma tipicamente de vala, devido alta fração volumétrica e o aumento na extensão dos contornos de grãos ocorridos pela presença de precipitados de carbeto de cromo, contribuindo para maior susceptibilidade a corrosão localizada.

As figuras 32a e 32b em que as amostras foram tratadas termicamente a 670°C durante 5 horas e apresentam microestrutura tipicamente na forma de vala nas interfaces dos contornos de grãos e a precipitação de carbeto de cromo.

Os aços inoxidáveis solubilizados e sensibilizados apresentam fases precipitadas, devido ao tempo de tratamento térmico, iniciando nos contornos de grão, contornos

incoerentes de macla, contornos coerentes de macla, interior dos grãos e por último na movimentação das discordâncias nos sistemas de deslizamento (MACHADO,1999; MURR, 1990).

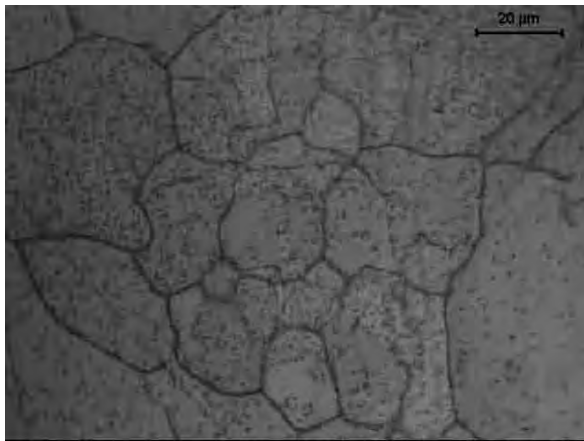


Figura 31a- Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 620°C – 24 horas, resfriamento ao ar.

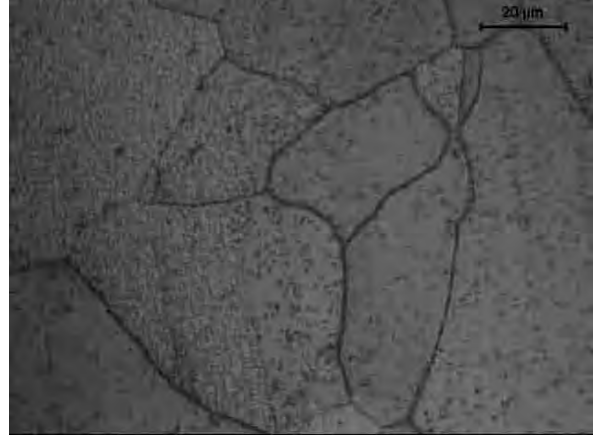


Figura 31b- Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 620°C – 24 horas, resfriamento ao ar.

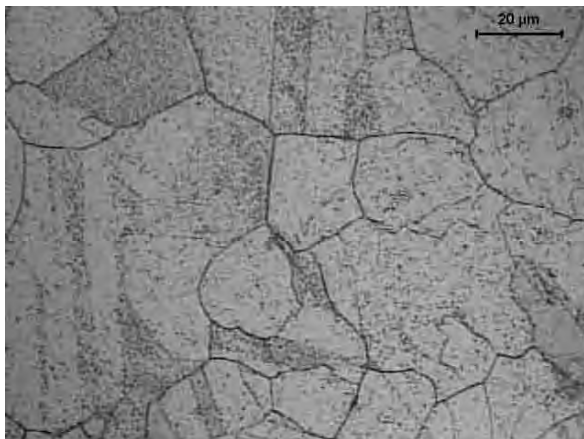


Figura 32a- Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 670°C – 5 horas, resfriamento ao ar .

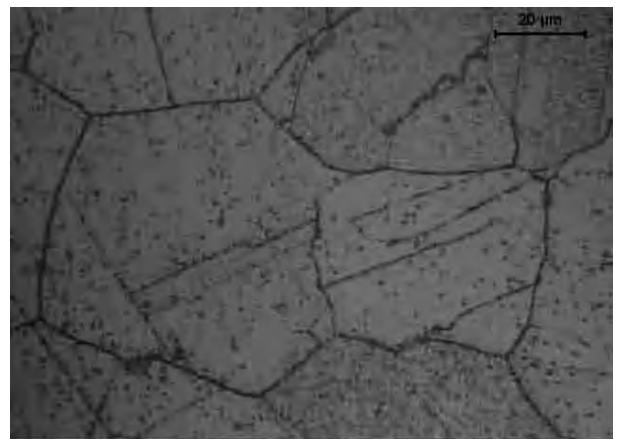


Figura 32b- Micrografia do aço inoxidável 310S tratado a 670°C – 5 horas, resfriamento ao ar.

5.2 - ENSAIOS DE RUGOSIDADE

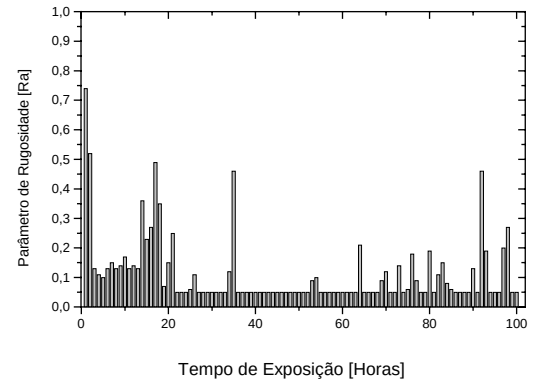
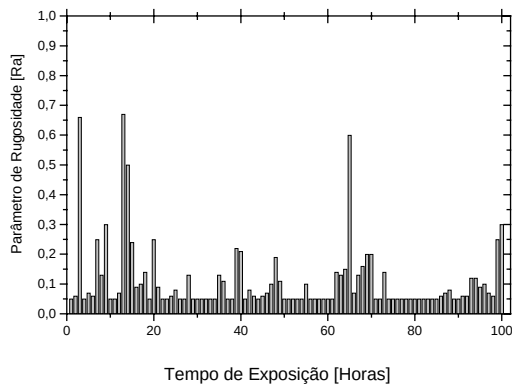
5.2.1 - AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ABNT 304

Foram realizados, em cada amostra vinte campos de medida, após a preparação metalográfica e em todas as situações impostas pelos tratamentos térmicos e aos testes de corrosão via névoa salina. Os resultados são apresentados nas Figuras 33 (a), (b), (c), (d), (e) e (f).

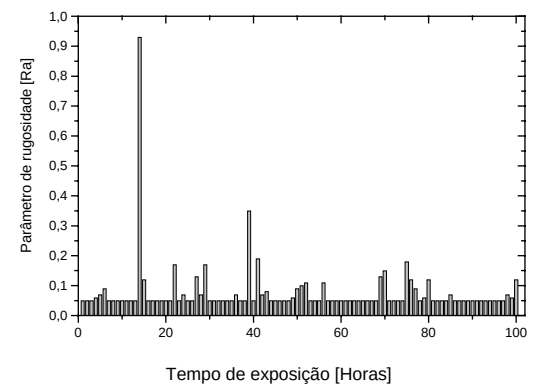
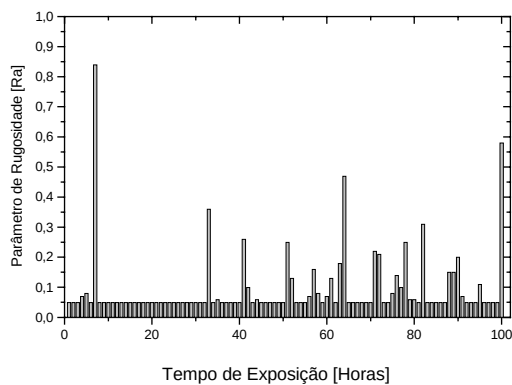
A rugosidade superficial, antes e após os ensaios de corrosão em diferentes tempos de exposição, não foi alterada ($R_a = 0,05\mu\text{m}$) indicando a ausência da corrosão localizada. Os valores de $R_a > 0,05\mu\text{m}$ são originados principalmente pela existência de pites.

Grandes variações na rugosidade são devidas à agressividade do ataque superficial, através da formação da corrosão localizada por pites principalmente quando os corpos de prova são submetidos a tempos prolongados de exposição como: 48, 120, 168, 216 e 312 horas em condições normalizadas.

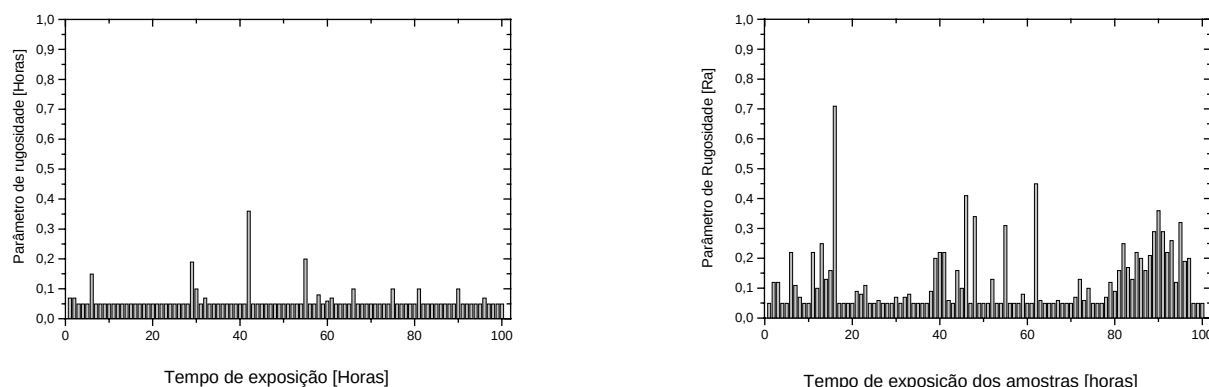
Em relação ao material, quando foi tratado termicamente, verificou-se ocorrências significativas da corrosão localizada. Os resultados mostraram que o aço inox 304 tratado termicamente a 620°C durante 5 horas e a 820°C durante 1 hora apresentou maior resistência à corrosão localizada ou superfícies menos atacadas que as demais condições.



- a) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 304 tratado a 1065°C – 1 hora, resfriamento água e gelo
- b) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 304 tratado 1065°C – 1 hora, resfriamento ar.



- c) Comportamento da rugosidade [Ra], aço inox 304 tratado a 620°C – 24 horas, resfriamento ao ar.
- d) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inoxidável 304 tratado a 820°C – 1 hora, resfriamento ao ar.



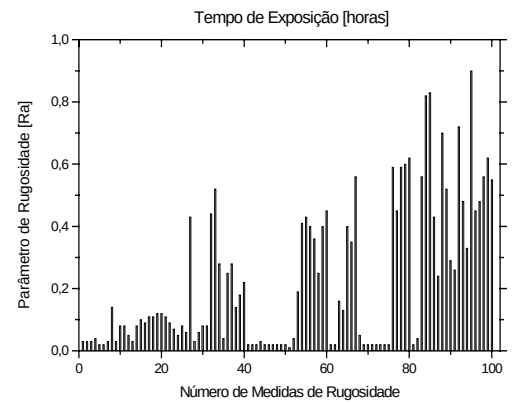
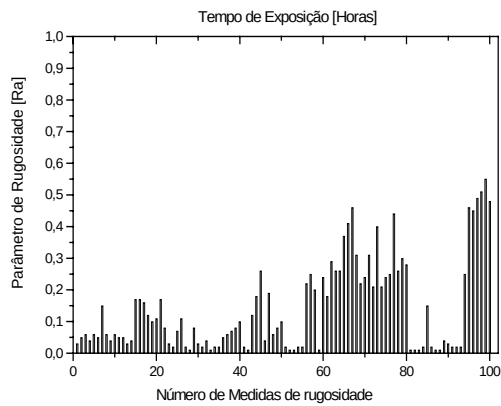
e) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 304 tratado a 670°C – 5 horas, resfriamento ao ar. f) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 304 , no estado como recebida.

Figura 33 – Comportamento da rugosidade [Ra], após os testes de corrosão no aço inoxidável 304

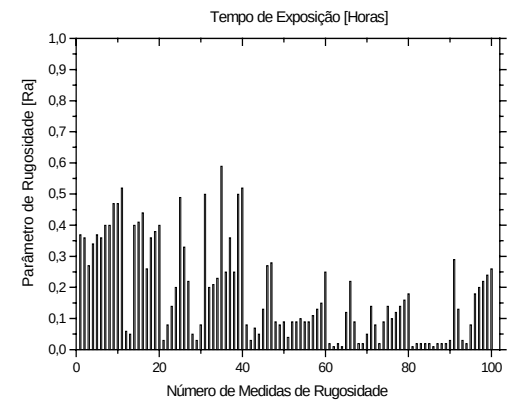
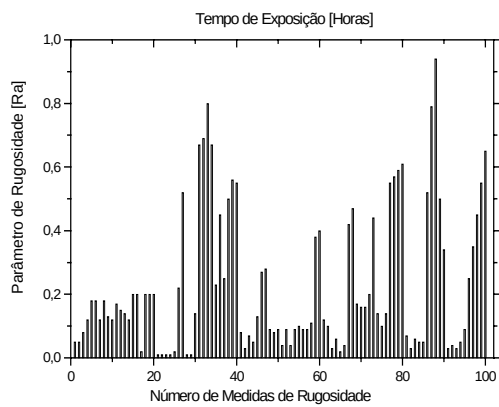
5.2.2 - AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ABNT 310S

O objetivo principal do ensaio de rugosidade nas amostras de aço inoxidável 310S tratado termicamente também foi à determinação do parâmetro de rugosidade superficial [Ra - μm] em relação a diferentes tempos de exposição em névoa salina (48, 120, 168, 216 e 312 horas).

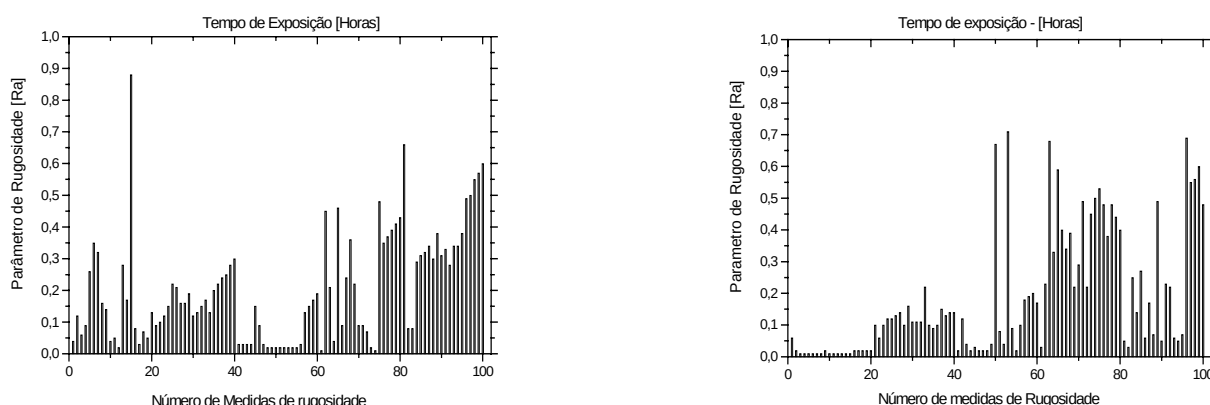
O parâmetro de rugosidade superficial inicial, ou seja, na superfície polida, foi ligeiramente menor que $Ra=0,05\mu\text{m}$ mas foi significativamente alterado após os ensaios de corrosão, o que é coerente com uma maior fração ou densidade dos pites em relação ao aço inoxidável austenítico 304.



a) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 310S tratado a $1065^{\circ}\text{C} - 1$ hora, resfriamento água e gelo. b) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 310S tratado a $1065^{\circ}\text{C} - 1$ hora, resfriamento ar.



c) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 310S tratado a $620^{\circ}\text{C} - 24$ horas, resfriamento ao ar. d) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 310S tratado a $820^{\circ}\text{C} - 1$ hora, resfriamento ao ar.



e) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 310S tratado a 670°C – 5 horas, resfriamento ao ar. f) Comportamento da rugosidade [Ra], no aço inox 310S, no estado como recebida.

Figura 34 – Comportamento da rugosidade [Ra], após os testes de corrosão no aço inoxidável 310S

5.3 - ENSAIOS DE MICRODUREZA

O objetivo principal dos ensaios de microdureza nos aços inoxidáveis ABNT 304 e 310S tratado termicamente foi caracterizar as variações das propriedades mecânicas superficiais em função das mudanças microestruturais induzidas pela diferentes condições de tratamentos térmicos que resultam numa microestrutura sensibilizada.

As Tabelas 7 e 8 indicam que, nos casos estudados, não há variações significativas quanto aos valores da microdureza apresentados nos materiais. No entanto duas diferenças podem ser notados: os aços tratados termicamente possuem valores menores na microdureza que os aços no estado como recebido e o aço inoxidável tipo 310S no estado como recebido apresenta aumento nos valores de microdureza ao redor de 30%, devido ao alto teor de cromo e níquel e pela elevada taxa de deformação mecânica, conforme as Tabelas 7 e 8.

Tabela 7- Valores de Microdureza (Vickers) no aço inoxidável 304, no estado como recebido e tratado

Tratamento Térmico (°C)	Valores de Microdureza – (Vickers)	Desvio Padrão
1065°C – 1 hora, resfriado água e gelo	170,66	5,2
1065°C – 1 hora, resfriado ao ar	147,56	3,4
820°C – 1 hora, resfriado ao ar	148,90	2,4
620°C – 24 horas, resfriado ao ar	152,22	5,5
670°C – 5 horas, resfriado ao ar	152,90	3,9
Como recebido	172,01	1,9

Tabela 8 - Valores de Microdureza (Vickers) no aço inoxidável 310S, no estado como recebido e tratado

Tratamento Térmico (°C)	Valores de Microdureza (Vickers)	Desvio Padrão
1065°C – 1 hora, resfriado água e gelo	166,55	4,2
1065°C – 1 hora, resfriado ao ar	152,97	3,00
820°C – 1 hora, resfriado ao ar	171,74	4,12
620°C – 24 horas, resfriado ao ar	169,35	3,43
670°C – 5 horas, resfriado ao ar	173,83	2,33
Como recebido	219,95	3,09

5.4 - ANÁLISES DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS DOS PITES EM DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS 304 E 310S TRATADOS

As análises superficiais dos corpos de prova foram realizadas, após submetidas a diferentes tempos de exposição em névoa salina, através do uso da microscopia óptica, processamento digital e análise de imagens.

O programa IMAGE-PRO PLUS 4.5 foi usado para o estudo e avaliação temporal dos parâmetros que governam a cinética de desenvolvimento dos aspectos geométricos dos pites dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 310S tratado termicamente.

As Tabelas 9 a 15 resumem os parâmetros estatísticos das superfícies corroída em diferentes tempos de exposição via névoa salina, após serem tratados termicamente.

Os resultados obtidos nas atividades revelam que os aços inoxidáveis ao serem submetidas a diferentes condições de tratamentos térmicos alteram significativamente os parâmetros morfológicos, principalmente a nucleação e a migração dos precipitados na forma carbeto de cromo ao redor dos contornos dos grãos.

Em seguida, evidencia-se não há alterações significativas na geometria dos pites, tornando o aspecto circular de acordo com o parâmetro da razão de aspecto (no estado como recebida: 1,22 a 48 horas – 1,34 a 312 horas de exposição e tratado a 620°C-24 horas: 1,07 a 48 horas – 1,05 a 312 horas).

Quanto maior o tempo de exposição em névoa salina, maior a extensão do ataque superficial e diante deste fato observa-se o aumento na densidade da corrosão localizada [$1/\text{mm}^2$] (no estado como recebida: 71,80 a 48 horas – 145,27 a 312 horas de exposição e tratado a 620°C-24 horas: 7,73 a 48 horas – 13,47 a 312 horas), fração corroída [%] (no estado como recebida: 0,14 a 48 horas – 0,80 a 312 horas de exposição e tratado a 620°C-24 horas: 0,03 a 48 horas – 2,79 a 312 horas) e área média dos pites [μm^2] (no estado como recebida: 13,19 a 48 horas – 35,07 a 312 horas de exposição e tratado a 620°C-24 horas: 11,45 a 48 horas – 28,26 a 312 horas) independentemente das condições de tratamentos térmicos realizadas no aço inoxidável 304.

Em todas as condições os diâmetros máximo e mínimo dos pites apresentaram similaridades nos resultados obtidos.

Tabela 9 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, estado de recebimento em testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	6,07	4,83	6,26	6,71	6,74
Diâmetro mínimo [μm]	3,55	3,27	3,66	3,70	3,84
Fração corroída [%]	0,14	0,07	0,27	0,23	0,80
Razão de aspecto	1,22	1,04	1,23	1,26	1,34
Densidade de pites [$1/\text{mm}^2$]	71,80	11,68	59,29	118,50	145,27
Área média [μm^2]	13,19	24,67	25,93	34,01	35,07
Desvio padrão	10,71	7,33	10,94	11,26	11,98

Tabela 10 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratada à 1065°C durante 1 hora, resfriada em solução água e gelo, submetida em testes de corrosão sob névoa salina em diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	4,33	4,16	4,26	4,64	4,12
Diâmetro mínimo [μm]	2,66	2,73	2,73	2,81	2,36
Fração corroída [%]	0,17	0,28	0,02	1,30	2,16
Razão de aspecto	1,11	1,04	1,05	1,08	1,11
Densidade de pites [$1/\text{mm}^2$]	39,68	5,28	12,47	16,82	553,30
Área média [μm^2]	13,47	13,40	14,84	11,61	17,39
Desvio padrão	11,49	11,59	10,98	13,45	9,45

Tabela 11 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratado à 1065°C durante 1 hora, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão sob névoa salina em diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	3,63	3,55	5,95	3,50	3,85
Diâmetro mínimo [μm]	2,37	2,38	2,75	2,31	2,35
Fração corroída [%]	0,07	0,15	0,18	0,65	2,33
Razão de aspecto	1,03	1,03	1,13	1,02	1,17
Densidade de pites [$1/\text{mm}^2$]	11,76	22,04	35,61	397,45	453,22
Área média [μm^2]	8,88	9,37	7,88	8,68	8,94
Desvio padrão	9,71	9,50	9,52	9,32	9,47

Tabela 12 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratada à 820°C durante 1 hora, resfriado ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	5,16	4,89	5,01	4,05	5,01
Diâmetro mínimo [μm]	3,37	4,89	5,01	4,05	2,68
Fração corroída [%]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,13
Razão de aspecto	1,04	1,23	1,47	1,09	1,10
Densidade de pites [$1/\text{mm}^2$]	4,50	8,98	2,07	4,97	19,44
Área média [μm^2]	22,36	27,45	34,56	14,42	33,08
Desvio padrão	13,38	12,72	11,47	7,79	10,48

Tabela 13 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratada a 620°C durante 24 horas, resfriado ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	4,15	4,45	4,68	5,05	4,04
Diâmetro mínimo [μm]	2,76	2,73	2,47	2,75	2,54
Fração corroída [%]	0,03	0,02	0,70	0,05	2,79
Razão de aspecto	1,07	1,09	1,05	1,12	1,17
Densidade dos pites [1/mm ²]	7,73	8,06	5,46	8,09	13,47
Área média [μm^2]	11,45	13,52	23,21	21,56	28,26
Desvio padrão	2,66	3,39	5,71	6,29	6,75

Tabela 14 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 304, tratada a 670°C durante 5 horas, resfriado ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	3,54	7,91	3,98	23,45	3,35
Diâmetro mínimo [μm]	2,34	4,05	2,47	2,07	2,10
Fração corroída [%]	0,02	0,03	0,03	0,01	0,08
Razão de aspecto	1,02	1,26	1,05	1,05	1,04
Densidade dos pites [1/mm ²]	13,75	15,09	16,82	12,23	20,42
Área média [μm^2]	7,98	7,66	8,91	7,63	14,47
Desvio padrão	1,92	1,73	3,90	2,82	2,21

As análises dos parâmetros morfológicos superficiais dos pites no aço inoxidável AISI 304 apontam que com o aumento do tempo de exposição, há uma tendência de crescimento na densidade dos pites e na fração corroída em todos os casos apresentados nas tabelas acima.

As Tabelas 10 e 11 revelam o crescimento mais regular no aço tratado à 1065°C durante 1 hora. A área média corroída tem uma tendência bem definida, entretanto, a análise das variáveis dos diâmetros máximo e mínimo com o tempo parece indicar que a área não muda significativamente em cada caso.

No entanto, a liga quando tratada a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar apresentou maior susceptibilidade a corrosão por pites, devido ao maior número de pites, área corroída, fração corroída e densidade de pites.

Tabela 15 – Parâmetros estatísticos dos pites no aço inoxidável 304, submetido a 312 horas de exposição em névoa salina.

Parâmetros Estatísticos	Como recebida	1065°C 1 hora água e gelo	1065°C 1 hora ar	820°C 1 hora ar	620°C 24 horas ar	670°C 5 horas ar
Diâmetro máximo [µm]	6,74	4,12	3,85	5,01	4,04	3,35
Diâmetro mínimo [µm]	3,84	2,36	2,35	2,68	2,54	2,10
Fração corroída [%]	0,80	2,16	2,33	0,13	2,79	0,08
Razão de aspecto	1,34	1,11	1,17	1,10	1,05	1,04
Densidade de pites [1/mm ²]	145,27	553,30	453,22	19,44	13,47	20,42
Área média [µm ²]	35,07	17,39	8,94	33,08	28,26	7,63
Desvio padrão	11,98	9,45	9,47	3,88	5,71	2,21

Na tabela 15 nota-se que a razão de aspecto, o diâmetro máximo e o mínimo permanecem de forma quase constante em todas condições, porém no material tratado (620°C-24 horas) constata-se o aumento da fração corroída e a diminuição da densidade de pites. Em contrapartida, no estado como recebida, apresentam-se maiores valores de tamanho médio e razão de aspecto em relação à área média dos pites para todos os tempos de exposição.

A densidade de pites revela que os valores são ligeiramente superiores no material quando tratado a 1065 °C-1 hora e resfriado em água e gelo. Em algumas situações evidenciam-se erros de amostragem nos resultados obtidos, com o tempo de exposição.

Tabela 16 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, estado como recebido, submetida a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	8,70	8,25	8,78	8,09	8,99
Diâmetro mínimo [μm]	4,77	4,66	4,00	4,89	4,91
Desvio padrão	10,04	10,33	10,44	10,55	10,01
Razão de aspecto	1,01	1,10	1,12	1,15	1,03
Densidade dos pites [$1/\text{mm}^2$]	30,01	33,44	60,02	140,09	160,44
Área média [μm^2]	16,78	17,99	27,05	39,49	40,88
Fração corroída [%]	1,23	1,44	1,34	1,50	1,55

Tabela 17 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado a 1065°C durante 1 hora, resfriada em solução água e gelo, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	6,33	6,55	6,32	6,45	6,78
Diâmetro mínimo [μm]	3,01	3,87	3,66	3,34	3,89
Desvio padrão	11,78	11,66	11,55	11,41	9,09
Razão de aspecto	1,12	1,09	1,08	1,18	1,20
Densidade dos pites [$1/\text{mm}^2$]	20,44	4,00	15,33	18,99	40,59
Área média [μm^2]	15,87	16,88	15,99	17,08	18,09
Fração corroída [%]	0,19	0,55	0,89	1,11	1,99

Tabela 18 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado à 1065°C durante 1 hora, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	5,00	5,87	5,15	5,04	5,87
Diâmetro mínimo [μm]	2,55	2,45	2,09	2,08	2,58
Fração corroída [%]	0,08	0,20	0,44	0,50	2,40
Razão de aspecto	1,10	1,05	1,13	1,01	1,13
Densidade dos pites [$1/\text{mm}^2$]	15,98	28,02	39,76	200,09	378,06
Área média [μm^2]	10,09	11,98	12,65	12,32	13,07
Desvio padrão	8,99	8,73	8,33	8,44	8,01

Tabela 19 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado à 820°C durante 1 hora, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	6,19	5,93	6,02	5,09	6,03
Diâmetro mínimo [μm]	3,03	2,98	3,56	2,66	3,45
Fração corroída [%]	0,34	0,44	0,74	0,23	0,95
Razão de aspecto	1,08	1,26	1,50	1,09	1,01
Densidade dos pites [1/mm ²]	5,08	8,44	8,55	10,82	20,09
Área média [μm^2]	24,87	28,09	37,56	37,09	38,01
Desvio padrão	13,44	13,21	13,76	13,77	13,99

Tabela 20 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado a 620°C durante 24 horas, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	8,09	8,44	8,53	8,78	8,92
Diâmetro mínimo [μm]	4,04	4,39	4,34	4,67	4,89
Fração corroída [%]	0,09	0,08	0,80	1,20	3,90
Razão de aspecto	1,08	1,10	1,15	1,13	1,02
Densidade dos pites [1/mm ²]	9,02	10,45	15,34	14,09	19,99
Área média [μm^2]	13,45	15,11	25,23	26,23	35,28
Desvio padrão	9,99	8,78	8,43	8,78	8,30

Tabela 21 – Parâmetros estatísticos dos pites em aço inoxidável tipo 310S, tratado a 670°C durante 5 horas, resfriada ao ar, submetido a testes de corrosão em névoa salina para diferentes tempos de exposição.

Parâmetros Estatísticos	48 horas	120 horas	168 horas	216 horas	312 horas
Diâmetro máximo [μm]	9,00	9,02	9,13	9,12	9,23
Diâmetro mínimo [μm]	4,54	4,20	4,34	4,28	4,66
Fração corroída [%]	0,04	0,10	0,55	0,90	1,89
Razão de aspecto	1,04	1,23	1,09	1,02	1,01
Densidade dos pites [$1/\text{mm}^2$]	19,03	25,15	34,16	34,12	40,20
Área média [μm^2]	8,87	9,67	20,14	25,08	29,76
Desvio padrão	11,98	11,37	11,09	11,50	10,98

A razão de aspecto observada para o aço inox 310S foi a morfologia circular para as situações em relação aos tempos de exposição (no estado como recebida: 1,01 a 48 horas – 1,03 a 312 horas de exposição e tratado a 620°C-24 horas: 1,08 a 48 horas – 1,02 a 312 horas).

Quanto maior tempo de exposição em névoa salina maior a extensão do ataque superficial em todo sistema, diante deste fato observamos os parâmetros: com aumento na densidade da corrosão por pites (no estado como recebida: 30,01 a 48 horas – 160,44 a 312 horas de exposição e tratado a 620°C-24 horas: 9,02 a 48 horas – 19,99 a 312 horas), fração corroída [%] (no estado como recebida: 1,23 a 48 horas – 1,55 a 312 horas de exposição e tratado a 620°C-24 horas: 0,09 a 48 horas – 3,90 a 312 horas) e área média dos pites [μm^2] (no estado como recebida: 16,78 a 48 horas – 40,88 a 312 horas de exposição e tratado a 620°C-24 horas: 13,45 a 48 horas – 35,28 a 312 horas) independentemente das condições de tratamentos térmicos realizadas no aço inoxidável 304.

Em todas as condições o diâmetro máximo e mínimo dos pites apresentaram similaridades aos resultados obtidos, porém consistentemente maiores que o aço inox 304.

As análises dos parâmetros morfológicos superficiais dos pites no aço inoxidável 310S apresentaram valores similares relativos aos parâmetros estatísticos ao aço inox 304 e tiveram as seguintes conclusões: quanto maior o tempo de exposição, maior a densidade de pites e a fração corroída em todos os casos apresentados nas tabelas 16 a 22.

No entanto, a liga quando tratada a 620°C durante 24 horas apresenta maior susceptibilidade à corrosão por pites, devido ao maior número de pites, área corroída, fração corroída e densidade de pites. Em contrapartida, para o aço tratado a 820°C durante 1 hora, há menor susceptibilidade à corrosão por pites indicada pela menor densidade de pites e fração global corroída, conforme a Tabela 20.

A liga quando tratada a 1065°C durante 1 hora e resfriada ao ar mostrou maior densidade de pites e menor área média corroída em relação às outras condições para todos os tempos de exposição.

Salienta-se em modo geral no sistema que quanto maior tempo de exposição maior a fração corroída. Quando a liga é tratada há o favorecimento da corrosão localizada, devido ao fenômeno de sensitização com a presença das fases intermetálicas como carbeto de cromo, resultando em mudanças significativas na microestrutura e no comportamento à corrosão.

Tabela 22 – Parâmetros estatísticos dos pites no aço inoxidável tipo 310S submetido a 312 horas de exposição em névoa salina.

Parâmetros Estatísticos	Como recebida	1065°C 1 hora água e gelo	1065°C 1 hora ar	820°C 1 hora ar	620°C 24 horas ar	670°C 5 horas ar
Diâmetro máximo [µm]	8,99	6,78	5,87	6,03	8,92	9,23
Diâmetro mínimo [µm]	4,91	3,89	2,58	3,45	4,89	4,66
Fração corroída [%]	1,55	1,99	2,40	0,95	3,90	1,89
Desvio padrão	10,01	9,09	8,01	13,99	8,30	10,98
Razão de aspecto	1,03	1,20	1,13	1,01	1,02	1,01
Densidade de pites [1/mm ²]	160,44	40,59	378,06	20,09	19,99	40,20
Área média [µm ²]	40,88	18,09	13,07	38,01	35,28	29,76

5.5. - MICROSCOPIA ÓPTICA E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS DA CORROSÃO POR PITES

5.5.1 - AÇO INOXIDÁVEL ABNT 304

A morfologia superficial dos pites foi avaliada através do uso de técnica de microscopia óptica, auxiliada por processamento digital e análise de imagens, após a preparação metalográfica dos corpos de prova, visando descrever de maneira qualitativa a forma e distribuição dos pites no aço inoxidável ABNT 304 tratado termicamente, conforme a norma técnica da ASTM A 480/A480M-91 - *Standard Specification for General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting*.

A inspeção visual mostrou o mínimo de degradação superficial, porém a examinação microscópica indicou a formação alguns “pontos escuros” de pites sobre a superfície dos corpos de prova ao serem submetidos a diferentes tempos de exposição,

conforme as micrografias 36a e 47b apresentando o aspecto de comparação entre os tempos de exposição (48 e 312 horas).

As características morfológicas dos pites foram determinadas para a superfície corroída das amostras por microscopia ótica e em seguida as imagens foram digitalizadas usando uma câmera digital PIXERA PROFESSIONAL em campo claro, resolução de 1260x960x8 bits, aumento de 100 vezes com iluminação por luz de xenônio em 30 campos por amostra.

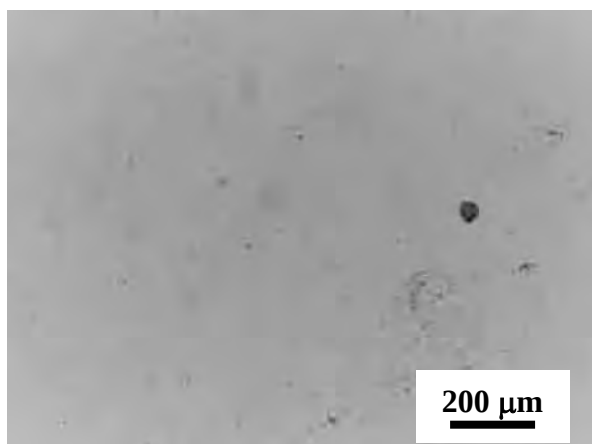


Figura 36a - Como recebida e exposição de 48 horas em névoa salina

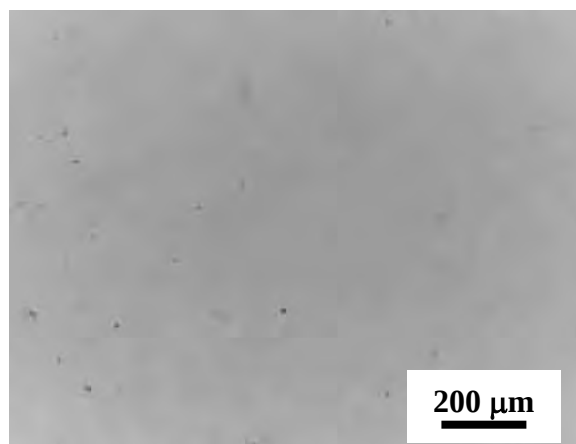


Figura 36b - Como recebida e exposição de 48 horas em névoa salina

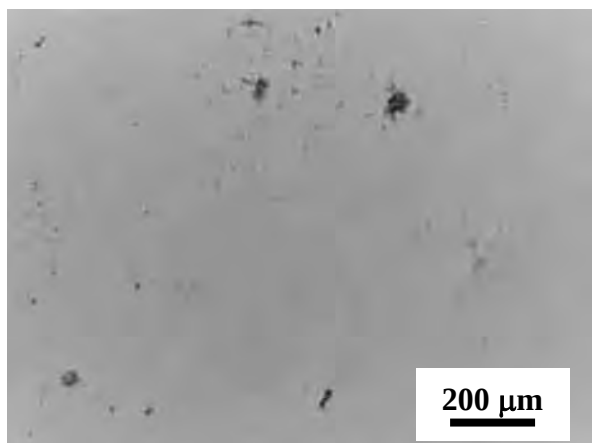


Figura 37a - Como recebida e exposição de 312 horas em névoa salina

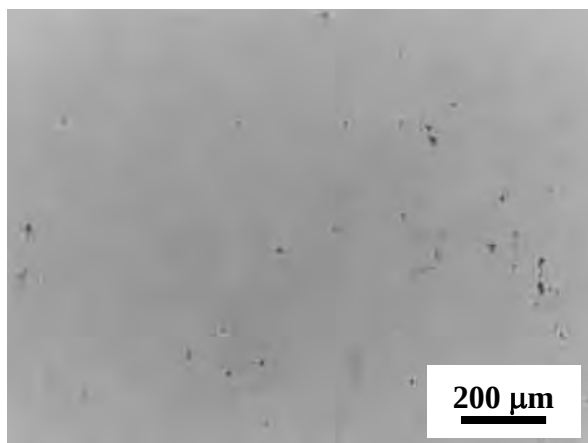


Figura 37 b - Como recebida e exposição de 312 horas em névoa salina

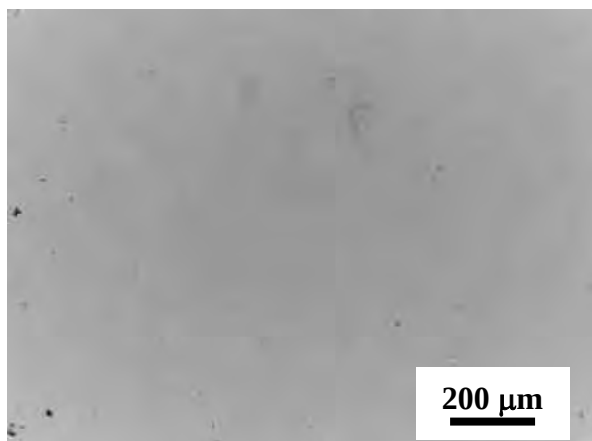


Figura 38a – tratada a 1065°C –1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 48 horas em névoa salina.

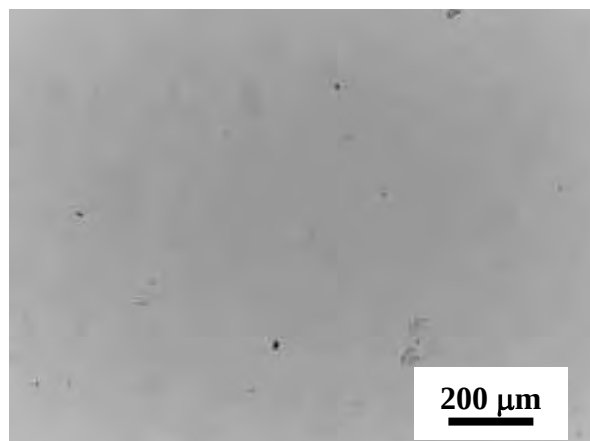


Figura 38b – tratada a 1065°C –1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 48 horas em névoa salina.

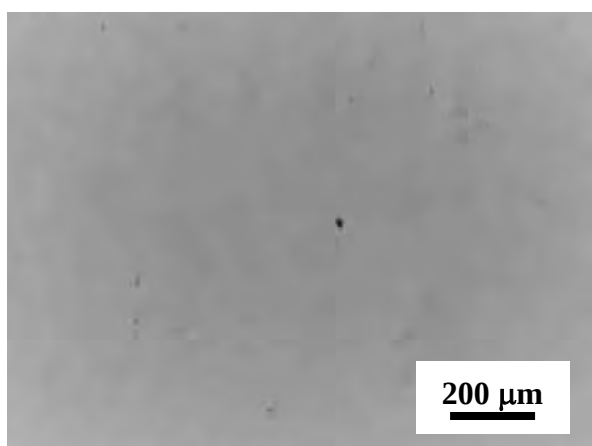


Figura 39a- tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 312 horas em névoa salina.

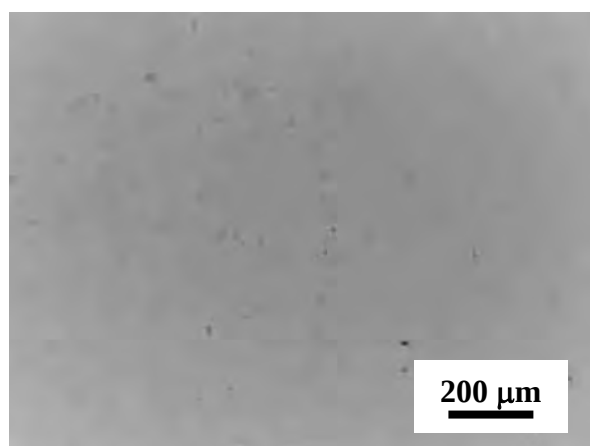


Figura 39b- tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 312 horas em névoa salina.

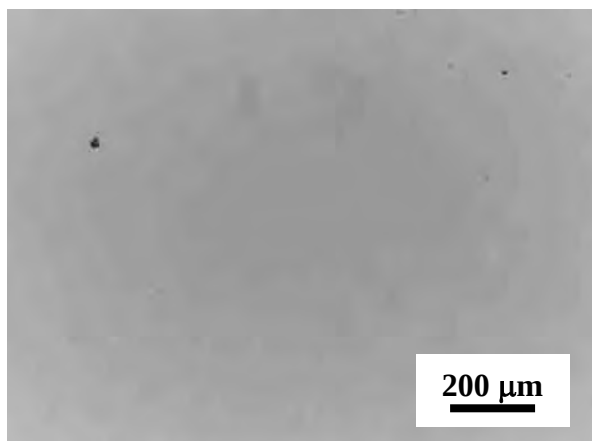


Figura 40A- tratada a 1065°C –1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina

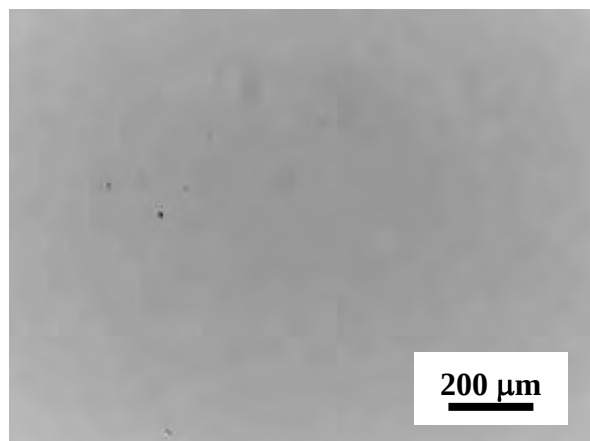


Figura 40b- tratada a 1065°C –1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina

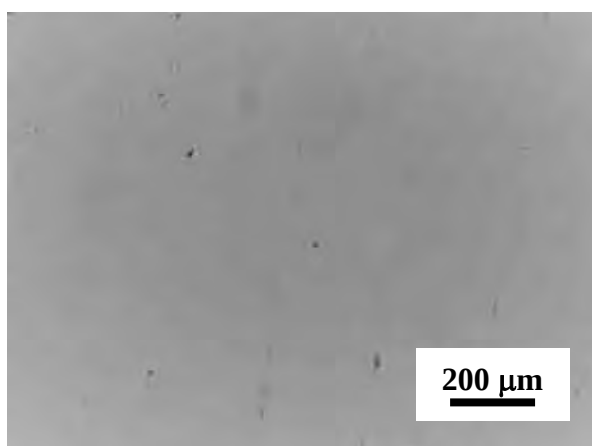


Figura 41a - tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

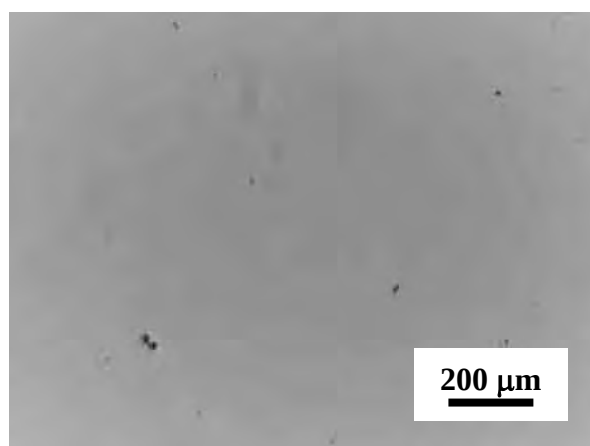


Figura 41b- tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina

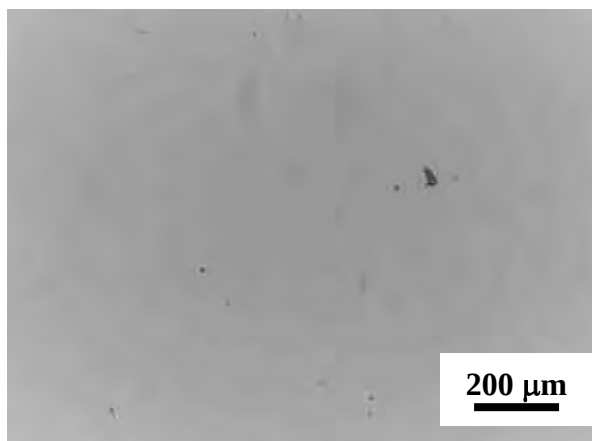


Figura 42a - tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina

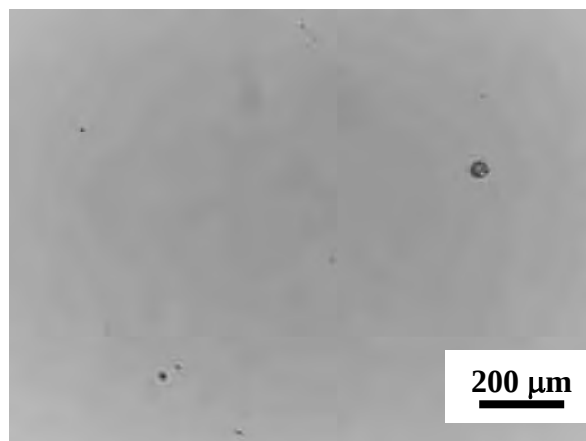


Figura 42b - tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina

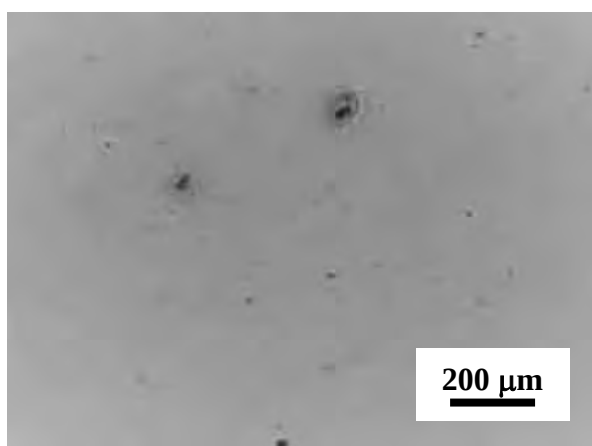


Figura 43a- tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina

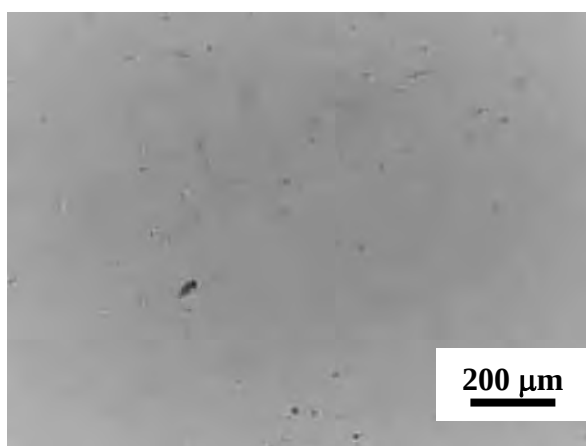


Figura 43b- tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina

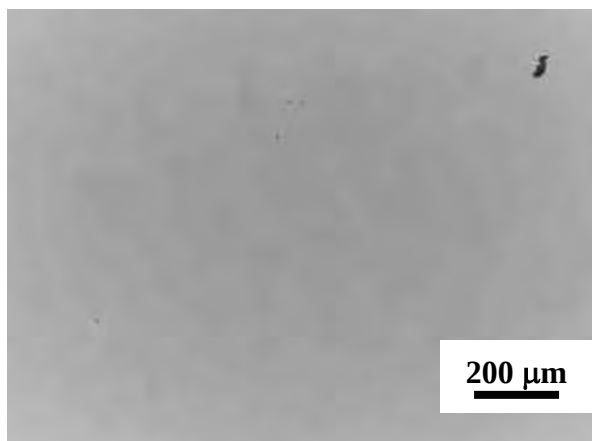


Figura 44a- tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

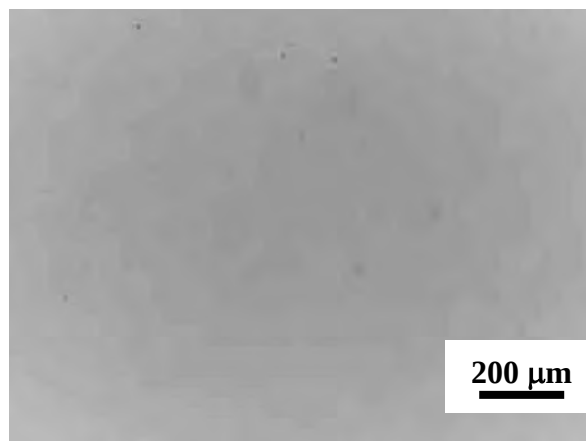


Figura 44b- tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

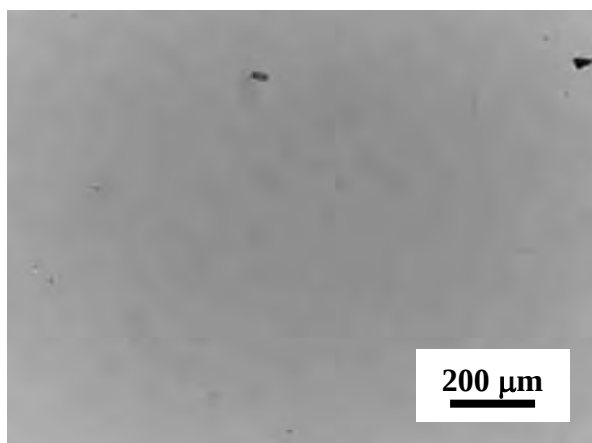


Figura 45a- tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

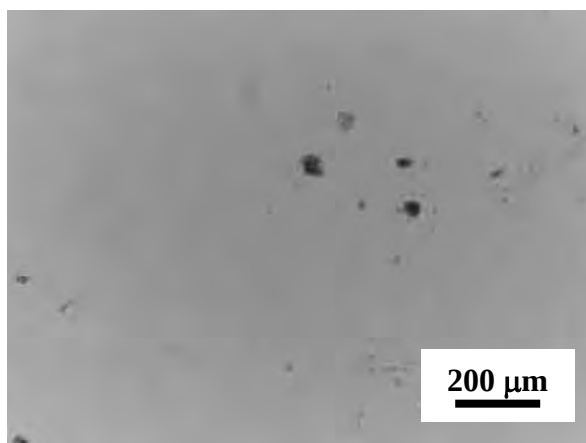


Figura 45b- tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

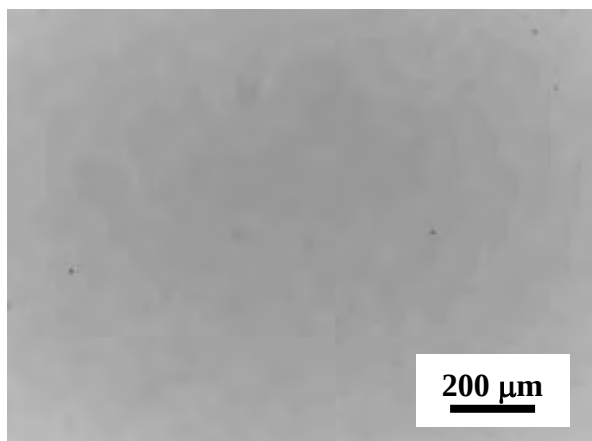


Figura 46a- tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

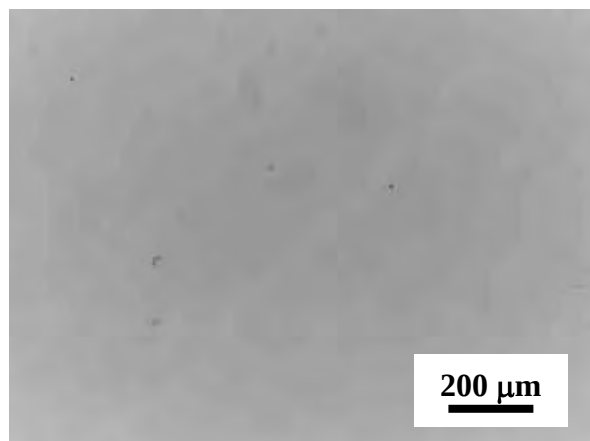


Figura 46b- tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

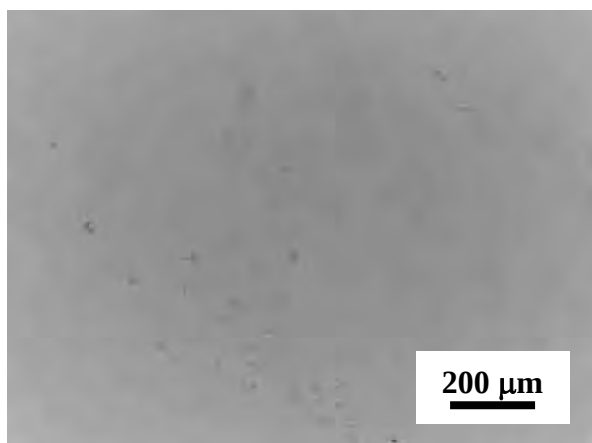


Figura 47 a - 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

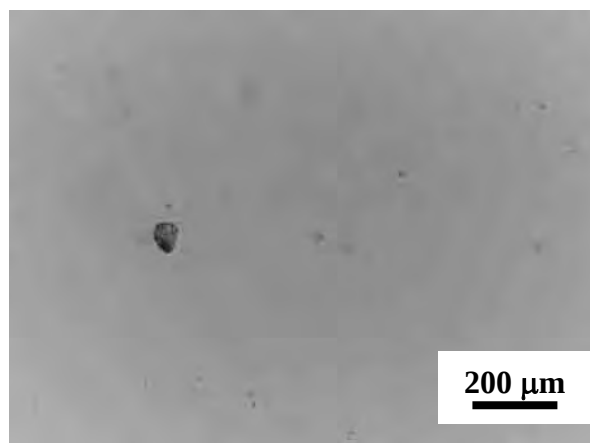


Figura 47 b - 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

5.5.2 - AÇO INOXIDÁVEL ABNT 310S

A inspeção visual mostrou a degradação mínima, porém a examinação microscópica permitiu observar a formação de certa quantidade de pites (pontos escuros), após as amostras serem submetidas aos testes de corrosão em diferentes tempos de exposição (fator comparativo: 48 e 312 horas).

As micrografias 48a a 59b foram feitas após a preparação metalográfica e os testes de corrosão, através da utilização de microscopia óptica em campo claro, com aumento de 100 vezes. Revelaram as características qualitativas da morfologia e os aspectos originais dos pites no aço inoxidável 310S, após serem submetidas aos testes de corrosão sob névoa salina.

Em todos os casos foi observado qualitativamente que quanto maior o tempo de exposição, maior área média, número de pites e a densidade de pites. Isso relata o caráter do ambiente corrosivo (meio) e as mudanças microestruturais no material, de acordo com a tabela 22.



Figura 48a- Como recebida e exposição de 48 horas em névoa salina



Figura 48b- Como recebida e exposição de 48 horas em névoa salina



Figura 49a- Como recebida e exposição de 312 horas em névoa salina.



Figura 49b- Como recebida e exposição de 312 horas em névoa salina.

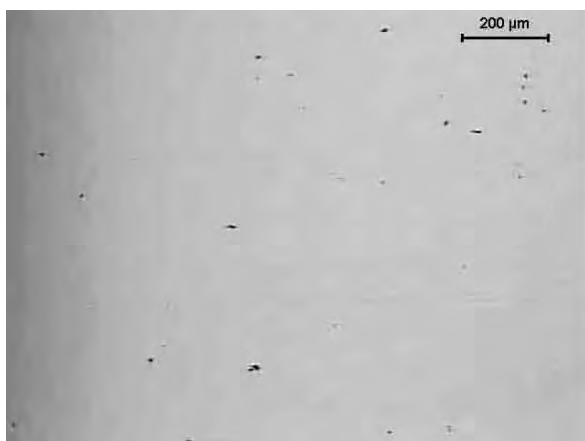


Figura 50a- tratada a 1065°C -1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 48 horas em névoa salina.



Figura 50b- tratada a 1065°C -1 hora, resfriada em água e gelo e exposição de 48 horas em névoa salina.

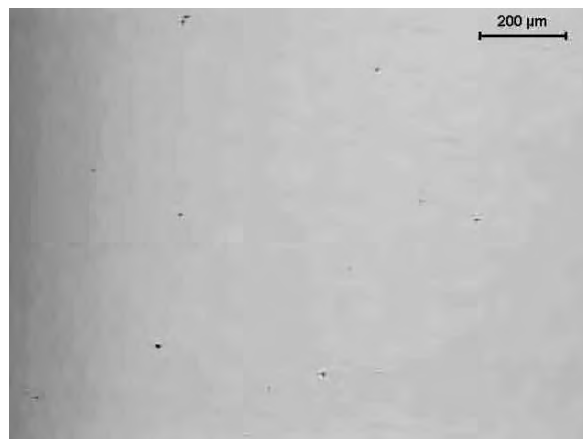


Figura 51a tratada a - 1065°C – 1 hora, resfriada água e gelo e exposição de 312 horas em névoa salina. Figura 51b - tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada água e gelo e exposição de 312 horas em névoa salina.

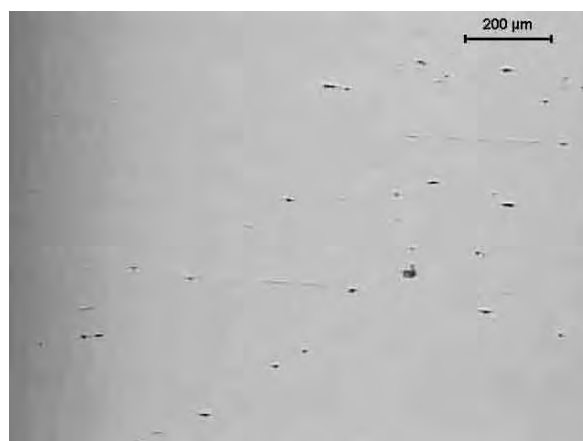


Figura 52a- tratada a 1065°C –1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina. Figura 52b- tratada a 1065°C –1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

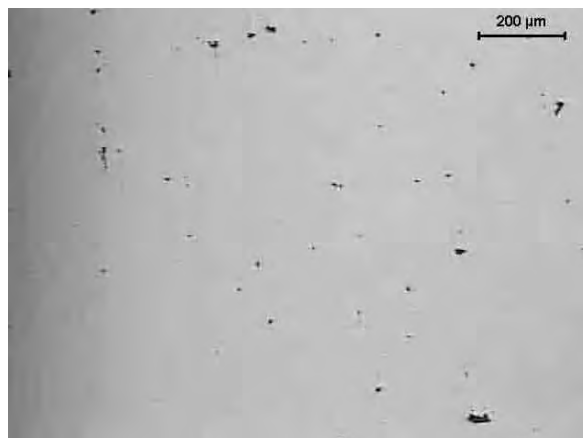
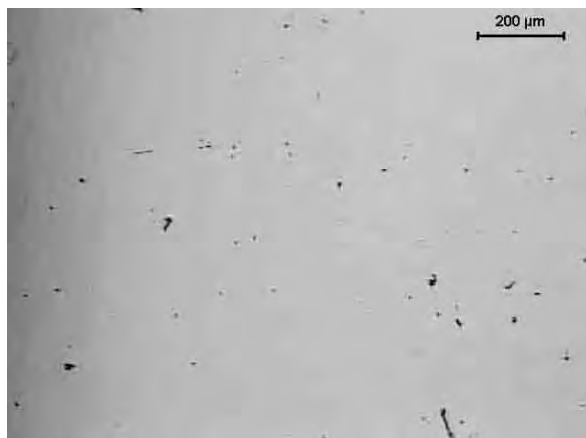


Figura 53a- tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

Figura 53b- tratada a 1065°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

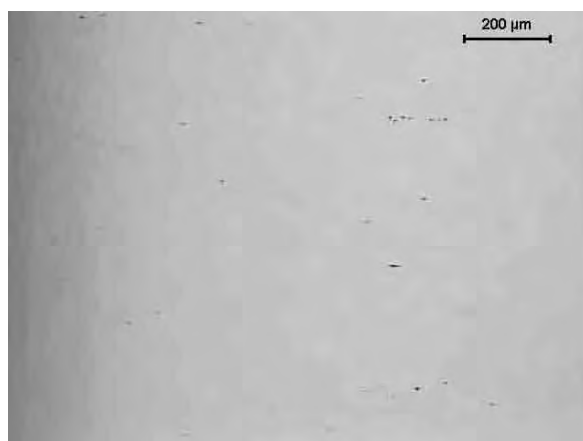
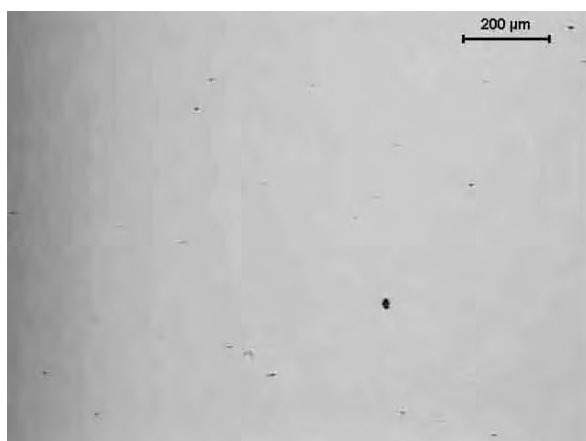


Figura 54a- tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

Figura 54b- tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

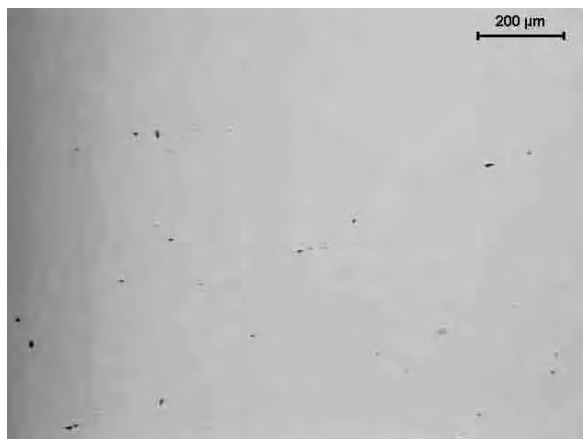
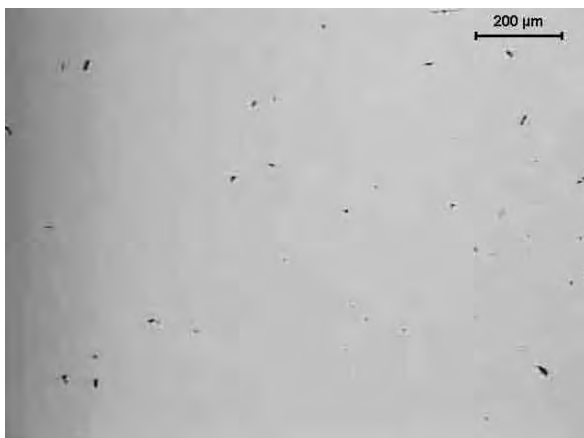


Figura 55a- tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

Figura 55b- tratada a 820°C – 1 hora, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

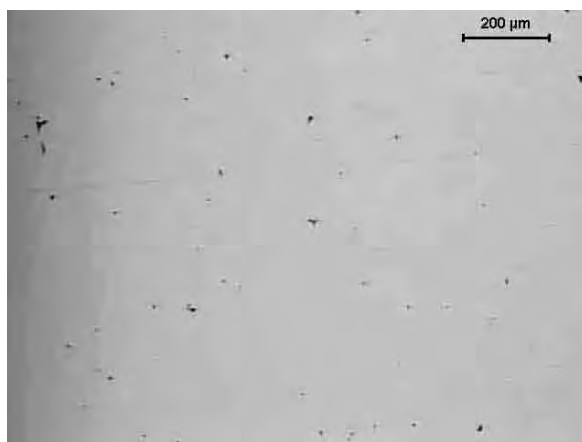
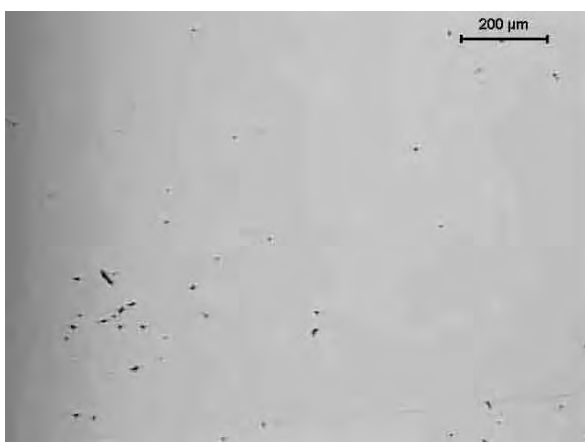


Figura 56a- tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

Figura 56b- tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

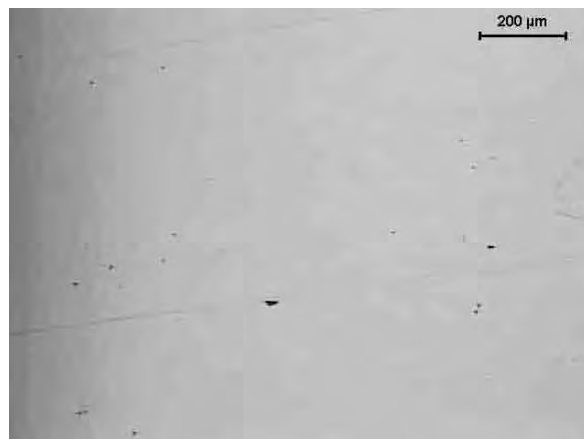
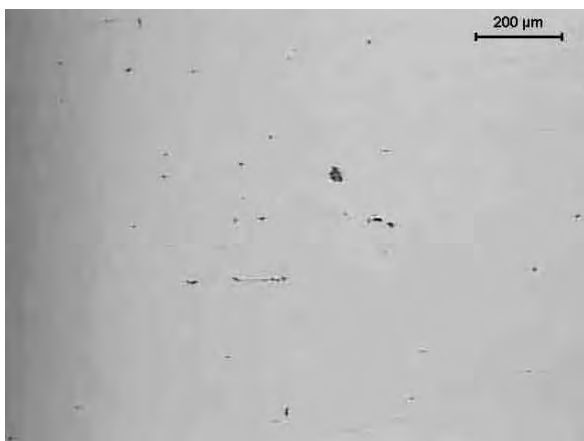


Figura 57a- tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina. Figura 57b- tratada a 620°C – 24 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina.

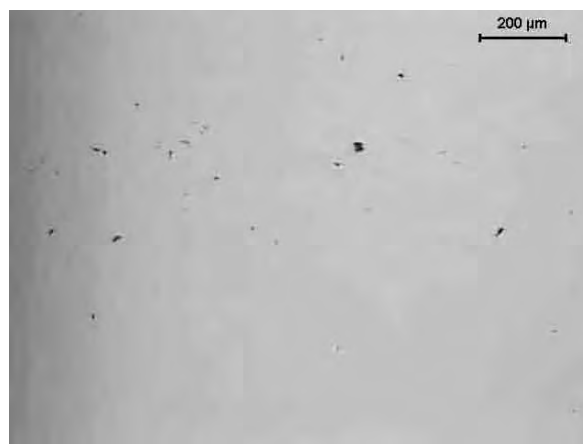
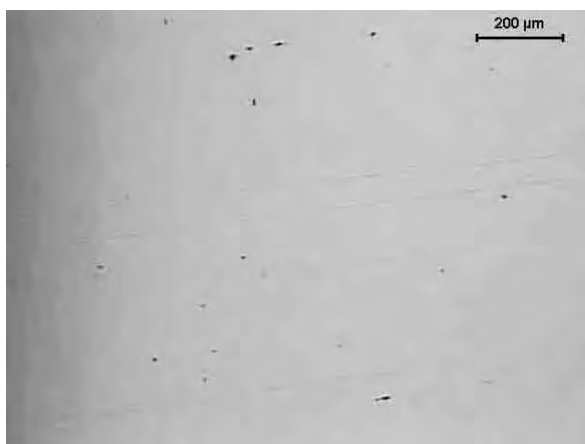


Figura 58a - tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina. Figura 58b - tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 48 horas em névoa salina.

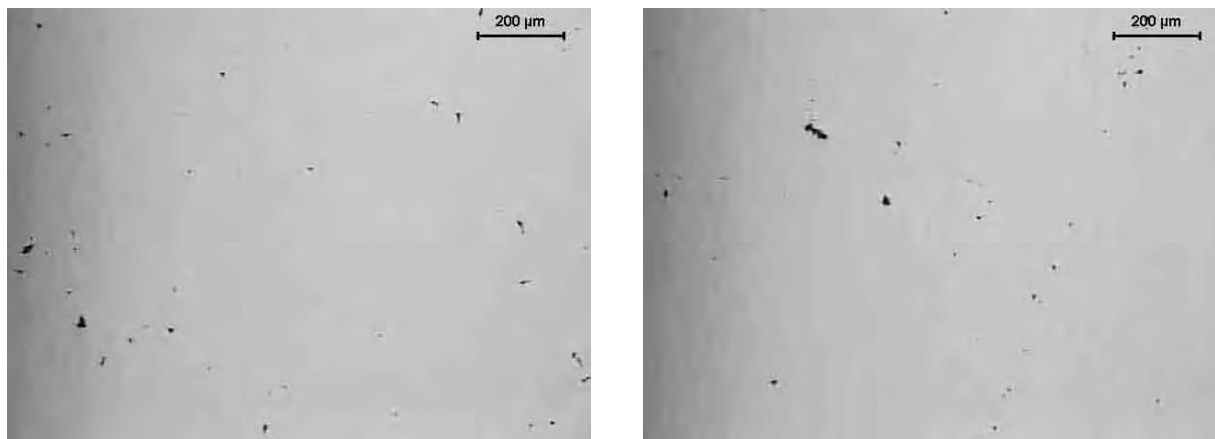


Figura 59a- tratada a 670°C – 5 horas, Figura 59b- tratada a 670°C – 5 horas, resfriada ao ar e exposição de 312 horas em resfriada ao ar e exposição de 312 horas em névoa salina. névoa salina.

5.6 - ANÁLISE DA FRAÇÃO CORROÍDA NO AÇO INOXIDÁVEL 304 VERSUS TEMPOS DE EXPOSIÇÃO EM DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

As Figuras 60 a 65 permitem a comparação dos aspectos estatísticos da corrosão por pites no aço inoxidável 304 tratado como: fração da área global corroída (%) em função do teste de corrosão sob névoa salina para diferentes tempos de exposição e aspectos microestruturais.

Notamos que o material, após ser tratado termicamente na condição 620°C durante 24 horas e resfriado ao ar, apresentou maiores valores quanto à fração da área global corroída (%) no maior tempo de exposição - 312 horas. Evidencia-se em alguns casos erros de amostragem. Em algumas situações evidenciam-se erros de amostragem nos dados obtidos, com a diminuição da fração corroída com o tempo de exposição.

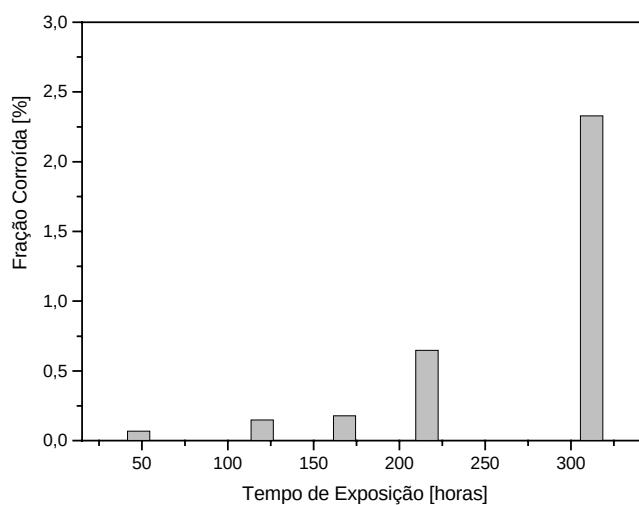


Figura 60 – Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304 tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.

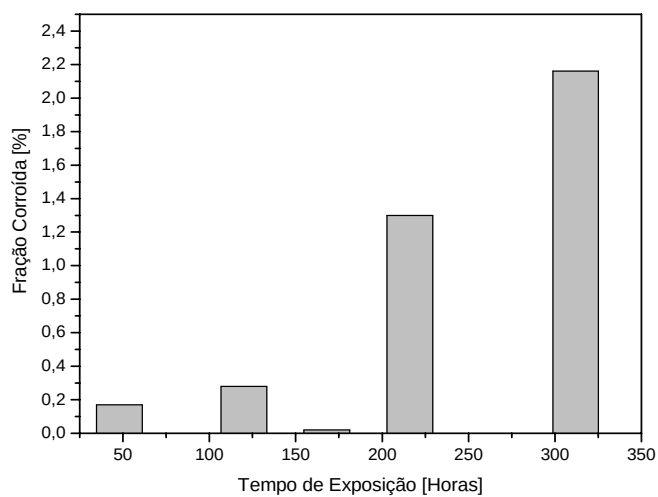


Figura 61 – Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304 tratado a 1065°C – 1 hora em água e gelo.

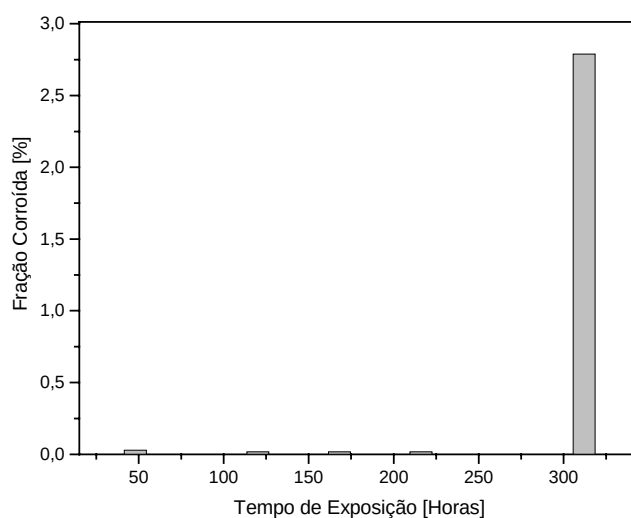


Figura 62 - Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.

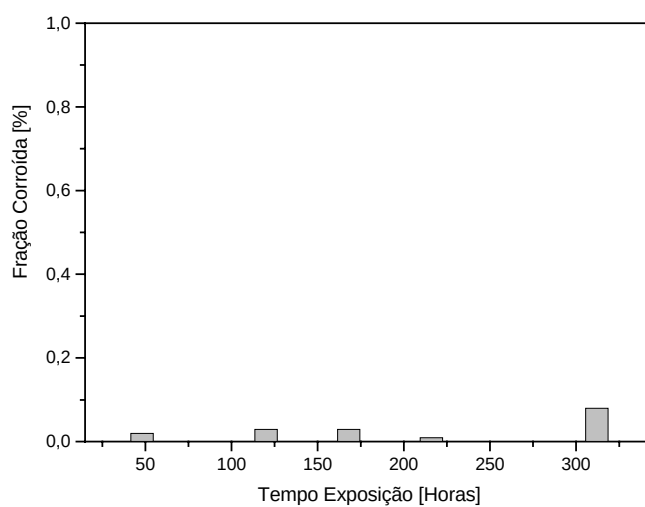


Figura 63 - Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.

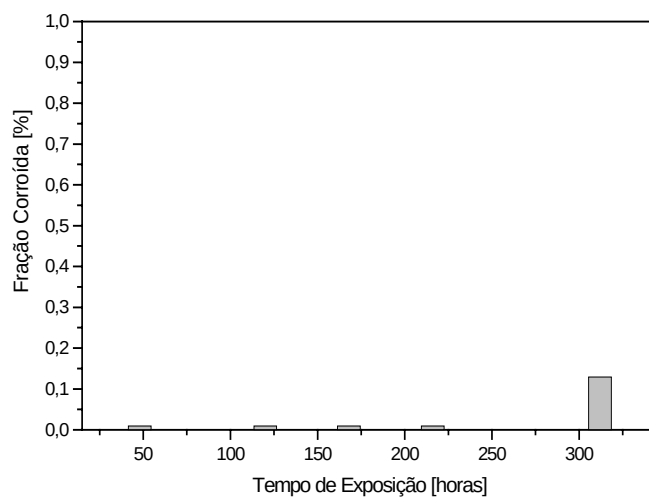


Figura 64 - Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304, tratado à 820°C – 1 hora e resfriada ao ar.

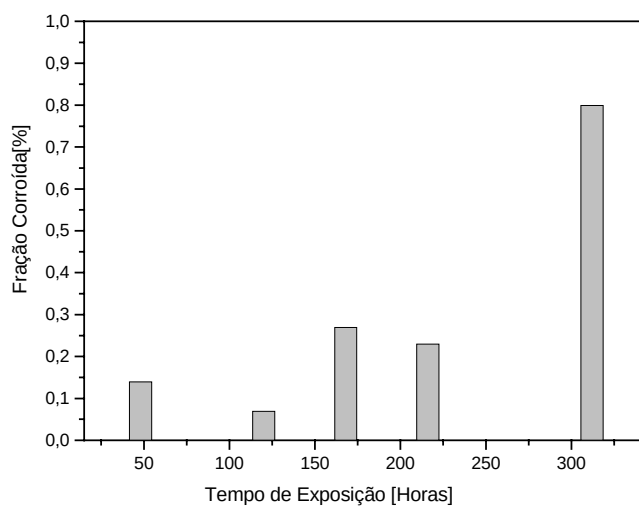


Figura 65 – Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 304, no estado como recebida.

5.7. - ANÁLISE DA DENSIDADE DE PITES NO AÇO INOXIDÁVEL 304 VERSUS TEMPOS DE EXPOSIÇÃO PARA OS DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

As Figuras 66 a 71 mostram a distribuição dos parâmetros morfológicos em relação à densidade dos pites [1/mm] associados com as diferentes condições dos testes de corrosão via “névoa salina” no aço inoxidável 304 tratado termicamente.

Das análises dos parâmetros superficiais após os testes de corrosão (tabelas) que a liga quando submetida aos tratamentos térmicos na faixa de temperatura 620°C-820°C observou-se uma menor variação das densidades de pites durante todos os tempos de exposição. Nota-se em alguns casos erros de amostragem.

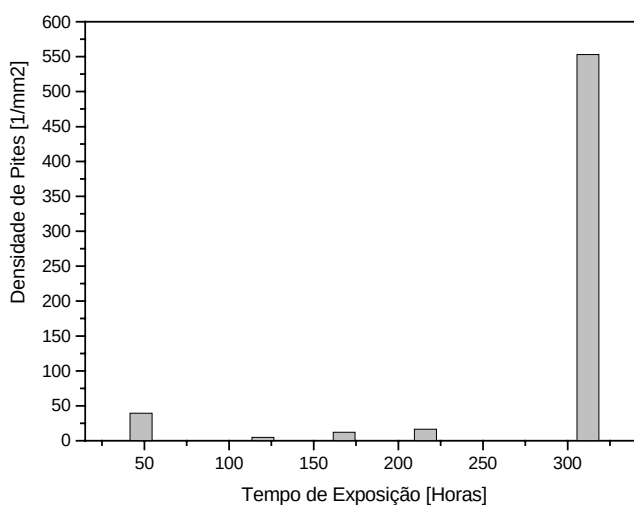


Figura 66 - Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratado á 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.

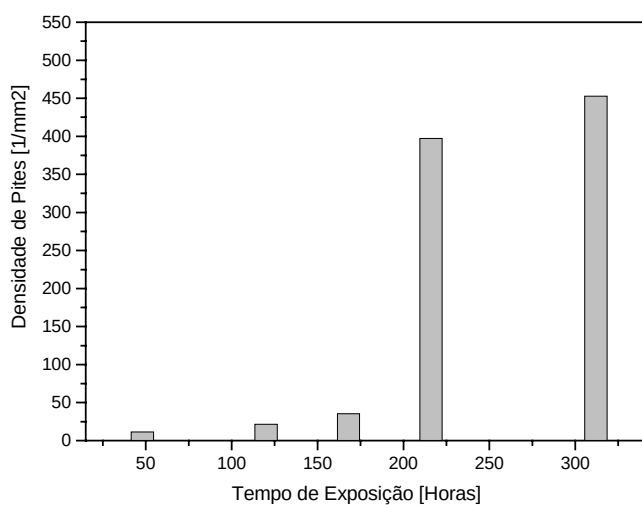


Figura 67 - Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratado à 1065°C, tratado à 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.

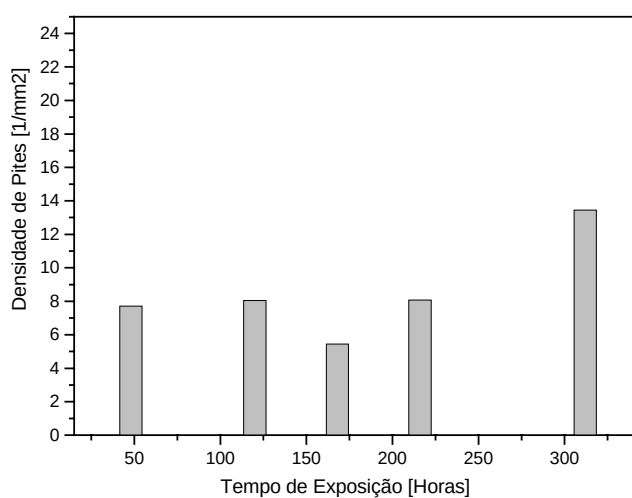


Figura 68 – Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratado à 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.

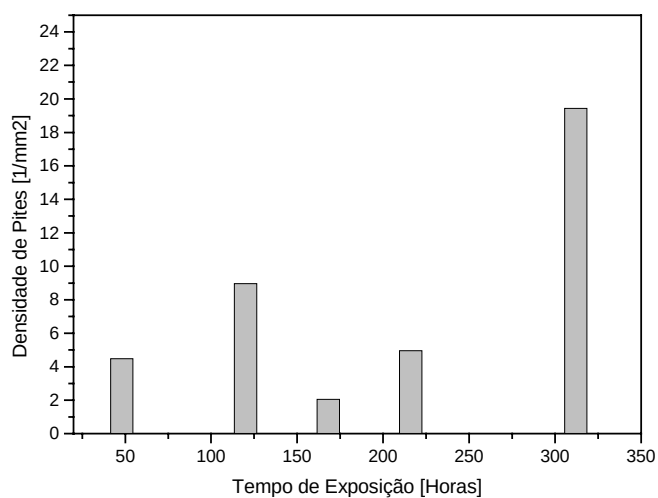


Figura 69 – Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada a 820°C durante 1 hora e resfriada ao ar.

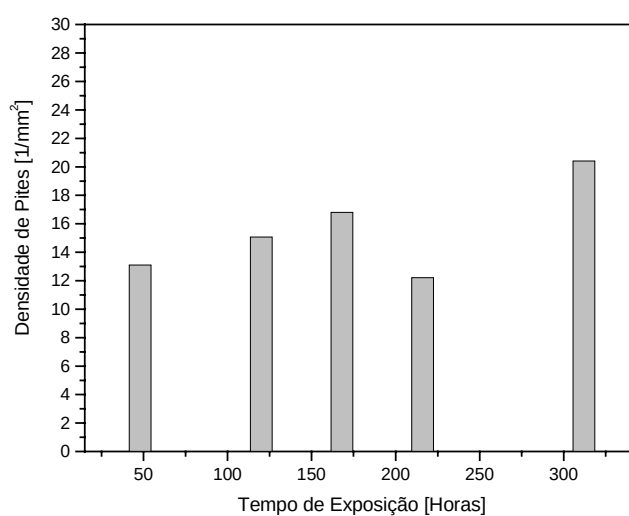


Figura 70 – Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada à 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.

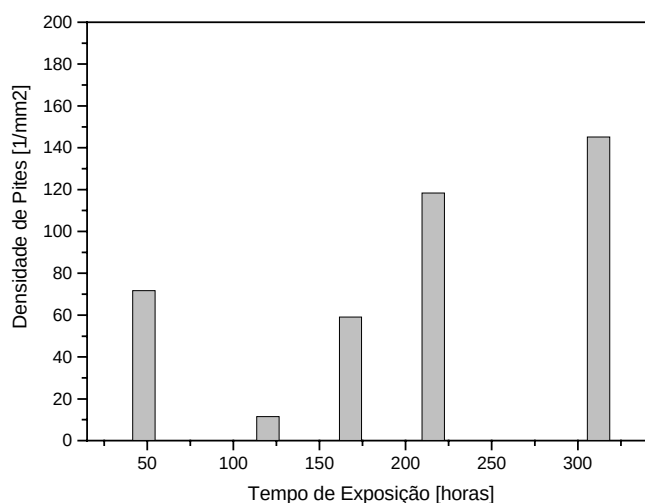


Figura 71 – Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 304, no estado como recebida.

Tem sido observado que nos testes de corrosão via névoa salina a condição como recebida e quando a liga é tratada, apresentam-se valores significantes em relação à densidade de pites [$1/\text{mm}^2$]. Estes resultados indicam que a microestrutura e os parâmetros do ambiente corrosivo influenciam diretamente a cinética que governam todo o processo de corrosão por pites no aço inoxidável 304.

Os resultados apresentados nas tabelas 9 a 15, levam a concluir que o tempo de exposição exibe uma relação direta com a evolução temporal que governa o crescimento dos pites, os dados estatísticos obtidos na análise dimensional são coerentes com esses apresentados.

5.8 - ANÁLISE DA FRAÇÃO CORROÍDA NO AÇO INOXIDÁVEL 310S VERSUS TEMPOS DE EXPOSIÇÃO EM DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

As figuras 72 a 77 permitem a comparação das condições do aço inox 310S no estado como recebido e tratado em relação à fração global corroída [%], após o material ser submetido a diferentes tempos de exposição em névoa salina.

Os resultados revelaram que o aço inox 310S, quando tratado na condição 620°C durante 24 horas e resfriado ao ar, apresentou maiores valores quanto à fração global corroída no maior tempo de exposição (312 horas).

Concluí-se que com o aumento do tempo de exposição em todos os casos há uma tendência significativa no crescimento e na quantidade dos pites em relação à geometria: diâmetro máximo e mínimo, área média, fração média, fração corroída e densidades de pites no aço inox 310S tratado, conforme as tabelas 16 a 22 .

Entretanto, em todos as condições o aço inox 310S apresentou-se com maior susceptibilidade à corrosão localizada que o aço inox 304, conforme os dados obtidos.

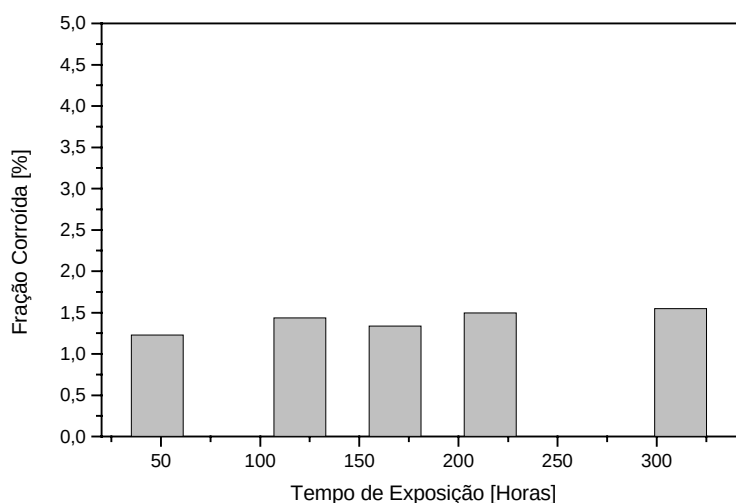


Figura 72- Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S, no estado como recebida.

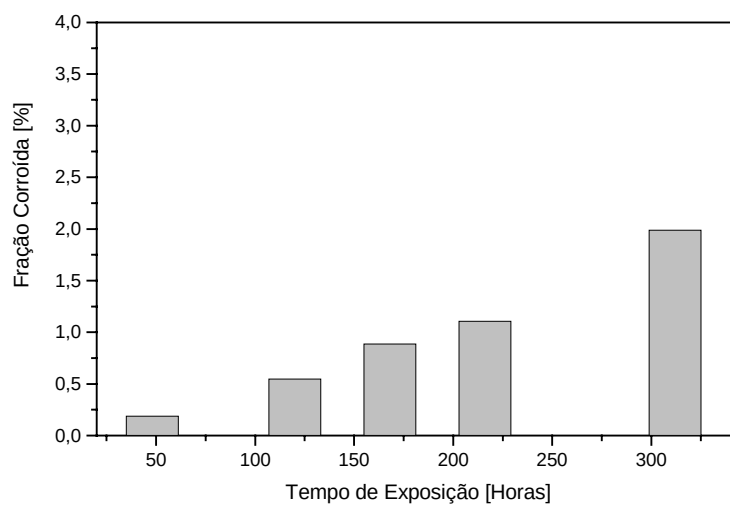


Figura 73– Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriado em água e gelo.

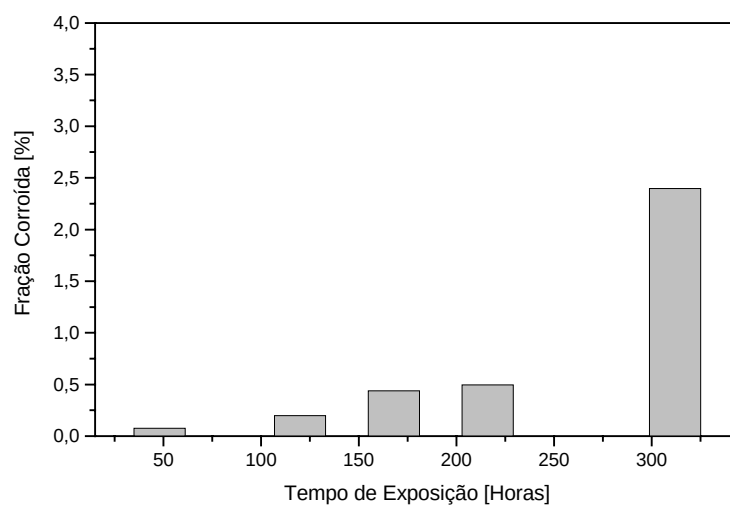


Figura 74– Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriado ao ar.

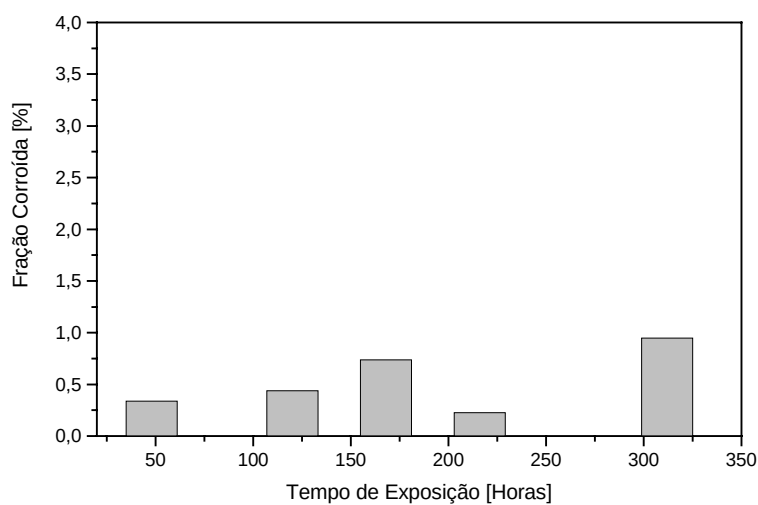


Figura 75 – Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 820°C durante 1 hora e resfriado ao ar.

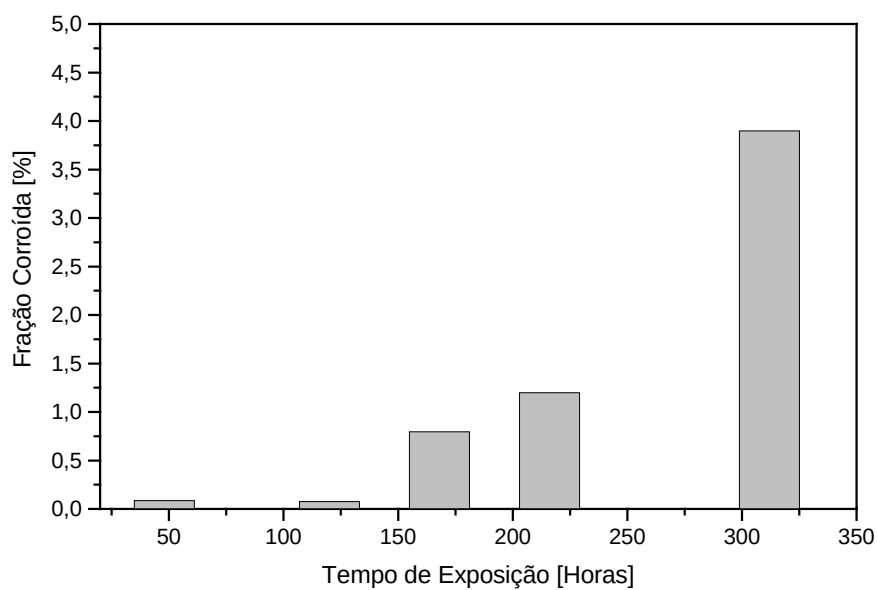


Figura 76 – Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 620°C durante 24 horas e resfriado ao ar

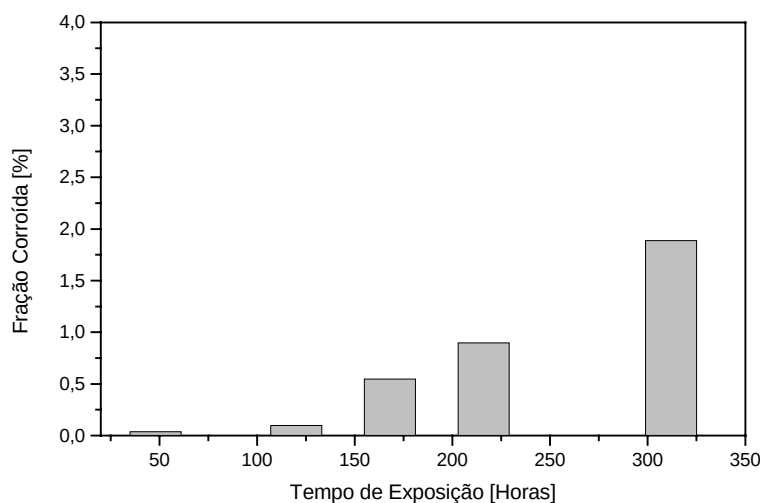


Figura 77 – Parâmetros estatísticos da corrosão por pites sobre a superfície corroída no aço inoxidável 310S tratado a 670°C durante 5 horas e resfriado ao ar.

5.9 - ANÁLISE DA DENSIDADE DE PITES NO AÇO INOXIDÁVEL 304 VERSUS TEMPOS DE EXPOSIÇÃO PARA OS DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

As figuras 78 a 83 mostram a distribuição dos parâmetros morfológicos superficiais dos pites no aço inox 310S, especificamente a densidade de pites [$1/\text{mm}^2$] associada com as diferentes condições de tratamentos térmicos e o tempo de exposição em névoa salina.

As análises dos parâmetros superficiais identificaram que o material, quando tratado na temperatura 620°C durante 24 horas e resfriado ao ar, apresentou maior fração global corroída, área média corroída [μm^2] e contrapartida, a densidade de pites menores [$1/\text{mm}^2$].

Os resultados revelam através das tabelas 9 a 16, levam a determinar que o tempo de exposição em todas as condições exibe relação direta com o crescimento dos pites e os dados obtidos pela análise dos perfis dos pites são coerentes com os superficiais para o aço inox 310S e para o aço inox 304.

No entanto, há o aumento no tamanho dos pites com o tempo de exposição nos testes de corrosão em todas as condições, entretanto, a condição como recebida os pites crescem mais rápido na largura e nas tratadas crescem preferencialmente, na profundidade.

Em relação à análise superficial e do perfil dos pites prevaleceu a similaridade na evolução dos aspectos que governa o crescimento dos pites, porém diferentes dimensões na mediana dos pites e o aço inox 310S revelou maior tamanho dos pites na largura quanto a profundidade do aço inox 304.

Para melhor compreensão destes dados obtidos, pode-se associar a cinética que governa o crescimento dos pites nos materiais e aspectos microestruturais como: mudanças na estrutura granular, distribuição e morfologia dos precipitados existentes.

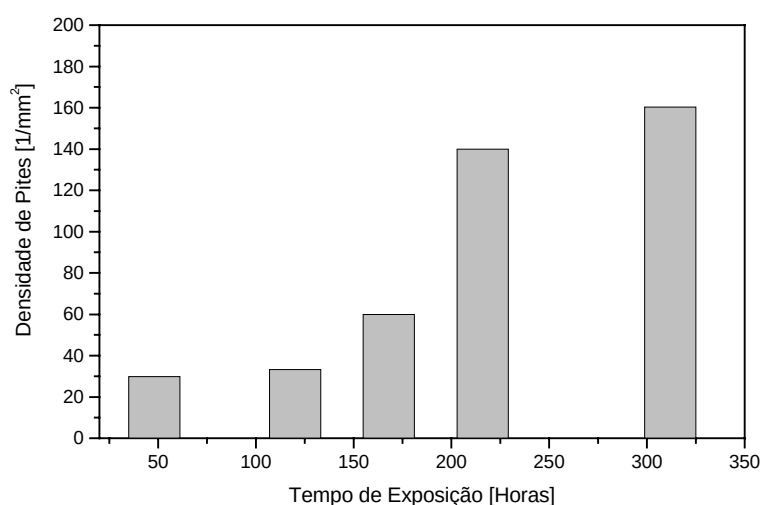


Figura 78 - Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, no estado como recebida.

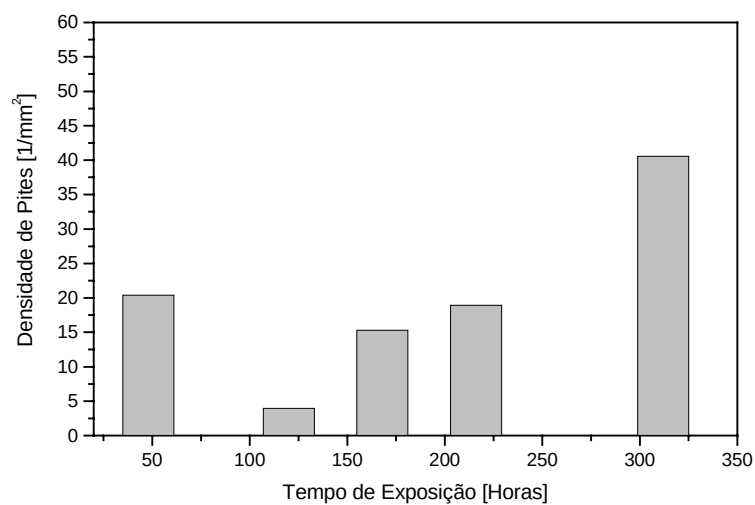


Figura 79 - Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo.

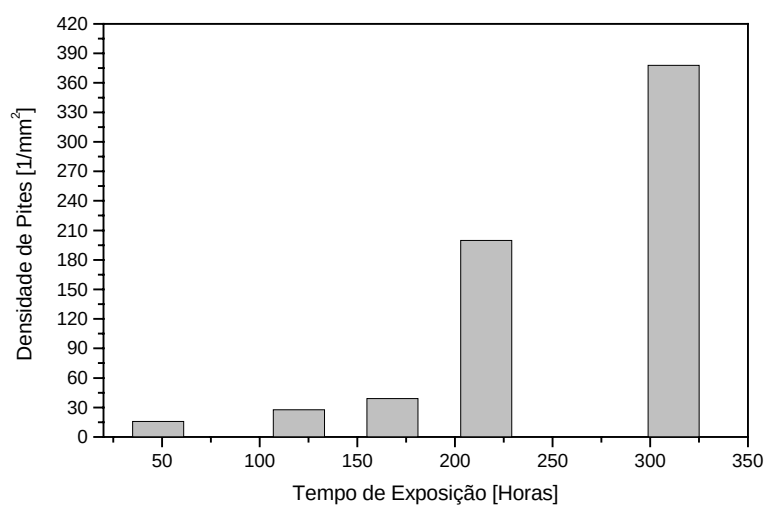


Figura 80 - Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriada ao ar.

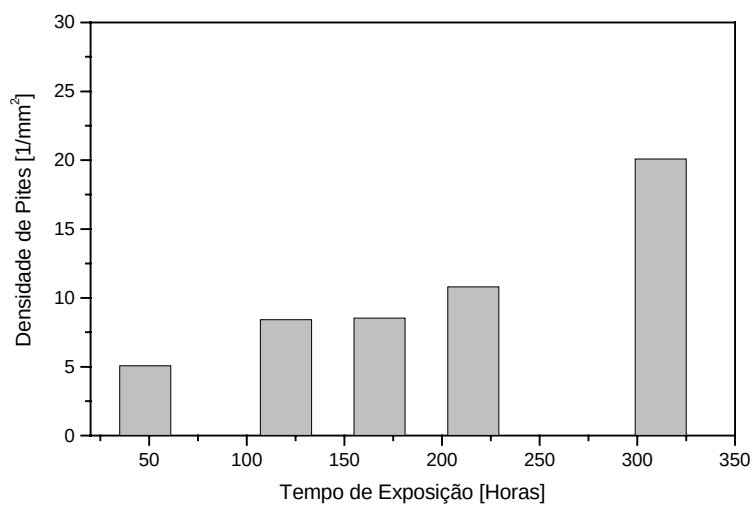


Figura 81 - Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 820°C durante 1 hora e resfriada ao ar.

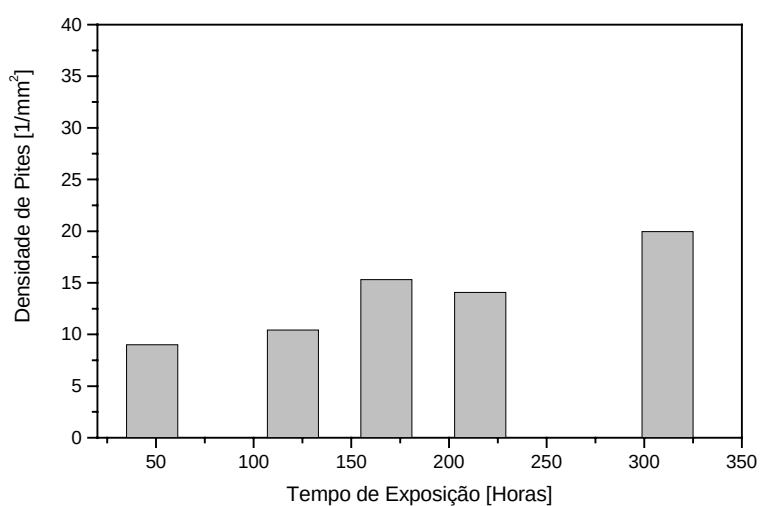


Figura 82 - Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar.

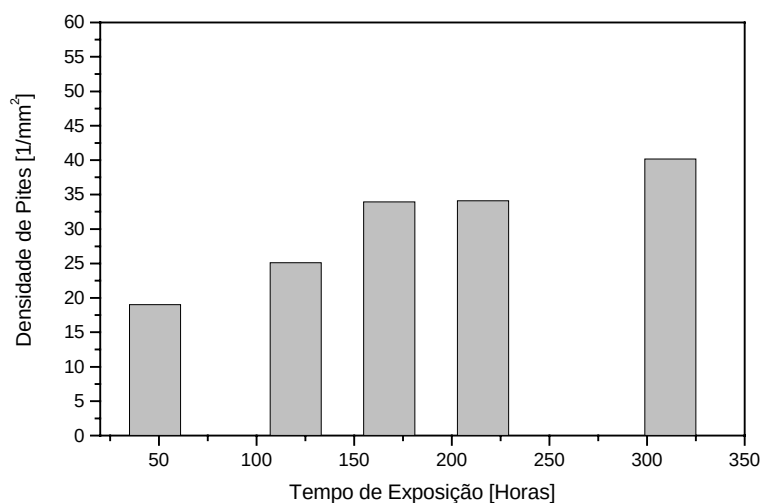


Figura 83 - Parâmetros estatísticos da corrosão localizada sobre a densidade dos pites no aço inoxidável 310S, tratado a 670°C durante 5 horas e resfriada ao ar.

5.10 - OCORRÊNCIA DA CORROSÃO LOCALIZADA NO AÇO INOXIDÁVEL 304 ASSOCIADA COM A MICROESTRUTURA

Os aços inoxidáveis austeníticos tipo 304 quando submetidos à faixa de temperatura de trabalho em torno de 1000°C e resfriamento ao ar, possuem a tendência da formação do fenômeno de sensitização junto à sua microestrutura e conseqüentemente torna-se o material com maior susceptibilidade à corrosão por pites ao longo da interface contornos de grãos e precipitados de carbeto de cromo.

As micrografias 84a a 88b ilustram os diferentes mecanismos de crescimento dos pites associados com as mudanças microestruturais do aço inoxidável 304 tratado termicamente, após serem submetidos a diferentes tempos de exposição sob névoa salina. As hipóteses para a formação da corrosão por pites no aço inoxidável está relacionada com as diferentes morfologias dos pites e dos precipitados, devido à distribuição em toda sua interface.

Foram feitas investigações composicional pela Microanálise Dispersiva de Energia – EDS por Microscopia Eletrônica de Varredura –MEV com objetivo de

determinar os elementos atuantes nos contornos, interior dos grãos e os precipitados visando correlacionar com os mecanismos e a cinética da corrosão localizada para os aços inoxidáveis 304 e 310S no estado como recebida e tratada termicamente, conforme as figuras 89 (a) e (b).

A corrosão por pites na condição como recebida, inicia-se junto aos contornos de grãos e na interface da região deformada mecanicamente como as maclas ou degraus nos contornos dos grãos, isso contribui como uma barreira, dificultando o todo o mecanismo de transporte de massa (pite) e diminuindo a cinética de crescimento da corrosão localizada no material, devido a microestrutura típica como degrau entre os contornos e zero de sensitização (isenção da precipitação da segunda fase).

Essas associações levam também a definir a formação dos pites a ser mais largo que profundo e crescem preferencialmente na largura.

Na condição tratada termicamente os pites iniciam o crescimento na interface primária da fase induzida pela precipitação tipo Cr_{23}C_6 (conforme os EDS) região rica em cromo e a secundária como toda matriz região rica em ferro, cromo e níquel principalmente nos contornos dos grãos, onde a nucleação é favorecida e quando os grãos são coalescidos e aumentados através do tratamento de térmico (sensitização).

Estas condições impostas pela sensitização conduzem à precipitação de carbeto de cromo ou cromo em todo os contornos de grão produzindo uma descontinuidade e o empobrecimento em toda rede ou célula de trabalho.

Este fenômeno é responsável pelo aumento na extensão de ataque em todo os contornos dos grãos, tornando o material mais susceptível à corrosão por pites.

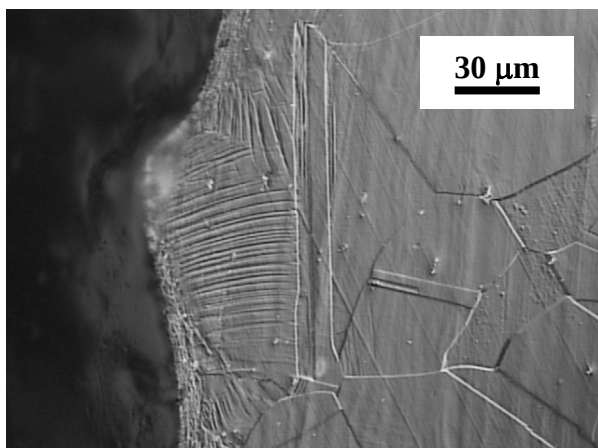


Figura 84a – A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, no estado como recebida.

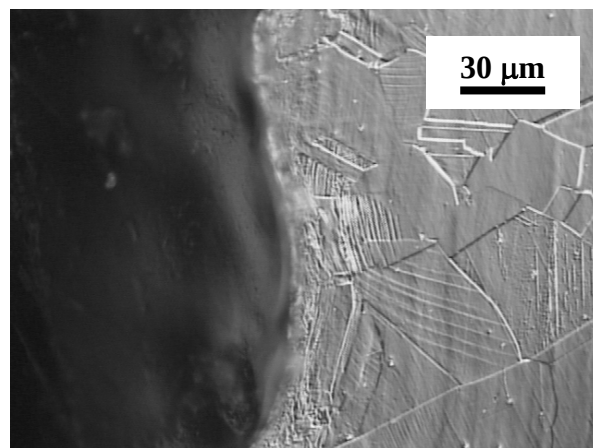


Figura 84b - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, no estado como recebida .

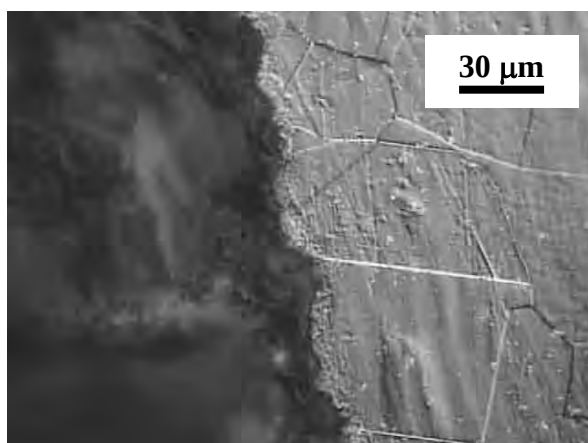


Figura 85a - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.

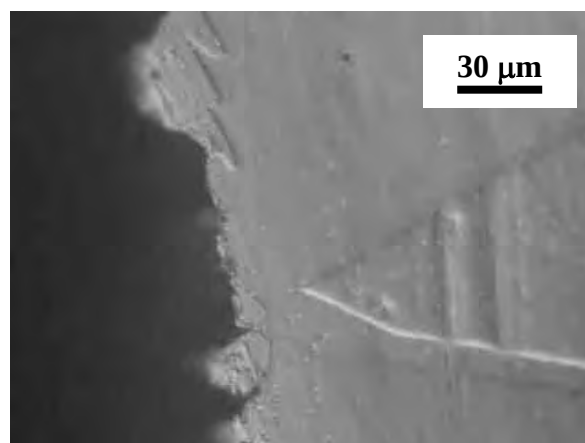


Figura 85b - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.

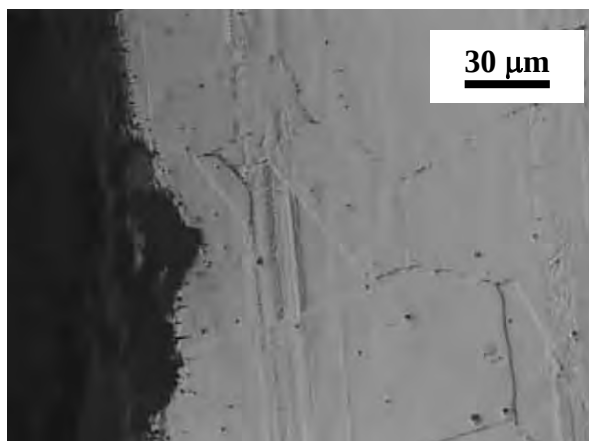


Figura 86a- A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.

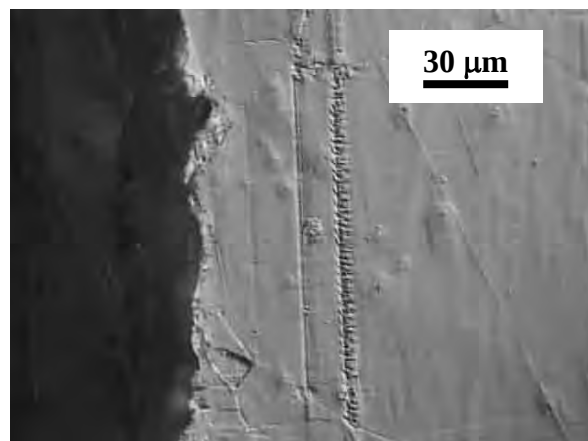


Figura 86b- A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.

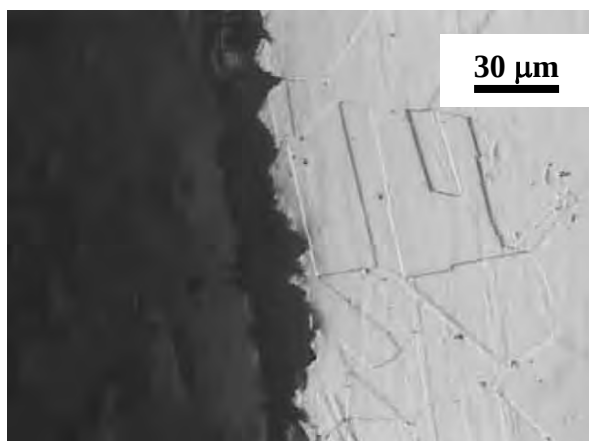


Figura 87a- A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.

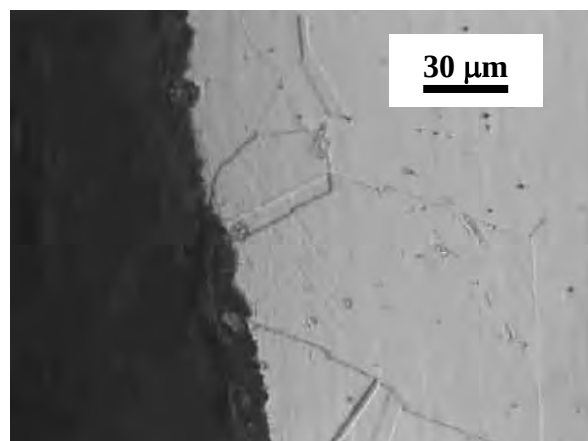


Figura 87b- A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.

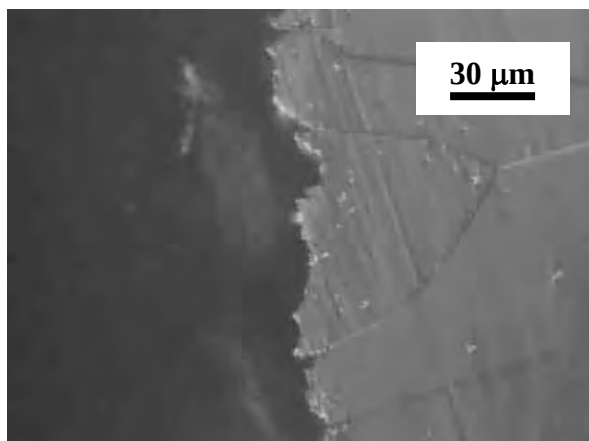


Figura 88a- A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.

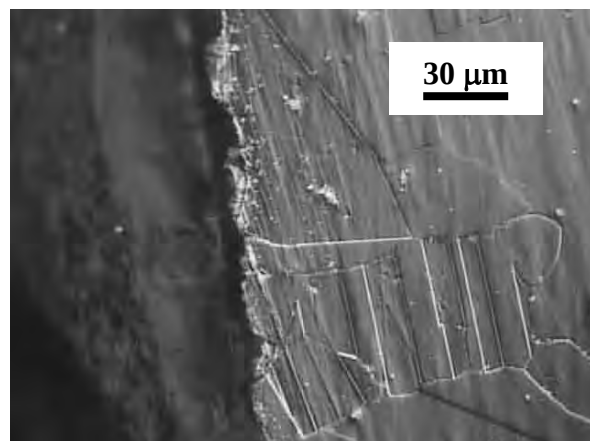


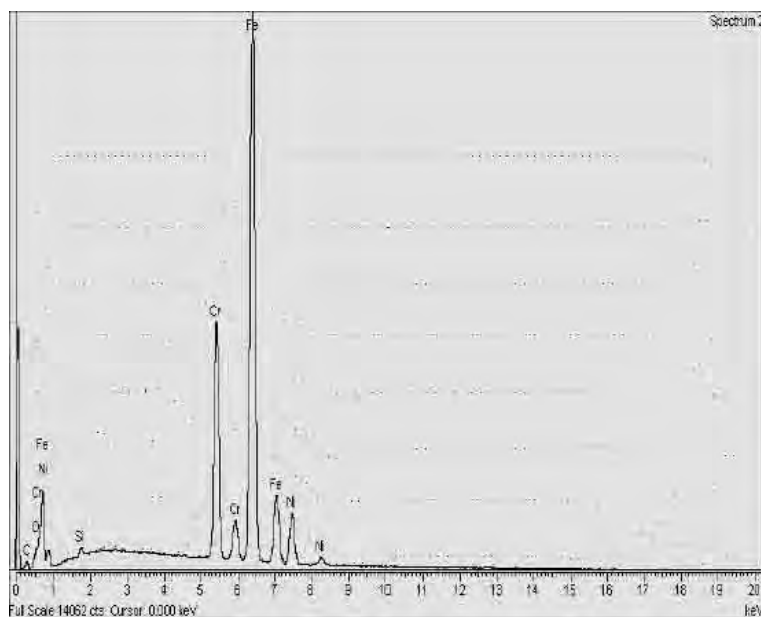
Figura 88b- A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.

As análises semi-quantitativa realizada no interior dos grãos pela técnica de Microanálise Dispersiva de Energia – EDS indica áreas ricas em ferro, cromo e níquel atuando como elementos principais na formação da liga (aço inox 304) e responsável pela formação dos precipitados, conforme a Figura 89 (a).

Para caracterizar o papel dos precipitados associados com as mudanças microestruturais, foram realizadas análises junto aos contornos dos grãos e precipitados. Os resultados indicam regiões ricas em cromo, provavelmente como Cr_{23}C_6 , conforme a Figura 89 (b).

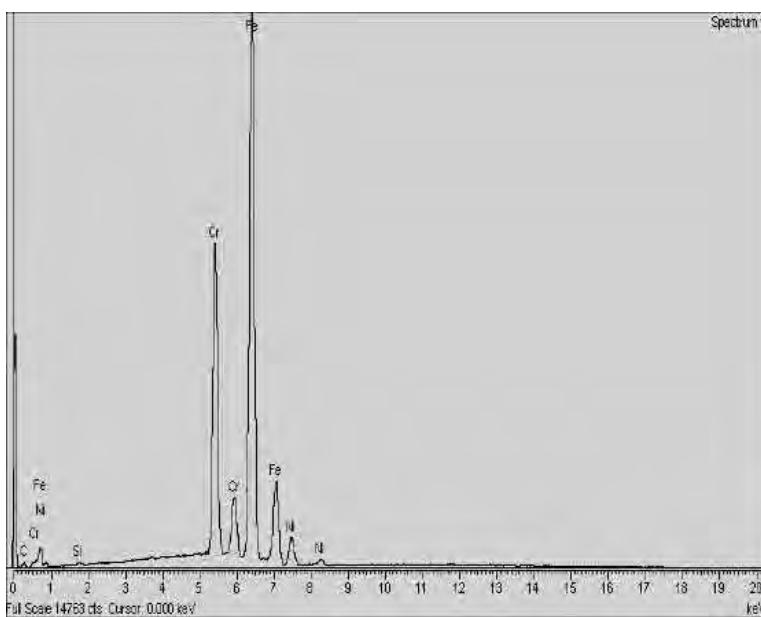
Os resultados obtidos pela microscopia óptica levam a concluir que as ocorrências locais dos pites são influenciadas pela mudança de comportamento da microestrutura do material no estado como recebida e quando a liga é tratada, após serem submetidos a 312 horas de exposição em névoa salina.

Os resultados revelam que a fração corroída é maior nas condições tratadas, especificamente à 620°C durante 24 horas, devido à formação de precipitados e o favorecimento da sua nucleação ao redor dos contornos dos grãos, contribui a corrosão localizada a deslocar para forma intergranular, conseqüentemente o crescimento mais rápido na profundidade dos pites.

I
N
T
E
N
S
I
D
A
D
E

Distância Interatômica

a) Microanálise Dispersiva de Energia típica no interior dos grãos (matriz) no aço inoxidável 304, no estado como recebido

I
N
T
E
N
S
I
D
A
D
E

Distância Interatômica

b) Microanálise Dispersiva de Energia típica em torno dos contornos dos grãos e precipitados em aço inoxidável 304, tratado termicamente

Figura 89 - Análises semi-quantitativa pela Microanálise Dispersiva de Energia – EDS em aço inoxidável 304: (a) Matriz e (b) Precipitados

5.11 - OCORRÊNCIA DA CORROSÃO LOCALIZADA NO AÇO INOX 310S ASSOCIADA COM A MICROESTRUTURA

Os aços inoxidáveis possuem a tendência da formação do fenômeno de sensitização quando submetido as situações de trabalho em temperaturas acima de 600°C, o que em sua microestrutura torna-se favorável à formação direta da precipitação de carbeto em diferentes morfologias, contribuindo sensivelmente para a corrosão por pites e intergranular no material.

As micrografias 90 a 95 ilustram, a partir da microscopia óptica dos perfis, distintos mecanismos de crescimento dos pites associados com os aspectos microestruturais do aço inox 310S tratado, após ser submetido a diferentes tempos de exposição em névoa salina.

A formação da corrosão por pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S revelou diferenças, através da associação com as morfologias, distribuição, tamanho e tendência de crescimento que governam toda evolução temporal dos pites e sua interface (contorno de grão e morfologia do precipitado).

A cinética da evolução da corrosão por pites possui similaridades quanto ao aço inox 304, quando o material no estado como recebido, mais a deformação mecânica torna-se uma barreira na formação dos pites. Entretanto, no material tratado a formação da corrosão é facilitada pelo processo de sensitização tornando um canal de indução da corrosão pelo alargamento dos contornos de grãos, com o aumento da fração volumétrica dos precipitados de carbeto de cromo e sua morfologia circular.

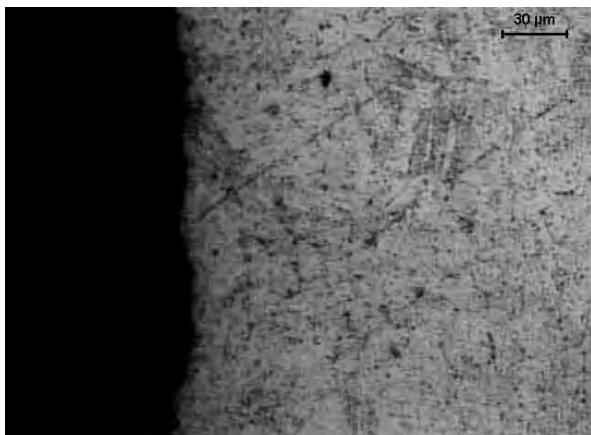


Figura 90a – A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, no estado como recebida.

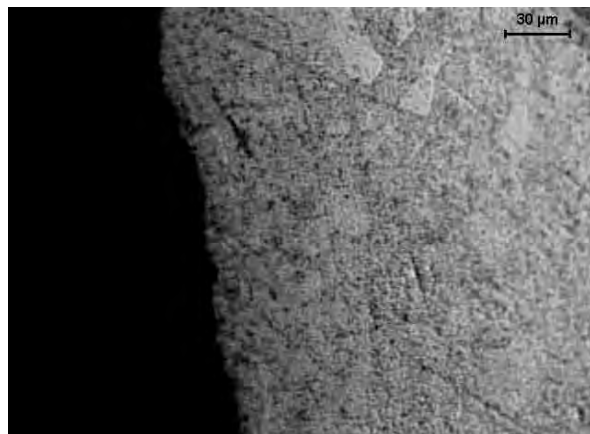


Figura 90b - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, no estado como recebida.



Figura 91a - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.



Figura 91b - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C –1 hora e resfriada em água e gelo.

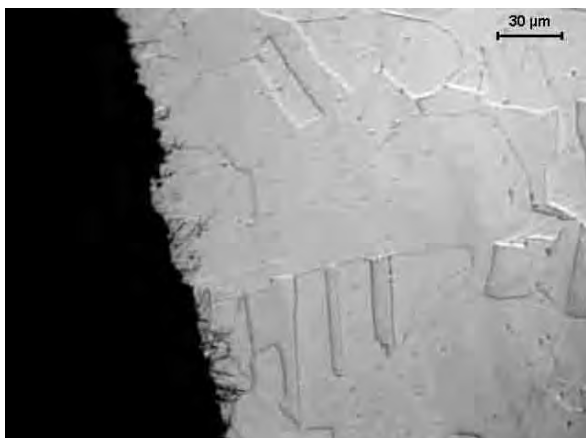


Figura 92a - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.



Figura 92b - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriada ao ar.

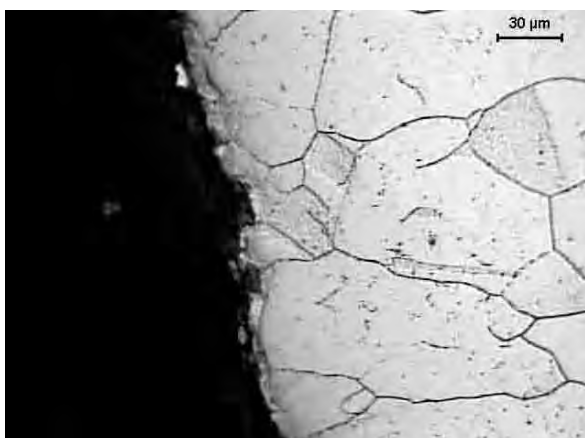


Figura 93a - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 820°C – 1 hora e resfriada ao ar.

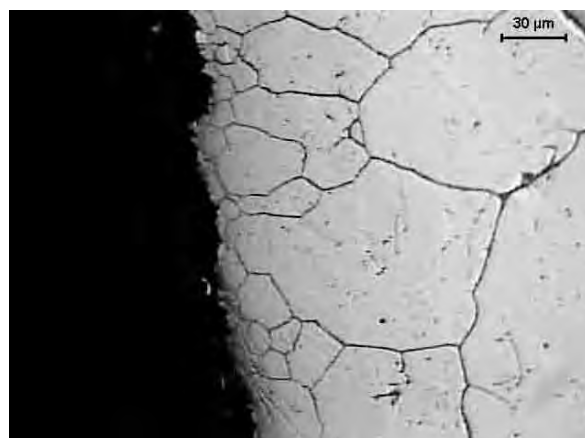


Figura 93b - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 820°C – 1 hora e resfriada ao ar.

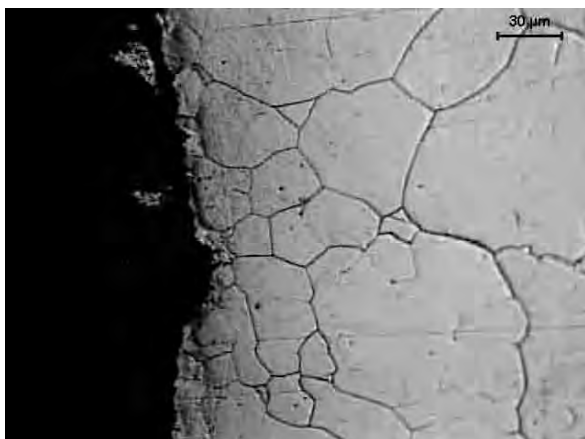


Figura 94a - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.

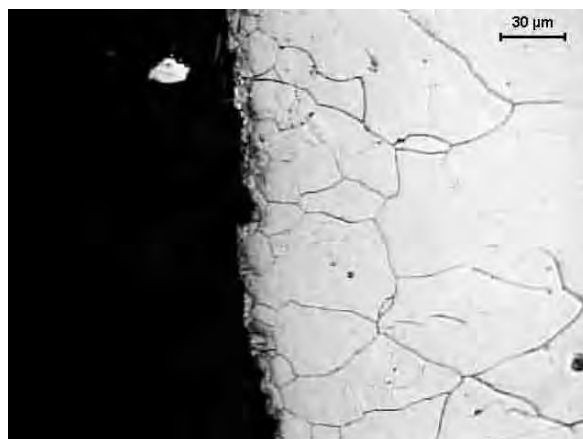


Figura 94b - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 620°C – 24 horas e resfriada ao ar.

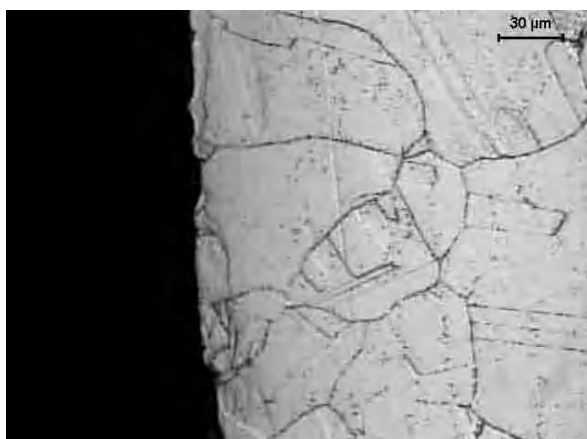


Figura 95a - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.

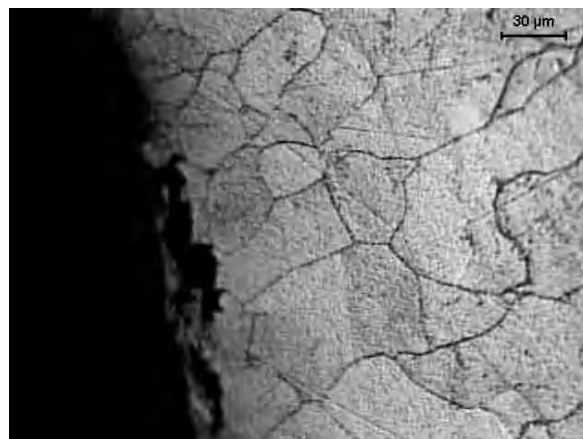
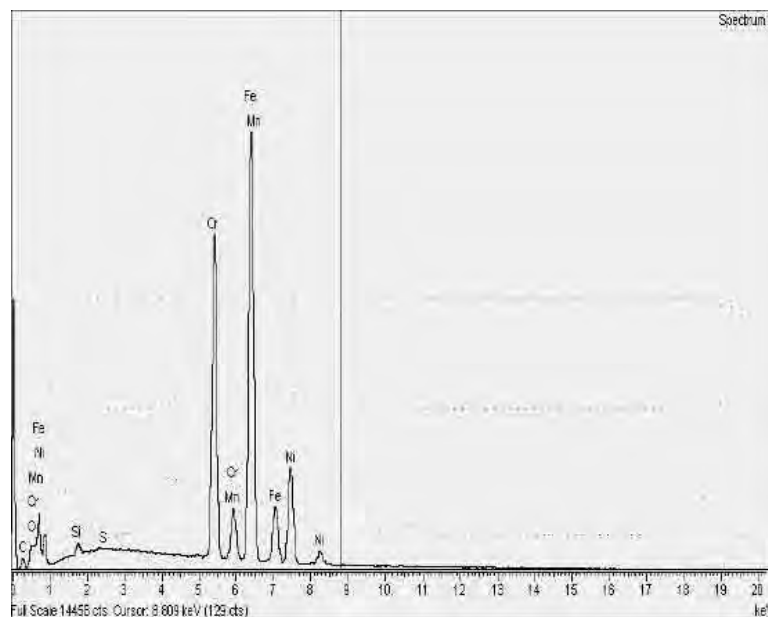
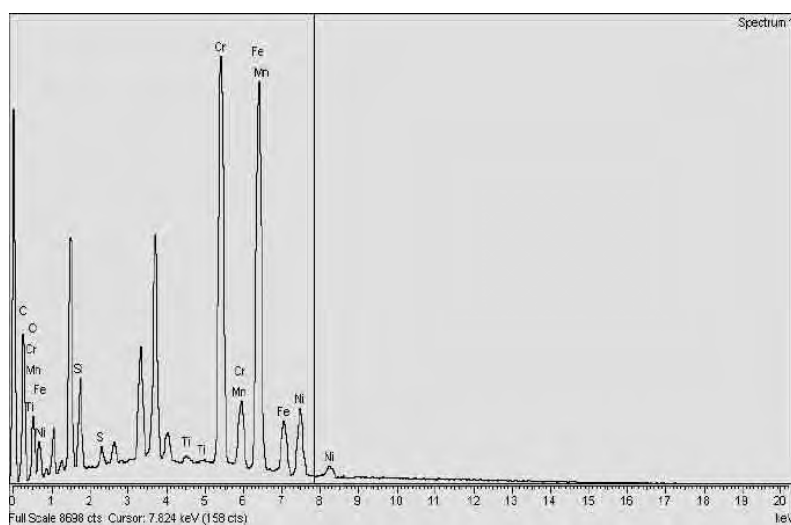


Figura 95b - A ocorrência da corrosão por pites no aço inoxidável 310S, tratado a 670°C – 5 horas e resfriada ao ar.

I
N
T
E
N
S
I
D
A
D
E

Distância Interatômica

a) Microanálise Dispersiva de Energia típica no interior dos grãos (matriz) no aço inoxidável 310S, no estado como recebido

I
N
T
E
N
S
I
D
A
D
E

Distância Interatômica

b) Microanálise Dispersiva de Energia típica em torno dos contornos dos grãos e precipitados em aço inoxidável 310S, tratado termicamente

Figura 96- Análise semi-quantitativa pela Microanálise Dispersiva de Energia – EDS em aço inoxidável 310S: (a) Matriz e (b) Precipitado

As análises semi-quantitativa realizada no interior dos grãos pela técnica de Microanálise Dispersiva de Energia – EDS indica áreas ricas em ferro, cromo e níquel atuando como elementos principais na formação da liga (aço inox 310S) e responsável pela formação dos precipitados, conforme a Figura 96 (a).

O aço inox 310S possui composição química diferente e teores de cromo e níquel em maior quantidade que o aço inox 304, isso é evidenciado na distribuição e classificação morfológica dos precipitados na forma angulares em toda microestrutura, de acordo com a Figura 96 (b).

Para caracterizar o papel dos precipitados associados com as mudanças microestruturais, foram realizadas análises junto aos contornos dos grãos e precipitados. Os resultados indicam regiões ricas em cromo, provavelmente como Cr_{23}C_6 , conforme a Figura 96 (b).

5.12 - CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA E DIMENSIONAL DOS PITES AÇO INOXIDÁVEL 304 TRATADOS, APÓS SEREM SUBMETIDAS AOS TESTES DE CORROSÃO VIA NÉVOA SALINA

As etapas de processamento digital e a análise de imagens tiveram como objetivos a caracterização da evolução e a determinação dos perfis da superfície corroída do aço inoxidável 304.

As figuras 96 a 107 mostram os dados estatísticos e a evolução temporal da corrosão localizada que governam o crescimento e determinam a forma geométrica dos pites em diferentes tempos de exposição em névoa salina.

A metodologia experimental é definida a partir da secção transversal da superfície do material, de acordo com o diagrama de classificação geométrica dos objetos desenvolvido neste trabalho.

O parâmetro usado nesta técnica baseia-se na da retangularidade que é a razão entre a área do objeto (pite) e a área do retângulo mínimo em que ele se inscreve. As regiões de transição A e B locais correspondem aos pites de geometria intermediária (incubador).

As tabelas 23 (a), (b) (c), (d), (e) e (f) mostram a classificação e a distribuição das porcentagens dos pites observado nessas figuras, enquanto que os diagramas refletem a idéia visual do tipo e da quantidade de pites que ocorrem em cada situação em que o material é submetido.

As tabelas 23 (a), (b) (c), (d), (e) e (f) caracterizam pites dos tipos irregulares, cônicos, hemisféricos e cilíndricos separados por duas regiões de transição A e B, respectivamente. A região de transição está entre os pites cônicos e hemisféricos, os pites não mais cônicos e nem hemisféricos, ou ainda passando de cônicos para hemisféricos independentemente do processo. Em contrapartida se assemelha com a região de transição B, de modo que os pites apresentam características hemisféricas e cilíndricas.

Tabela 23 (a) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, no estado como recebida.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	24,43	9,39	58,91	8,85	1,6	0
120	31,61	11,87	47,07	8,72	0,71	0
168	30,18	7,04	50,66	11,03	1,06	0
216	45,16	22,57	38,20	5,61	0,44	0
312	43,35	7,85	34,59	3,47	0,15	0

Tabela 23 (b) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	28,46	11,04	55,33	3,31	0,24	0
120	28,40	10,99	56,83	3,40	0,38	0
168	28,04	9,08	54,94	7,24	0,69	0
216	28,39	10,20	52,72	7,83	0,83	0
312	32,13	2,15	55,39	5,15	5,15	0

Tabela 23 (c) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 1065°C – 1 hora ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	27,24	9,29	57,00	6,34	0,10	0
120	27,18	9,27	57,20	6,44	0,11	0
168	31,95	9,72	51,39	6,65	0,21	0
216	28,39	10,20	52,72	7,83	0,83	0
312	26,18	10,68	56,71	6,33	0,09	0

Tabela 23d – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 820°C – 1 Hora ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	25,60	8,49	57,68	7,41	0,80	0
120	18,72	10,31	60,65	9,90	0,40	0
168	19,10	9,09	57,31	13,96	0,52	0
216	31,83	9,56	52,73	5,19	0,27	0
312	30,26	10,80	51,64	7,05	2,29	0

Tabela 23 (e) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 620°C – 24 Horas e resfriamento ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	32,98	9,38	50,97	5,47	1,17	0
120	40,54	9,12	46,45	3,54	0,33	0
168	36,07	9,65	48,01	5,82	0,42	0
216	35,89	10,34	47,02	5,95	0,62	0
312	34,90	9,32	48,04	6,96	0,78	0

Tabela 23 (f) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 304, tratada a 670°C – 5 Horas resfriada ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	34,27	9,40	52,83	3,35	0,12	0
120	34,21	9,17	50,48	5,70	0,41	0
168	35,53	8,40	50,27	5,50	0,27	0
216	35,70	8,23	50,75	4,78	0,54	0
312	30,09	10,06	52,17	7,32	0,34	0

Nas tabelas 23 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) visualizamos a seguinte distribuição e classificação dos pites: região de transição A > irregulares > cônicos > hemisféricos > região de transição B. Os pites são presentes em maior quantidades na região transição A e irregulares, praticamente não há presença e evidencias de evolução temporal de pites cilíndricos no sistema.

Concluimos que a distribuição dos pites no aço inox 304 a cada tempo de exposição é a mesma ordem de na quantidade de pites é na região de transição A > irregulares > cônicos > hemisféricos > região de transição B. Pites cilíndricos não foram observados.

Não há evidências de evolução temporal de pites com geometrias cônicas. A velocidade de corrosão ficará determinada principalmente pela velocidade de crescimento dos pites na transição A e dos pites de geometrias irregulares. A evolução temporal dos pites é similar para o aço quando tratado à 1065°C e resfriamento em diferentes maneiras.

Ao aumentar o tempo há a ocorrência do aumento dos pites hemisféricos e os de transição B, porém a evolução temporal dos pites é similar no aço quando tratado a 620°C e a 670°C ao aumentar o número de pites de transição B.

A evolução temporal dos pites é similar para o aço no estado como recebida e tratado à 820°C, ao aumentar o tempo aumenta o número de pites irregulares e diminui os pites hemisféricos e os da região de transição A e B.

Logo abaixo, visualizamos as Tabelas 24 (a), (b), (c), (d) (e) e (f) e sumariamente apresentam os dados estatísticos do aço inoxidável 304 associados com a morfologia e a mediana do tamanho dos pites [μm] para diferentes condições de tratamento térmico e tempos de exposição sob névoa salina.

Quanto aspecto geométrico dos pites no aço inox 304 no estado como recebida apresentam mais largos que profundos e crescem preferencialmente na largura. A liga quando tratada apresentou-se com pites mais profundos que largos e crescem preferencialmente na profundidade, conforme as tabelas 24 (a), (b), (c), (d), (e) e (f).

Tabela 24 (a) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 304, no estado como recebida.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	2,54	1,90	1,56	1,08	0,45	0
	Profundidade	1,35	1,26	1,18	0,81	0,35	0
120	Largura	0,25	0,18	0,16	0,13	0,10	0
	Profundidade	0,11	0,10	0,09	0,07	0,05	0
168	Largura	2,42	1,56	1,30	1,02	0,80	0
	Profundidade	1,06	0,90	0,71	0,53	0,40	0
216	Largura	2,36	2,50	1,92	1,77	1,55	0
	Profundidade	0,26	0,16	0,14	0,12	0,12	0
312	Largura	3,65	2,44	2,16	2,04	1,49	0
	Profundidade	0,22	0,16	0,13	0,11	0,12	0

A tabela 24 (a), mostra a seguinte ordem morfológica associada com a mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites [μm]: pites irregulares > cônicos > transição A > hemisféricos > transição B e não foi observado a existência de pites

cilíndricos no sistema. Os pites caracterizam-se pela mediana no maior tamanho na morfologia irregular e menor na região de transição B em todo sistema.

Os pites apresentam mais largos (ordem de 10 vezes) que profundos e crescem preferencialmente na largura. Outro parâmetro importante avaliado no sistema é que quanto maior tempo de exposição, maior a largura dos pites mesmo entre as diferentes morfologias geométricas (irregulares: 3,65 μm e cônicos: 2,44 μm em 312 horas e irregulares: 2,54 μm em 48 horas e 3,65 μm em 312 horas).

Tabela 24 (b) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	0,10	0,09	0,13	0,09	0,09	0,11
	Profundidade	0,20	0,14	0,09	0,07	0,02	0,001
120	Largura	0,21	0,16	0,13	0,11	0	0,11
	Profundidade	0,14	0,12	0,12	0,10	0	0,03
168	Largura	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0
	Profundidade	0,20	0,16	0,13	0,11	0,12	0
216	Largura	1,06	0,76	0,70	0,61	1,14	0
	Profundidade	0,13	0,12	0,11	0,08	0,10	0
312	Largura	1,20	0,80	0,70	0,61	1,10	0
	Profundidade	0,15	0,13	0,12	0,12	0,12	0

A tabela 24(b), mostra a seguinte ordem morfológica associada com a mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites [μm]: pites irregulares > cônicos > transição A > hemisféricos > transição B > cilíndricos. Os pites caracterizam-se por maior tamanho mediano na morfologia irregular.

Os pites apresentam-se mais largos (ordem de 8 vezes) que profundos e crescem preferencialmente na largura. Observou-se que quanto maior tempo de exposição,

maior a largura dos pites mesmo entre as diferentes morfologias (irregulares: 1,10 μm e cônicos: 0,80 μm em 312 horas e irregulares: 0,10 μm em 48 horas e 1,10 μm em 312 horas) e a profundidade constante.

Tabela 24 (c) – Mediana da largura e profundidade dos de pites no aço inoxidável 304, tratada a 1065°C – 1 hora ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	0,21	0,16	0,13	0,11	0	0
	Profundidade	0,14	0,12	0,12	0,10	0	0
120	Largura	0,20	0,15	0,14	0,11	0	0
	Profundidade	0,14	0,12	0,11	0,10	0	0
168	Largura	0,48	0,40	0,26	0,33	0,10	0
	Profundidade	0,14	0,14	0,12	0,11	0,07	0
216	Largura	0,20	0,15	0,13	0,12	0	0
	Profundidade	0,14	0,12	0,11	0,11	0	0
312	Largura	0,20	0,15	0,13	0,12	0	0
	Profundidade	0,14	0,12	0,11	0,11	0	0

A tabela 24 (c), apresentou-se a seguinte ordem morfológica associada com a mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites: irregulares> cônicos> transição A> hemisféricos> transição B; não foi observada a existência de pites cilíndricos no sistema. Os pites caracterizam-se por maior tamanho da mediana na morfologia dos pites irregulares.

Novamente os pites apresentam-se mais largos que profundos e crescem preferencialmente na largura para todos os tempos de exposição. Evidenciou-se a similaridade entre as geometrias (irregulares: 0,20 μm e cônicos: 0,15 μm em 312 horas e irregulares: 0,21 μm em 48 horas e 0,20 μm em 312 horas) e a profundidade constante.

Tabela 24 (d) – Mediana da largura e profundidade dos de pites no aço inox 304, tratada a 820°C – 1 Hora ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf. Trans B	Pites Cilíndricos	
48	Largura	0,15	0,16	0,15	0,12	0,09	0
	Profundidade	0,82	0,74	0,48	0,22	0,75	0
120	Largura	0,17	0,16	0,14	0,10	0,05	0
	Profundidade	0,41	0,33	0,36	0,26	0,12	0
168	Largura	2,30	2,41	1,79	1,43	0,91	0
	Profundidade	1,41	1,60	1,27	0,93	0,40	0
216	Largura	0,21	0,16	0,14	0,12	0,11	0
	Profundidade	0,13	0,12	0,10	0,10	0,03	0
312	Largura	0,13	0,11	0,11	0,10	0,07	0
	Profundidade	2,73	1,90	1,64	1,34	1,58	0

A tabela 24 (d), apresentou-se a seguinte ordem morfológica associada com a mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites: irregulares > cônicos > transição A > hemisféricos > transição B não foi observado a existência de pites cilíndricos no sistema Os pites caracterizam-se por maior tamanho da mediana na morfologia dos pites irregulares.

Como demais casos, os pites apresentam-se mais profundos (ordem de 3 vezes) que largos e crescem preferencialmente na profundidade. Avaliou-se no sistema que quanto maior tempo de exposição, maior a profundidade dos pites mesmo entre as diferentes morfologias dos pites (irregulares: 2,73 μm e cônicos: 1,90 μm em 312 horas e irregulares: 0,82 μm em 48 horas e 2,73 μm em 312 horas) e a largura constante.

Tabela 24 (e) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada a 620°C – 24 Horas e resfriamento ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf. Trans B	Pites Cilíndricos	
48	Largura	0,21	0,17	0,14	0,12	0,11	0
	Profundidade	2,99	2,12	1,80	1,54	1,56	0
120	Largura	0,22	0,14	0,13	0,12	0,12	0
	Profundidade	2,73	1,90	1,81	1,35	1,42	0
168	Largura	0,22	0,16	0,14	0,12	0,12	0
	Profundidade	2,78	2,04	1,70	1,36	2,02	0
216	Largura	0,23	0,19	0,15	0,12	0,10	0
	Profundidade	3,14	2,25	1,80	1,45	1,37	0
312	Largura	0,13	0,11	0,10	0,10	0,07	0
	Profundidade	3,45	1,90	1,64	1,45	1,18	0

A tabela 24 (e) mostra a seguinte ordem morfológica associada com a mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites: irregulares> cônicos>transição A> hemisféricos> transição B; não foi observada a existência de pites cilíndricos no sistema. Os pites caracterizam-se por maior tamanho na mediana na largura e profundidade nas morfologias irregulares.

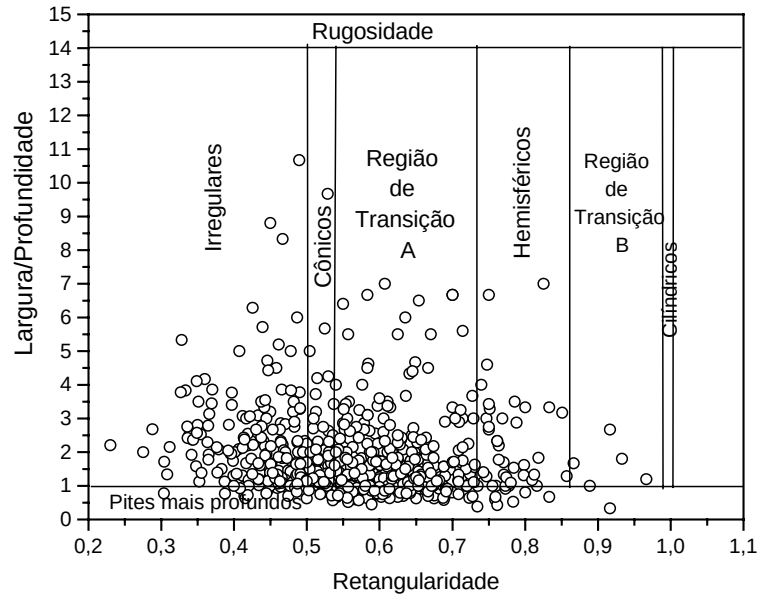
Os pites apresentam-se mais profundos (ordem de 15 vezes) que largos e crescem preferencialmente na profundidade. Quanto maior tempo de exposição maior a profundidade dos pites mesmo entre as diferentes morfologias (irregulares: 3,45 μm e cônicos: 1,90 μm em 312 horas e irregulares: 2,99 μm em 48 horas e 3,45 μm em 312 horas) e a largura constante.

Tabela 24 (f) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 304, tratada a 670°C – 5 Horas resfriada ao ar.

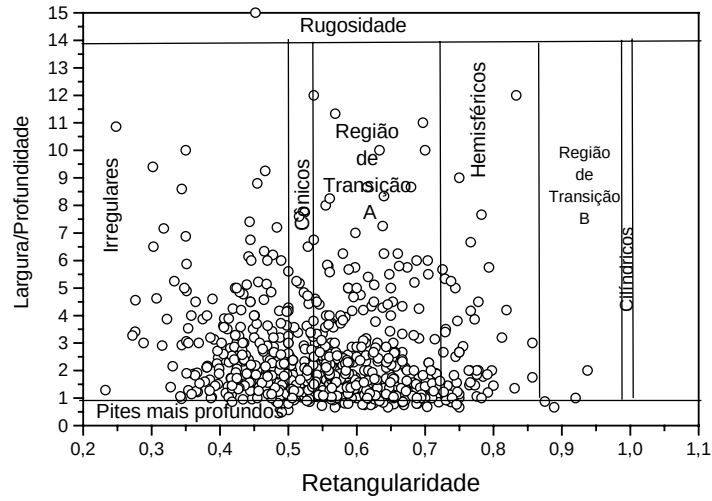
Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [média]	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf. Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	0,22	0,16	0,14	0,12	0
	Profundidade	2,96	2,22	1,88	1,59	0
120	Largura	0,21	0,15	0,13	0,11	0,10
	Profundidade	3,00	2,06	1,70	1,44	1,38
168	Largura	0,21	0,17	0,14	0,12	0,10
	Profundidade	2,56	1,98	1,65	1,46	1,27
216	Largura	0,22	0,17	0,14	0,12	0,14
	Profundidade	2,78	2,11	1,66	1,44	0,16
312	Largura	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12
	Profundidade	3,20	1,97	1,65	1,40	1,16

A tabela 24 (f), mostra a seguinte ordem morfológica associada com a mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites: irregulares> cônicos> transição A> hemisféricos> transição B; não foi observada a existência de pites cilíndricos no sistema. Os pites caracterizam-se por maior tamanho da mediana na morfologia dos pites irregulares.

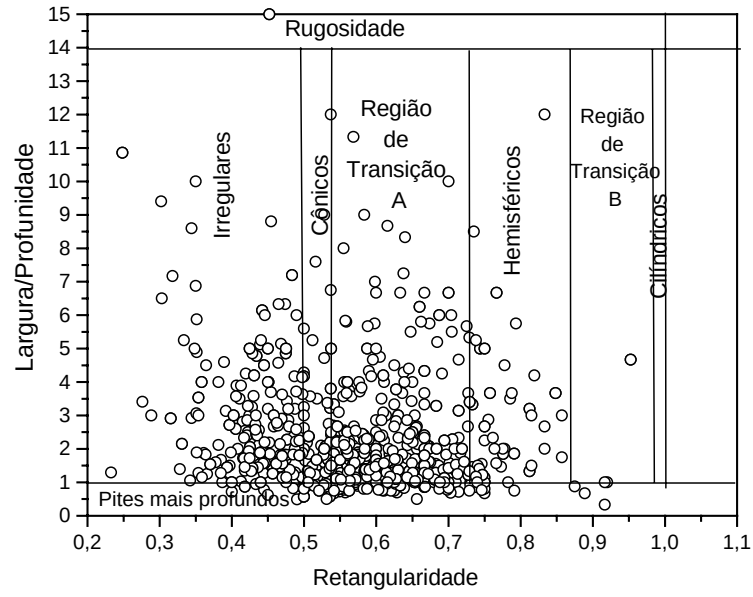
Os pites apresentam-se mais profundos (ordem de 12 vezes) que largos e crescem preferencialmente na profundidade. Quanto maior tempo de exposição maior a largura dos pites mesmo entre as diferentes morfologias (irregulares: 3,20 μm e cônicos: 1,97 μm em 312 horas e irregulares: 2,96 μm em 48 horas e 3,20 μm em 312 horas) e a largura constante.



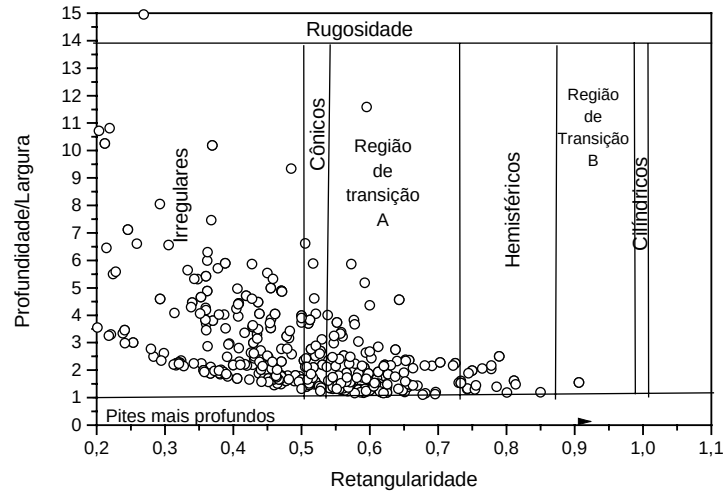
(a)



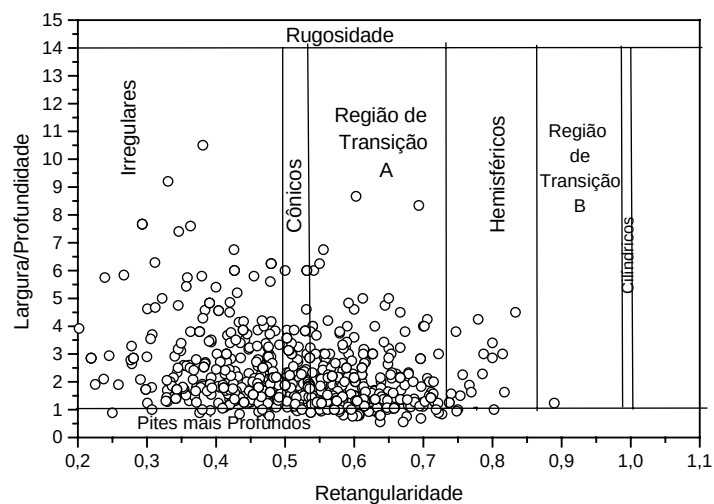
(b)



(c)

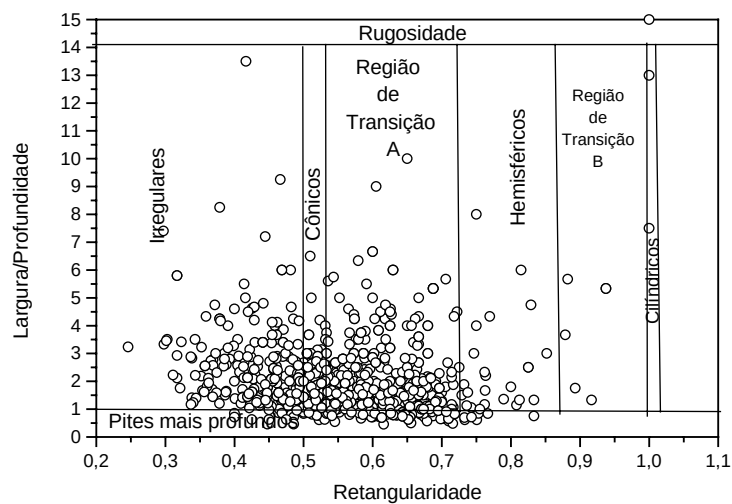


(d)

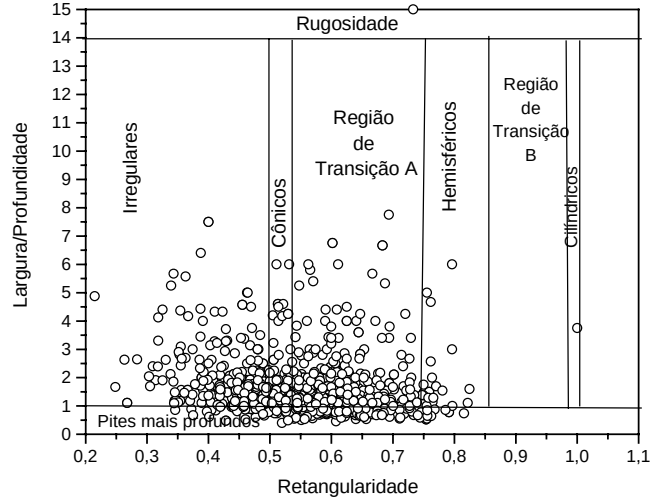


(e)

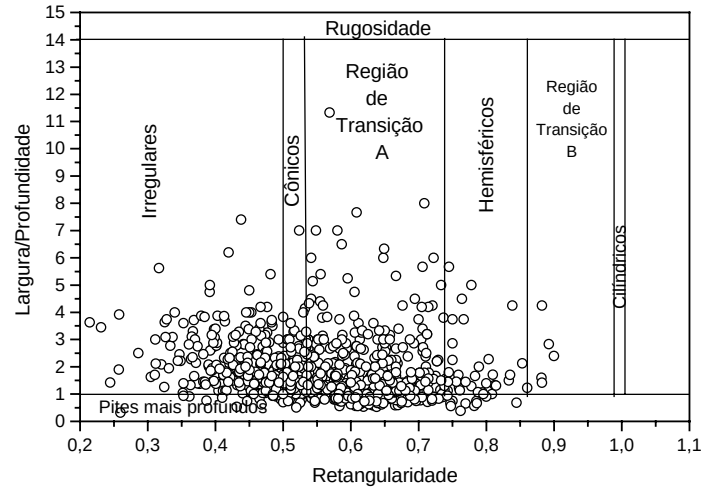
Figura 96- Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304 no estado como recebido e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



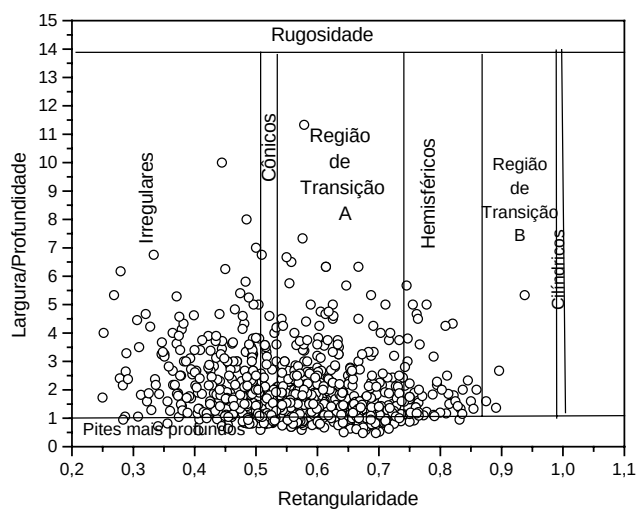
(a)



(b)

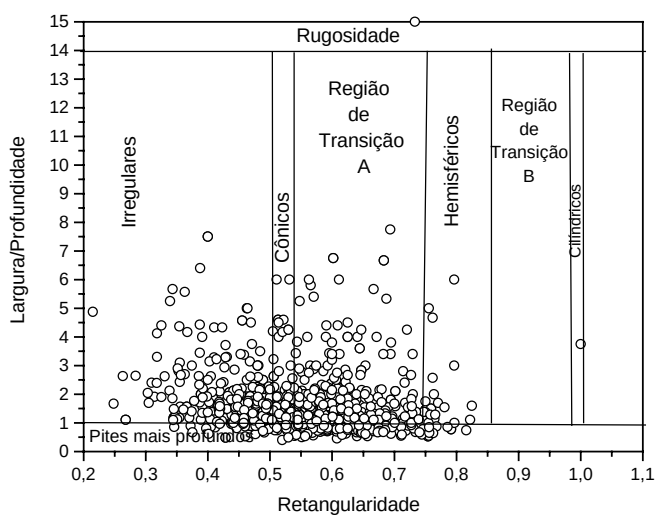


(c)

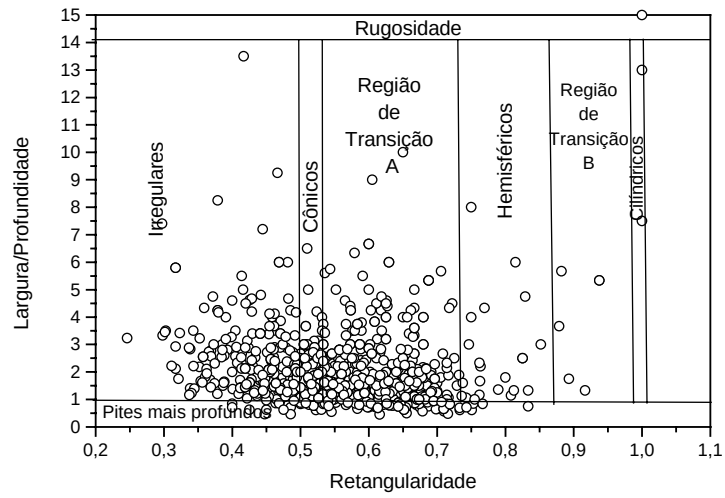


(e)

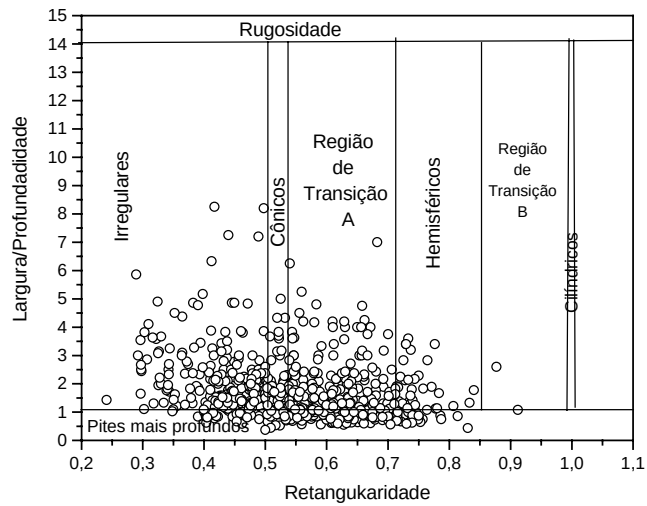
Figura 98 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriado em água e gelo, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



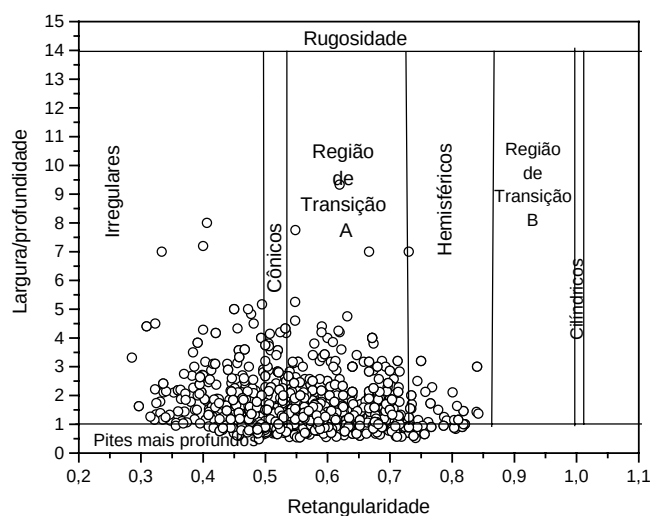
(a)



(b)

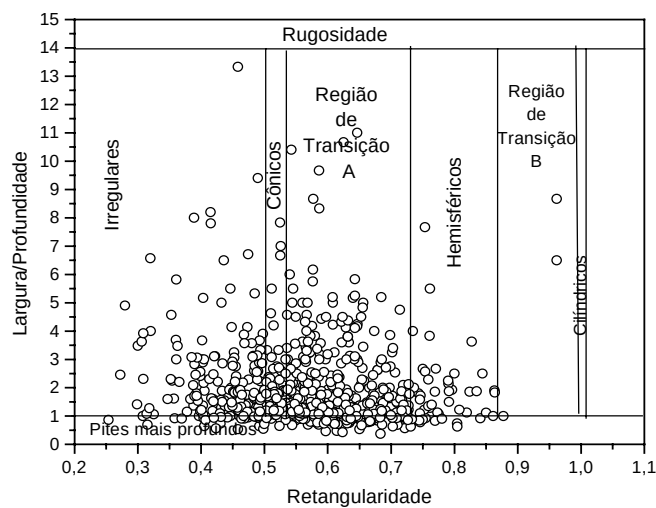


(c)

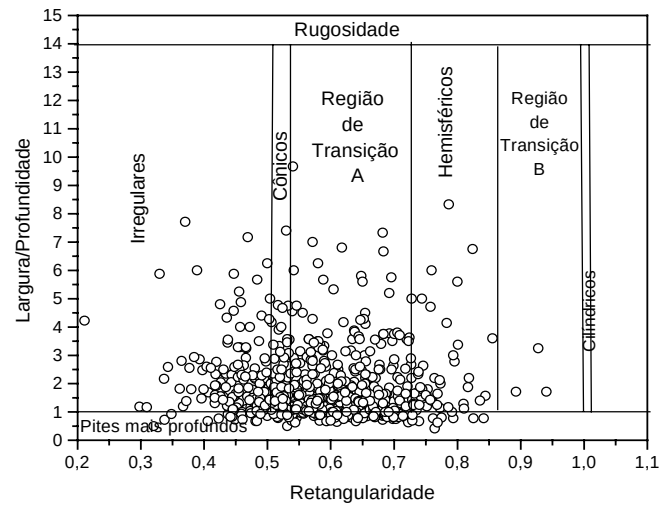


(e)

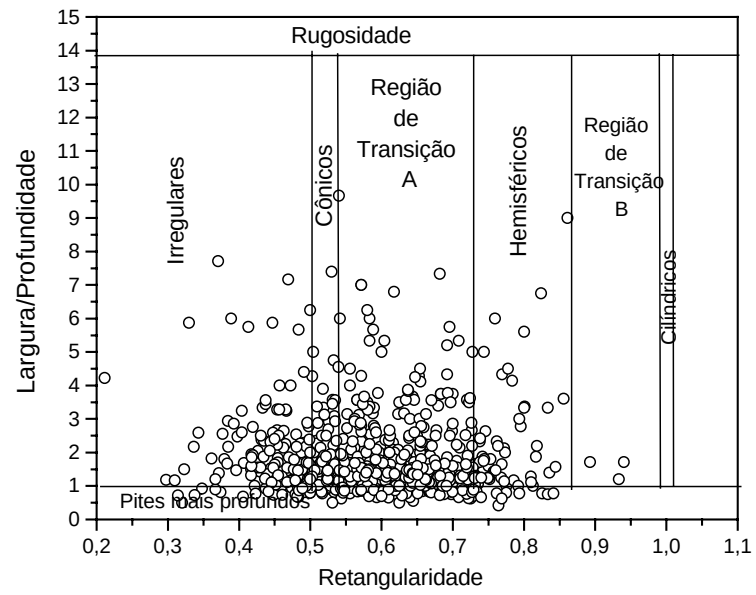
Figura 99 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 1065°C –1 hora e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



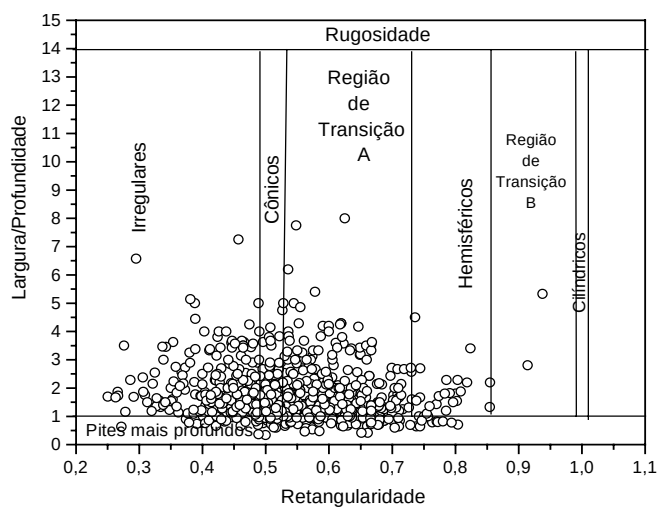
(a)



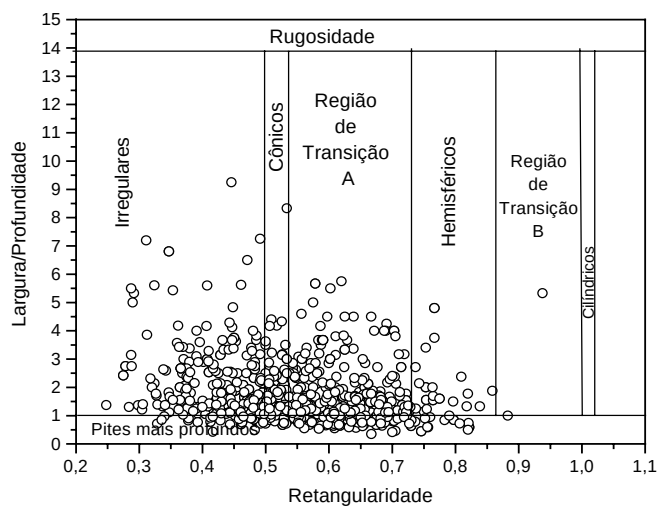
(b)



(c)

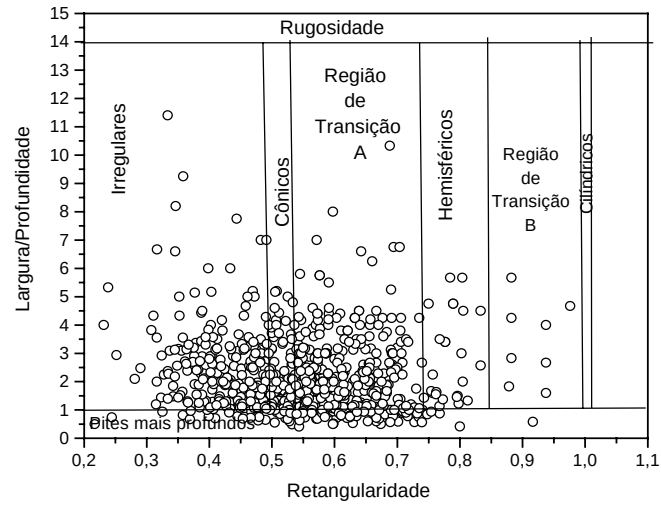


(d)

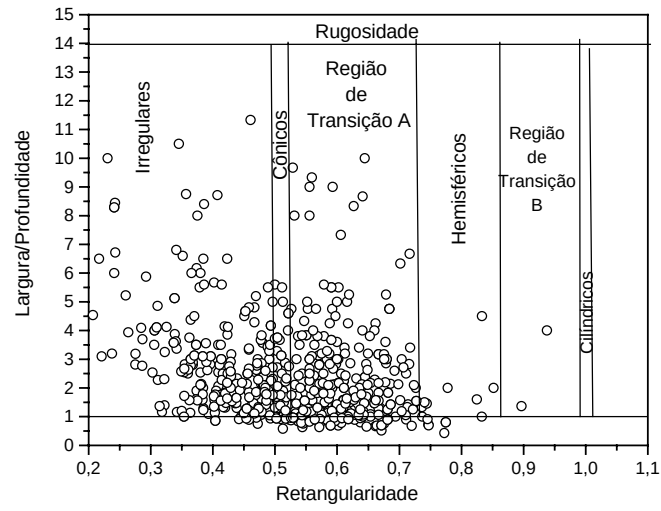


(e)

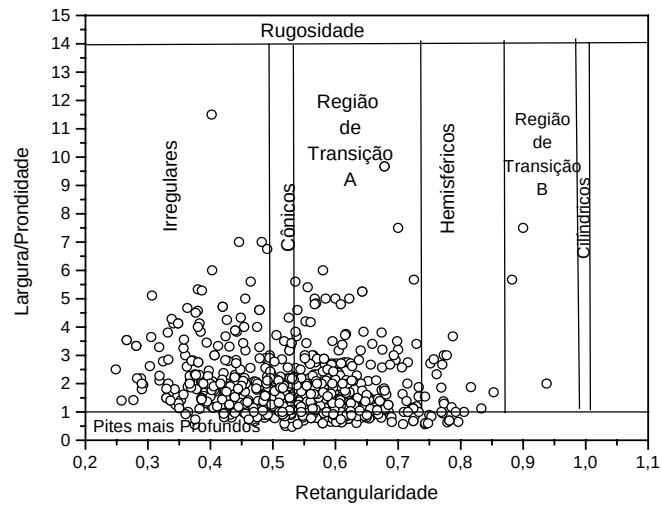
Figura 100 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 820°C – 1 hora e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



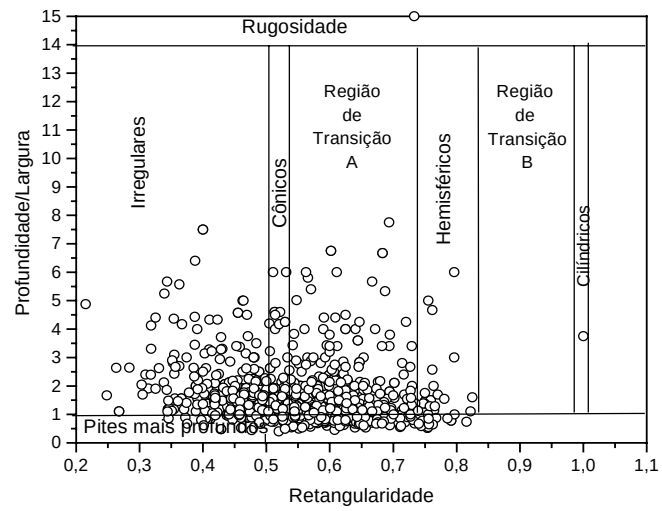
(a)



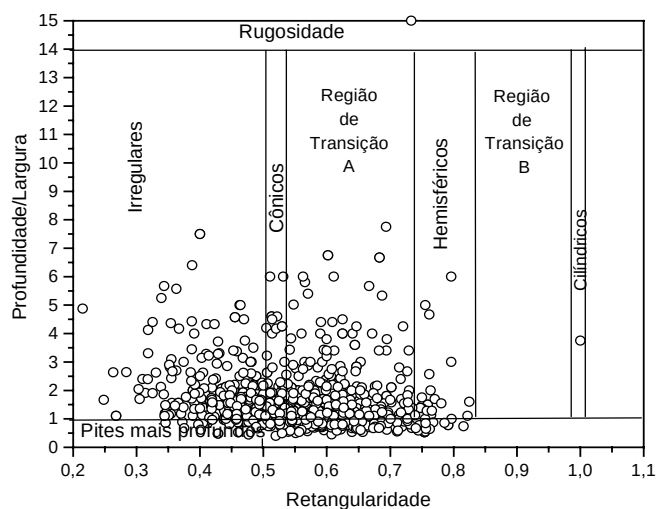
(b)



(c)

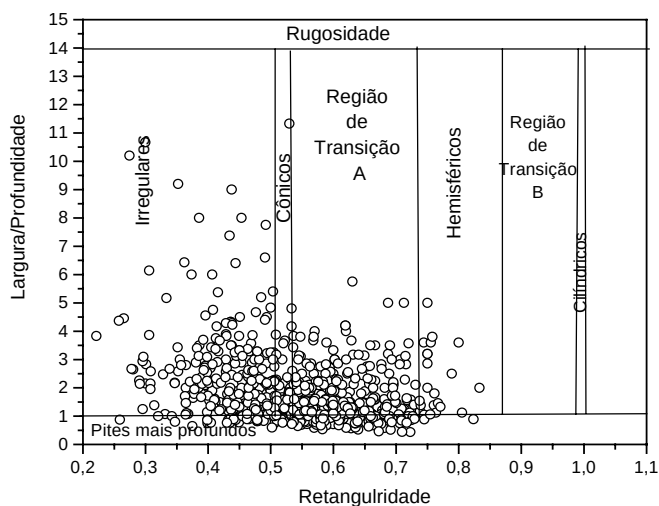


(d)

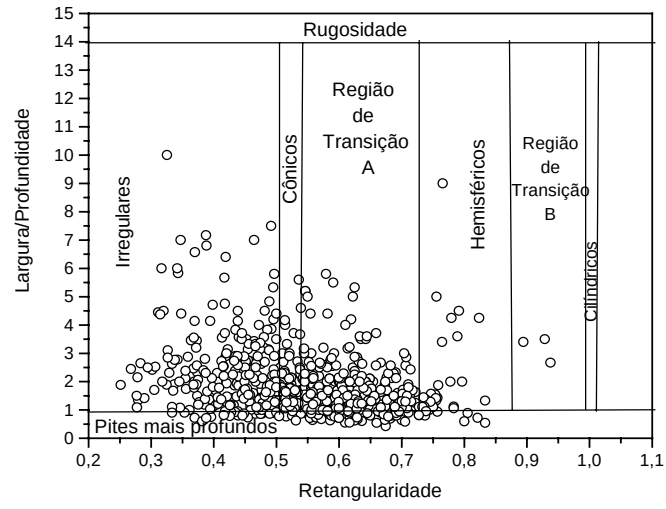


(e)

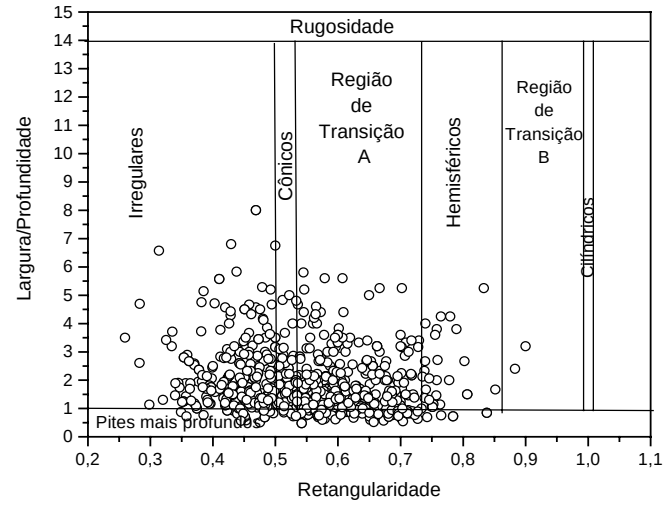
Figura 101 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 620°C – 24 horas e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



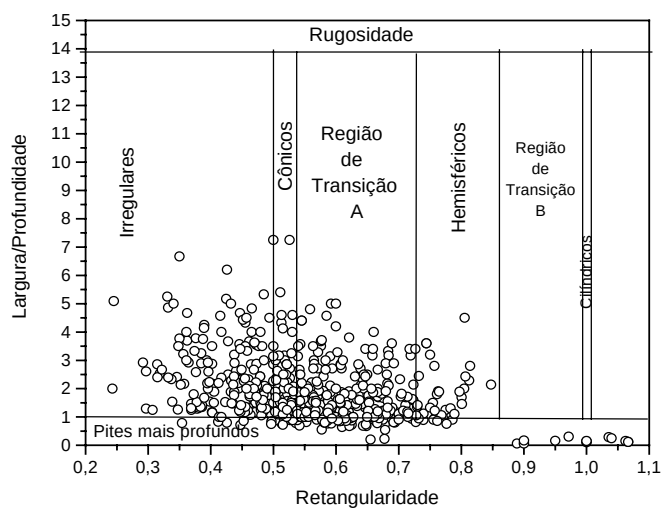
(a)



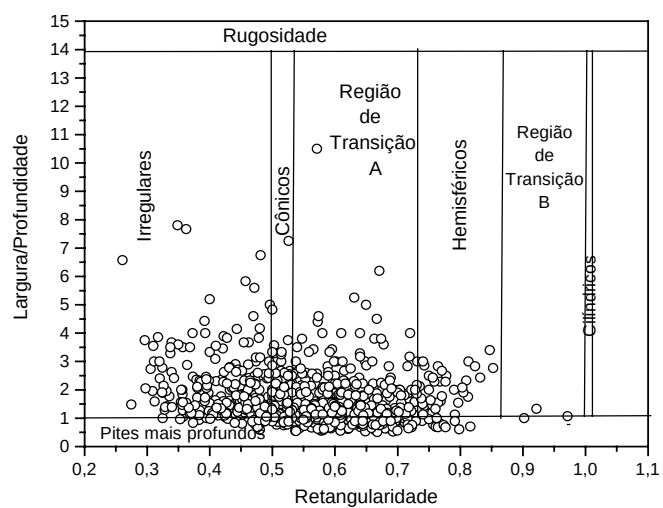
(b)



(c)

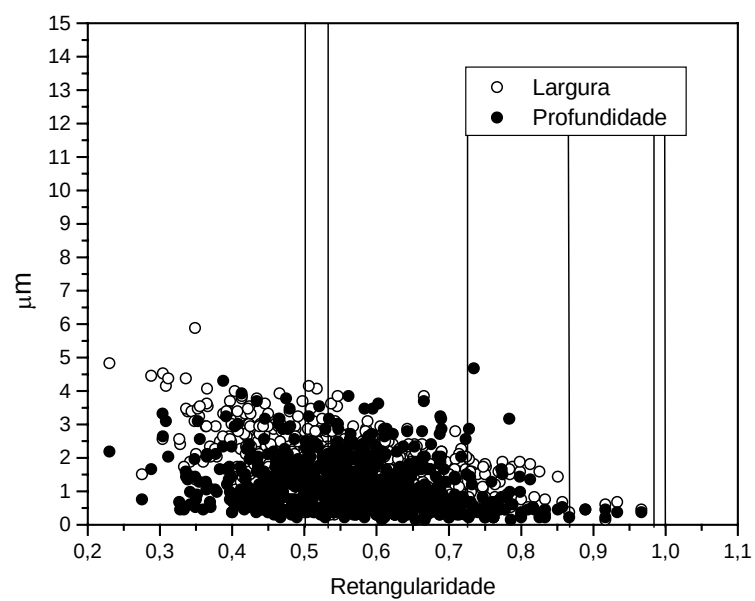


(d)

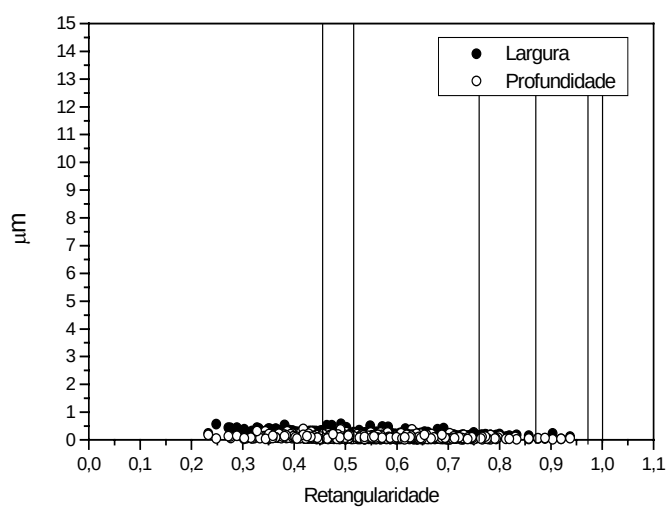


(e)

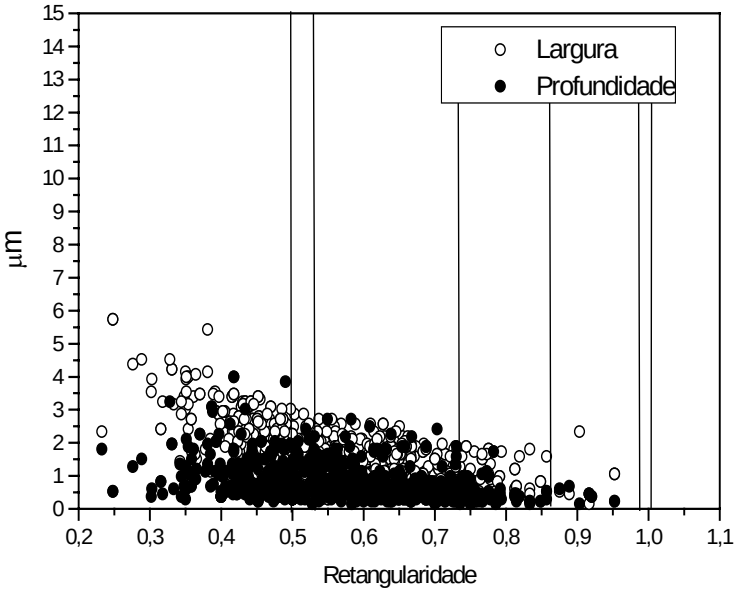
Figura 102 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 670°C – 5 horas e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



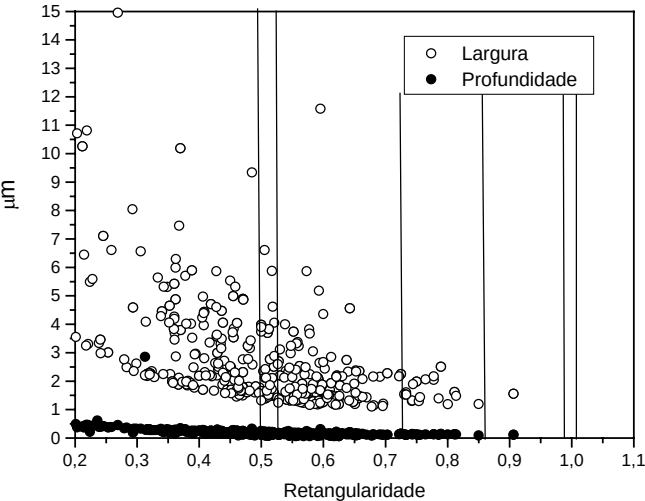
(a)



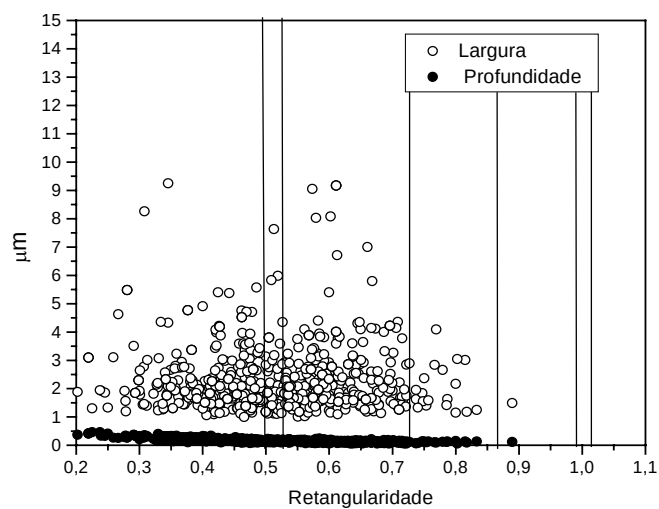
(b)



(c)

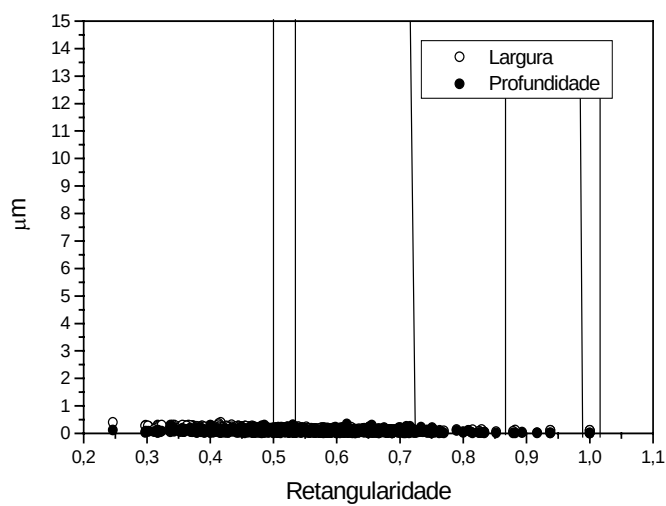


(d)

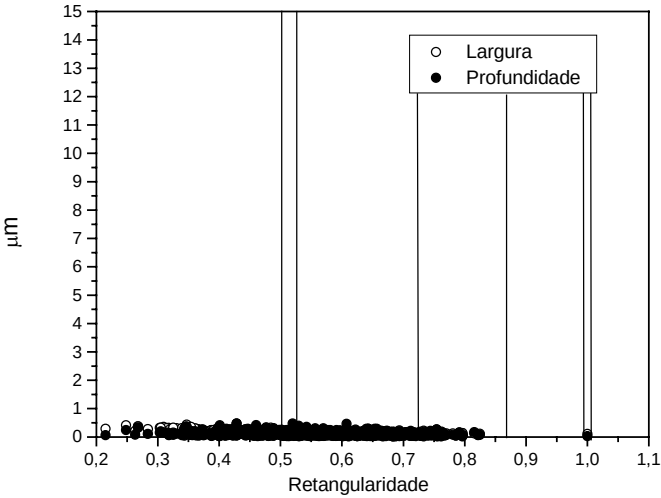


(e)

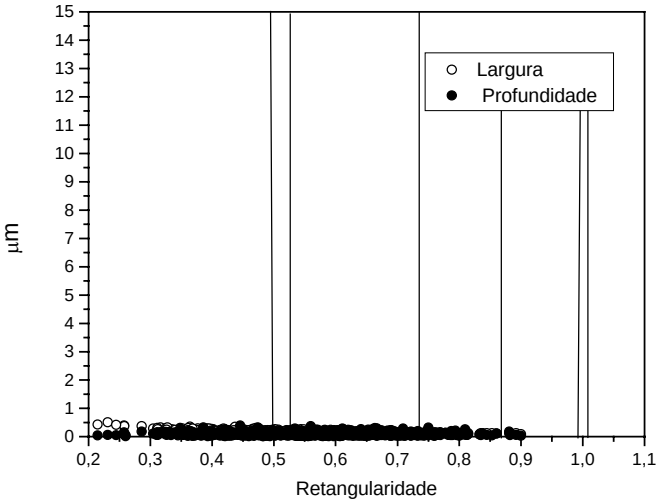
Figura 103 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, no estado como recebida, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



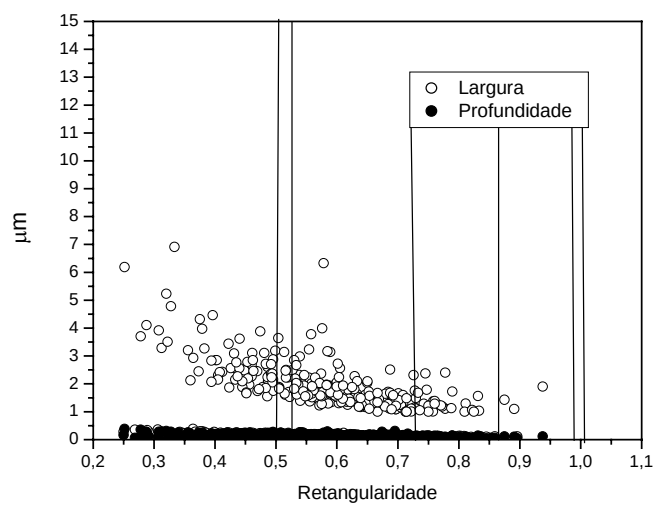
(a)



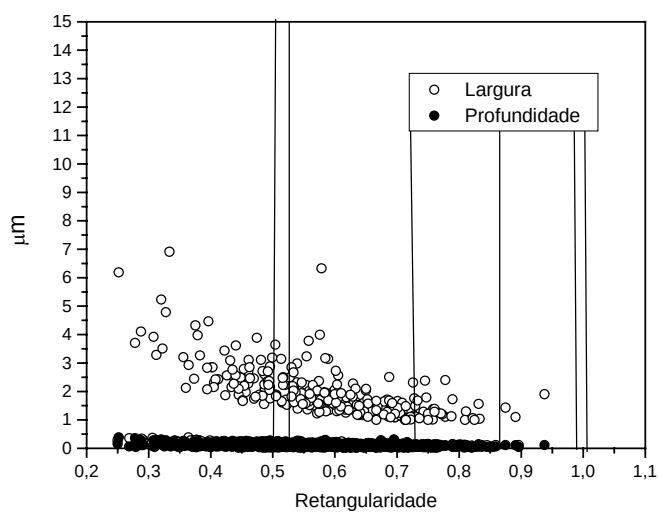
(b)



(c)

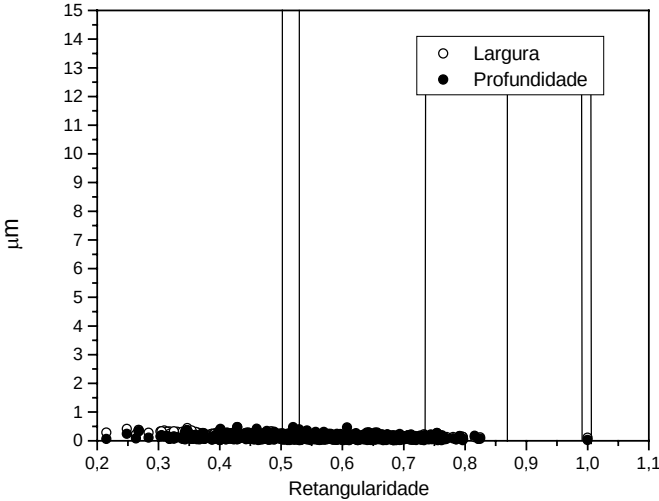


(d)

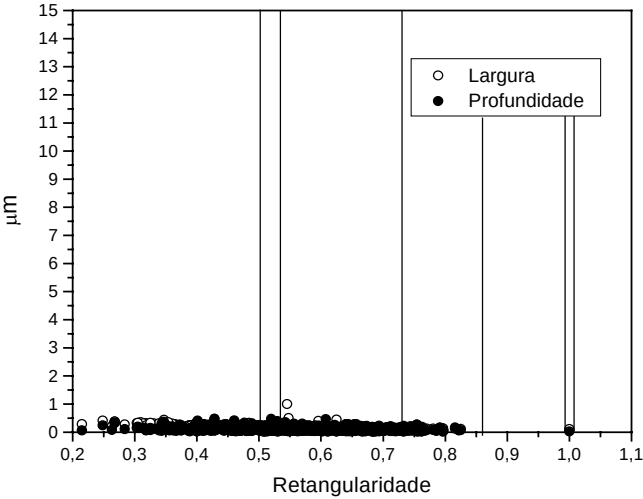


(e)

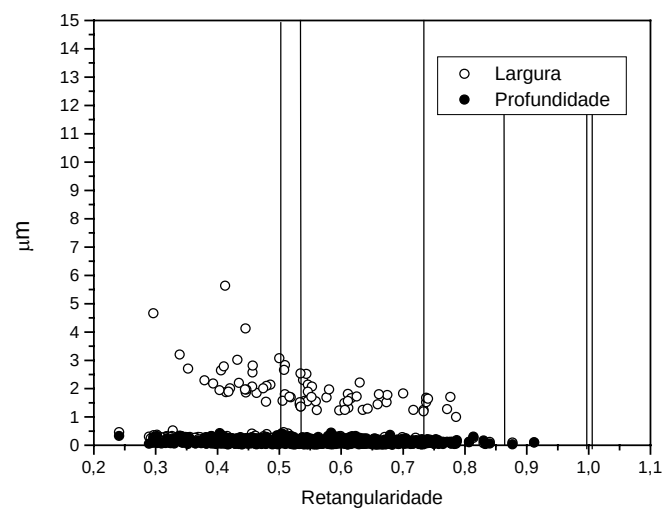
Figura 104 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriado em água e gelo, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



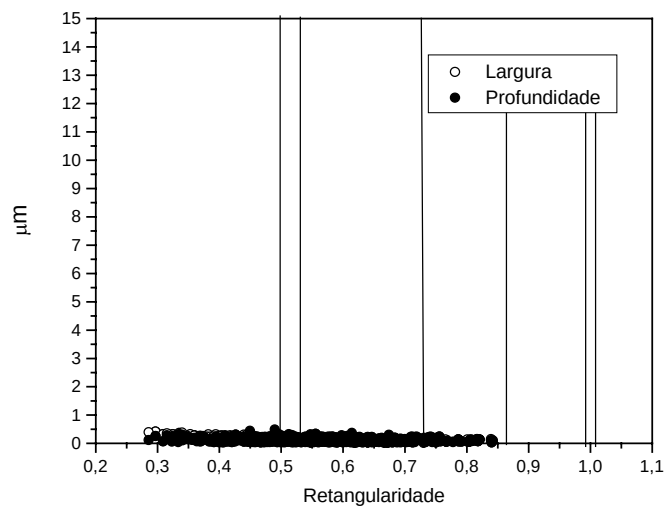
(a)



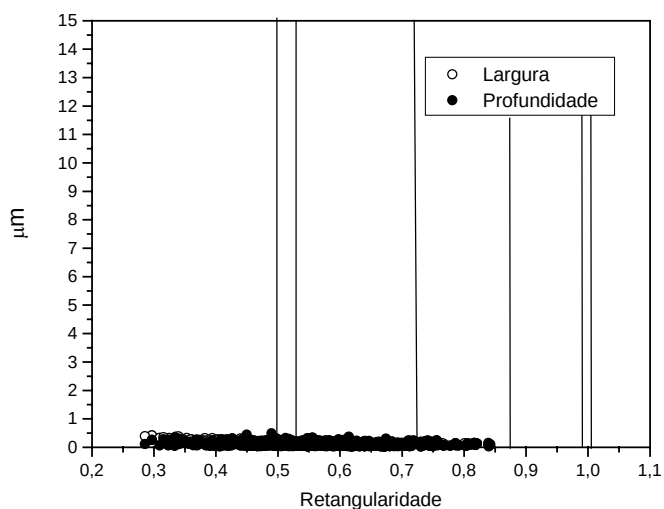
(b)



(c)

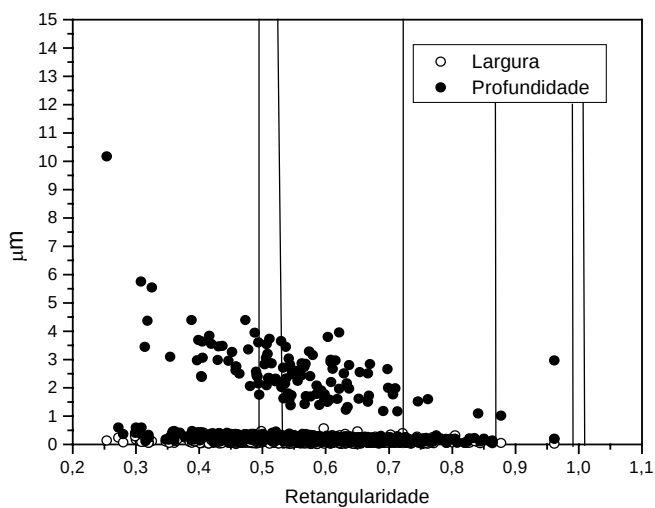


(d)

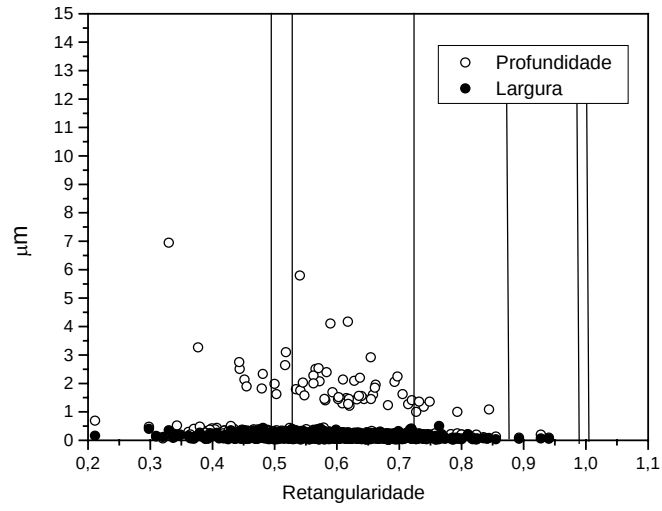


(e)

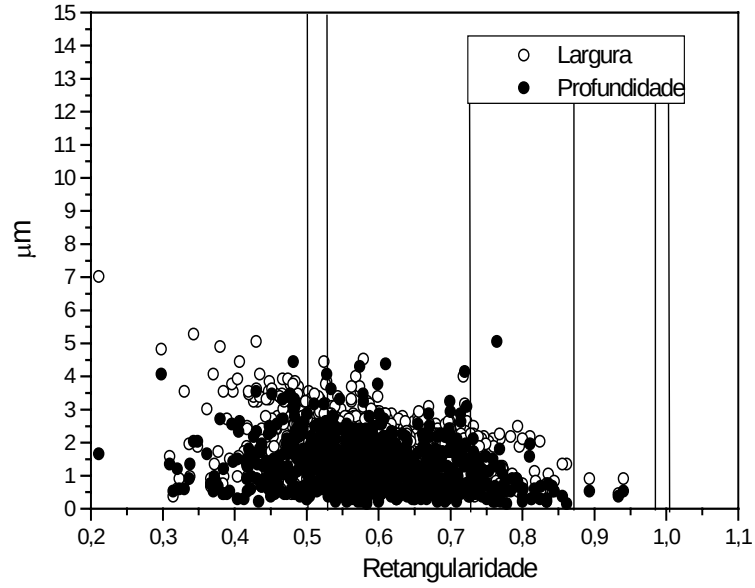
Figura 105 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 1065°C – 1 hora e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



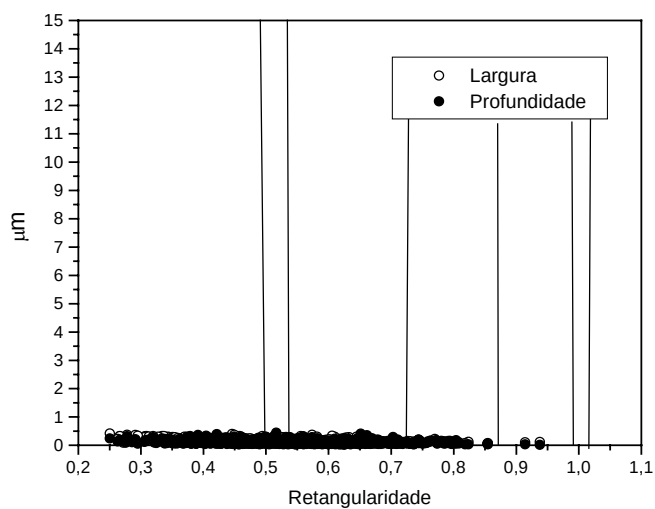
(a)



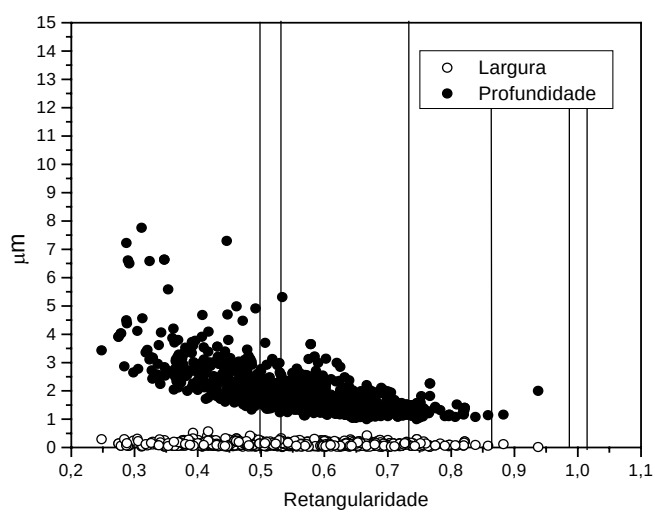
(b)



(c)

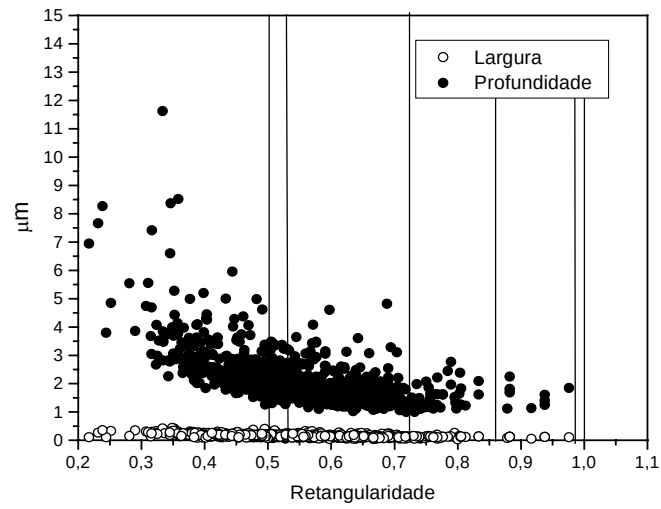


(d)

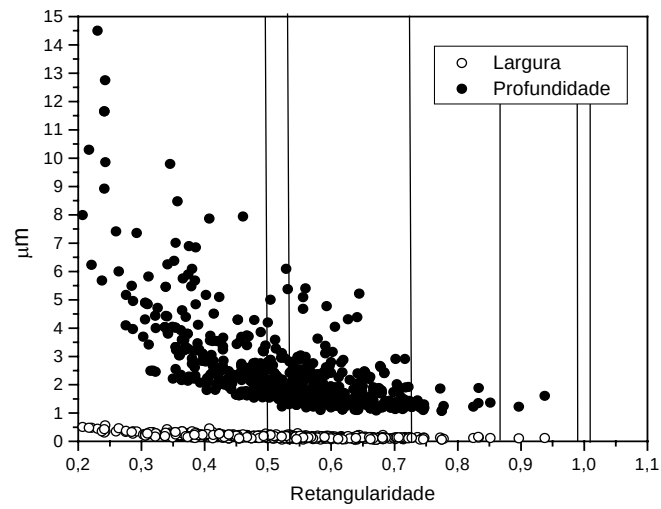


(e)

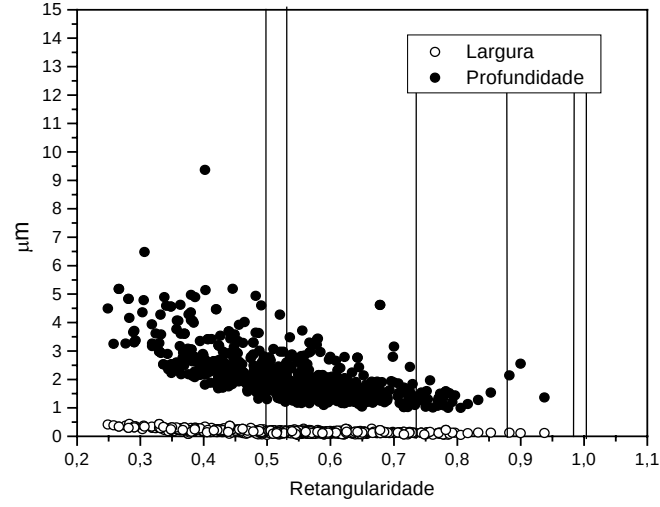
Figura 106 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 820°C – 1 hora e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



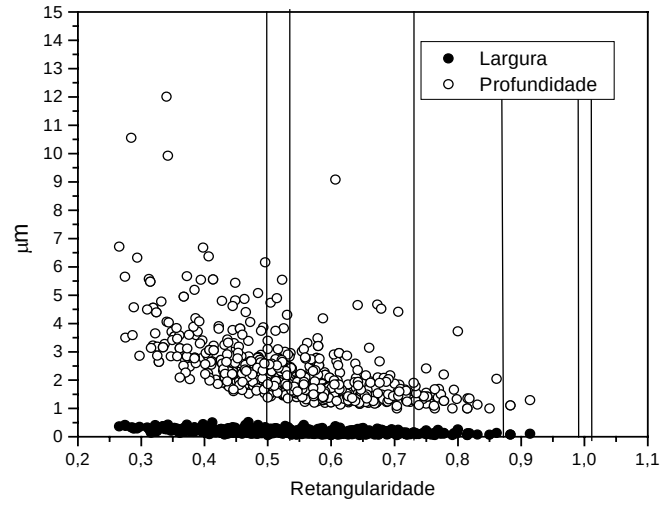
(a)



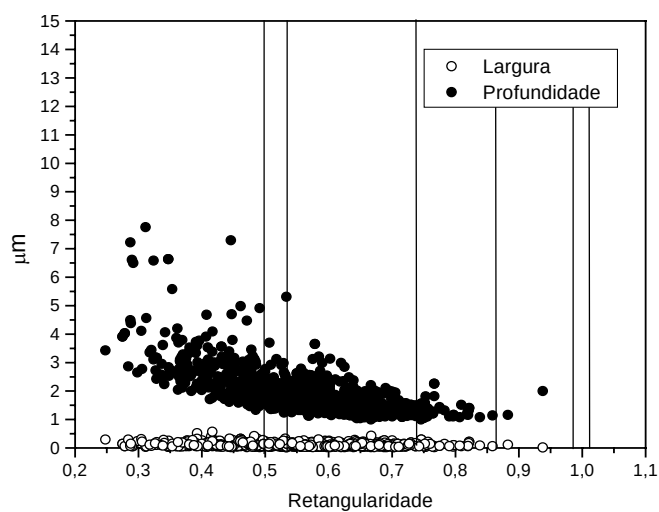
(b)



(c)

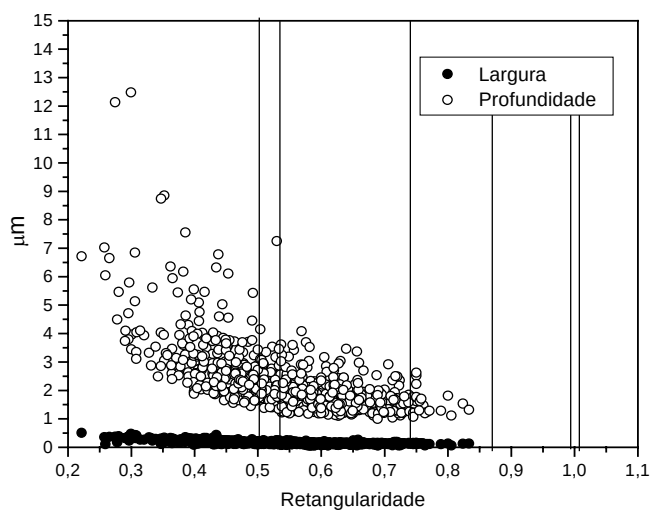


(d)

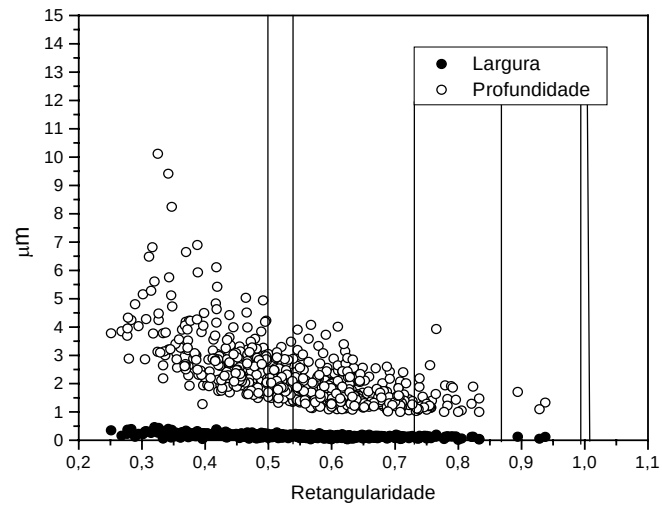


(e)

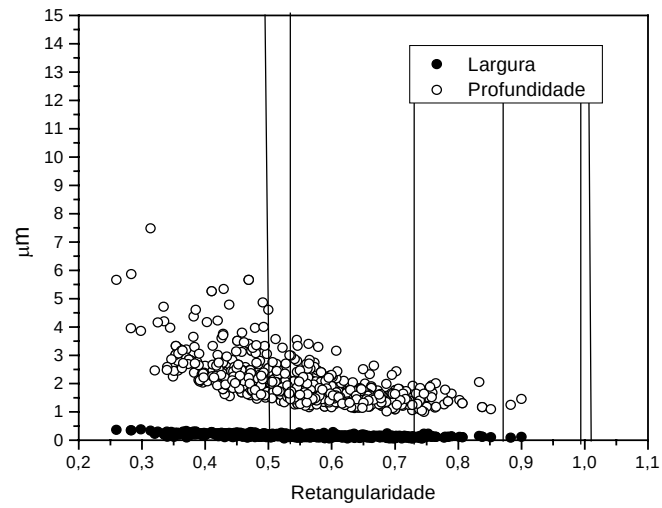
Figura 107 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 620°C – 24 horas e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



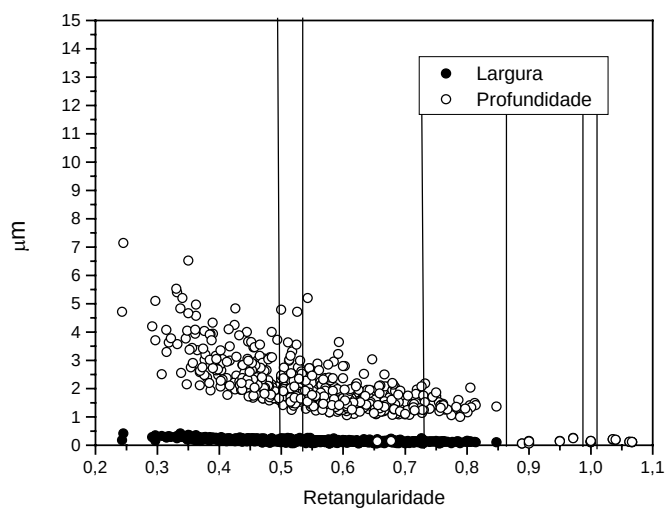
(a)



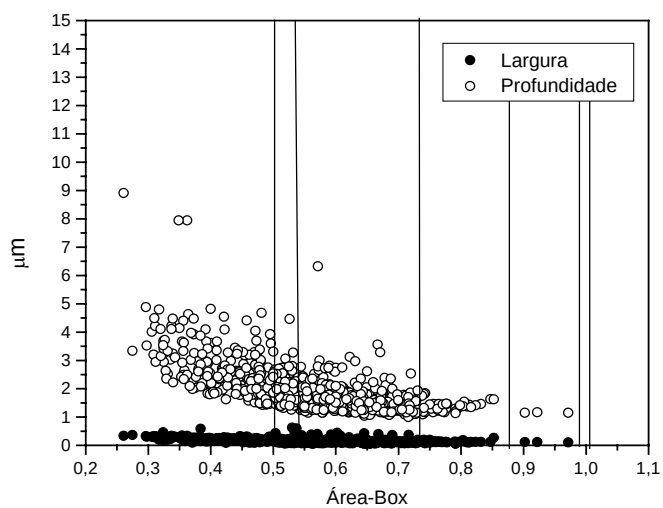
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 108 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 304, tratado a 670°C – 5 horas e resfriado ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.

As análises dos perfis da liga no estado como recebida corroída indicam a presença de pites predominante cônicos, quase-cônicos e irregulares, porém mais largos do que profundos.

As análises dos perfis da liga quando tratada termicamente indicam a presença de pites predominantemente cônicos, quase-cônicos e irregulares, com larguras e profundidades similares, mas com o aumento do tempo de exposição à distribuição na geometria não apresenta mudanças significativas. No entanto, se observa um crescimento mais visível na profundidade que na largura do pite.

5.13 - CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA E DIMENSIONAL DOS PITES NO AÇO INOXIDÁVEL 310S TRATADOS, APÓS SEREM SUBMETIDAS AOS TESTES DE CORROSÃO VIA NÉVOA SALINA

Os diagramas das figuras 109 a 119 revelam a classificação morfológica e dimensional que governam o crescimento dos pites no aço inox 310S no estado como recebido e tratado, após ser submetido a diferentes tempos de exposição em névoa salina. Esses diagramas refletem a idéia visual do tipo e da quantidade de pites que ocorrem em cada situação em que ao material é submetido.

As tabelas 25 (a), (b) (c), (d), (e) e (f) mostram a classificação e a distribuição das porcentagens dos pites no aço inoxidável 310S no estado como recebida e tratado.

Essas tabelas caracterizam-se por pites dos tipos (irregulares, cônicos, hemisféricos e cilíndricos) por duas regiões de transição A e B, respectivamente. A região de transição A indica que está entre os pites cônicos e hemisféricos, onde os pites não mais são cônicos e nem hemisféricos, ou estão passando de hemisféricos para cônicos dependendo do processo. Similar raciocínio aplica-se à região de transição B, de modo que os pites apresentam características hemisféricas e cilíndricas.

As tabelas 25 e 26 (a), (b), (c), (d) (e) e (f) indicam duas tendências que governam a evolução temporal referente ao crescimento dos pites no aço inoxidável 310S no estado como recebido e tratado associado com a classificação, distribuição e mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites.

Na tabela 25 (a), visualizou-se a seguinte distribuição e classificação dos pites: hemisféricos> região de transição A> região de transição B> irregulares> cônicos. Os pites são presentes em maior quantidades hemisféricos e na região transição A, não há evolução temporal de pites cilíndricos no sistema.

Tabela 25 (a) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, no estado como recebida.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	0	0	27	22,5	55	0
120	8,76	4,25	21,13	37,33	28,06	1,50
168	6,50	7,60	25,44	36,66	23,80	0
216	2,12	0	16,73	21,60	59,55	0
312	12,82	4,22	29,03	31,35	22,58	0

Na tabela 25 (b), mostra-se a seguinte distribuição e classificação dos pites: região de transição A> hemisféricos> região de transição B> cônicos> irregulares. Os pites são presentes em maior quantidade na região transição A e hemisféricos, não há evolução temporal dos pites cilíndricos no sistema.

Na tabela 25 (c), revelou a seguinte distribuição e classificação dos pites: região de transição B> hemisféricos> região de transição A> cônicos> irregulares. Os pites são presentes em maior quantidades na região transição B e hemisféricos, não há pites cilíndricos no sistema.

Tabela 25 (b) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	2,01	3,33	55,31	29,33	10,02	0
120	7,5	1,87	34,37	34,38	21,88	0
168	10,5	2,59	15,29	18,46	53,16	1,59
216	26,96	5,21	32,19	24,34	11,30	0
312	4,23	7,95	45,50	29,10	13,22	0

Tabela 25 (c) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 1065°C – 1 hora ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	6,41	1,28	7,70	19,23	65,38	0
120	0,67	4,67	54,66	29,33	10,67	0
168	0,66	1,32	14,47	28,29	55,26	0
216	4,19	2,80	26,57	17,48	48,96	0
312	0	1,23	3,47	20,99	74,31	0

Tabela 25 (d) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 820°C – 1 Hora ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	8,49	6,60	48,11	25,47	11,33	0
120	10,50	6,00	44,50	26,50	12,50	0
168	12,40	6,61	38,85	24,79	17,35	0
216	9,34	9,61	26,17	23,71	29,90	0,93
312	2,37	2,78	17,86	23,81	52,78	0,40

Na tabela 25 (d), visualiza-se a seguinte distribuição e classificação dos pites: região de transição B> hemisféricos> região de transição A> cônicos> irregulares. Os pites são presentes em maior quantidade na região transição B e hemisféricos, não há evolução temporal significativa dos pites cilíndricos no sistema.

Tabela 25 (e) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 620°C – 24 Horas e resfriamento ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	0	0	18,14	24,29	55,14	2,43
120	3,17	2,08	27,09	31,43	39,26	0
168	15,87	2,59	26,98	29,16	25,40	0
216	6,44	13,30	61,80	15,88	2,58	0
312	12,30	6,56	39,33	24,60	17,21	0

Na tabela 25 (e), visualiza-se a seguinte distribuição e classificação dos pites: região de transição A> hemisféricos> região de transição B> irregulares> cônicos. Os pites são presentes em maior quantidade na região transição A e hemisféricos, não há evolução temporal dos pites cilíndricos no sistema.

Tabela 25 (f) – Classificação e distribuição das porcentagens de pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 670°C – 5 Horas resfriada ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Pites Irregulares	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	1,71	0	20,50	23,08	54,71	0
120	7,43	6,93	64,36	17,33	2,48	0
168	3,75	5	23,75	36,71	30,38	0
216	5,36	0,89	27,68	41,96	22,32	0
312	6,67	1,02	30,45	42,56	19,30	0

Na tabela 25 (f), visualiza-se a seguinte distribuição e classificação dos pites: hemisféricos> região de transição A> região de transição B> irregulares> cônicos. Os pites são presentes em maior quantidades região transição B e hemisféricos, praticamente não há presença e evidencias de evolução temporal dos pites cilíndricos no sistema.

Conclui-se que a distribuição e classificação dos pites no aço inox 310S possuem as seguintes tendências: hemisféricos> região de transição B> região de transição A> cônicos> irregulares, ora, região de transição B> hemisféricos> região de transição A> cônicos> irregulares.

Não houve a presença dos pites cilíndricos no sistema. A evolução temporal dos parâmetros que governam a distribuição dos pites é similar no aço inox 310S quando tratado na faixa de temperatura de 620°C - 670°C.

Ao aumentar o tempo de exposição, há a ocorrência do aumento dos pites hemisféricos e na região de transição A, porém a evolução temporal é similar no aço

quando tratados a 1065°C durante 1 hora e resfriado ao ar e 820°C durante 1 hora e resfriado ao ar.

Foram observados alterações nas distribuições, ou seja, aumento no número de pites na região de transição A e geometrias irregulares e a diminuição na região de transição B no aço no estado como recebida e tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriado água e gelo.

Tabela 26 (a) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, como recebido.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	0	0	4,54	5,53	9,17	0
	Profundidade	0	0	4,36	4,93	6,33	0
120	Largura	19,30	13,70	14,51	10,97	6,38	5,08
	Profundidade	5,73	4,97	4,99	4,44	4,82	4,72
168	Largura	37,78	0	15,41	13,10	6,43	0
	Profundidade	6,15	0	4,21	3,93	4,59	0
216	Largura	13,77	0	5,01	15,41	6,43	0
	Profundidade	6,16	0	6,72	4,21	4,59	0
312	Largura	37,87	8,26	11,62	7,55	5,27	0
	Profundidade	6,41	6,90	5,08	4,98	5,19	0

A tabela 26 (a), mostra a seguinte ordem no tamanho da mediana da largura e profundidade dos pites associada com a morfologia dos pites: irregulares > cônicos > transição A > hemisféricos > transição B; não foi observada a existência de pites cilíndricos no sistema para o aço inox 310S.

A geometria dos pites apresentam maior na largura (ordem de 6 vezes) que na profundidade e parecem crescer preferencialmente na largura. Observou-se que quanto maior tempo de exposição na condição como recebido, maior a largura dos pites mesmo entre as diferentes morfologias dos pites (irregulares: 37,87 μm e cônicos: 8,26

μm em 312 horas e irregulares: 19,30 μm em 120 horas e 37,87 μm em 312 horas) e a profundidade constante.

A tabela 26 (b), mostra a seguinte ordem na mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites associada com a morfologia: irregulares > cônicos > transição A > hemisféricos > transição B; não foi observada a existência de pites cilíndricos no sistema.

Os pites apresentam maior na profundidade (ordem de 5 vezes) que largura e parecem que crescer preferencialmente na profundidade. Notou-se que quanto maior tempo de exposição, maior a profundidade dos pites mesmo entre as diferentes morfologias dos pites (irregulares: 31,72 μm e cônicos: 7,77 μm em 312 horas e irregulares: 11,40 μm em 48 horas e 31,72 μm em 312 horas) e a largura constante.

Tabela 26 (b) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 1065°C – 1 hora e resfriada em água e gelo.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	11,40	8,12	7,16	6,01	5,49	0
	Profundidade	18,07	10,30	7,37	6,71	4,98	0
120	Largura	9,74	9,82	8,06	7,98	7,26	0
	Profundidade	9,45	8,34	7,48	6,69	5,55	0
168	Largura	6,72	4,86	4,78	3,76	4,96	4,86
	Profundidade	33,41	8,44	15,99	9,17	4,98	3,57
216	Largura	7,29	5,72	4,75	4,72	5,18	0
	Profundidade	8,28	7,22	8,42	7,43	4,56	0
312	Largura	9,74	6,55	6,57	5,92	5,26	0
	Profundidade	31,72	7,77	6,94	5,90	4,44	0

A tabela 26 (c) mostra a seguinte ordem na mediana do tamanho da largura e profundidade associada com a morfologia dos pites: irregulares> cônicos > transição A> hemisféricos> transição B; não foi observada a existência de pites cilíndricos no sistema.

Os pites apresentam-se mais profundos (ordem de 3 vezes) que largos e crescem preferencialmente na profundidade. Quanto maior tempo de exposição, maior a profundidade dos pites mesmo entre as diferentes morfologias dos pites (irregulares: 33,17 μm e cônicos: 18,60 μm em 312 horas e irregulares: 27,47 μm em 48 horas e 33,17 μm em 312 horas).

Tabela 26 (c) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 1065°C – 1 hora ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	7,12	4,58	4,74	4,82	5,05	0
	Profundidade	33,17	21,46	14,02	11,19	5,40	0
120	Largura	14,88	9,01	6,89	6,02	5,54	0
	Profundidade	27,19	14,59	7,34	6,85	5,21	0
168	Largura	11,73	6,86	6,64	5,89	5,16	0
	Profundidade	16,31	6,29	8,57	6,99	4,73	0
216	Largura	5,74	4,65	4,38	3,91	4,74	0
	Profundidade	27,47	11,77	14,64	8,66	5,16	0
312	Largura	0	4,72	6,34	3,67	4,78	0
	Profundidade	0	18,60	14,31	14,02	5,91	0

A tabela 26 (d) mostra a seguinte ordem da mediana no tamanho da largura e profundidade associada com a morfologia dos pites: irregulares> cônicos> transição A> hemisféricos> transição B> cilíndricos.

Os pites apresentam-se mais profundos (ordem de 3 vezes) que largos e parecem que crescem preferencialmente na profundidade. Evidenciou-se que quanto

maior tempo de exposição, maior a profundidade dos pites mesmo entre as diferentes morfologias dos pites (irregulares: 29,23 μm e cônicos: 25,55 μm em 216 horas e irregulares: 16,23 μm em 48 horas e 29,23 μm em 216 horas) e a largura constante.

Tabela 26 (d) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 820°C – 1 Hora ao ar.

Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	7,25	6,09	5,36	5,33	5,90	0
	Profundidade	16,23	13,10	10,38	8,09	6,33	0
120	Largura	9,10	8,03	7,79	8,32	7,56	0
	Profundidade	7,69	7,82	7,30	5,92	5,18	0
168	Largura	6,96	6,35	5,80	4,88	4,92	0
	Profundidade	12,84	8,78	7,91	7,00	4,71	0
216	Largura	6,01	4,69	4,24	3,53	4,58	3,29
	Profundidade	29,23	25,55	19,51	10,61	5,80	4,78
312	Largura	6,24	6,25	5,30	5,21	4,92	4,72
	Profundidade	13,21	10,91	8,27	6,70	4,80	2,28

A tabela 26 (e) apresenta-se a seguinte ordem na mediana do tamanho na largura e profundidade associada com a morfologia dos pites: irregulares> cônicos> transição A> hemisféricos> transição B> cilíndricos.

Os pites apresentam-se mais profundos (ordem de 3 vezes) que largos e crescem preferencialmente na profundidade. Observou que quanto maior tempo de exposição, maior a profundidade dos pites mesmo entre as diferentes morfologias dos pites (irregulares: 27,79 μm e cônicos: 19,60 μm em 216 horas e irregulares: 7,15 μm em 120 horas e 27,79 μm em 216 horas) e a largura constante.

Tabela 26 (e) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 620°C – 24 Horas e resfriamento ao ar.

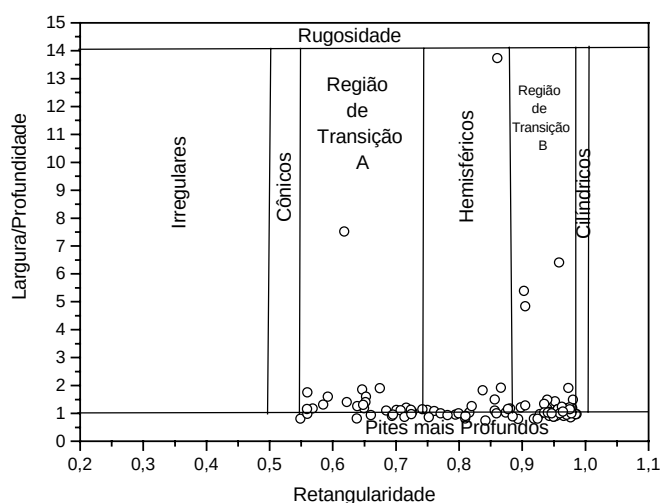
Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf. Trans B	Pites Cilíndricos	
48	Largura	0	0	4,37	3,24	4,79	4,72
	Profundidade	0	0	20,15	13,09	5,64	4,29
120	Largura	6,65	4,86	5,71	4,97	5,10	0
	Profundidade	7,15	30,62	9,65	8,33	6,01	0
168	Largura	6,35	5,01	4,17	5,01	5,12	0
	Profundidade	27,79	19,60	13,43	9,48	6,14	0
216	Largura	7,04	6,30	6,16	5,54	5,19	0
	Profundidade	7,15	6,46	6,08	5,59	3,98	0
312	Largura	6,96	6,35	5,80	4,88	4,92	0
	Profundidade	12,84	8,78	7,91	7,00	4,71	0

A tabela 26 (f) mostra a seguinte ordem na mediana no tamanho da largura e profundidade associada com a morfologia dos pites: irregulares> cônicos> transição A> hemisféricos> transição B; não foi observada a existência de pites cilíndricos no sistema.

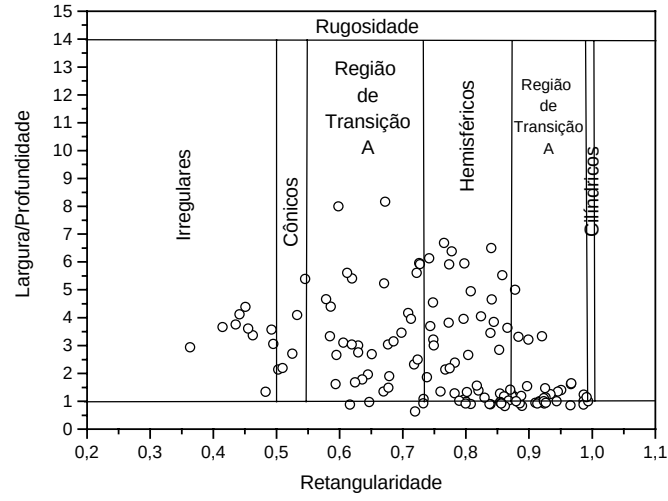
Os pites apresentam-se mais profundos (ordem de 2 vezes) que largo e crescem preferencialmente na profundidade. Quanto maior tempo de exposição, maior a profundidade dos pites mesmo entre as diferentes morfologias dos pites (irregulares: 25,26 μm e cônicos: 15,29 μm em 312 horas e irregulares: 11,10 μm em 48 horas e 25,26 μm em 312 horas).

Tabela 26 (f) – Mediana da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310 S, tratada a 670°C – 5 Horas resfriada ao ar.

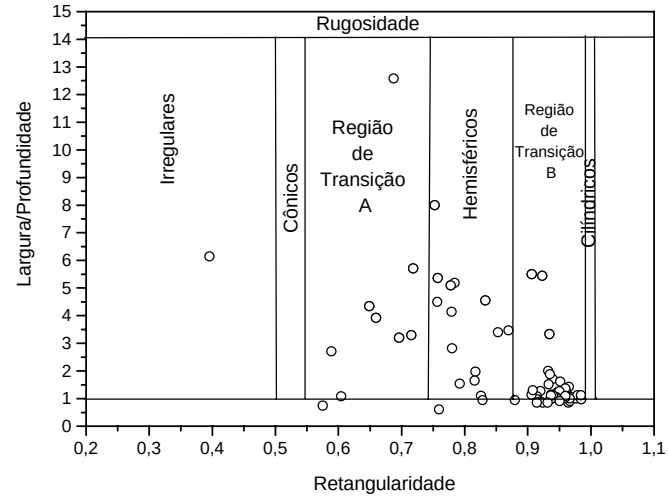
Tempo de Exposição [Horas]	Parâmetros [mediana] μm	Pites Irreg	Pites Cônicos	Pites Trans A	Pites Hemisf.	Pites Trans B	Pites Cilíndricos
48	Largura	7,29	0	5,50	5,99	5,65	0
	Profundidade	11,01	0	10,50	9,16	6,30	0
120	Largura	9,52	6,88	6,88	6,32	5,29	0
	Profundidade	9,80	6,51	6,66	5,76	4,52	0
168	Largura	6,01	4,79	4,39	5,07	7,39	0
	Profundidade	23,32	16,81	15,00	10,13	6,60	0
216	Largura	7,77	4,57	5,53	5,55	6,36	0
	Profundidade	15,19	13,02	10,68	7,54	6,51	0
312	Largura	8,15	5,02	6,22	6,38	6,37	0
	Profundidade	25,26	15,29	12,99	10,28	7,55	0



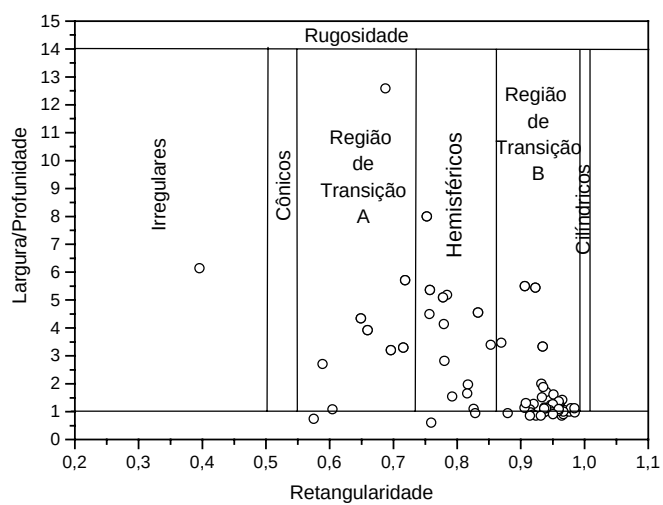
(a)



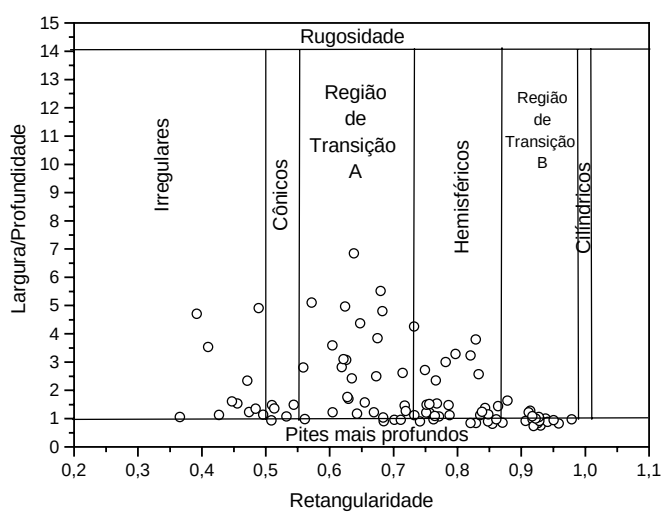
(b)



(c)

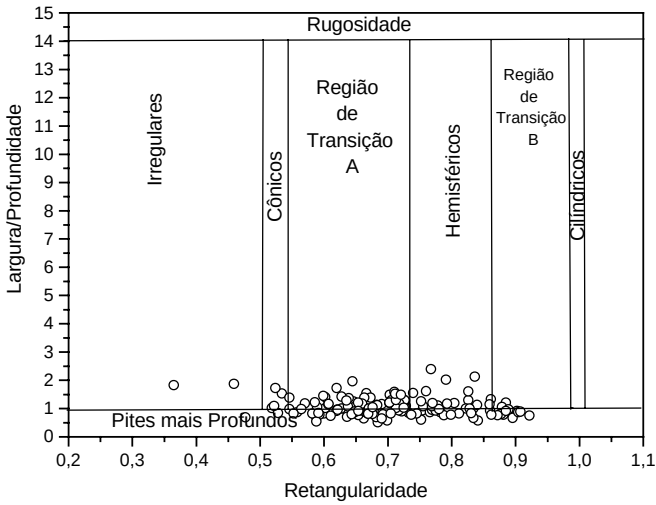


(d)

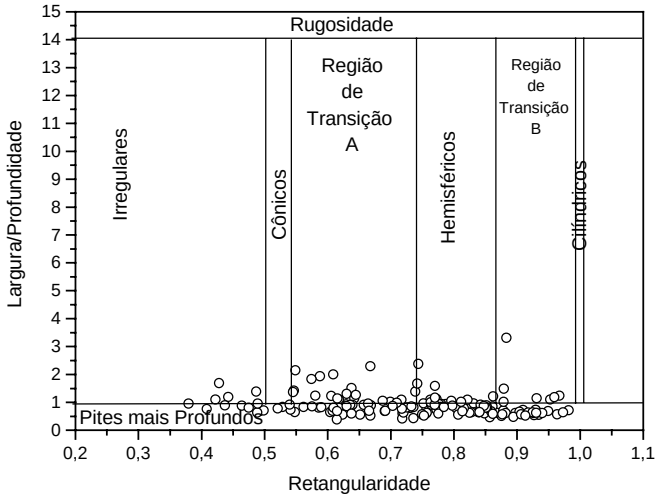


(e)

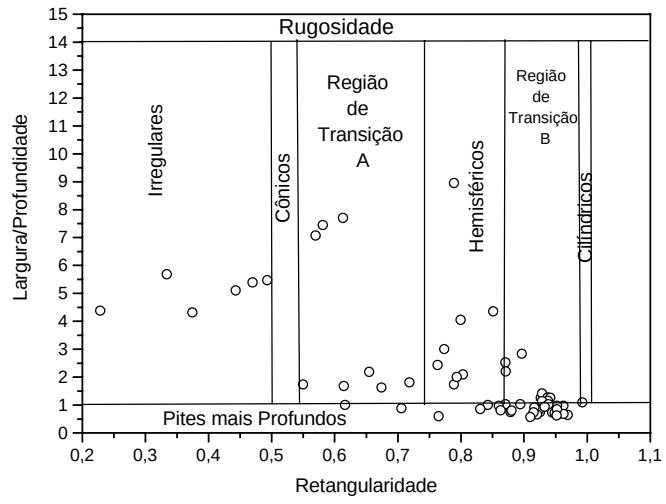
Figura 109- Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S no estado como recebido e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



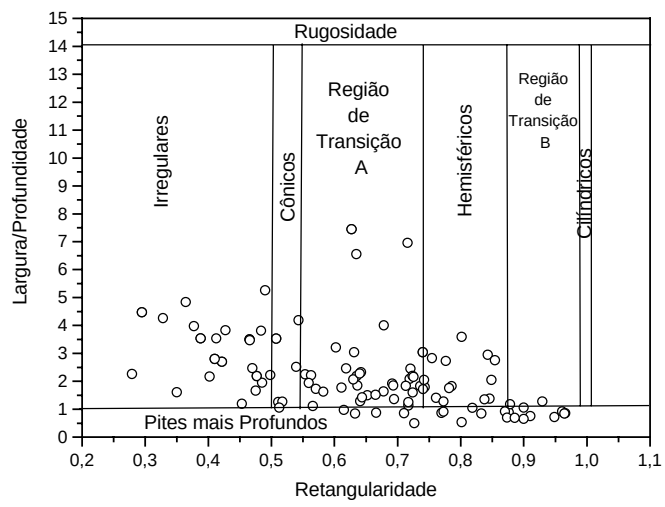
(a)



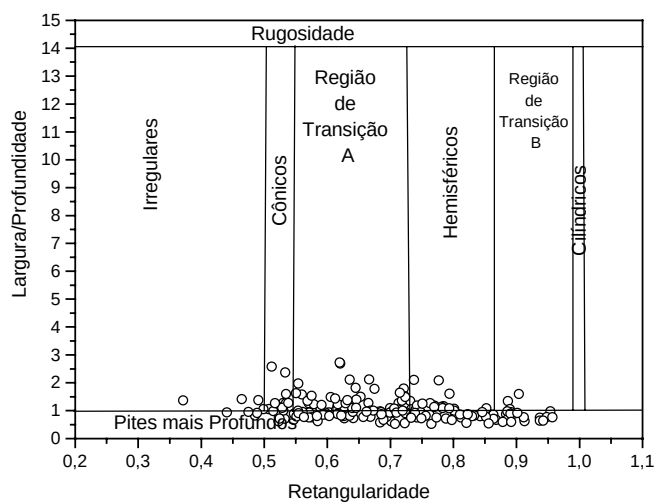
(b)



(c)

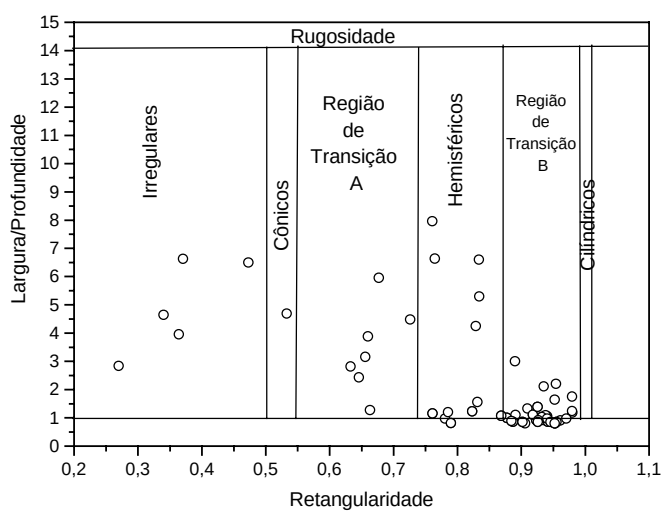


(d)

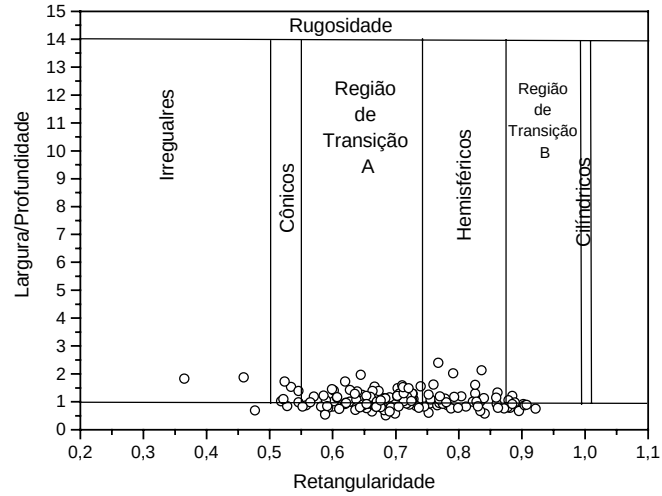


(e)

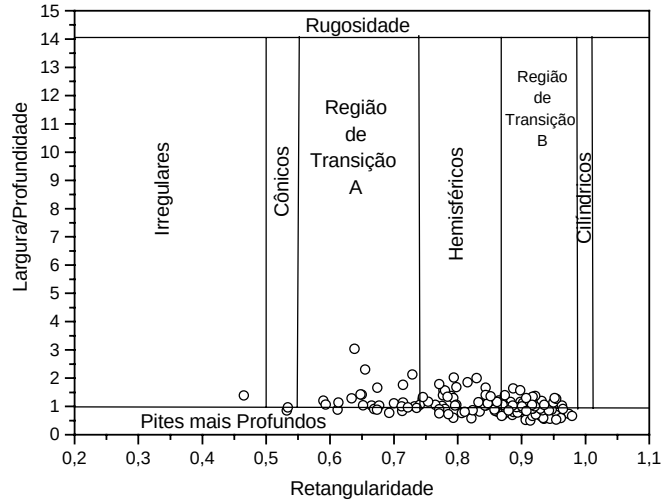
Figura 110 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 1065°C durante 1 hora e resfriado em água e gelo e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h.



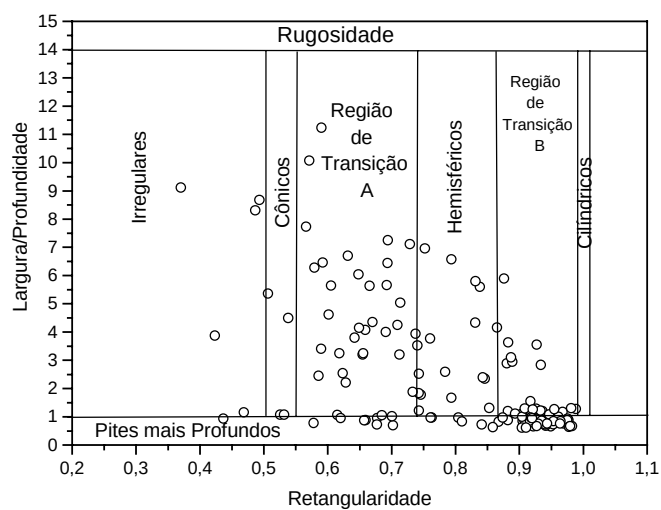
(a)



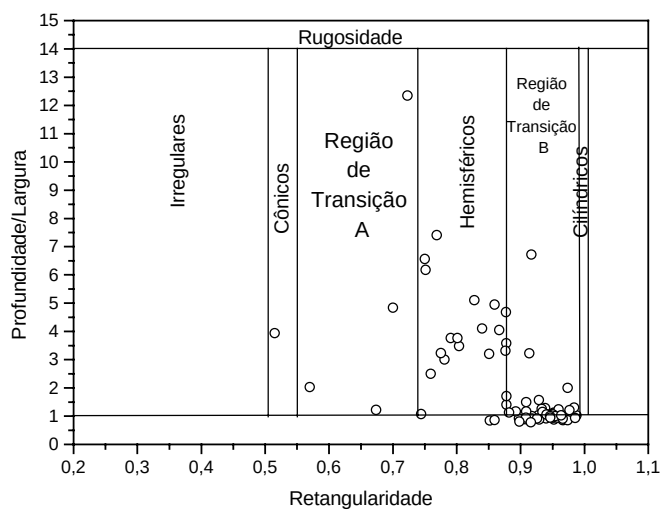
(b)



(c)

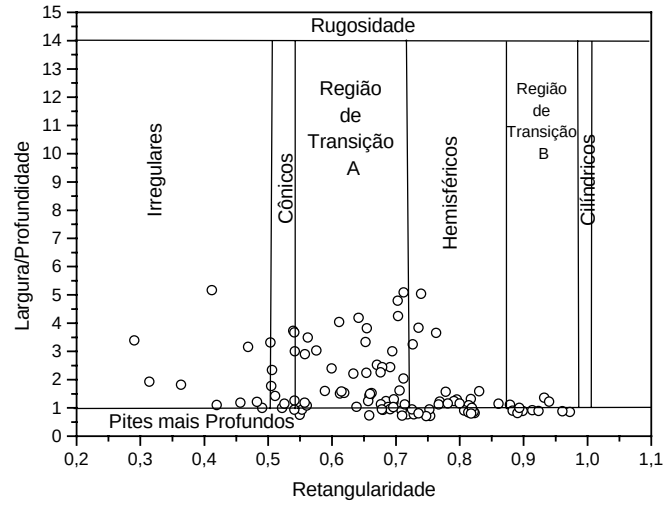


(d)

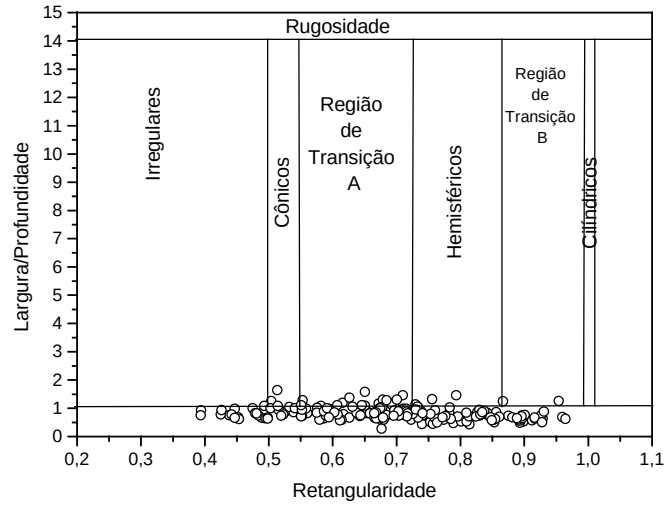


(e)

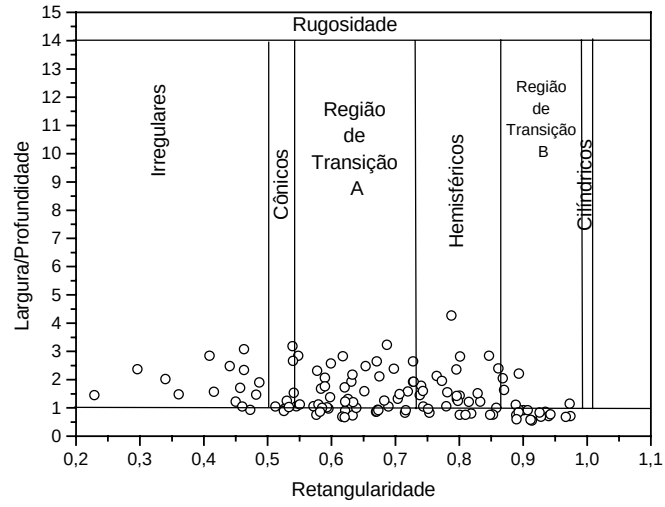
Figura 111 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 1065°C durante 1 hora e resfriado ao ar e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



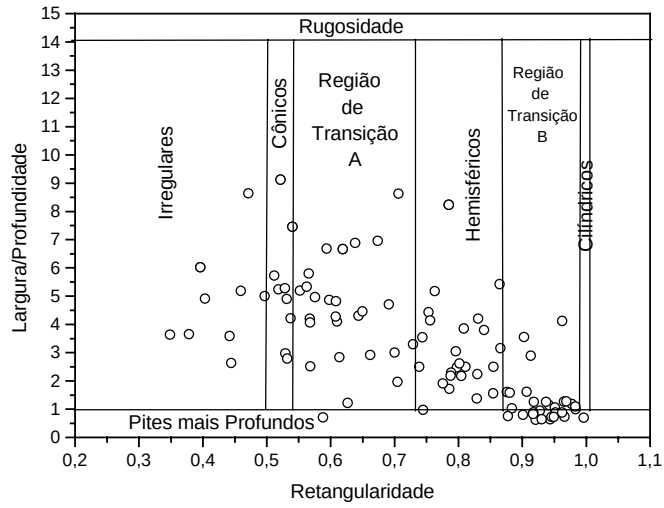
(a)



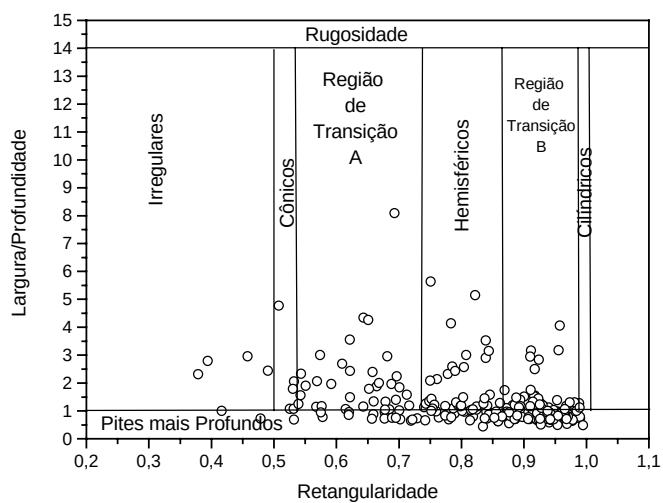
(b)



(c)

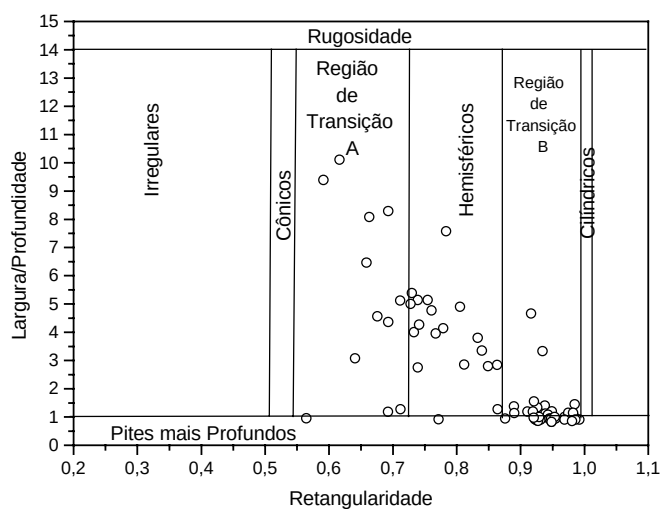


(d)

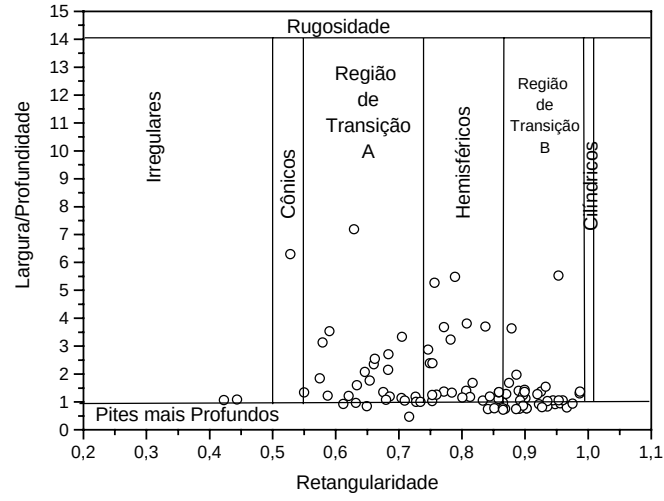


(e)

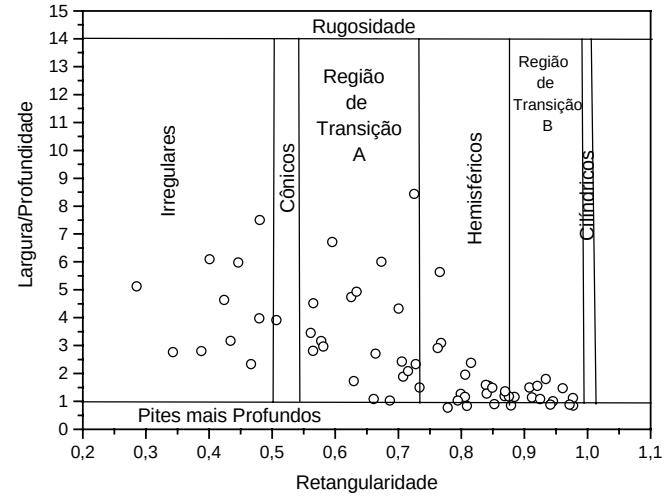
Figura 112 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 820°C durante 1 hora ao ar e gelo e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



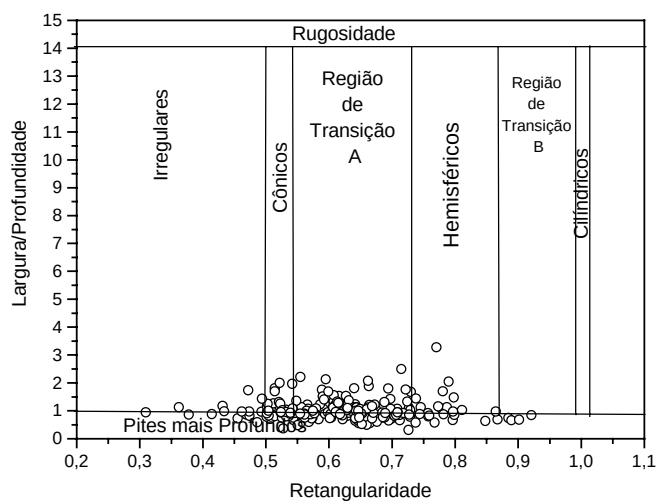
(a)



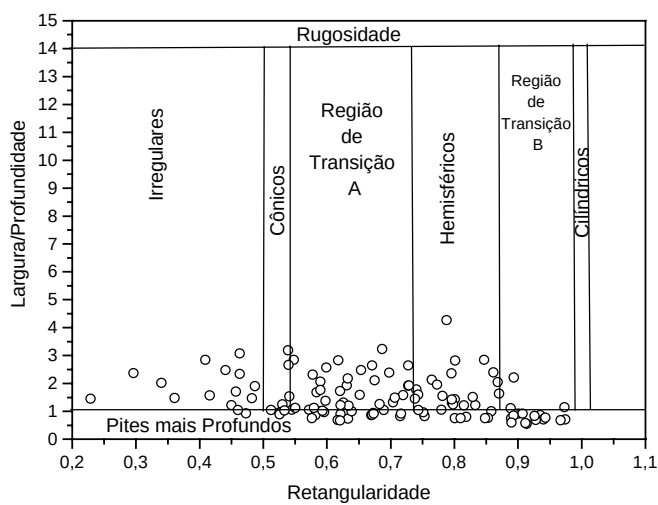
(b)



(c)

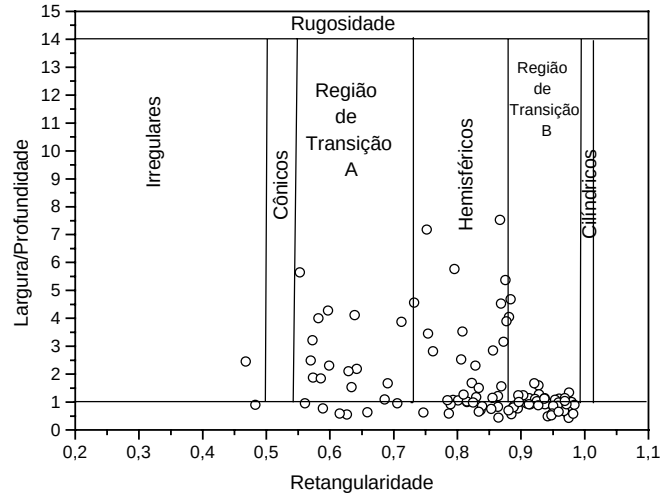


(d)

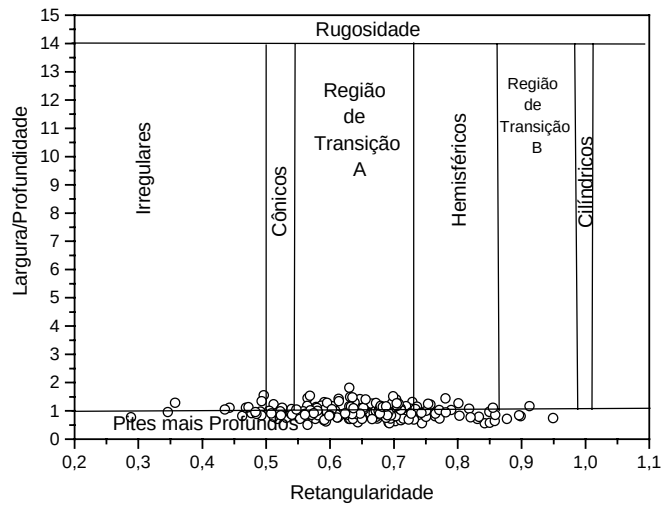


(e)

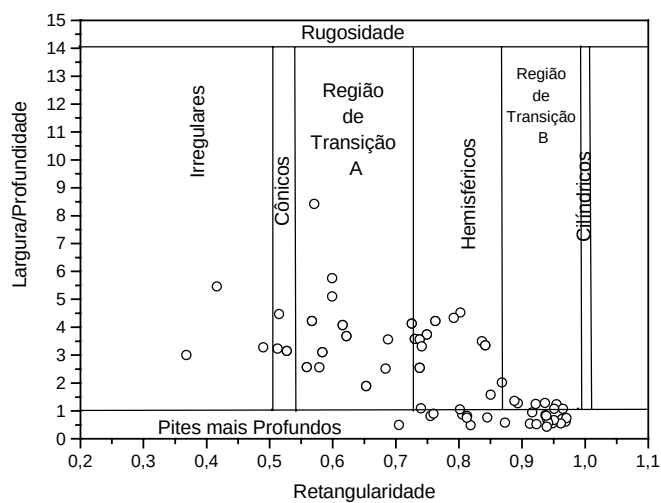
Figura 113 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 620°C durante 24 horas e resfriado ao ar e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



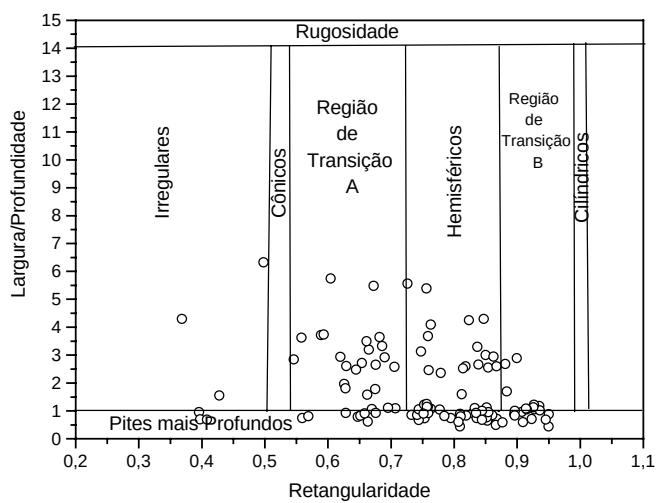
(a)



(b)

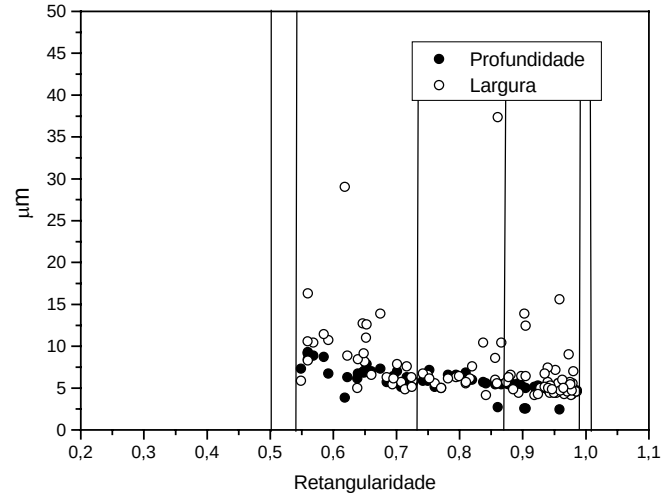


(c)

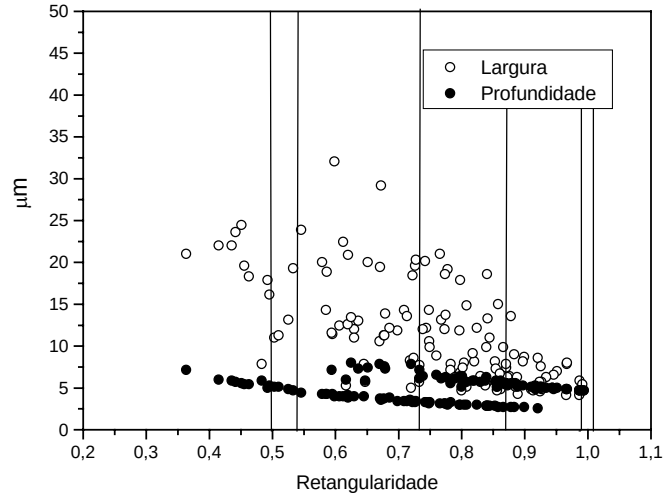


(d)

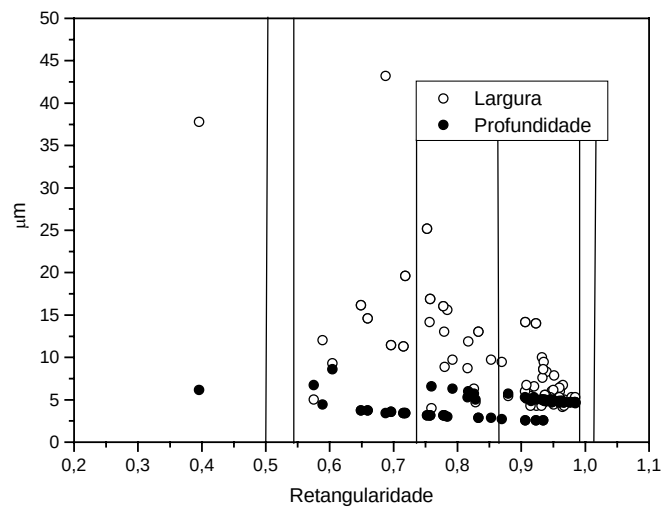
Figura 114 - Classificação dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado 670°C durante 5 horas e resfriado ao ar e submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



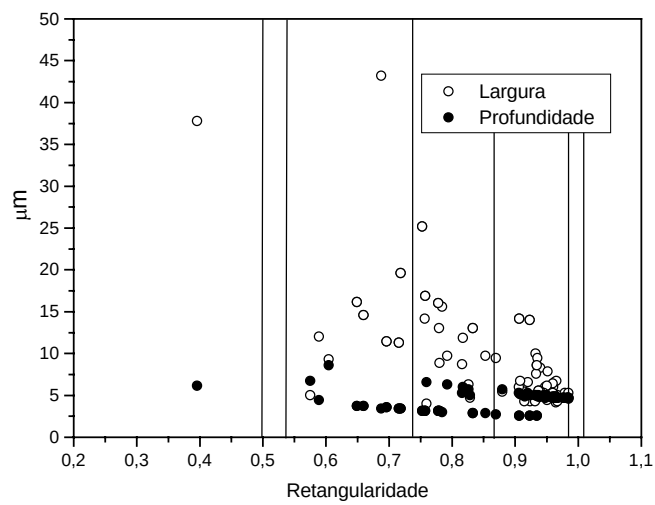
(a)



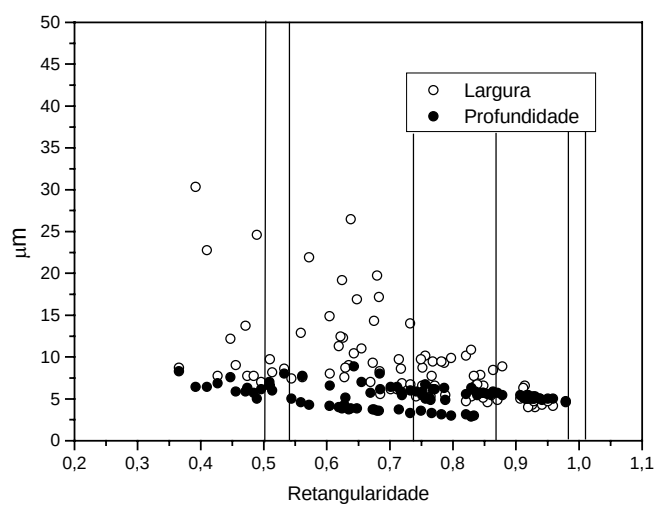
(b)



(c)

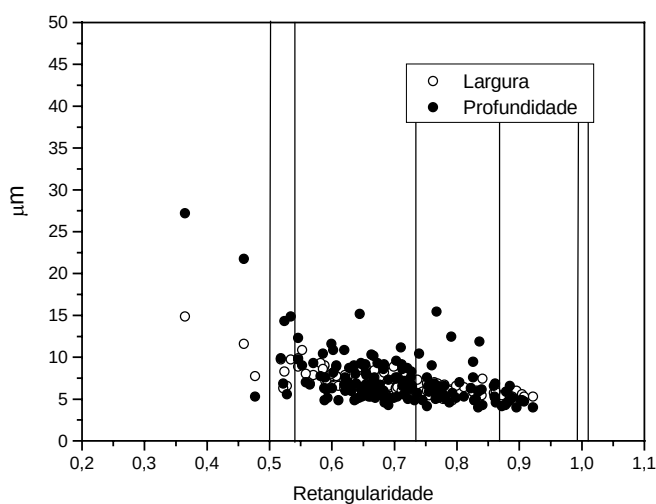


(d)

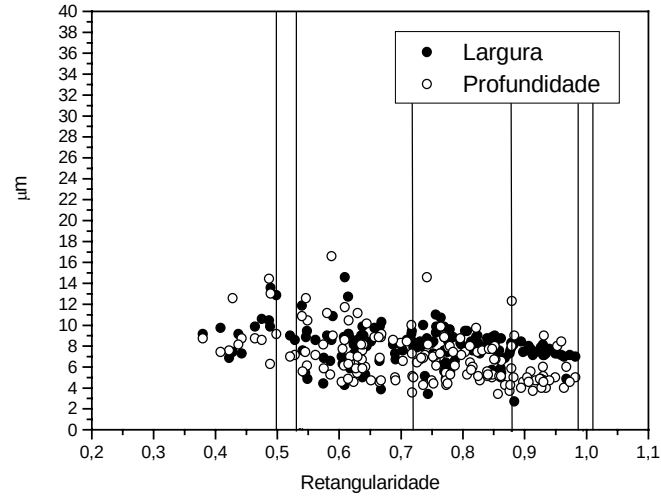


(e)

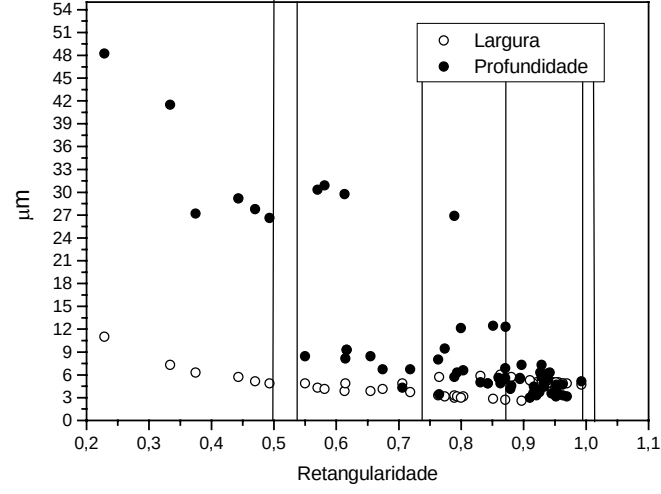
Figura 115 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S, no estado como recebida, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



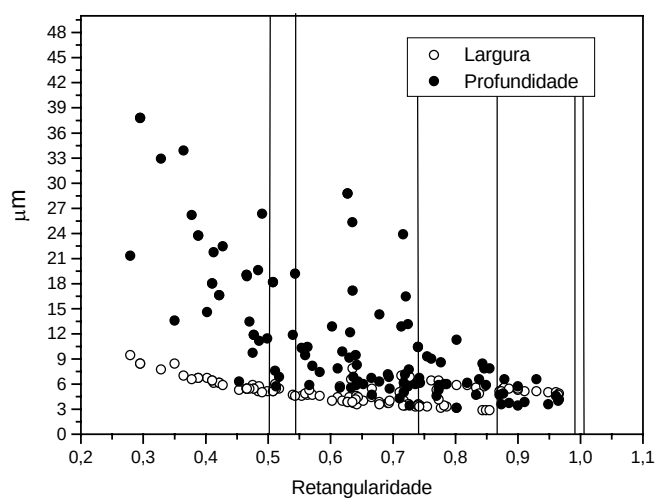
(a)



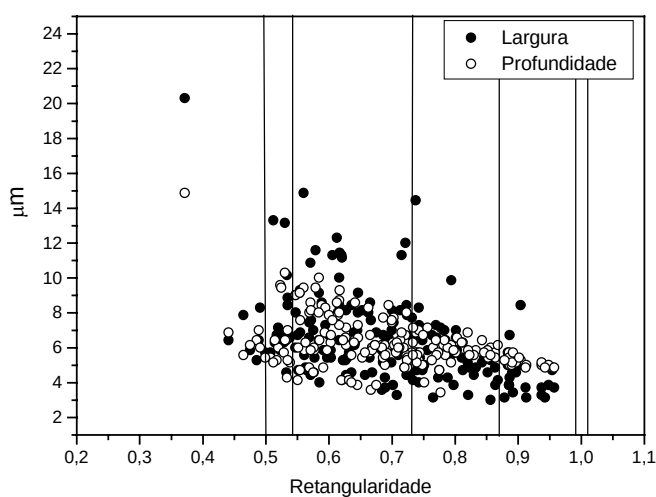
(b)



(c)

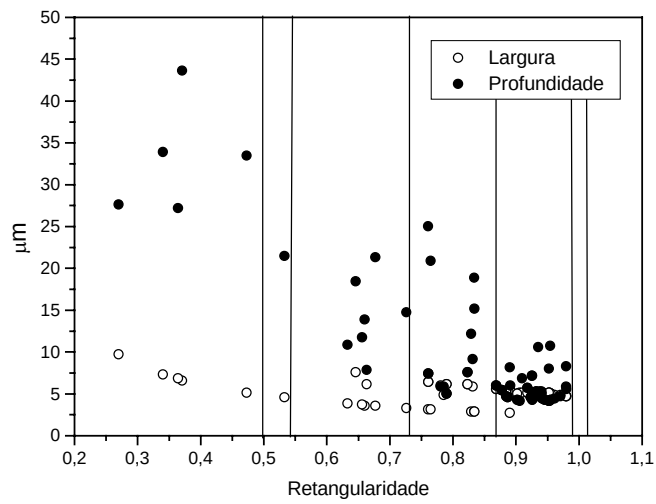


(d)

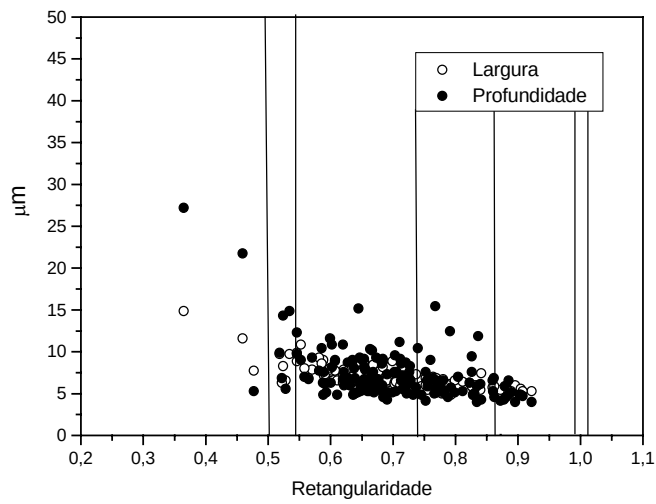


(e)

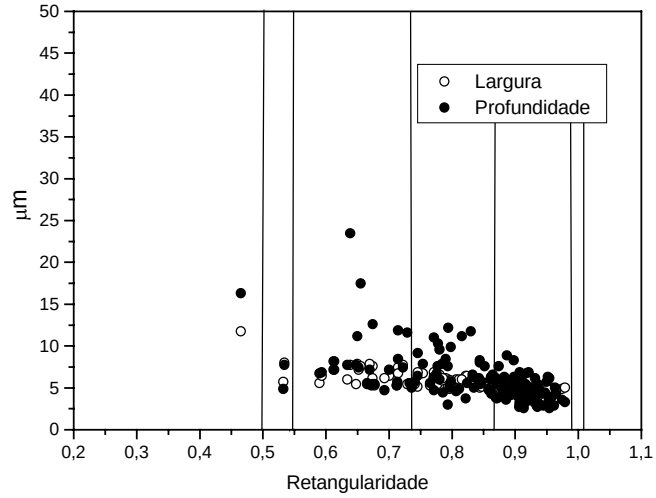
Figura 116 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



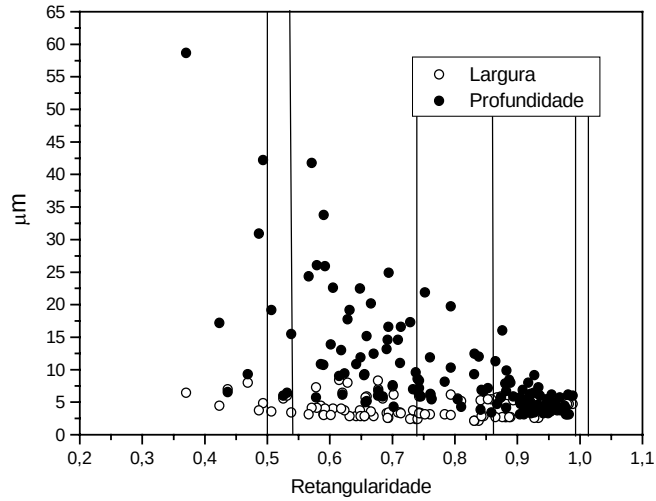
(a)



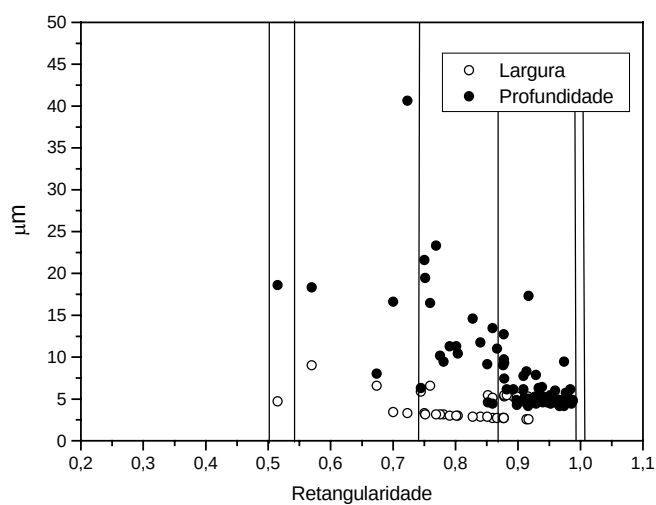
(b)



(c)

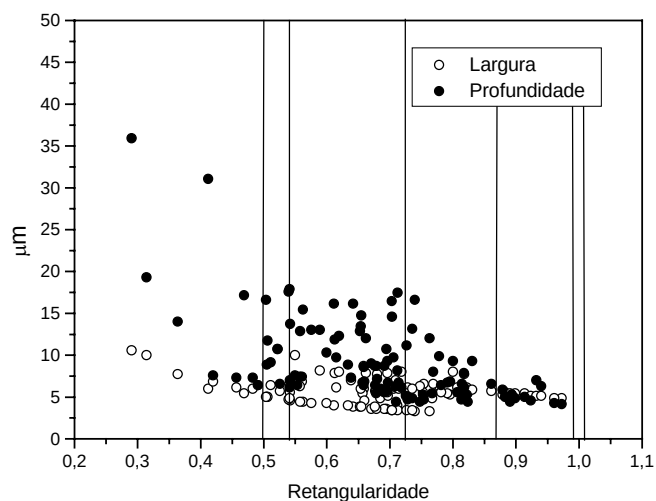


(d)

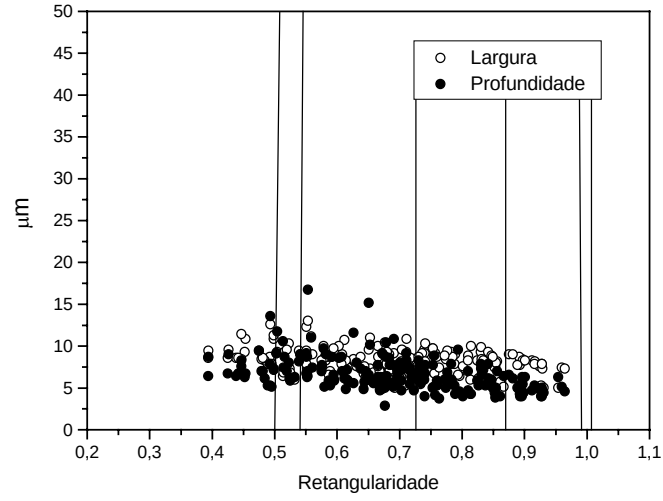


(e)

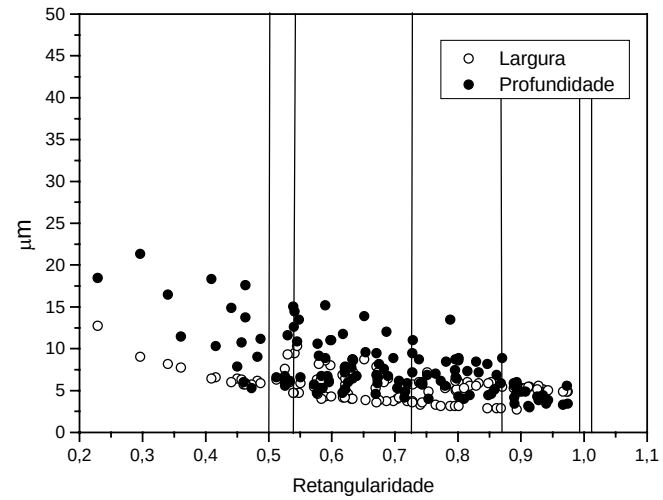
Figura 117 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 1065°C durante 1 hora e resfriada ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



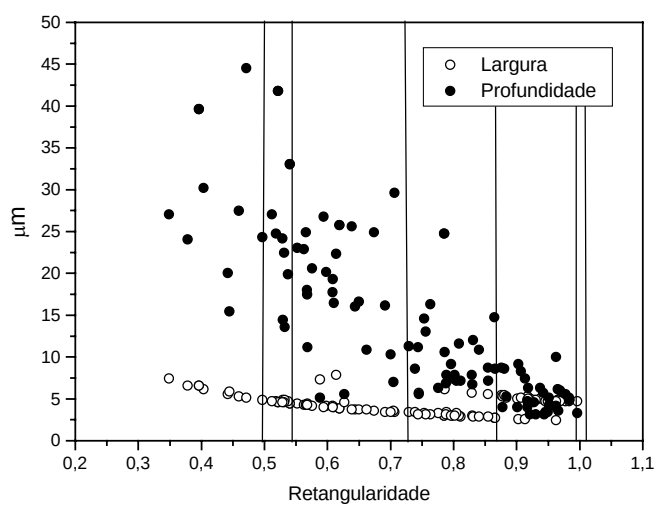
(a)



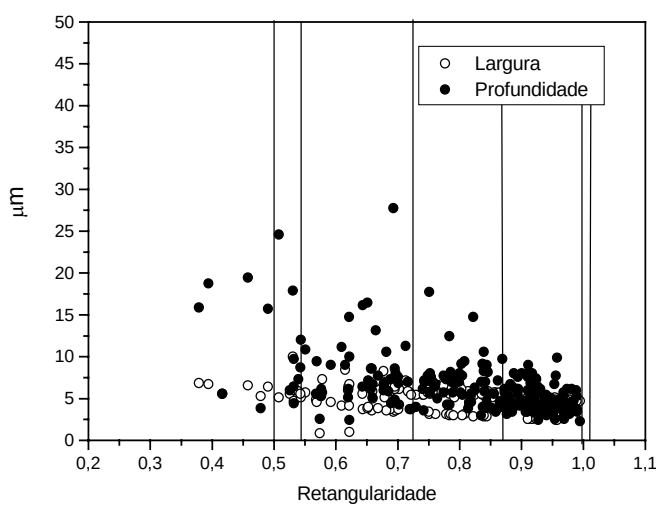
(b)



(c)

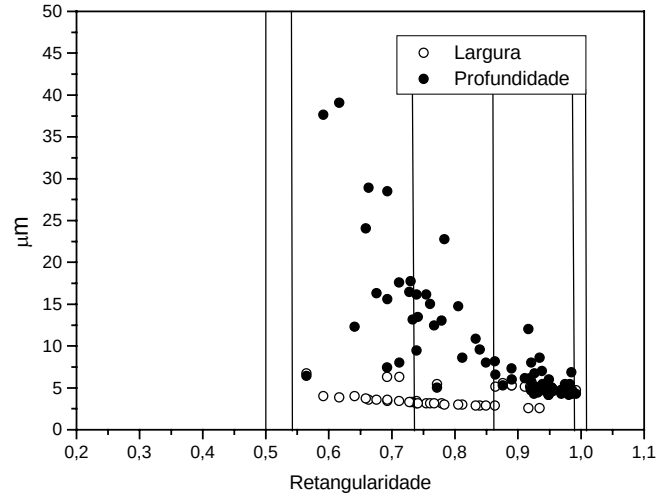


(d)

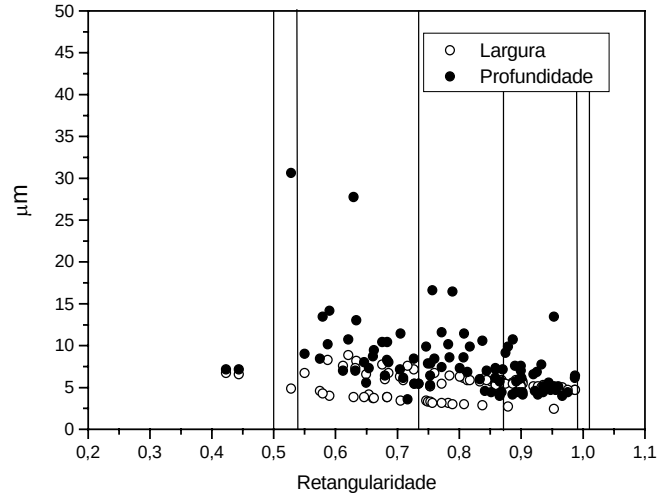


(e)

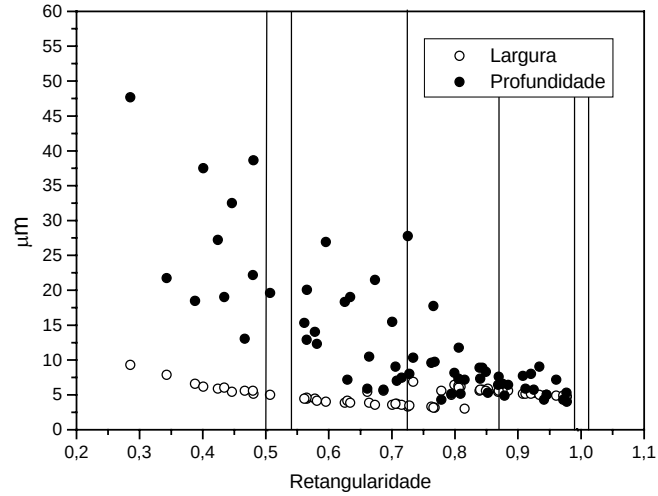
Figura 118 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 820°C durante 1 hora e resfriada ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



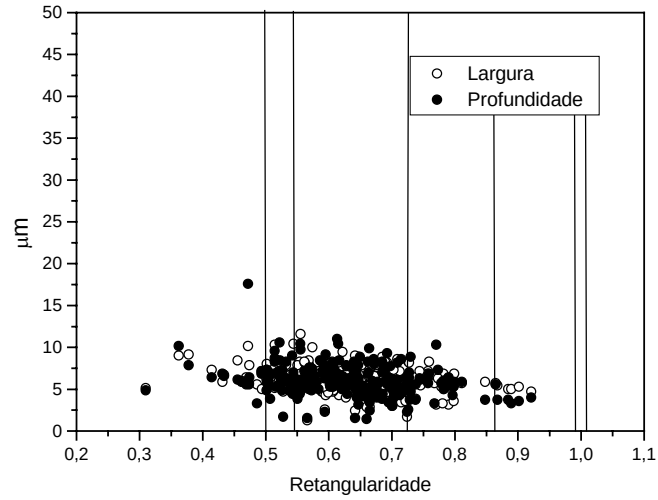
(a)



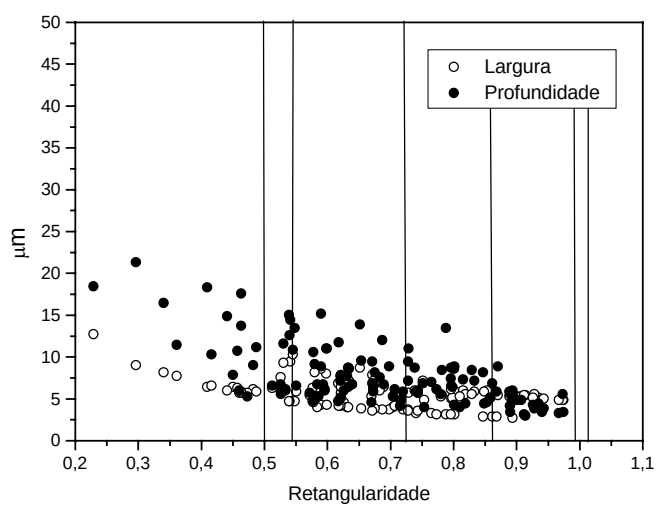
(b)



(c)

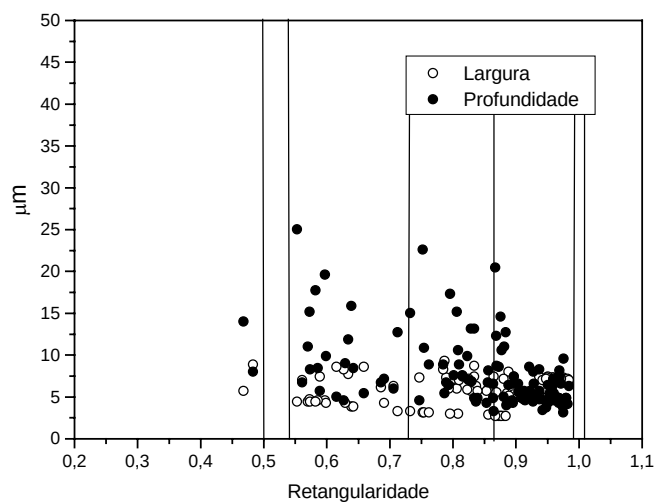


(d)

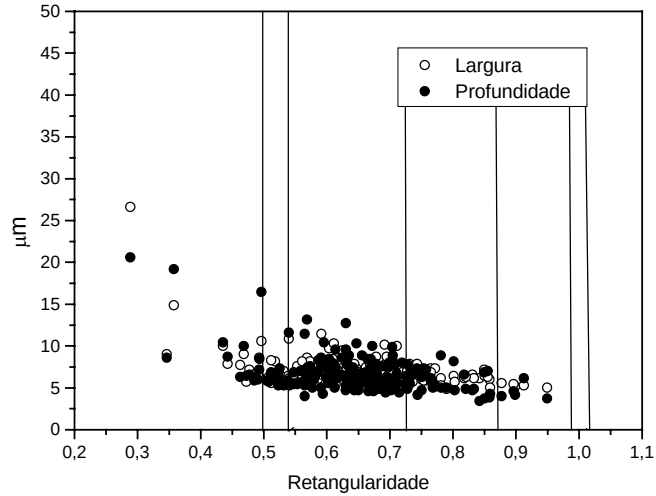


(e)

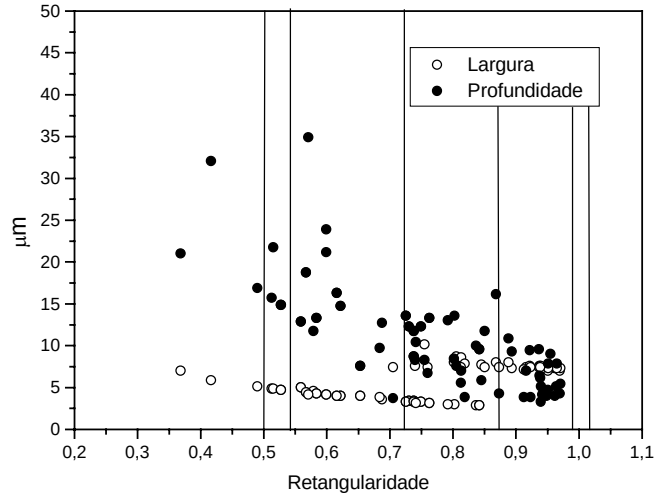
Figura 119 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h



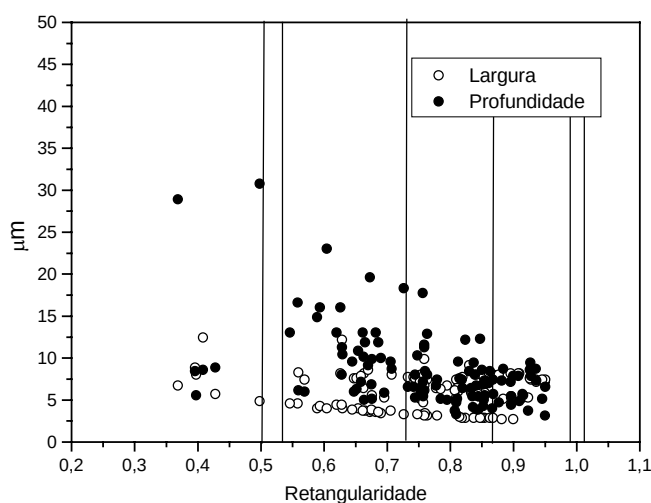
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 120 – Tamanho dos pites formados na superfície do aço inox 310S tratado a 670°C durante 5 horas e resfriada ao ar, após serem submetido a testes de corrosão via névoa salina (a) 48 h, (b) 120 h, (c) 168 h, (d) 216 h e (e) 312 h

5.14 - CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS E DIMENSIONAIS NOS AÇOS INOXIDÁVEIS TIPOS 304 E 310S TRATADOS

Neste capítulo serão avaliados os seguintes aspectos a similaridades e diferenças dos resultados obtidos quanto à distribuição, classificação e a mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites para os aços inoxidáveis austeníticos 304 e 310 S expostos em diferentes condições em névoa salina.

Em geral, os resultados mostram similaridades em relação aos aspectos geométricos quanto à cinética de crescimento dos pites, no estado como recebido. Os pites tendem a ser mais largo que profundos e crescem preferencialmente na largura, porém quando submetidos aos tratamentos térmicos os pites tendem a ser mais profundo que largos e crescem preferencialmente na profundidade nos aços inoxidáveis 304 e 310S.

A distribuição e a classificação morfológica dos pites no aço inox 304 apresenta diferenças em comparação com o aço inox 310S. A distribuição dos pites a cada tempo

de exposição tem a mesma ordem na quantidade, da forma: região de transição A> irregulares> cônicos> hemisféricos> região de transição B e não há presença de pites de forma cilíndrica em todo sistema para o aço inox 304.

O aço inox 310S o comportamento da distribuição e classificação dos pites possuem as seguintes tendências: hemisféricos> região de transição B> região de transição A> cônicos> irregulares, ou região de transição B> hemisféricos> região de transição A> cônicos> irregulares. Não há evidências de evolução temporal de pites na geometria cilíndrica.

Quanto a mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites o aço inox 310S possuir menor resistência à corrosão localizada que o aço inox 304, pois que os pites são mais profundos e largos em todas as condições do sistema. Em comparação, quando os materiais obtidos na condição como recebida são similares, os pites irregulares possuem dimensões maiores em relação aos outros e as diferenças apresentadas entre os aços são da ordem estimada de sete vezes na largura dos pites no aço inoxidável 304 para 310S.

Para o aço inox 310S, quando tratado a 670°C durante 5 horas, os pites apresentam-se mais profundos que largos e crescem preferencialmente na profundidade de forma similar ao aço inox 304, porém dez vezes maior.

As relações entre tamanho e distribuição revelam diferenças entre os aços, sendo que o aço inox 304 os pites na geometria irregulares estão em maior quantidade e mediana do tamanho maior. O aço inox 310S mostrou outra particularidade, os pites na geometria hemisféricas estão em maior presença (quantidade) no sistema, porém os pites irregulares são maiores no tamanho na largura e profundidade.

5.15 - AVALIAÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS EM AÇOS INOXIDÁVEIS 304 E 310S TRATADOS, APÓS OS TESTES DE CORROSÃO VIA NÉVOA SALINA

Os cálculos para a avaliação estatística dos parâmetros morfológicos nos materiais foram realizados a partir da determinação da mediana da largura e profundidade dos produtos em diferentes aspectos dos pites: irregulares, região de transição A, cônicos, região de transição B e cilíndricos, respectivamente. O método foi aplicado nos aços inoxidáveis 304 e 310S no estado como recebido e tratado, visando definir um modelo matemático para estimar a velocidade de corrosão em diferentes condições, conforme anexos A .

As figuras 121 a 126, mostram o comportamento da corrosão localizada, especialmente os aspectos geométricos quanto à largura e profundidade dos pites nos diferentes tratamentos térmicos e tempo de exposição sob névoa salina nos aços inoxidáveis 304 e 310S. Cada ponto representa a média ponderada (mediana) dos parâmetros de cada geometria para o mesmo tempo de exposição.

Nota-se o comportamento da corrosão localizada para os aços no estado como recebido, os pites são mais largos que profundos e a evolução temporal dos parâmetros que governa seu crescimento é preferencialmente na largura, tornando a liga com menor resistência à corrosão por pites.

Quando os materiais são tratados termicamente o comportamento dos pites apresenta mudanças em sua cinética relativas aos aspectos geométricos que envolvem o seu crescimento, os pites tendem a ser mais profundos que largos em crescer preferencialmente nessa direção, em particular no 310S.

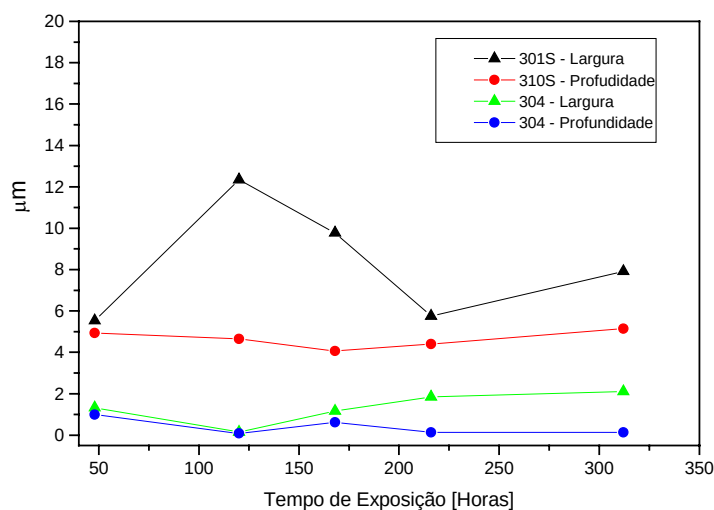


Figura 121 – Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, como recebida em função do tempo de exposição.

Observamos a correlação entre os aços inoxidáveis 304 e 310S no estado como recebido, as avaliações dos resultados revelaram os seguintes aspectos: quanto maior o tempo de exposição, maior o tamanho (mediana dos produtos) dos pites na largura e profundidade; são mais largos que profundos e crescem preferencialmente na largura.

O aço inoxidável 310S no estado como recebido, apresenta-se distribuição morfológica de pites hemisféricos em maior quantidade no sistema o que se torna mais susceptível a corrosão localizada em relação ao aço inoxidável 304 no estado como recebida, conforme a Figura 121. Em algumas situações evidenciam-se erros de amostragem nos dados obtidos, por exemplo, com a diminuição da largura ou profundidade em relação à exposição em meio corrosivo.

As análises dos parâmetros estatísticos superficiais dos pites nos aços mostraram os seguintes resultados: quanto maior tempo de exposição maior a fração corroída (%), densidade de pites ($1/\text{mm}^2$) e área média (μm^2).

Em comparação os dados obtidos pelo aço inox 304 revelaram-se mais resistente apresentando menor número, fração corroída e área média dos pites do que o aço inox 310S, conforme as Figuras 97 a 120.

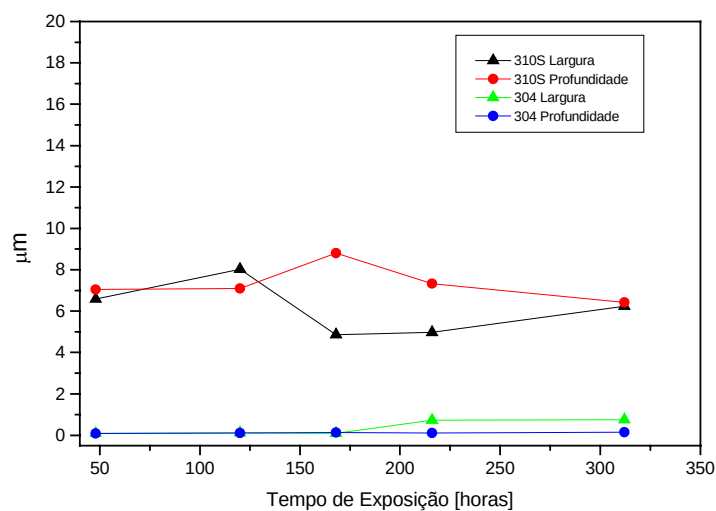


Figura 122 - Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 1065°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo em função do tempo de exposição.

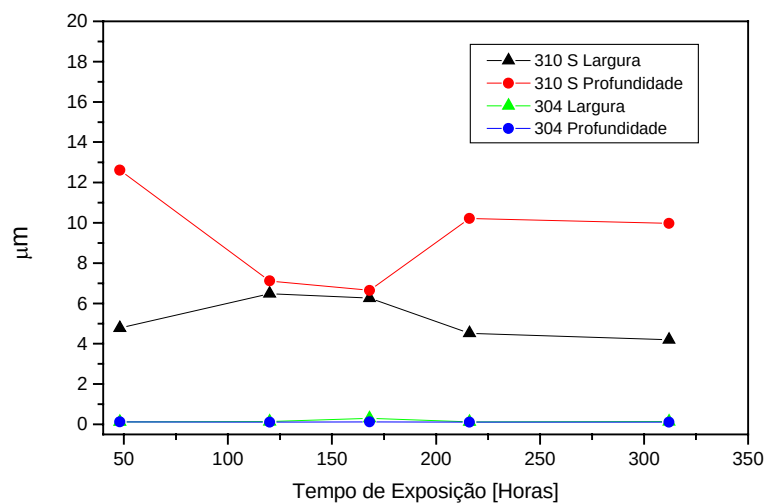


Figura 123 - Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 1065°C durante 1 hora e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.

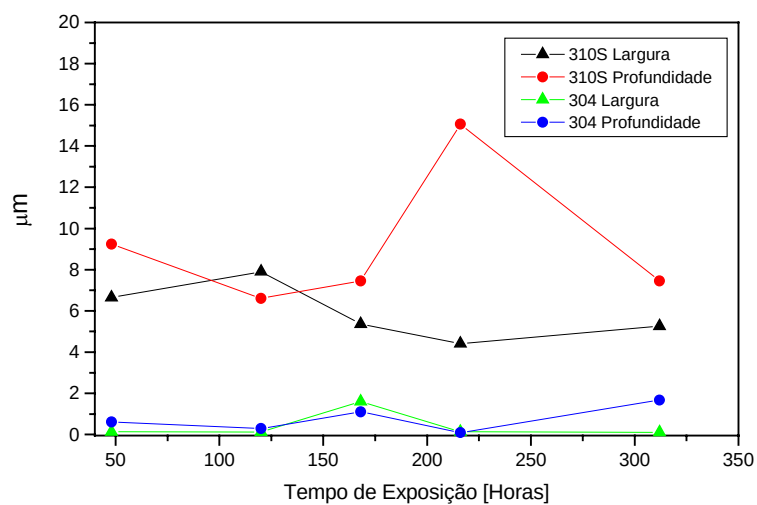


Figura 124 - Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 820°C durante 1 hora e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.

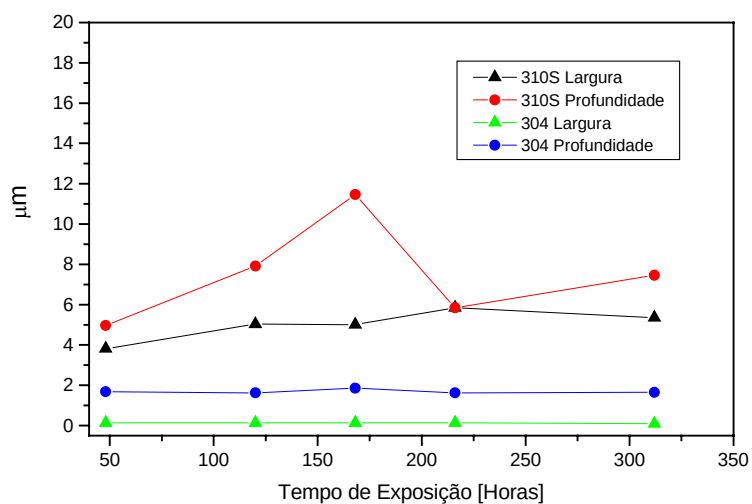


Figura 125 - Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.

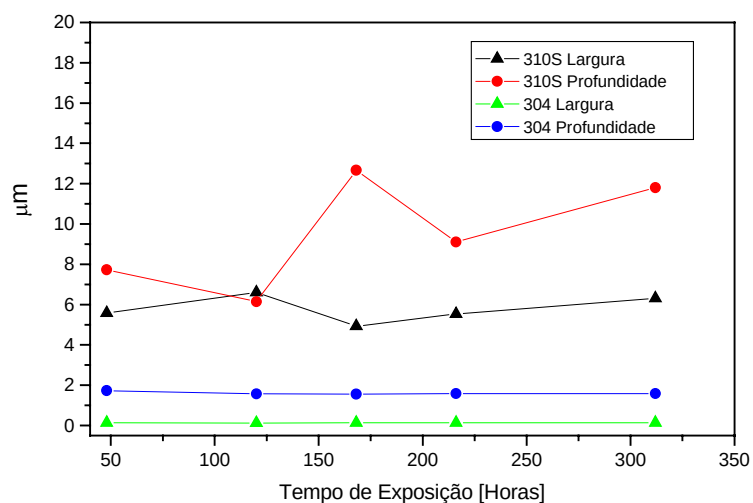


Figura 126 - Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 670°C durante 5 horas e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.

Nas figuras 122 a 126, quando o material é tratado, nota-se que a morfologia geométrica dos pites são mais largos do que profundos, crescem preferencialmente na profundidade. A condição tratada a 670°C durante 5 horas apresentou-se maiores valores no tamanho dos pites tanto na largura e profundo, correspondendo a maior susceptibilidade a corrosão por pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S.

A mediana no tamanho da largura e profundidade dos pites no aço inoxidável 310S revela que quanto maior o tempo de exposição, maior será sua dimensão ou ataque.

Dois aspectos a serem destacados:

a) No aço inox 304 no estado como recebido e tratado, a velocidade de crescimento dos pites (coeficiente angular das curvas) não muda significativamente com o tempo de exposição. Nestas condições os pites apresentam classificação e distribuição por pites irregulares e região de transição A, em maior quantidade no sistema.

b) No aço inox 310S no estado como recebido e tratado, a velocidade de crescimento dos pites, especificamente na largura e profundidade são diferentes, sendo que esta última parece ser maior e variar com o tempo de exposição.

Nestas condições os pites apresentam classificação e distribuição diferente em relação às condições em que foram submetidas aos tratamentos térmicos, condição no estado como recebido por pites hemisféricos e região de transição A, em maior quantidade, e quando tratada é evidenciado por pites na região de transição A e hemisféricos, em maior quantidade no sistema. A mediana de maior tamanho na largura e profundidade revelaram por pites irregulares, para o aço inox 304 e 310S.

Na há definição exata e coerente da morfologia dos pites no aço inox 310S, isto pode ser relacionado com as mudanças microestruturais e sua composição química com elevado teores de cromo e níquel na liga, contribuindo sensivelmente a formação dos precipitados.

A velocidade de corrosão é definida como a somatória das duas velocidades, como a fração de área corroída e o fator geométrico (tamanho - largura e profundidade) dos pites.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A metodologia experimental foi aprimorada em aços inoxidáveis austeníticos ABNT 304 e 310S com objetivo de avaliar a classificação, distribuição e os aspectos morfológicos dos pites em ligas passiváveis de diferentes composição e tratamento térmico.

As ligas após os tratamentos térmicos de sensitização apresentaram a formação de carbeto de cromo no interior e contornos dos grãos, especificamente o aço inoxidável 310S mostrou-se em maior quantidade e microestrutura mais grosseira, contribuindo para o aumento da corrosão por pites, conforme os dados obtidos na análise superficial e dos perfis.

Após os ensaios de corrosão em diferentes condições sob névoa salina foi observada que a razão de aspecto dos pites para os aços inoxidáveis 304 e 310S no estado como recebido e tratados, corresponde a geometria circular.

O aço inox 304 quando tratado na faixa 620°C durante 24 horas, para a caracterização superficial dos pites, obteve-se maior fração corroída e valores de área média, provavelmente devido aos pares galvânicos entre a alta densidade de precipitados de carbeto de cromo na interface da matriz e os contornos dos grãos.

Após o tratamento térmico a 820 °C durante 1 hora, observam-se menor densidade de pites e fração corroída, associando a microestrutura com características de maclas e grãos deformados.

Na análise dos perfis dos pites no aço inoxidável 304 como recebido apresentou-se a seguinte distribuição morfológica: irregular > região de transição A > cônicos > hemisféricos > região de transição B, sendo que irregulares e região de transição A em maiores quantidades no sistema. Os pites são mais largos que profundos, crescem preferencialmente na largura.

Quando a liga é tratada, a cada tempo de exposição apresenta mesma ordem na quantidade de pites: região de transição A > irregular > cônicos > hemisféricos > região de transição B, sendo que os pites na região de transição A e irregulares são presentes em maior quantidades no sistema. Os pites são mais profundos que largos e crescem preferencialmente na profundidade. Os pites cilíndricos não foram observados.

As mudanças na distribuição e classificação dos pites no aço inox 304, provavelmente é devido aos aspectos microestruturais que na condição como recebido, encontra-se associados com a presença dos contornos e as interfaces das maclas. Na condição tratada, associam-se os pites com as regiões ricas em carbeto de cromo, tornando a liga mais susceptível a corrosão por pites.

A liga quando tratada a 620° durante 24 horas mostrou-se menos resistente a corrosão por pites, caracterizado pelo caráter dos precipitados de carbeto de cromo sobre a microestrutura local.

O aço inox 310S apresentou maiores valores e mesma tendência relativa dos parâmetros estatísticos dos pites, porém a liga mostrou-se menor resistência a corrosão localizada que o aço inoxidável 304, aparentemente pela diferença na microestrutura e composição química.

Na análise superficial no aço inoxidável 310S como recebido exibiu-se a seguinte ordem na morfologia dos pites: hemisféricos > região de transição A > região de transição B > irregulares > cônicos, sendo que os pites são presentes em maiores quantidades em hemisféricos e na região de transição A. Os pites são mais largos que profundos, crescem preferencialmente na largura. Os pites cilíndricos não foram observados no sistema.

Quando a liga é tratada, a cada tempo de exposição apresenta mesma ordem na quantidade de pites: região de transição B > hemisféricos > região de transição A > cônicos > irregulares, particularmente os pites são mais profundos que largos.

As mudanças significativas na distribuição morfológica e no tamanho dos pites no aço inoxidável 310S quando tratados, encontra-se correlacionado ao papel dos precipitados de carbeto de cromo, especificamente na quantidade e morfologia.

Através da mediana do tamanho da largura e profundidade dos pites revelou-se a seguinte ordem: irregulares > cônicos > região de transição A > hemisféricos > região de transição B.

No aço inox 304 no estado como recebido e tratado, cinética que governa o crescimento dos pites (coeficiente angular das curvas) não altera significativamente com o tempo de exposição caracterizando maior resistência a corrosão por pites.

No aço inox 310S no estado como recebido e tratado, a velocidade de crescimento dos pites, especificamente na largura e profundidade são diferentes, sendo que a última parece ser maior e variar com o tempo de exposição, portanto, mostrando os altos valores nos pites irregulares e pela distribuição em grandes quantidades de pites na região de transição A e B, ora quase cônico e hemisférico.

CAPÍTULO 7

PROPOSTA PARA TRABALHO FUTUROS

1 - Aprimoramento da técnica no que se refere à avaliação estatística dos parâmetros cinéticos;

2 – Aplicação da técnica a outros tipos de corrosão localizada;

3 – Correlacionar as geometrias e o tamanho dos precipitados e de partículas intermetálicas com as geometrias e tamanho dos pites.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

ANDRADE, S.R.; PERALTA, J.L., SANTOS, R.G.; Comparação de resultados teóricos e experimentais do processo de solidificação do aço inoxidável AISI 304. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais – XVI – CBECIMAT. Natal. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G 31 -72:Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G 46:Evaluation of pitting corrosion, Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B 117: Standard practice for operation Salt Spray (fog) apparatus, Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 1382: Standard test methods for determining average grain size using semiautomotive image analysis, Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A 480/480M: Standard Specification for General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting, Philadelphia, 1997.

AROLA, D.; WILLIAMS, C.L., Estimating the Fatigue Stress Concentration Factor of Machine Surfaces, International Journal of Fatigue, 24, 2002, 923-930p.

AZUMA, S.; MIYUKI, H.; KUDO, T.; Effect of Alloying nitrogen on crevice corrosion of austenitic stainless steels, ISIJ International, v.36, n.7, 1996,p.793-798.

BASTOS, N. I.; ANDRADE, M.C.; NOGUEIRA, R.P.; PONCIANO, J.A.C.; Flutuações de corrente em corrosão sob tensão de um aço inoxidável austenítico em meios ácidos, CD-XIV CBECIMAT, 2000.

BELEJCHAK, P.; Machining Stainless Steel, Advanced Materials & Process, vol 12, 1997.

BROWN, B.F. In Theory of Stress Corrosion Cracking of Alloys; Ed. J.C. Scully, NATO, Brussels, 187, 1971.

BRESLIN, C.B.; MACDONALD, D.D.; SIKORA,E.; SIKOLA,J.; Photo-inhibition of pitting on types 304 and 316 stainless steels in chloride containing solution. Electrochimica Acta. V.42, 1997.p. 137-144.

BRUCE, E. DUNHAM, Salt spray: Are you comparing Apples to Oranges? Testing and Control. Metal finish. 1999. p16-19.

BRUNO, E.P.; SANTOS, J.C.; RIBEIRO, R.B.; SILVA, M.B.; Aplicação do Método Estatístico de Taguchi no Processo de Usinagem em Aços 1045, CD - XV CBECIMAT, 2002.

BRUEMMER, J.; BOAH, J.K.; HANSEN, D.A.; Statistical modeling of corrosion pitting and pipeline reliability. Corrosion Science. 1990.v.46.p190-196.

CARDOSO, R.J.C.; MACHADO, A.T.; Estudos de causas de falhas em serviço de tubulação de aço inoxidável AISI 304 de alta pressão. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais – XVI - CBECIMAT. 2002. Natal

CALLISTER JUNIOR, W. D.; Introdução à Engenharia e Ciências dos Materiais, Edição nº 05, Editora New York: John Wiley & Sons, 2002. p. 819.

CHENG, Y.F; WILMOTT, M.; LUO, J.L; The role of chloride ions in pitting of carbon steel studied analysis of electrochemical noise. Applied Surface Science. v.152. 1999. p.161-168.

CODARO, E.N.; NAKAZATO, R.Z.; HOROVISTIZ, A.L.; RIBEIRO, L.M.F.; RIBEIRO, R.B.; HEIN, L.R. DE O.; An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation. Material Science and Engineering A, 334, (1-2) 298, (2002)

CODARO, E.N.; NAKAZATO, R.Z.; HOROVISTIZ, A.L.; RIBEIRO, L.M.F.; RIBEIRO, R.B.; HEIN, L.R. DE O.; An image analysis of pit formation on Ti-6Al-4V. Material Science and Engineering A, 341, p.1-2202, (2003)

COSTA, L.F.; CESAR JUNIOR, R.M., Shape analysis and classification: theory and practice, CRC PRESS, 680p. – 2000.

CUNHA, E. A.; RIBEIRO, M.V. Influência da Velocidade de Corte na Rugosidade em Usinagem de Ligas de Alumínio, II - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2002.

DUTRA, C.A.M.; Estudo da corrosão das ligas Al 2024 e Al 7050 em soluções de NaCl contendo nitrato e nitrito, Tese de mestrado, 2002, 143p., Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica – Projetos e materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, UNESP – Guaratinguetá, 2002.

DUNHAM, B.E.; Salt Spray: Are you Comparing Apples to Orange?, Metal Finishing, 1999, 16-20p.

DANACHIE, M.J.J; Heat Treating Titanium and its Alloys; Heat Treating Progress, 2001.

ERNEST, P.; N.J., LAYCOCK; M.H. MOAYED; NEWMAN, R.C.; The Mechanism of Lacy Cover Formation in Pitting; Corrosion Science, vol. 39, 1997, 1133-1136p..

FOLEY, R.T.; Localized corrosion of aluminum alloy – A, Review. Corrosion, Houston, v.42, n. 5, p.227-288, 1986.

FRANKEL; G.S.; Pitting Corrosion of Metals; Review of the Critical Factors, J. Electrochemical Society, vol.145, n.6, 1998.

GALVELE, J.R.; DEDEMICHELI, S.M.; Mechanism of intergranular corrosion of Al-Cu alloys. Corrosion Science, Oxford, v. 10, n. 11, p. 795-807, Nov. 1970.

GENTIL, V.; Corrosão, 3 ed., Rio de Janeiro: Guanabara S.A., 1996, 345p..

GODARD, P; Can. Journal of Chemical Engineering, v.167, n.21,p.104,1960.

GUILLAUMIN, G.; GUERIAU, J.; Quantitative measurements and Shape characterization of pits with na image analyser. Proceddings of the international metallography conference – MC 95.ASM Colmar. França, 1995.p. 59-64.

GUIMARÃES; W.A.; Influência da microestrutura sobre as propriedades mecânicas e resistência a corrosão de um aço inoxidável ISO 5832-9 – utilizando na fabricação de implantes ortopédicos; tese de doutorado; Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, 2002.

GUIMARÃES; W.A.; Controle Dimensional e Geométrico: Uma Introdução à Metrologia Industrial, Universidade de Passo Fundo, EDIUPF, 1999, 161p..

HAN, Z; ZHAO, H; CHEN,X.F.; LIN, H.C.; Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V alloy Welded by Scanning Electron Beam; Materials Science and Engineering A, vol. 277, 2000, 18-45.

HERTZBERG, R.W.; Deformation and fracture mechanism of engineering materials. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.786p.

HONEYCOMBE, R.W.K.; Steel – Microstructure and properties. London: Edward Arnolds publishers. 1984.p.513-518.

HUNKELER, F.; BOEHNI, H. Determination of pit growth rates on aluminum using a metal foil technique. Corrosion, Houston, v. 37, n. 11, p. 645, Nov. 1981.

KANE, R.D.; Super ' Stain, Advanced Materials & Process, vol. 7, 1993.

KAYAFAS, I; Corrosion product Removal from Steel Fracture surface fo Metallographic Examination, vol. 36, n8, NACE, 1980.

KRISHNAN; K. S.; KUMAR, V.J.; Pitting Corrosion and Fadigue Behavior of Aluminum 7050-T6, Advanced Materials & process, 2000, 53-54p.

ISO 11463; Corrosion of Metals and Alloy; Evaluation of Pitting Corrosion, 1995, 1-10 p.

JAYALAKSHMI, M.; MURALIDHARAM; Empirical and deterministic models of pitting corrosion – an overview, vol 14, 1996.

JONES, MACHADO, I.F.; Transformações de fase no estado sólido em alguns aços inoxidáveis e ferríticos-austeníticos (dúplex) contendo altos teores de nitrogênio. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado, 1999.176p.

MARTÍNEZ, G.A.S.; Otimização da Velocidade de Trefilação do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304; Dissertação de Mestrado; Campinas; Faculdade de Engenharia Mecânica; Universidade Estadual Paulista, 1993.

MOUTARLIER, V; GIGANDET, M.P.; PAGETTI, J; Characterization of pitting corrosion in sealed anodic films formed in sulphuric, sulphuric/molybdate and chromic media. Applied Surface Science, v. 206, 2003.p.237-249.

MURR, L.E.; ADVANI, A.; ATTERIDGE, D.G.; Effects of deformation (strain) and heat treatment on grain boundary sensitization and precipitation in austenitic stainless steels. Materials Characterization, v.24, 1990.p.135-138.

NAKAZATO, R.Z.; CODARO, E.N.; RIBEIRO, L.M.F. HEIN, L.R. de O..Qualitative and Quantitative Characterization of Aluminum Alloys After Corrosion Testing, Praktische Metallographie – Practical Metallography, Munich, v. 38, n. 6, p. 301-313, 2001.

NAKAZATO, R.Z.; CODARO, E.N.; RIBEIRO, L.M.F. HEIN, L.R. de O..A Metallurgical Study of Aluminum Alloys used as Aircraft Components, Praktische Metallographie – Practical Metallography, Munich, v. 38, n. 2, p. 73-87, 2001.

NEWMAN, R. C.; FRANZ E. M.; Growth and Repassivation of Single Corrosion Pits in Stainless Steel, NACE, vol. 40, 1984.

OLIVEIRA, J.C; CAVALEIRO, A.; BRETT, M.A.C; Influence of sputtering condition on corrosion of sputted W-Ti-N thin film hard coatings: salt spray tests and image analysis. Corrosion Science. V.42.2000.p.1881-1895.

PADILHA, A. F; GUEDES, L.C.; Aços inoxidáveis austeníticos, Microestrutura e Propriedades, São Paulo, Editora Hemus, Universidade de São Paulo, 1994.

PANOSSIAN, Z. Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas. São Paulo: Instituto de Pesquisas tecnológicas, v.1, 280 p., 1993.

PERES, P. M., Estudo do Efeito do Tempo e da temperatura de Desidrogenação na Resistência à Fadiga do aço ABNT 4340 que sofreu Eletrodeposição de Cádmio, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL, 1996. 157p.

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E.N.; HEIN, L.R. DE O.; Estudo das Características Morfológicas dos Pites nos Materiais Resistentes à Corrosão, Congresso Anual da ABM, 2002.

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E.N.; NAKAZATO, R.Z.; HOROVITZ, A.L.; RIBEIRO, L.M.F. e HEIN, L.R.de O., Evaluation of Pitting Morphology of Ti-6Al-4V after Corrosion Testing, 2001, XVIII Congresso da Sociedade Brasileira de Microscopia e Microanálise, pp.135-136.

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E.N e L.R.de O; Estudo da morfologia superficial dos pites no aço inox AISI 304 tratado termicamente após os ensaios de corrosão, Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais – CBECIMAT, Natal – R.N, CD-ROM, 2002.

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E.N e L.R.de O; Pitting morphology analysis of AISI 304 Stainless Steel After Corrosion Testing by Salt Spray, Anais do Congresso da sociedade Brasileira de Microscopia e Microanálise – MICROMAT, Curitiba – P.R., CD-ROM, 2002.

RIBEIRO, R.B.; Influência da Condições do Ataque Químico para Revelação Metalográfica sobre a Investigação Quantitativa por Sistemas de Processamento Digital e Análise de Imagens, 1999, Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica – Projetos e materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, UNESP – Guaratinguetá, 1999.

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E. N.; HEIN, L.R. de O.; Evaluation of Pitting Morphology of Ti-6Al-4V after corrosion Testing, XVIII CSBMM, 2001, 135-136p..

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E. N.; HEIN, L.R. de O.; ROSA, J.L.; Pitting Morphology Analysis of AISI 304 Stainless Steel After Corrosion Testing by Salt Spray, VIII Micromat, 2002.

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E. N.; HEIN, L.R. de O.; Estudo das características morfológicas dos pites nos materiais resistentes a corrosão por pites, 58º Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2003.

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E. N.; HEIN, L.R. de O.; Study of Pitting Morphological Characteristics for Heat Treated AISI 304 Stainless Steel, XIX CSBMM, 2003.

RIBEIRO, R.B.; CODARO, E. N.; HEIN, L.R. de O; Morphological analysis of pitting in ABNT 310S stainless steel after corrosion testing – Salt Spray, III Encontro da Sociedade Brasileira para Pesquisa de Materiais – SBPMat – Foz do Iguaçu - 2004.

RUSS, J.C. The Image Processing Handbook, 3rd. Ed., Boca Raton: CRC PRESS,1998, 771p.

SCHTZ, E.; BERGER, F.; BARILLON, R.; AUDEBERT, P.; CHAMBAUDET, A.; Behaviour of painted mirrors during exposure tests to salt spray. Applied Surface Science. V. 120, 1997. p. 106-118.

SILVA, J.W.J., Efeito dos Oxions-Anions do grupo VIB sobre a Corrosão Aquosa das Ligas AL-2024 e Al 7050 utilizadas na Indústria Aeronáutica; Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica – Projetos e materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, UNESP – Guaratinguetá, 2003, 119p.

SILVA, J.W.J.; BUSTAMENTE, A.G.; CODARO E.N.; NAKAZATO, R.Z.; HEIN, L.R. O.;Morphological analysis of pits formed on Al 2024-T3 in Chloride aqueous solution. Applied Surface Science, IN PRESS, 2004.

SPAHN, H.; Performance Requirements for Stainless Steels In the Chemical process Industry, In Stailless Steel’77, R.Q. Barr, London, 1977.

SZKLARSKA-SMIALOWSKA, Z.; Insight into the pitting corrosion behavior of aluminum alloys. Corrosion Science, Oxford, v. 33, n. 8, p. 1193-1202, Ago. 1992.

SZLARSKA-SMIALOWSKA, Z. Pitting Corrosion of Metals. In NACE, 1986, p.281.

SZLARSKA-SMIALOWSKA, Z. Pitting Corrosion of Aluminum. Corroison Science, v.41, n9, p1743-1767, 1999.

SZLARSKA-SMIALOWSKA, S.; CRAGNOLINO, G.; Stress corrosion cracking of sensitized type 304 stainless steel in oxygenated pure water at elevated temperature (Review). Corrosion Science. 1980.p.653-663.

OLIVEIRA, J.C; CAVALEIRO, A.; BRETT,C.M.A.; Influence Of Sputtering Condition On Corrosion Of W-Ti-N Thin Film Hard Coatings: Salt Salt tests and Image Analysis, Corrosion Science, vol. 42, 2000, 1881-1895p.

SAE – AMS 4911H; Titanium Alloy, Sheet, Strip and Plate, 6V-4V, Annealed, SAE International, USA, 1995.

SHREIR, L.L.; Corrosion science Control; Newnes-Butterwords, 2rd. Ed., London, UK, 1978.

TALBOT. D, TALBOT, J; Corrosion Science and Technology, London, CRC, 1998.

TSAI, T.W.; HUANG,K.E.; Microstructural aspect and oxidation resistance of an aluminide coating on 310S stainless steel. Thin solid films. V. 366.2000.p.164-168.

UHLIG, H.H.; Corrosion and Corrosion Control; New York; John Willey & Sons, 1967

ZAVAGLIA, C.A.C.; Aplicações de biocerâmicas em próteses ortopédicas. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Tese (Livre Docência), 1993.116p.

WOJNAR, J.; Image Analysis of Materials: Application in materials engineering. CRC Press. Boca Raton.1999.p.245.

ANEXOS A

SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE CRECIMENTO DOS PITES

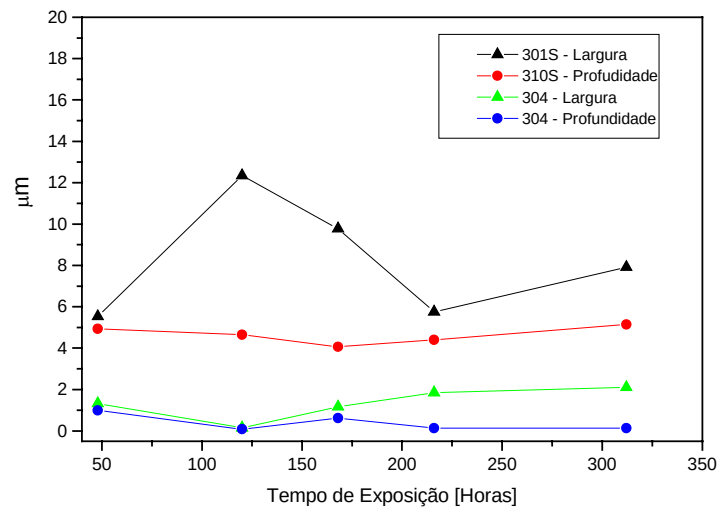
A simulação das curvas para avaliação do crescimento e a determinação de um modelo descritivo aplicando a regressão linear é mostrada pela equação $Y=A + B* X$. A proposta tem como objetivo estimar a profundidade dos pites [mm], entretanto representado pelas figuras abaixo.

A equação proposta para calcular à estimativa da profundidade dos pites [mm] corresponde: $Y = A + B * X$.

A = Coeficiente linear

B = Coeficiente angular

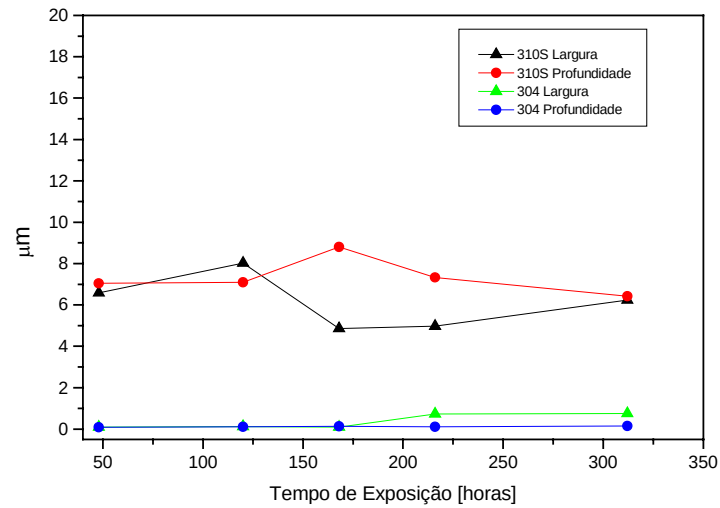
X = Constante



Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, como recebida em função do tempo de exposição.

$$Y = A + B * X$$

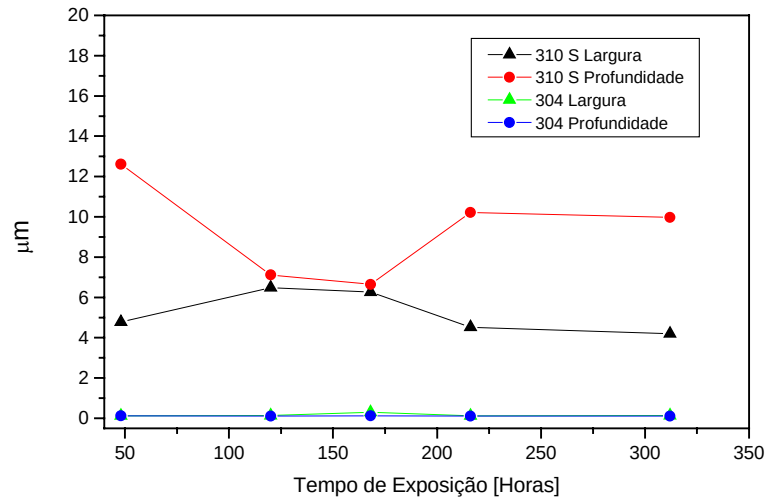
Parâmetros	Valores	Erro
A	0,47	0,6511
B	0,0049	0,00335



Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 1065°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo em função do tempo de exposição.

$$Y = A + B * X$$

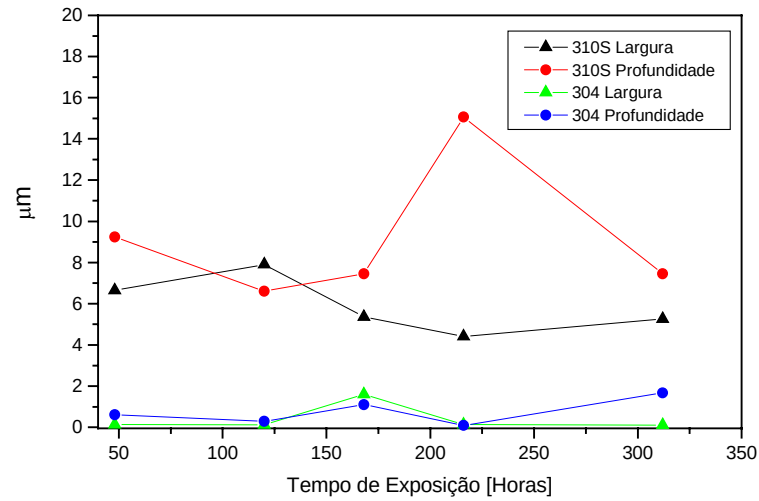
Parâmetros	Valores	Erro
A	-0,1486	0,2098
B	0,00294	0,00108



Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 1065°C durante 1 hora e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.

$$Y = A + B * X$$

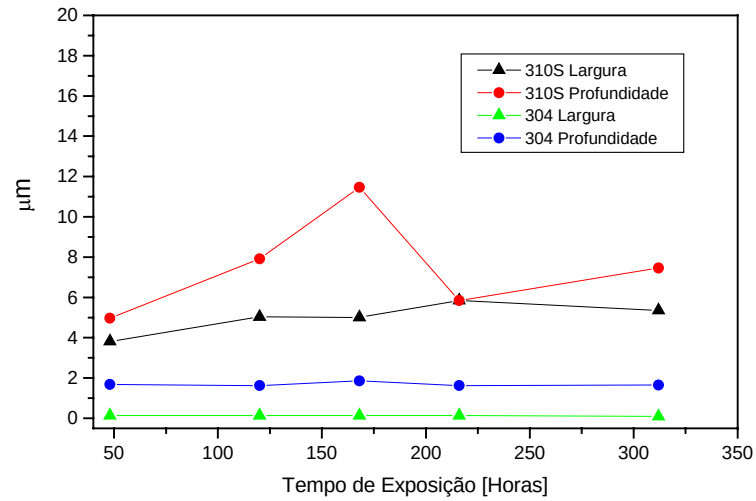
Parâmetros	Valores	Erro
A	0,16	0,08842
B	4,48249E-20	4,54885E-4



Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 820°C durante 1 hora e resfriada em água e gelo em função do tempo de exposição.

$$Y = A + B * X$$

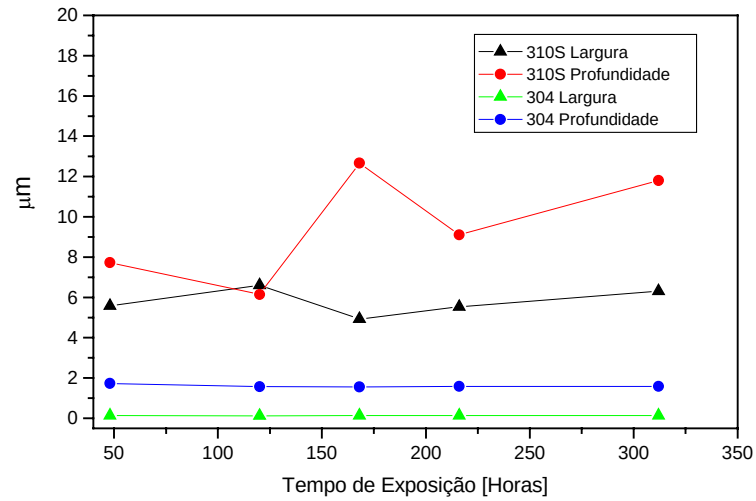
Parâmetros	Valores	Erro
A	0,46826	0,74831
B	-2,67684E-4	0,00385



Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 620°C durante 24 horas e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.

$$Y = A + B * X$$

Parâmetros	Valores	Erro
A	0,14233	0,01342
B	-9,44767E-5	6,90159E-5



Avaliação dos parâmetros geométricos dos pites nos aços inoxidáveis 304 e 310S, tratados a 670°C durante 5 horas e resfriada ao ar em função do tempo de exposição.

$$Y = A + B * X$$

Parâmetros	Valores	Erro
A	0,12174	0,00668
B	5,93508E-5	3,43659E-5