



ASPECTOS DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE DE AÇO SUPER DUPLEX PARA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS ORGÂNICOS ANTICORROSIVOS

Áquila Vieira do Nascimento

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadora: Isabel Cristina Pereira Margarit
Mattos.

Rio de Janeiro
Agosto de 2012

ASPECTOS DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE DE AÇO SUPER DUPLEX
PARA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS ORGÂNICOS ANTICORROSIVOS

Áquila Vieira do Nascimento

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof^ª. Isabel Cristina Pereira Margarit Mattos, D.Sc.

Prof^ª. Renata Antoun Simão, D.Sc.

Prof^ª. Idalina Vieira Aoki, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2012

Nascimento, Áquila Vieira do

Aspectos do tratamento de superfície de aço super duplex para aplicação de revestimentos orgânicos anticorrosivos / Áquila Vieira do Nascimento. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XX, 121 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Isabel Cristina Pereira Margarit Mattos

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 110-119.

1. Revestimentos orgânicos. 2. Tratamento de superfície. 3. Aço Super Duplex UNS S32760. 4. Jateamento abrasivo. 5. Revestimentos orgânicos. 6. Corrosão. I. Mattos, Isabel Cristina Pereira Margarit. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

*À Jesus Cristo, o meu **MESTRE!***

*Aos meus valiosos pais,
dedico este trabalho com muito amor
e carinho, **Josué Degenário do
Nascimento e Tânia Vieira do
Nascimento.***

Agradeço por estarem sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, onipresente, onipotente e onisciente, por me capacitar e estar sempre ao meu lado em todos os momentos de minha vida.

À minha amada e grande família, pelos momentos de alegria, por acreditarem na minha capacidade e pela compreensão da minha ausência na busca de meus objetivos, em especial, aos meus pais Tânia Vieira do Nascimento, e Josué Degenário do Nascimento, aos meus seis irmãos, Pedro Filipe Vieira do Nascimento, Gilda Carolina Vieira do Nascimento, Ana Beatriz Vieira de Jesus, Elisa Miriam Vieira do Jesus, Calebe Carias da Silva Degenário e Gabriel Carias da Silva Degenário. A todos vocês tenho um enorme sentimento de gratidão.

Aos professores Oscar Rosa Mattos e Isabel Cristina Pereira Margarit Mattos pela oportunidade de realizar este trabalho, pelo aprendizado e orientação.

Um agradecimento especial a minha namorada Estefany Sales Oliveira pelas palavras de incentivo, carinho e compreensão nos momentos de dificuldade, que por sinal não foram poucos, sobretudo pela maturidade de lidar com estas situações e entender as inúmeras razões de minha ausência na busca dos meus objetivos.

Aos meus amigos de todas as horas: Agmar José da Silva, Fabrício Gardingo Abreu, Rodrigo Roberto Alves Garcia, Flávio Vieira Vasques, Davi Vaz de Andrade Ferreira, Rafael da Silva Gama, Francisco Antônio da Rocha Agura e Pedro Müri, agradeço pelos momentos de descontração, pelas informações compartilhadas, pelas horas de estudo e por participarem desta importante etapa em minha vida!

Aos meus amigos conterrâneos Carlos Petter Bomfá, Rafael Passos Rosa Cunha, Tiago Nunes Santana, Filipe Demuner da Silva, Estevão Frigini Mai, Leonardo Nunes e Edmar Seleguini, agradeço pelo incentivo e pelos belos momentos de descontração.

Aos professores Luís Marcelo Marques Tavares e Renata Antoun Simão pelos esclarecimentos e pelo acesso aos seus laboratórios para desenvolvimento da parte experimental. Um agradecimento especial à Maria da Glória Marcondes Rodrigues do Laboratório de Geotecnia (LABGEO) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ pelo apoio e grande contribuição na parte experimental.

Ao corpo de técnicos e engenheiros do Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos, Corrosão e Soldagem – LNDC da COPPE/UFRJ, que colaboraram muito para a realização deste trabalho, em especial, a Susana Ines Losada Díaz, o Toseli de Farias Matos, pelo comprometimento e importantes informações compartilhadas; e a Ediléia Mendes de Andrade Silva, Vicente Simen Junior, ao Cleison Francisco Camelo Nascimento, Adriana da Cunha Rocha, Kioshy Santos de Assis, Walter Andrade de Souza e Fellipe Araújo dos Reis que tiveram uma participação fundamental neste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram na realização deste trabalho.

À Capes e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Muito Obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ASPECTOS DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE DE AÇO SUPER DUPLEX PARA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS ORGÂNICOS ANTICORROSIVOS

Áquila Vieira do Nascimento

Agosto/2012

Orientador: Isabel Cristina Pereira Margarit Mattos

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

São avaliados aspectos do jateamento abrasivo de aço super duplex comparativamente ao aço carbono. O desempenho de quatro abrasivos comerciais foi avaliado quanto à eficiência na abertura do perfil de rugosidade e consequências de incrustações sobre o desempenho de revestimento orgânico aplicado após jateamento. O trabalho foi dividido em três etapas: i) caracterização físico-química dos abrasivos; ii) análises das alterações nas superfícies promovidas pelo processo de jateamento e iii) ensaios de corrosão com amostras revestidas a fim de avaliar a influência dos diferentes tratamentos superficiais no desempenho do revestimento. A caracterização das superfícies incluiu medidas do perfil de rugosidade, dureza, presença de incrustações, sais solúveis, pH de extratos aquosos, energia de superfície e velocidade de corrosão por perda de massa. Resultados mostram que, a alumina desmagnetizada apresentou a mais alta fragmentação, resultando em baixos perfis de rugosidade. Além disso, gerou alcalinização das superfícies, prejudicando a aderência do revestimento nos dois substratos e ativando corrosão no aço carbono. As granalhas metálicas ativaram corrosão no aço super duplex, prejudicando também o desempenho do revestimento. Com a granalha de aço inox esse aspecto foi agravado pelas baixas energias de superfície. O abrasivo que resultou em melhor desempenho foi a bauxita sinterizada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ASPECTS OF SURFACE TREATMENT OF SUPER DUPLEX STAINLESS STEEL
FOR APPLYING ANTICORROSIVES ORGANIC COATINGS

Áquila Vieira do Nascimento

August/2012

Advisor: Isabel Cristina Pereira Margarit Mattos

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Aspects of super duplex steel abrasive blasting are evaluated in comparison with carbon steel. The performance of four commercial abrasive was characterized on the opening of roughness profile and fouling effect on the performance of organic coating applied after blasting. The work was divided into three steps: i) physico-chemical characterization of abrasives; ii) analysis of changes in surface promoted by the blasting process and iii) corrosion tests with coated samples to assess the influence of different surface treatments on coating performance. The characterization included measurements of the surface roughness profile, hardness, the presence of fouling, soluble salts, pH of aqueous extracts, surface energy and corrosion rate by weight loss. Results show that the demagnetized alumina had the highest fragmentation leading to lower roughness profiles. Moreover, alkalization of the generated surfaces impaired the coating adhesion on both substrates and activated corrosion on carbon steel. The metallic abrasives activated corrosion of the super duplex steel, damaging also the performance of the coating. With stainless steel abrasive, this aspect was aggravated by the low surface energies. The abrasive resulting in better performance was sintered bauxite.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS.....	XVIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
1.1 AÇO CARBONO	2
2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX.....	3
2.3 PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES.....	5
2.3.1 <i>Limpeza</i>	5
2.3.2 <i>Inspeção</i>	7
2.3.3 <i>Limpeza química</i>	7
2.3.4 <i>Limpeza mecânica</i>	8
2.4 JATEAMENTO ABRASIVO	9
2.4.1 <i>Tipos de abrasivos</i>	13
2.4.2 <i>Texturização da superfície</i>	17
2.5 PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIES	33
2.5.1 <i>Ângulo de contato e energia de superfície</i>	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ABRASIVOS	37
3.1.1 <i>Densidade</i>	37
3.1.2 <i>Dureza</i>	38
3.1.3 <i>Condutividade e pH do extrato aquoso</i>	38
3.1.4 <i>Composição</i>	38
3.1.5 <i>Distribuição granulométrica</i>	39
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES JATEADAS.....	40

3.2.1	<i>Jateamento abrasivo</i>	40
3.3	ANÁLISES NO SUBSTRATO	43
3.3.1	<i>Perfil de rugosidade</i>	43
3.3.2	<i>Difração de raios-X (DRX)</i>	44
3.3.3	<i>Análise de condutividade e pH de extrato aquosos</i>	44
3.3.4	<i>Dureza do substrato</i>	45
3.3.5	<i>Ângulo de contato e energia de superfície</i>	45
3.3.6	<i>Perda de massa e suscetibilidade à corrosão por pite</i>	47
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE REVESTIMENTO ORGÂNICO	48
3.4.1	<i>Preparação das amostras</i>	48
3.4.2	<i>Ensaio de corrosão</i>	49
3.4.2.1	<i>Ensaio de Imersão</i>	49
3.4.2.2	<i>Ensaio cíclico</i>	50
3.5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	52
3.5.1	<i>Grau de empolamento</i>	52
3.5.2	<i>Corrosão no substrato</i>	53
3.5.3	<i>Avanço à partir do risco</i>	55
3.5.4	<i>Ensaio de aderência</i>	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ABRASIVOS	57
4.1.1	<i>Densidade aparente</i>	57
4.1.2	<i>Microdureza</i>	57
4.1.3	<i>Condutividade e pH do extrato aquoso</i>	60
4.1.4	<i>Difração de raios-X (DRX)</i>	61
4.1.5	<i>Distribuição granulométrica</i>	64
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES JATEADAS	65

4.2.1	<i>Influência do tempo de jateamento</i>	65
4.3	ANÁLISES NO SUBSTRATO	71
4.3.1	<i>Difração de raios-X (DRX)</i>	71
4.3.2	<i>Análise de sais solúveis, condutividade e pH interfacial</i>	77
4.3.3	<i>Dureza do substrato</i>	79
4.3.4	<i>Ângulo de contato e energia de superfície</i>	80
4.3.5	<i>Ângulo de contato e cinética de molhabilidade com a tinta</i>	83
4.3.6	<i>Medida de velocidade de corrosão e suscetibilidade à corrosão por pite</i>	84
4.4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE AMOSTRAS REVESTIDAS	88
4.4.1	<i>Grau de empolamento</i>	89
4.4.2	<i>Avanço de corrosão à partir do risco</i>	91
4.4.3	<i>Medidas de aderência</i>	100
5	CONCLUSÃO	106
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
7	ANEXO A	120

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 MICROGRAFIA DAS PRINCIPAIS MICROESTRUTURAS DO AÇO CARBONO. (A) FERRITA, (B) CEMENTITA E (C) PERLITA.....	3
FIGURA 2 COMPONENTES IMPORTANTES NUM JATEAMENTO ABRASIVO.....	11
FIGURA 3 MÁQUINAS DE JATEAMENTO: (A) TIPO PRESSÃO E (B) TIPO SUCCÃO.....	11
FIGURA 4 CLASSIFICAÇÃO DOS PADRÕES DE LIMPEZA DE ACORDO COM A NORMA SUECA SIS 05 59 00.....	12
FIGURA 5 BAUXITA SINTERIZADA COM FORMA (A) ESFÉRICA (<i>SINTERBALL</i> ®) E (B) ANGULAR (<i>SINTERBLAST</i> ®)	15
FIGURA 6 PERFIL OBTIDO COM CADA TIPO DE GRANALHA (A) ESFÉRICO E (B) ANGULAR .	17
FIGURA 7 INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NA ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS DE Cu, Al ₂ O ₃ E WC-Co.....	18
FIGURA 8 (A) SUPERFÍCIE GEOMÉTRICA E (B) SUPERFÍCIE REAL	18
FIGURA 9 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MEDIÇÃO DE RA.....	19
FIGURA 10 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MEDIÇÃO DE RY.....	20
FIGURA 11 CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS RA E RZ DAS SUPERFÍCIES JATEADAS COM GRÃOS DE ALUMINA DE DUAS GRANULOMETRIAS DIFERENTES (D= 427 µm, D= 231 µm)	21
FIGURA 12 PERFIL DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DO AÇO CARBONO (NUM PERCURSO DE 4 MM) PARA VÁRIAS COMBINAÇÕES DE GRANULOMETRIA E PRESSÃO DE JATEAMENTO (A) P = 20.7 kPa, D= 427 mm; (B) P = 10.35 kPa, D= 427 mm; (C) P = 20.7 kPa, D= 231 mm; E (D) P = 10.35 kPa, D= 231 mm.....	22

FIGURA 13 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE PARA AS DISTÂNCIAS DE APLICAÇÃO DE 20, 30, E 40 CM (TEMPO DE JATEAMENTO = 3 S E PRESSÃO = 0,3 N/MM ²).....	23
FIGURA 14 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE JATEAMENTO (AL ₂ O ₃ , D~1,4 MM, P= 0,8 MPA, DISTÂNCIA DE JATEAMENTO D= 100 MM); ■ = AU4G, Δ = 100 C6, X = FT25.....	24
FIGURA 15 VARIAÇÃO NA RUGOSIDADE DO AÇO JATEADO EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE IMPACTO A UMA PRESSÃO DE 7 BAR, DISTÂNCIA DE 100 MM, TEMPO DE 1 MINUTO E GRANULOMETRIA DE 24 MESH	25
FIGURA 16 EFEITO DO ÂNGULO DE JATEAMENTO NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL	26
FIGURA 17 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DE JATEAMENTO, D, NA RA PARA TRÊS TAMANHOS DE PARTÍCULAS E TRÊS MATERIAIS SUBSTRATOS (P = 0,3 MPA, UM PASSE, MÁQUINA DO TIPO PRESSÃO).....	27
FIGURA 18 VARIAÇÃO NA RUGOSIDADE DO AÇO JATEADO EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA DE JATEAMENTO A UMA PRESSÃO DE 7 BAR, ÂNGULO DE 90°, TEMPO DE 1 MINUTO E GRANULOMETRIA DE 24 MESH	28
FIGURA 19 EFEITO DA DISTÂNCIA E DA PRESSÃO DE JATEAMENTO NA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO RECOZIDO (TEMPO DE JATEAMENTO = 3 S).....	28
FIGURA 20 VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO AÇO CARBONO JATEADA (RA) EM FUNÇÃO DA PRESSÃO PARA DOIS TAMANHOS DE GRÃOS (427 E 231 μM).....	29
FIGURA 21 EFEITO DO TEMPO DE JATEAMENTO NA RUGOSIDADE EM DIFERENTES PRESSÕES DE JATEAMENTO. (DISTÂNCIA DE JATEAMENTO = 40 CM)	30

FIGURA 22 VARIAÇÃO NA RUGOSIDADE EM RELAÇÃO AO TEMPO DE JATEAMENTO A UMA PRESSÃO DE 7 BAR, ÂNGULO DE 90°, DISTÂNCIA DE 100MM E GRANULOMETRIA DE 24 MESH	30
FIGURA 23 VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO DE AÇO CARBONO JATEADA (RA) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE JATEAMENTO PARA VÁRIAS COMBINAÇÕES DE PRESSÃO E TAMANHO DE GRÃO	31
FIGURA 24 MODIFICAÇÃO NA RUGOSIDADE DEVIDO AO JATEAMENTO ABRASIVO, (0) SUPERFÍCIE SEM TRATAMENTO, (I) SUPERFÍCIE JATEADA NUMA ÚNICA ETAPA E (II) SUPERFÍCIE REJATEADA	32
FIGURA 25 REPRESENTAÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO SOBRE UMA SUPERFÍCIE.....	34
FIGURA 26 ÂNGULO DE JATEAMENTO, 90°.....	42
FIGURA 27 APARATO EXPERIMENTAL PARA O ENSAIO DE IMERSÃO.....	50
FIGURA 28 EXPOSIÇÕES UTILIZADAS NO ENSAIO CÍCLICO: (A) CÂMARA DE UV/CONDENSAÇÃO, (B) CÂMARA DE NÉVOA SALINA, (C) CÂMARA DE BAIXA TEMPERATURA.....	51
FIGURA 29 PADRÕES FOTOGRÁFICOS DA CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE EMPOLAMENTO ISO 4628-2 (2003).	53
FIGURA 30 PADRÕES VISUAIS DE PERCENTUAL DE ÁREA CORROÍDA E SUAS CLASSIFICAÇÕES ASTM D 610 (2008).	54
FIGURA 31 DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE MICRODUREZA PARA A GRANALHA.....	58
FIGURA 32 DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE MICRODUREZA PARA O AÇO INOX.	58

FIGURA 33 DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE MICRODUREZA PARA A BAUXITA SINTERIZADA.	59
FIGURA 34 DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE MICRODUREZA PARA A ALUMINA DESMAGNETIZADA.	59
FIGURA 35 RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS DIFRATOGRAMAS PARA OS ABRASIVOS GRANALHA, AÇO INOX, BAUXITA E ALUMINA.	63
FIGURA 36 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS ABRASIVOS NA CONDIÇÃO "COMO RECEBIDO"	64
FIGURA 37 VARIAÇÃO DO PERFIL DE RUGOSIDADE COM O TEMPO DE JATEAMENTO: (A) SUPER DUPLEX JATEADO COM GRANALHA, (B) AÇO CARBONO JATEADO COM GRANALHA, (C) SUPER DUPLEX JATEADO COM AÇO INOX E (D) AÇO CARBONO JATEADO COM AÇO INOX.	66
FIGURA 38 VARIAÇÃO DO PERFIL DE RUGOSIDADE COM O TEMPO DE JATEAMENTO: (A) SUPER DUPLEX JATEADO COM BAUXITA, (B) AÇO CARBONO JATEADO COM BAUXITA, (C) SUPER DUPLEX JATEADO COM ALUMINA E (D) AÇO CARBONO JATEADO COM ALUMINA. ..	67
FIGURA 39 DIFERENCIAÇÃO DA TEXTURA DAS SUPERFÍCIES APÓS O JATEAMENTO: (1-A-B) GRANALHA DE AÇO CARBONO, (2-A-B) AÇO INOX, (3-A-B) BAUXITA SINTERIZADA E (4-A-B) ALUMINA DESMAGNETIZADA.	68
FIGURA 40 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS ABRASIVOS APÓS O USO.	69
FIGURA 41 DIFRATOGRAMA DO SUBSTRATO SUPER DUPLEX NA CONDIÇÃO "COMO RECEBIDO" E APÓS OS TRATAMENTOS.	73

FIGURA 42 DIFRATOGRAMA DO SUBSTRATO AÇO CARBONO NA CONDIÇÃO "COMO RECEBIDO" E APÓS OS TRATAMENTOS.....	75
FIGURA 44 CONDUTIVIDADE DOS EXTRATOS AQUOSOS DAS SUPERFÍCIES JATEADAS (S.D – SUPER DUPLEX, A.C – AÇO CARBONO).....	78
FIGURA 49 TAXA DE CORROSÃO DO SUBSTRATO SUPER DUPLEX SUBMETIDOS A DIFERENTES TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	85
FIGURA 50 TAXA DE CORROSÃO DO SUBSTRATO AÇO CARBONO SUBMETIDOS A DIFERENTES TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	85
FIGURA 52 TAXA DE CORROSÃO CORRIGIDA DO SUBSTRATO AÇO CARBONO SUBMETIDOS A DIFERENTES TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	88
FIGURA 55 DELAMINAÇÃO E CORROSÃO DOS AÇOS SUPER DUPLEX E CARBONO APÓS IMERSÃO EM ÁGUA DESTILADA A 40 °C.....	93
FIGURA 56 ILUSTRAÇÕES DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA EM TORNO DO RISCO PARA OS SUBSTRATOS SUPER DUPLEX SUBMETIDOS AO ENSAIO CÍCLICO COM 1184 HORAS.....	96
FIGURA 57 ILUSTRAÇÕES DO EMPOLAMENTO EM TORNO DO RISCO PARA OS SUBSTRATOS AÇO CARBONO SUBMETIDOS AO ENSAIO CÍCLICO COM 1184 HORAS.....	97
FIGURA 58 AVANÇO À PARTIR DO RISCO PARA O SUBSTRATO SUPER DUPLEX AO FINAL DO ENSAIO CÍCLICO.....	98
FIGURA 59 AVANÇO À PARTIR DO RISCO PARA O SUBSTRATO AÇO CARBONO AO FINAL DO ENSAIO CÍCLICO.....	99
FIGURA 61 RESULTADOS DE <i>PULL-OFF</i> DAS AMOSTRAS NA CONDIÇÃO INICIAL.....	101

FIGURA 62 RESULTADOS DE <i>PULL-OFF</i> DAS AMOSTRAS SUBMETIDAS AO ENSAIO DE IMERSÃO AO FINAL DO ENSAIO.....	102
FIGURA 63 CONTAMINAÇÃO NOS <i>DOLLIES</i> (ESQUERDA) E NOS SUBSTRATOS (DIREITA), PARA OS ABRASIVOS: (1-A-B) GRANALHA DE AÇO CARBONO, (2-A-B) AÇO INOX, (3-A-B) BAUXITA SINTERIZADA E (4-A-B) ALUMINA DESMAGNETIZADA.	103
FIGURA 64 RESULTADOS DE <i>PULL-OFF</i> DAS AMOSTRAS SUBMETIDAS AO ENSAIO CÍCLICO AO FINAL DO ENSAIO.....	104
FIGURA 65 MOSAICO DE DEMONSTRAÇÃO DE VALES E INCRUSTAÇÕES DOS SUBSTRATOS JATEADOS OBTIDO POR MICROSCOPIA ÓTICA.....	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DUREZA DE DOIS AÇOS CARBONO.....	2
TABELA 2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DUREZA DOS PRINCIPAIS AÇOS DUPLEX E SUPERDUPLEX COMERCIALIZADOS (%MASSA)	5
TABELA 3 NÍVEIS DE CLORETO PERMITIDOS EM SUBSTRATOS METÁLICOS	6
TABELA 4 EFICIÊNCIA DE JATEAMENTOS NA REMOÇÃO DE SAIS	10
TABELA 5 EFICIÊNCIA DO JATEAMENTO SECO NA REMOÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS.....	10
TABELA 6 COMPOSIÇÃO TÍPICA DE ABRASIVOS A BASE DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO.....	15
TABELA 7 COMPOSIÇÕES TÍPICAS E DUREZAS DE GRANALHAS COM PERFIL ANGULAR	16
TABELA 8 VALORES DE RA PARA COMPRIMENTOS MÍNIMOS DE AMOSTRAGEM	19
TABELA 9 SEQUÊNCIA DE PENEIRAS ASTM E 11 (2009).....	39
TABELA 10 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DUREZA DO AÇO SUPER DUPLEX UNS S 32760 E DO AÇO CARBONO ASTM A 516 G 60.	40
TABELA 11 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ABRASIVOS BAUXITA E ALUMINA DE ACORDO COM O BOLETIM TÉCNICO DO FORNECEDOR.	41
TABELA 12 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ABRASIVOS GRANALHA DE AÇO CARBONO E AÇO INOX DE ACORDO COM O BOLETIM TÉCNICO DO FORNECEDOR.	41
TABELA 13 CONDIÇÕES DE JATEAMENTO.	42
TABELA 14 PROPRIEDADE DOS LÍQUIDOS UTILIZADOS.....	46
TABELA 15 CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO DOS MATERIAIS NO ENSAIO CÍCLICO ISO 20340 (2003).	50

TABELA 16 DENSIDADE DOS MATERIAIS ABRASIVOS UTILIZADOS.	57
TABELA 17 CONDUTIVIDADE E PH DOS EXTRATOS AQUOSOS.	60
TABELA 18 CARACTERIZAÇÃO DAS FASES PRESENTES NAS ANÁLISES DE RAIOS-X DOS ABRASIVOS.	62
TABELA 19 CONDIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS ABRASIVOS "COMO RECEBIDO", DE ACORDO COM OS FORNECEDORES.....	64
TABELA 20 PERFIS DE RUGOSIDADE RESULTANTE DOS CORPOS DE PROVA JATEADOS.....	69
TABELA 21 CONSUMO RELATIVO A CADA MATERIAL ABRASIVO.....	70
TABELA 22 CARACTERIZAÇÃO DAS FASES PRESENTES NAS ANÁLISES DE RAIOS-X DOS SUBSTRATOS SUPER DUPLEX NA CONDIÇÃO COMO RECEBIDO E APÓS OS TRATAMENTOS.	71
TABELA 23 PERCENTUAL DE ELEMENTOS CONTAMINANTES QUANTIFICADOS PELO MÉTODO DE RIETVELD NO SUPER DUPLEX TRATADO COM BAUXITA E ALUMINA.	74
TABELA 24 EVOLUÇÃO DAS FASES NO SUBSTRATO SUPER DUPLEX.....	74
TABELA 25 CARACTERIZAÇÃO DAS FASES PRESENTES NAS ANÁLISES DE RAIOS-X DOS SUBSTRATOS AÇO CARBONO NA CONDIÇÃO COMO RECEBIDO E APÓS OS TRATAMENTOS..	76
TABELA 26 PERCENTUAL DE ELEMENTOS CONTAMINANTES QUANTIFICADOS PELO MÉTODO DE RIETVELD NO AÇO CARBONO TRATADO COM BAUXITA E ALUMINA.	76
TABELA 27 EVOLUÇÃO DAS FASES NO SUBSTRATO AÇO CARBONO.....	76
TABELA 28 pH, CONDUTIVIDADE E TEOR DE CLORETO PARA OS EXTRATOS AQUOSOS.	79
TABELA 29 ENERGIA DE SUPERFÍCIE DOS SUBSTRATOS SUBMETIDOS A DIFERENTES TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIES.	81

TABELA 30 ÂNGULO DE CONTATO DOS SUBSTRATOS SUBMETIDOS A DIFERENTES TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIES.	82
TABELA 31 FATORES DE CORREÇÃO DAS TAXAS DE CORROSÃO.	86
TABELA 32 QUANTIFICAÇÃO DO AVANÇO À PARTIR DO RISCO PARA O SUBSTRATO AÇO CARBONO AO FINAL DO ENSAIO DE IMERSÃO.	94

1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento de processos a alta temperatura e pressão, em especial, na indústria do petróleo, tem gerado sérios problemas relacionados à integridade estrutural dos equipamentos envolvidos neste setor.

Os aços inoxidáveis duplex (AID) e superduplex (AISD) foram introduzidos na indústria com a proposta de conferir uma excelente combinação entre resistência à corrosão e propriedades mecânicas. O custo desses aços é elevado, mas se justifica, sobretudo em ambientes agressivos, com o aumento da vida útil dos equipamentos. Sendo assim, mesmo antes de uma caracterização criteriosa do desempenho desses aços, vários equipamentos foram construídos e instalados em plantas industriais importantes. Infelizmente sérios problemas de corrosão vêm ocorrendo e uma das alternativas tem sido revestir estes equipamentos através da aplicação de revestimentos orgânicos.

Esta dissertação tem como objetivo realizar um estudo das possibilidades de tratamento de superfície por jateamento abrasivo do aço superduplex. Isto porque o aço superduplex apresenta elevada dureza comparativamente ao aço carbono, sendo assim, abrir perfil de rugosidade neste material não é uma tarefa fácil. O desempenho de vários abrasivos é caracterizado quanto à eficiência na abertura do perfil e possíveis conseqüências de incrustação na superfície. A metodologia consiste de três partes principais, a saber: caracterização dos abrasivos, caracterização das superfícies jateadas e avaliação de desempenho após aplicação de revestimento orgânico. O mesmo trabalho experimental será realizado com o aço carbono para fins comparativos.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica, onde são abordados os aspectos básicos sobre aço carbono e aços inoxidáveis superduplex, bem como, as técnicas relativas à preparação de superfície de metais envolvendo métodos de limpeza e tratamento por jateamento abrasivo, com suas peculiaridades e principais variáveis que influenciam neste processo. O Capítulo 3 descreve a metodologia experimental.

A apresentação dos resultados obtidos e as discussões se encontram no capítulo 4 e, finalmente, no capítulo 5 consta um parecer conclusivo individual de cada resultado e global do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 AÇO CARBONO

O aço carbono é uma liga ferro-carbono que contém, geralmente, 0,8% a 2,06% em massa de carbono, além de possuir alguns resíduos originários do processo de fabricação (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2006).

Este tipo de aço possui uma estrutura relativamente complexa cujos principais elementos de liga são o ferro e o carbono, podendo encontrar, como elementos residuais, o silício, fósforo, enxofre e manganês. Estes elementos secundários podem exercer influência na resistência à corrosão do material. O enxofre, por exemplo, pode contribuir com a formação de inclusões de sulfeto ferroso (FeS), acelerando o processo de corrosão do material (CHIAVERINI, 1979). Esta composição exerce influência em propriedades importantes, como a dureza, por exemplo. Na tabela 1, se apresenta a composição de dois aços com suas respectivas durezas.

Tabela 1 Composição química e dureza de dois aços carbono (MATWEB, 2011).

Aço	C	Fe	Mn	Mo	P	Si	S	Dureza Vickers
AISI 1335	0,33-0,38	97,3-97,92	1,6-1,9	-	≤0,035	0,15-0,35	0,040	217
ASTM A572								
Gr 42	≤0,21	≥97,95	≤1,35	-	≤0,04	0,15-0,4	0,05	118

O aço carbono apresenta como principais fases, ferrita, cementita e perlita (Figura 1). Porém, outras fases podem surgir, dependendo do tratamento térmico (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

(A) A ferrita apresenta estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) sendo estável à temperatura ambiente. Ela apresenta também estrutura de grãos poligonais irregulares, boa resistência ao impacto, elevado alongamento, baixa resistência a tração e dureza e é magnética.

(B) A cementita é uma estrutura cristalina com arranjo ortorrômbico e possui o carbeto de ferro (Fe_3C) com 6,67% de carbono, o qual é responsável por conferir baixa ductilidade e elevada dureza aos aços de alto carbono.

(C) A perlita apresenta propriedades mecânicas intermediárias as da ferrita e da cementita com composição aproximada de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita na forma de lamelas dispostas de forma alternada.

Na Figura 1, estão micrografias típicas de cada uma dessas fases.

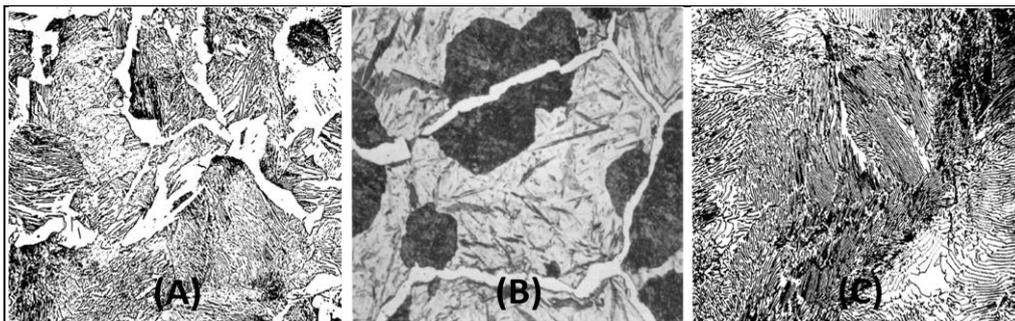


Figura 1 Micrografia das principais microestruturas do aço carbono. (A) Ferrita, (B) Cementita e (C) Perlita (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

O aço carbono apresenta significativa importância no grupo das ligas metálicas utilizadas em engenharia e na indústria, sendo empregado de forma intensiva em diversas aplicações como, pontes, máquinas, ferramentas, utensílios domésticos, setor de transportes e em elementos residenciais. Esta diversidade de aplicações é atribuída ao seu baixo custo e boa resistência mecânica. No entanto, materiais alternativos podem ser eleitos quando as condições de aplicação necessitam de propriedades especiais de resistência térmica, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, características magnéticas ou elétricas e leveza, por exemplo.

2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX

Os aços inoxidáveis são os materiais que conjugam boa combinação entre resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas.

Um aço para ser considerado inoxidável necessita conter pelo menos 10,5% em peso do elemento cromo, o que confere resistência à corrosão adequada em função da formação de uma fina camada de óxido de cromo aderente e protetora (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

O grupo de aços inoxidáveis pode ser dividido quanto à sua microestrutura em cinco subgrupos, aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos, ferríticos, endurecidos por precipitação e duplex, sendo que cada um deles tem aplicações e propriedades específicas (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

Os aços duplex, constituídos por ligas contendo ferro, cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio, possuem basicamente uma microestrutura composta por austenita e ferrita, numa proporção volumétrica de 50% aproximadamente. A excelente combinação de resistência à corrosão e propriedades mecânicas que os aços inoxidáveis duplex conferem frente a outros materiais é devido ao arranjo microestrutural e à composição química de suas fases, como exemplo, o limite de escoamento para os aços duplex é aproximadamente o dobro comparado aos aços austeníticos. Em relação à resistência à corrosão, os aços duplex apresentam um número equivalente de resistência à corrosão por pite ou PREN (*Pitting Resistance Equivalent numbers*) superior a 25 (ARMAS; MOREUIL, 2009).

A aplicação e utilização destes aços em unidades industriais quase na totalidade envolvem processos de soldagem, os quais podem originar precipitação de fases deletérias e consequente alteração nas propriedades do material (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

A diferença básica entre os aços inoxidáveis duplex e superduplex está relacionada com as concentrações de níquel, cromo, molibdênio, nitrogênio e outros elementos na liga (TOTTEN, 2006). Na tabela 2, são apresentadas algumas composições típicas dos dois tipos de aço, junto com seus respectivos PREN e dureza Vickers.

Tabela 2 Composição química e dureza dos principais aços duplex e superduplex comercializados (%massa) (ARMAS; MOREUIL, 2009), (ASTM A 789/A 789M – 08a, 2008) e (ASTM A 790/A 790 – 03, 2003).

Aço (ASTM)	Cr	Mo	Ni	Mn	Cu	N	Outros	PREN	Dureza Vickers	
	S31500	18,5	2,7	5	1	-	0,1	-	29	290
	S32304	23	0,2	4	1	-	0,13	-	25	290
Duplex	S32101	21	0,3	1,5	5	-	0,2	-	24	290
	S32003	20	1,7	3,5	2	-	0,15	-	28	290
	S32205	22	3	6	1	-	0,17	-	35	293
Super Duplex	S32750	25	3,5	7	1	-	0,27	-	41	310
	S32520	25	3,5	7	1	1,5	0,25	-	41	302

2.3 PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES

A aplicação de revestimentos anticorrosivos exige preparação adequada de superfície, cujos principais aspectos serão abordados a seguir.

2.3.1 Limpeza

Antes da aplicação de um revestimento é necessário remover os contaminantes presentes na superfície, a fim de não prejudicar a aderência entre o revestimento e o substrato.

Dentre as impurezas que devem ser eliminadas da superfície estão: óleos, graxas, resinas, parafinas, camadas de óxido, poeira, resíduos do processo de fabricação, sais, contaminantes provenientes de tratamento térmico e revestimentos antigos deteriorados.

A presença de sais solúveis contaminando a superfície a ser revestida pode acelerar a oxidação do substrato por baixo da película de tinta, bem como o empolamento dos sistemas de pintura aplicados. Portanto, este tipo de contaminação precisa ser controlado. A tabela 3 exemplifica valores admissíveis para o conteúdo de

sais em substratos onde, observa-se que estes valores variam de acordo com as aplicações e os órgãos normativos (MOMBER, 2008).

Tabela 3 Níveis de cloreto permitidos em substratos metálicos (MOMBER, 2008).

Instituição normativa	Conteúdo permitido de cloreto em $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
NASA	5
IMO (DE 84/12)	5
SSPC/NACE	7
US Navy (non-immersion service)	5
US Navy (immersion service)	3
Norsok (M-501)	2
Hempel (non-immersion service)	19,5
Hempel (immersion service)	6,9

A contaminação da superfície com sais solúveis é frequentemente expressa em $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (massa por unidade de área). Os sais comumente encontrados na superfície dos substratos são cloretos, sulfatos e nitratos (MOMBER, 2008).

A existência de superfícies idealmente limpas pode ocorrer por um período de tempo extremamente curto. A recontaminação de superfícies metálicas, uma vez limpas, é uma grande preocupação, sendo que esta depende do tempo de exposição, ambiente e temperatura. A superfície de um substrato metálico exposta ao ar atmosférico adquire, instantaneamente, por exemplo, uma fina camada de óxido, com posterior adesão de outros contaminantes presentes no ambiente (BUNSHAH, 1994). Desta forma, a preservação da superfície se faz necessária, uma vez que os contaminantes comprometem os resultados de desempenho do revestimento.

Existem vários padrões de limpeza, sendo os mais adotados no Brasil aqueles da norma sueca SIS 05 59 00 com tradução na norma ABNT 6405, as quais prevêm a inspeção visual das superfícies por comparação com fotografias e descrição do tipo de sujidade tolerável (LIMA; TREVISAN, 2007).

Basicamente, os processos de limpeza de superfícies consistem em inspeção prévia das condições da superfície, limpeza química e limpeza mecânica (LIMA; TREVISAN, 2007):

2.3.2 Inspeção

Uma inspeção visual é realizada para identificar os pontos de sujeira, óleo, graxa, gordura, óxidos e defeitos superficiais. Os defeitos superficiais podem ser removidos através do esmerilhamento, caso existam. Óleos, graxas e gorduras podem ser eliminados através da limpeza química e os óxidos removidos com a decapagem ou limpeza mecânica.

2.3.3 Limpeza química

O processo de limpeza química pode ser dividido em três categorias (LIMA; TREVISAN, 2007):

Detergência: Consiste na remoção de resíduos aderidos à superfície, pó, graxa e óleo. Conhecida também como limpeza alcalina, onde a determinação da composição do agente de limpeza a ser utilizado depende das condições de superfície, da composição do material e dos contaminantes presentes.

Desengraxamento: É uma operação com solvente orgânico efetuada para remover graxas ou óleos de superfícies. Além dos custos para promover a limpeza por solventes serem elevados, a toxicidade e a permanência de resíduos após a evaporação do solvente são alguns problemas decorrentes que devem ser considerados.

Segundo Gnecco, Mariano e Fernandes (2003) é importante conhecer os contaminantes a serem removidos, bem como, as suas características físico químicas. Por exemplo, óleos e graxas em sua maioria são insolúveis em água, mas podem ser removidos por saponificação com a utilização de soluções alcalinas. Já no caso de óleos minerais, devem ser removidos com o uso de tensoativos com posterior enxágue.

Decapagem ácida: Operação que tem por finalidade a remoção de óxidos, hidróxidos, e sulfetos. A decapagem ácida, além promover a remoção dos óxidos pode atacar severamente o metal proporcionando uma determinada rugosidade na superfície

metálica. É muito comum a adição de inibidores de corrosão ou submeter a superfície à passivação de forma a neutralizar o efeito do ácido.

Os principais ácidos inorgânicos utilizados como agentes decapantes são o ácido clorídrico, ácido sulfúrico e ácido fosfórico, sendo que este necessita de aquecimento e um maior tempo de tratamento. Ao reagirem, estes ácidos promovem a formação de sais solúveis de fácil remoção.

É um método eficiente, no entanto, o seu bom desempenho requer que a etapa de desengraxe tenha sido previamente realizada, visto que, resquícios de gorduras e óleos podem dificultar a atividade dos agentes decapantes.

2.3.4 Limpeza mecânica

Os principais tipos de limpeza por ação mecânica são (NUNES; LOBO, 1990):

Limpeza manual: Consiste num método de limpeza de baixo rendimento, não sendo recomendado para preparação de superfície de revestimentos que exijam boa adesividade ou que atuarão associados em sistemas de proteção catódica.

Este método de limpeza é classificado como padrão St2 da norma sueca SIS 05 59 00, sendo aplicado na remoção de óxidos e de materiais que não se encontram muito aderidos à superfície através de escovas de aço, raspadores, lixas, etc.

Limpeza com ferramentas mecânicas manuais: Com rendimento relativamente baixo, porém superior ao obtido em relação à limpeza manual, é um método também utilizado na remoção de óxidos e materiais não muito aderentes através da utilização de escovas rotativas, martelotes de agulhas, lixadeiras, etc., cujos resultados se enquadram no padrão St3 da norma sueca SIS 05 59 00. A sua recomendação está condicionada quando não for possível aplicar outro método mais eficiente.

- **Limpeza com jateamento abrasivo:** Promove a remoção de óxidos e outros contaminantes aderidos à superfície metálica através da projeção de partículas abrasivas

impulsionadas por um fluido, geralmente ar comprimido. A limpeza por jateamento abrasivo apresenta bom rendimento e excelentes condições de superfície pós tratamento.

2.4 JATEAMENTO ABRASIVO

O processo de jateamento, por sua natureza abrasiva, consiste basicamente na projeção de partículas de um material duro, de composição, forma e granulometria específicas, em direção ao alvo que se deseja promover o tratamento.

O processo de tratamento de superfícies por jateamento abrasivo não é suficiente para a limpeza de substratos metálicos. As camadas de óxidos existentes são amplamente removidas pelo jateamento. No entanto, compostos graxos são mais bem removidos através do desengraxe, daí a necessidade dos dois métodos associados para promover um grau de limpeza apropriado (LIMA; TREVISAN, 2007).

No que se relaciona à remoção de sais solúveis, a eficiência de vários tipos de jateamento é apresentada na tabela 4. Verifica-se que a presença de água no jateamento tem influência positiva nesse aspecto.

Tabela 4 Eficiência de jateamentos na remoção de sais (Appleman, 2003, apud MOMBER, 2008).

Método	(%) Remoção de sais solúveis
Hidrojateamento com abrasivos	100
Hidrojateamento	95
Jateamento abrasivo úmido	90
Jateamento abrasivo seco	83 a 90
Lavagem com água a alta pressão	85
Limpeza com ferramenta manual ou mecânica	25

A capacidade de remoção dos sais através do jateamento seco depende do grau de limpeza utilizado, conforme apresentado na tabela 5 (MOMBER, 2008).

Tabela 5 Eficiência do jateamento seco na remoção de sais solúveis (Appleman, 2003, apud MOMBER, 2008).

Grau de limpeza	(%) Remoção de sais solúveis
Jateamento Comercial	83
Jateamento ao Metal Quase Branco	84
Jateamento ao Metal Branco	90

O emprego do jateamento abrasivo gera contaminação da superfície pelo abrasivo. Esta contaminação pode resultar em problemas de aderência do revestimento (LIMA; TREVISAN, 2007).

Elementos importantes num processo de jateamento abrasivo industrial são enumerados na figura 2.

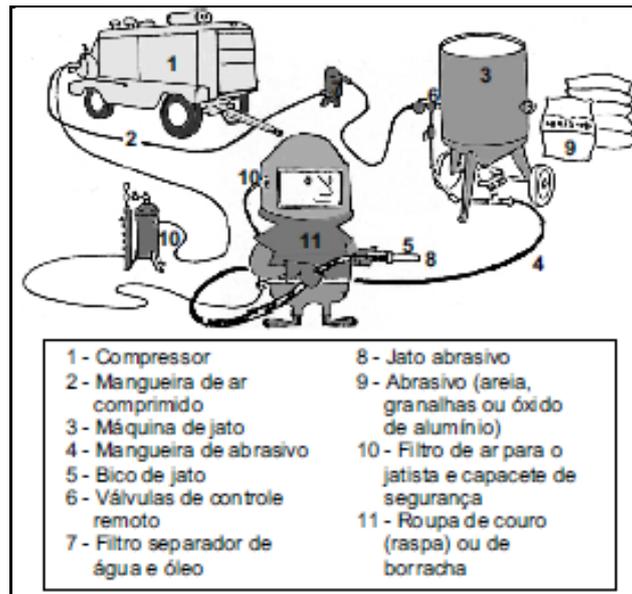


Figura 2 Componentes importantes num jateamento abrasivo (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003).

Em operações industriais, dois tipos de equipamentos de jateamento abrasivo são amplamente utilizados, as máquinas de pressão e as máquinas de sucção (DAVIS, 2004), cujas principais diferenças no funcionamento estão esquematizadas na figura 3.

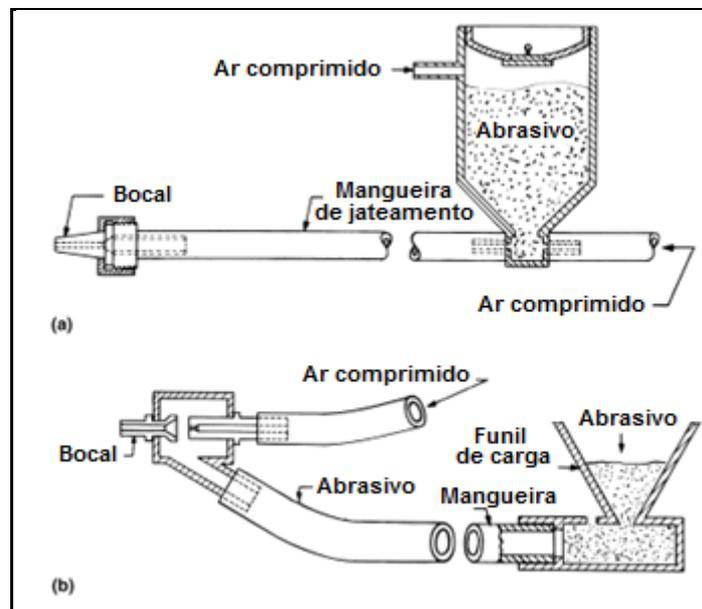


Figura 3 Máquinas de jateamento: (a) tipo pressão e (b) tipo sucção (Adaptado de (DAVIS, 2004)).

Quatro padrões de limpeza para superfícies de aço preparadas através destes processos são previstos com base nas normas SIS 05 59 00 e a ISO 8501-1, os quais compreendem (GENTIL, 2007):

Grau Sa 1 - Jateamento Ligeiro - São removidos contaminantes pouco aderidos consistindo numa limpeza precária e ligeira. Este padrão é pouco utilizado para pintura, exceto em alguns casos de repintura. A aparência final da superfície corresponde às fotos classificadas como Sa1 (Figura 4).

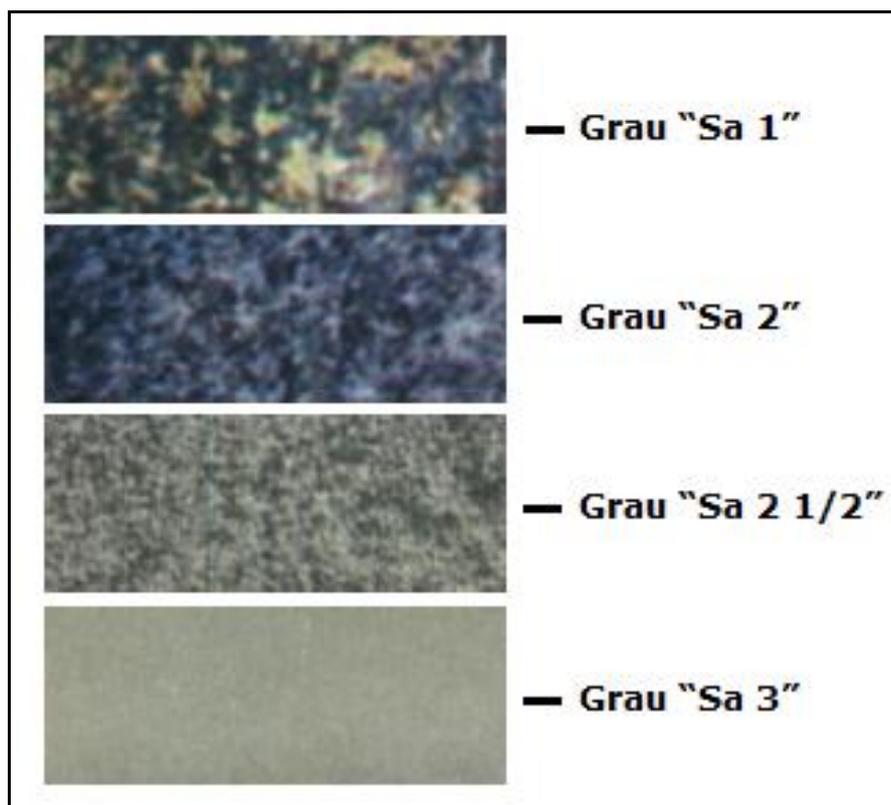


Figura 4 Classificação dos padrões de limpeza de acordo com a norma sueca SIS 05 59 00 (ZIRTEC, 2010).

Grau Sa 2 - Jateamento Comercial - Se constitui numa limpeza com retirada de praticamente todos os óxidos, carepa de laminação e todo e qualquer corpo estranho presente na superfície. A aparência final da superfície deve corresponder às fotos com designação Sa2 na (Figura 4).

Grau Sa 2 1/2 – Jateamento ao Metal Quase Branco - Se constitui numa limpeza minuciosa da superfície com a retirada quase total dos óxidos. Quantitativamente, pode-se considerar que 95% da superfície se encontra totalmente

limpa. A aparência final da superfície deve corresponder às fotos classificadas como Sa2 ½ na (Figura 4).

Grau Sa 3 - Jateamento ao Metal Branco - constitui-se numa limpeza com a retirada total de carepa, óxidos, etc., de forma que a superfície do metal se apresente completamente limpa. A sua aparência final corresponde ao padrão Sa3 na (Figura 4).

2.4.1 Tipos de abrasivos

A escolha do tipo de abrasivo a ser utilizado em um processo de jateamento é um fator de extrema importância para se obter o perfil de rugosidade e o grau de limpeza almejados. Para isto, a seleção deve estar condicionada ao conhecimento de algumas características do abrasivo, como: granulometria, salinidade, pH e dureza (GENTIL, 2007).

A granulometria e a dureza são parâmetros importantes que influenciam nos resultados de perfil de rugosidade, sendo que, a dureza também é responsável pelo grau de limpeza. A presença de sais no abrasivo reduzem consideravelmente a vida útil dos revestimentos, assim como, as condições de pH, ácidas ou básicas, influenciam na degradação prematura dos revestimentos (GENTIL, 2007).

A diversidade de abrasivos disponíveis comercialmente é grande. Em geral, os abrasivos são oferecidos com variedade de dimensão, composição e forma; cabe ao usuário a escolha. A determinação do tamanho das partículas, geralmente, está associada ao perfil de rugosidade almejado. Já a composição, envolve a necessidade de utilizar abrasivos cuja contaminação não prejudique o desempenho do revestimento (GENTIL, 2007).

Dentre os principais tipos de abrasivos estão:

ESFERAS DE VIDRO

Suas características físicas e químicas o colocam em posição de destaque. Estes materiais são de natureza inerte, não tóxicos e os seus resíduos não agredem o meio ambiente. Suas aplicações mais comuns envolvem a limpeza de superfícies,

acabamentos decorativos, tratamento *shot peening* para aumentar a resistência à corrosão e à fadiga de componentes de motores de avião, molas, turbinas, entre outros (ZIRTEC, 2010).

ÓXIDO DE ALUMÍNIO

É um produto com dureza relativamente alta e a sua taxa de degradação não é elevada, exceto quando utilizado em jateamento a altas pressões em substratos de elevada dureza, como o aço temperado. Suas aplicações resultam em alta eficiência de limpeza e bons resultados de perfis de rugosidade, podendo ser alternativo, inclusive em situações em que a granalha de aço origina impregnações na superfície e problemas de corrosão (DAVIS, 2004).

Abrasivos em que o óxido de alumínio é o elemento principal podem ser conhecidos comercialmente como, óxido de alumínio puro, bauxita sinterizada e bauxita desmagnetizada, sendo a composição diferenciada pelo teor de alguns elementos, em especial o ferro (Tabela 6).

Existe uma diversidade de óxidos de alumínio disponíveis no mercado com aplicação para jateamento (ASCONTEC, 2007). Estes materiais possuem diferentes composições químicas em função da origem do material utilizado nos processos de fabricação. Por exemplo, o óxido de alumínio (ALO N) possui origem do beneficiamento da parte mais externa do bloco eletro-fundido e apresenta um elevado teor de TiO_2 . Já o (ALO RN - Marrom) origina da eletro-fusão de bauxita, entre outros. Em geral, estes abrasivos são submetidos em etapas de queima, britagem, moagem, descontaminação magnética e classificação granulométrica.

Tabela 6 Composição típica de abrasivos a base de óxido de alumínio (TECJATO, 2011), (ELFUSA, 2006) e (TREIBACHER, 2010).

Abrasivo	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O
	(% em massa)					
Bauxita sinterizada	78,20	13,00	4,21	1,82	0,22	0,83
Óxido de alumínio (marrom)	85,04	8,10	3,94	1,87	0,68	0,17
Óxido de alumínio (puro)	99,00	0,20	0,20	-	-	0,60

A bauxita sinterizada pode ser encontrada na forma esférica *SinterBall*[®] ou angular *SinterBlast*[®] (Figura 5). Sua dureza é elevada e possui baixa densidade, quando comparada com a granalha de aço, o que torna a aplicação menos cansativa para o operador, menor gasto de energia nos compressores, alta produtividade e velocidade de limpeza. Este abrasivo ainda possui a característica de não ser afetado pela umidade do ambiente (ZIRTEC, 2010).

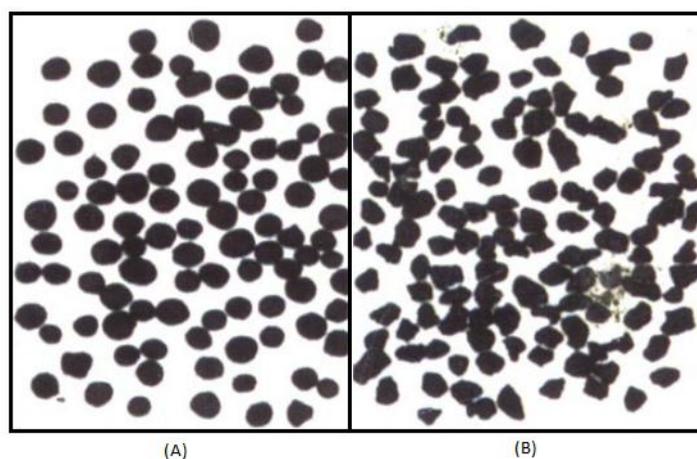


Figura 5 Bauxita sinterizada com forma (A) esférica (*Sinterball*[®]) e (B) angular (*Sinterblast*[®]) (ZIRTEC, 2010).

AREIA

É um material que apresenta fácil fragmentação em relação aos outros tipos de abrasivos. Operadores que as utilizam em ambientes confinados, quando desprotegidos dos equipamentos de proteção individual (EPI's) estão sujeitos à inalação de micro partículas de sílica, caracterizando uma atividade insalubre, através do surgimento de

problemas respiratórios (GENTIL, 2007). O seu uso está proibido por lei desde 2004, em todo território nacional, tanto em jateamento seco quanto úmido (ZIRTEC, 2010).

GRANALHAS

As granalhas são um dos mais importantes materiais abrasivos para jateamento. Comercialmente podem ser encontradas as granalhas de aço carbono, cobre, chumbo, zinco, aço inox, etc., sendo as mais empregadas industrialmente as de aço carbono e aço inoxidável, cujas composições típicas são apresentadas na (Tabela 7).

Tabela 7 Composições típicas e durezas de granalhas com perfil angular (CYM, 2011), (RODRIGUESBRANDAO, 2011), (GRANASAMINAS, 2003).

Granalha	C	Cr	Ni (%) em massa	Si	Mn	P	S	Dureza Vickers
Aço carbono (austenita)	0,8-1,2	-	-	>0,4	0,35-1,2	0,05	0,05	>697-480
Aço carbono (martensita)	0,85-1,2	-	-	>0,4	0,6-1,2	<0,05	<0,05	389-768
Aço Inox (austenita)	0,2±0,05	18,0±2,0	8,0±1,0	2,0±0,5	1,0±0,3	-	-	300
Aço Inox (martensita/ferrita)	0,25±0,05	14,0±1,0	-	2,0±0,5	-	-	-	450

A composição pode originar problemas de incompatibilidade em relação ao substrato a ser jateado. Quanto à forma podem se apresentar de duas maneiras, esféricas ou angulares (Figura 6), as quais exercem uma grande influência nos resultados de aderência de revestimentos.

As aplicações das granalhas de aço com perfil esférico são mais eficientes na remoção de resíduos. Porém seu uso gera efeito de martelamento, com forte tendência a aplainar a superfície, sendo muito utilizadas em operações de *shot peening*.

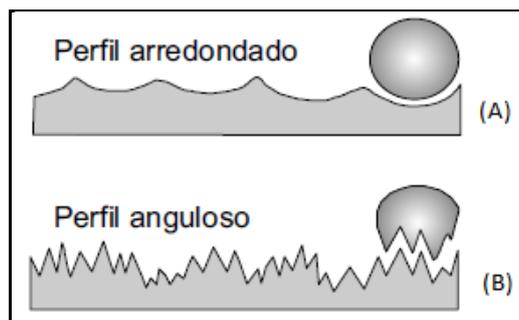


Figura 6 Perfil obtido com cada tipo de granalha (a) esférico e (b) angular (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003).

As granalhas angulares promovem perfis de rugosidade pontiagudos, arrancando o material da superfície e originando uma quantidade acentuada de irregularidades e pontos de ancoramento, resultados que favorecem boa aderência do revestimento (MENEZES, 2007).

Além dos abrasivos tradicionais, existem ainda dois outros tipos de abrasivos que foram inseridos recentemente no mercado, o *zirflocos*[®] e o *sponge-Jet*[®], comercialmente conhecidos (SPONGE-JET, 2012) (CANTON, 2010). No Brasil, testes com estes abrasivos têm sido desenvolvidos, mas o seu uso ainda é limitado.

2.4.2 Texturização da superfície

Uma vez realizada a limpeza do substrato metálico, a superfície deve apresentar um perfil de rugosidade adequado para que ocorra a adesão do revestimento.

Segundo Lima e Trevisan (2007) a rugosidade ou texturização é necessária, visto que, a adesão mecânica dos revestimentos se dá nas irregularidades da superfície do substrato. Em princípio, quanto maior o número de picos dentro de uma determinada região, maior é o efeito de adesão (LIMA; TREVISAN, 2007). No entanto, pode existir um valor de rugosidade acima do qual não se observam mudanças significativas de aderência, conforme verificado por Sen *et al.* (2010) para revestimentos de cobre, Al₂O₃ e WC-CO. Com efeito, na figura 7, não foi detectado aumento de aderência para perfis com Ra maior que 4 µm.

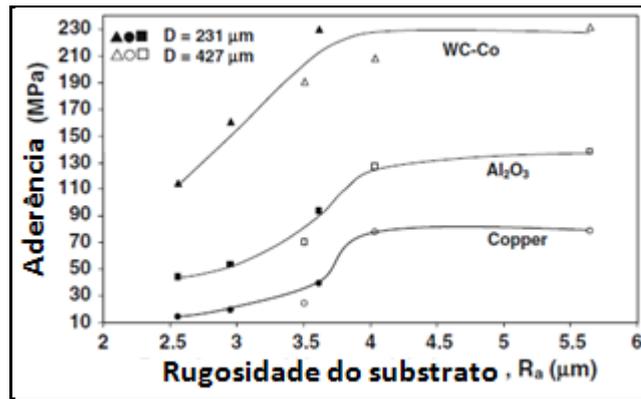


Figura 7 Influência da rugosidade na aderência de revestimentos de Cu, Al_2O_3 e WC-Co (Adaptado de (SEN *et al.*, 2010)).

É importante lembrar que a verdadeira área da superfície, corresponde à área de contato real considerando o perfil das irregularidades, composta por picos e vales. Considerando sistemas de dimensões iguais ($a \times a$) a área verdadeira é superior à área geométrica (Figura 8).

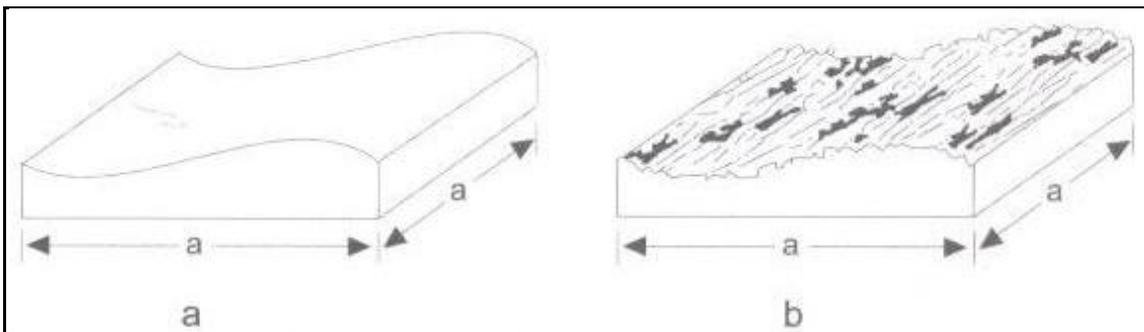


Figura 8 (a) superfície geométrica e (b) superfície real (LIMA; TREVISAN, 2007).

O sistema de avaliação do estado de superfícies em termos de rugosidade possui algumas definições que são apresentadas na norma ABNT NBR 6405. Os principais parâmetros utilizados na prática e na literatura são apresentados a seguir (LIMA; TREVISAN, 2007):

- **Rugosidade média (R_a):** É um parâmetro cujo cálculo é baseado na média aritmética dos valores absolutos de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média de medição, considerando o comprimento do percurso de medição (l_m) (Figura 9).

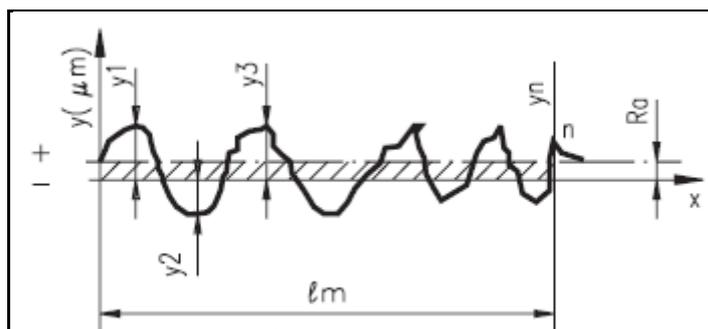


Figura 9 Representação esquemática da medição de Ra (DESTEC, 2010).

O parâmetro R_a é o mais utilizado, cuja expressão matemática é dada por:

$$R_a = \frac{(y_1 + y_2 + y_n)}{n}$$

Na avaliação de parâmetros de rugosidade (Tabela 8), a norma ABNT NBR 6405/1988, recomenda valores mínimos de comprimento de amostragem para diferentes faixas de rugosidade média (LIMA; TREVISAN, 2007).

Tabela 8 Valores de Ra para comprimentos mínimos de amostragem (LIMA; TREVISAN, 2007).

Rugosidade Ra (μm)	Mínimo comprimento de amostragem (mm)
0 a 0,3	0,25
0,3 até 3	0,8
Maior que 3	2,5

- **Rugosidade máxima (R_y):** Representa o maior valor das rugosidades parciais (Z_i), apresentados pelos comprimentos de amostragem (l_c) dentro do percurso de medição (l_m), isto é, a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo dentro de l_m , conforme mostra a figura 10.

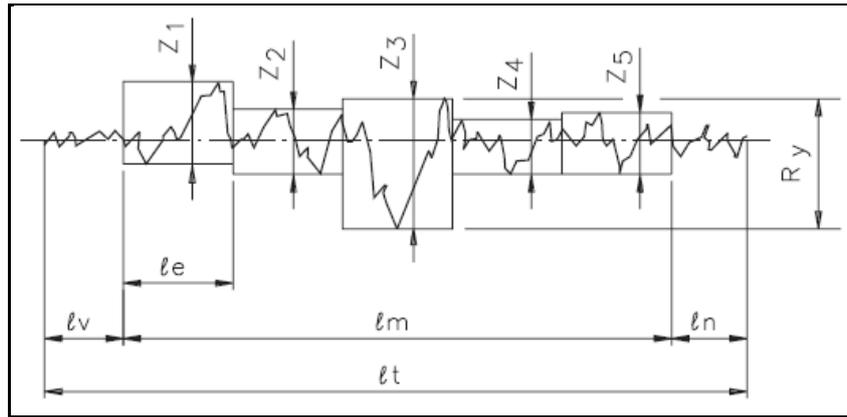


Figura 10 Representação esquemática da medição de R_y (DESTEC, 2010).

- **Rugosidade média (R_z):** Equivale a média aritmética de cinco valores de rugosidade parcial (Z_i), sendo que estes representam a soma dos valores absolutos dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, compreendidos num comprimento de amostragem (l_e), conforme ilustrado na (Figura 10). A representação matemática da rugosidade média pode ser expressa por,

$$R_z = \frac{(z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5)}{5}$$

Diversos dispositivos são utilizados para avaliar a rugosidade, entre eles, os rugosímetros de contato e os óticos (sem contato), sendo que, o princípio de obtenção dos resultados e os parâmetros disponíveis variam em função do aparelho utilizado (MEDTEC, 2012) (OLYMPUS, 2011). O dispositivo utilizado neste trabalho foi o rugosímetro mecânico, de contato, que mede a altura entre picos e vales de uma superfície plana, sendo este, muito empregado na avaliação de perfis de rugosidade, em campo, nas aplicações de esquemas de pintura.

Sen *et al.*, (2010) realizaram uma análise entre os parâmetros R_a e R_z , variando pressões de trabalho (20,7 e 10,35 kPa) e granulometria (427 e 231 μm), na preparação do aço carbono. Com os resultados, os autores verificaram uma ótima correlação entre esses dois parâmetros (Figura 11), o que resulta que qualquer uma das duas variáveis pode ser utilizada para análise da influência da rugosidade na adesão.

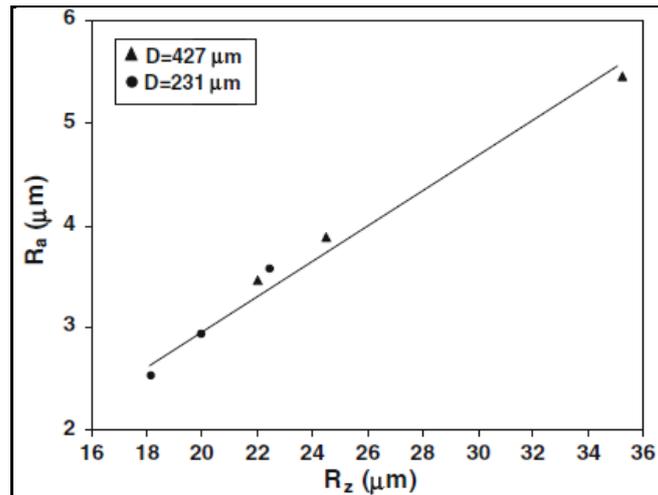


Figura 11 Correlação entre os parâmetros Ra e Rz das superfícies jateadas com grãos de alumina de duas granulometrias diferentes (D= 427 µm, D= 231 µm) (SEN *et al.*, 2010).

Um outro aspecto que precisa ser considerado é a relação entre a rugosidade e espessura seca do revestimento. A prática industrial recomenda que o perfil de rugosidade não deve ser superior à terça parte da espessura seca do revestimento, a fim de se evitar picos de jato à descoberto.

Na determinação do perfil de rugosidade das superfícies tratadas com o auxílio de um perfilômetro, os autores também verificaram a importância relativa da pressão e do diâmetro do abrasivo sobre a rugosidade Ra (Figura 12) (SEN *et al.*, 2010). A diminuição da pressão de 20,7 kPa para 10,35 kPa teve efeito equivalente à diminuição da granulometria do abrasivo de 427 µm para 231 µm sobre os valores de Ra. Comparando as figuras 12 (a) e 12 (d) se verifica que quando a pressão e a granulometria são reduzidos o valor de Ra muda de 5,65 µm para 2,96 µm.

Alguns parâmetros importantes que devem ser avaliados nos processos de jateamento abrasivo são o tipo de equipamento, o diâmetro interno do bocal, tipo e granulometria do abrasivo, pressão de ar, ângulo de aplicação, distância de aplicação e o tempo de jateamento. (MOMBER, 2008).

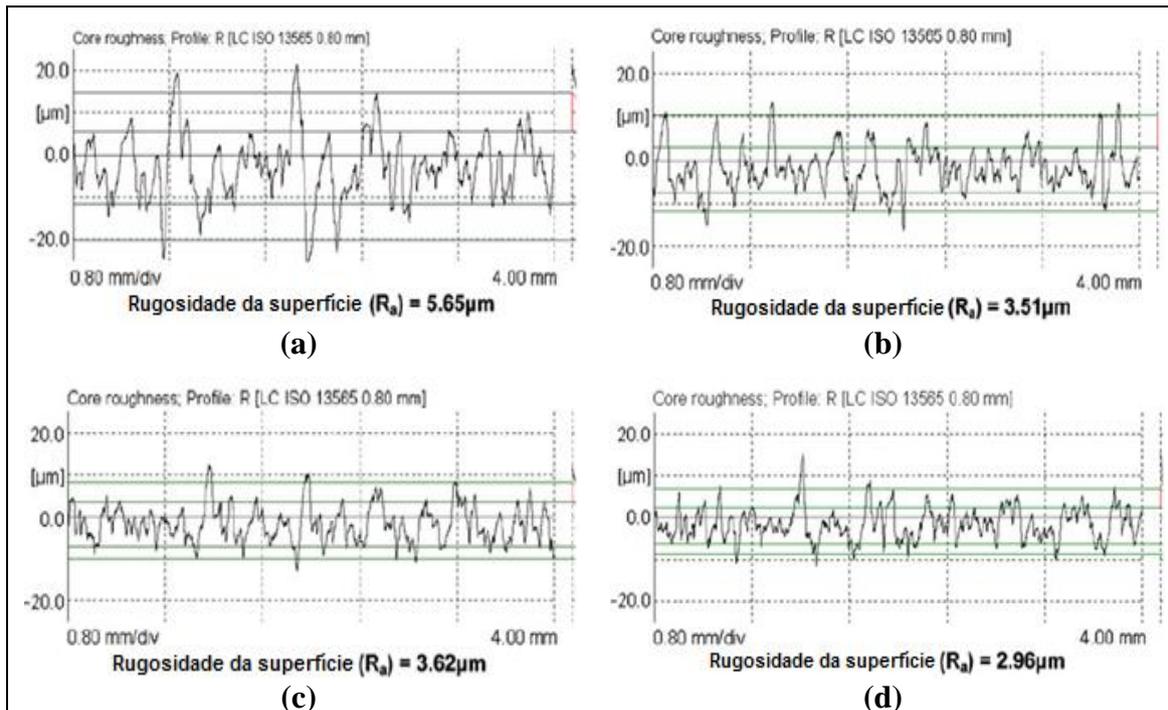


Figura 12 Perfil de rugosidade da superfície do aço carbono (num percurso de 4 mm) para várias combinações de granulometria e pressão de jateamento (a) $P = 20.7$ kPa, $D = 427$ mm; (b) $P = 10.35$ kPa, $D = 427$ mm; (c) $P = 20.7$ kPa, $D = 231$ mm; e (d) $P = 10.35$ kPa, $D = 231$ mm (Adaptado de (SEN *et al.*, 2010)).

Mellali *et al.* (1997) ao avaliarem a influência do tipo de equipamento no jateamento abrasivo com alumina em três materiais diferentes, dentre eles, o aço carbono, verificaram que as máquinas do tipo pressão operam de forma mais eficaz e eficiente quando comparadas às máquinas do tipo sucção, uma vez que maiores velocidades são impostas ao sistema oferecendo uma maior energia de impacto. Desta forma, a utilização de máquinas de jateamento por pressão são mais convenientes na realização de grandes trabalhos que requerem altas taxas de produção e no tratamento de substratos muito duros.

A dureza do material além de estar relacionada à escolha de equipamento a ser utilizada, ela também influencia nos valores de rugosidade. Khameneh e Heydarzadeh (2010) exemplificam esse aspecto com os resultados da figura 13. O aço carbono foi submetido a três tratamentos térmicos, a saber: recozimento, normalização e têmpera. Em consequência disso, foi verificado que um aumento na dureza do material, em consequência dos tratamentos térmicos, originou uma diminuição nos valores de

rugosidade para as distâncias de jateamento de 25 cm e 30 cm. Para maiores distâncias, 40 cm, sob as mesmas condições, foi observado um comportamento contrário onde, a rugosidade aumenta com a dureza do material.

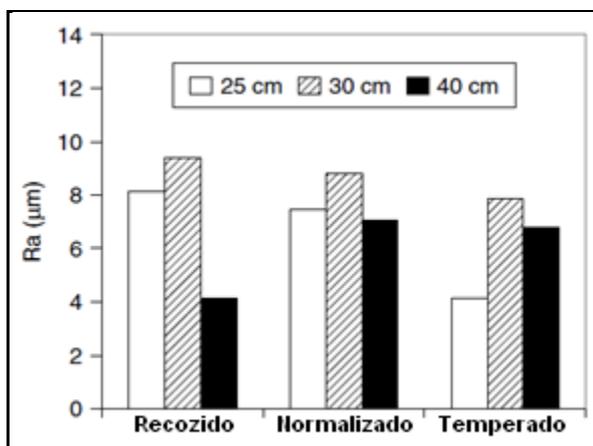


Figura 13 Efeito do tratamento térmico na rugosidade da superfície para as distâncias de aplicação de 20, 30, e 40 cm (tempo de jateamento = 3 s e pressão = 0,3 N/mm²) (Adaptado de (KHAMENEH; HEYDARZADEH, 2010)).

Maruyama, Akagi e Kobayashi (2006) realizaram uma avaliação quantitativa dos grãos residuais em superfícies jateadas, bem como a facilidade na remoção destes resíduos da superfície. Para isto, chapas de aço carbono foram tratadas com abrasivo de alumina branca com diâmetro médio de 338 - 1106 µm, num equipamento de jateamento com bocal de 6 mm, pressão do ar ajustada em 0,4 MPa e ângulo de incidência de aplicação de 90°. O tempo e a distância de jateamento das amostras foram fixados em 25 s e 150 mm, respectivamente.

A remoção dos resíduos da superfície se deu através de uma máquina de limpeza por ultrassom, com solução ácida contendo 20% de ácido clorídrico e 20% de ácido nítrico.

Após cada tratamento, as soluções foram filtradas, num meio filtrante com abertura de 20 a 30 µm, sendo que, a cada troca de solução os grãos foram pesados e a espessura do substrato medida. A profundidade de penetração dos abrasivos na superfície foi determinada pela diferença de espessura antes e depois da retirada dos grãos residuais, através da comparação de imagens de cortes transversais de substratos

jateados feitas com o auxílio de microscópio ótico (MARUYAMA; AKAGI; KOBAYASHI, 2006).

O aumento do tamanho da partícula abrasiva aumentou a rugosidade da superfície e a profundidade de penetração das partículas abrasivas, sendo estas, de 5 a 9% do diâmetro médio do grão (MARUYAMA; AKAGI; KOBAYASHI, 2006).

Ainda com relação ao tamanho do grão, o número de partículas que efetivamente promovem o jateamento diminui com o aumento da granulometria, no entanto, o peso dos resíduos aderidos ao substrato por unidade de área durante o jateamento aumentou com o diâmetro médio dos abrasivos, apresentando valores de 7 a 17 g/m² (MARUYAMA; AKAGI; KOBAYASHI, 2006).

Mellali *et al.* (1997) avaliaram como o ângulo de jateamento influenciou a rugosidade da superfície em diferentes substratos. Grãos de alumina branca com diâmetro médio de 0,5, 1 e 1,4 mm foram disparados contra um aço duro (100 C6), liga de alumínio (AU4G) e ferro fundido (FT25), com o intuito de avaliar a influência da distância de jateamento (56 a 200 mm), tempo de jateamento (3 a 30 s), variando o ângulo entre o bocal e a superfície a ser tratada (30°, 60°, 90°) e pressão de jateamento (0,2 a 0,7 MPa). Os autores verificaram que o aumento do ângulo de jateamento contribuiu para aumento na rugosidade (figura 14), dos três materiais ensaiados. No entanto, para materiais macios, como a liga de alumínio, foi verificada uma maior dependência da rugosidade para ângulos inferiores a 60°.

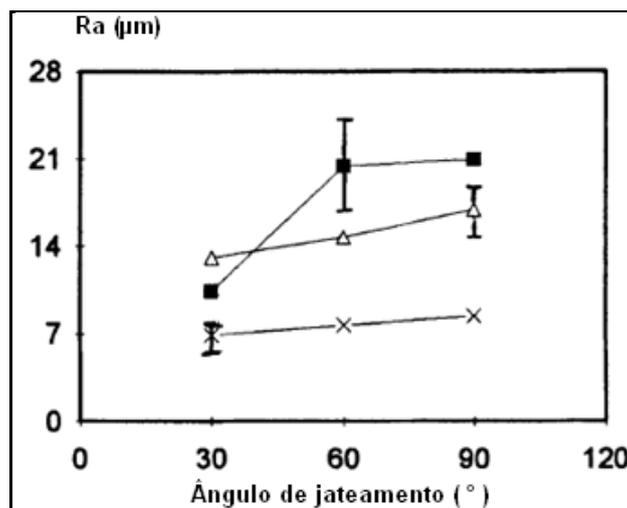


Figura 14 Influência do ângulo de jateamento (Al_2O_3 , $D \sim 1,4$ mm, $p = 0,8$ MPa, distância de jateamento $d = 100$ mm); ■ = AU4G, Δ = 100 C6, X = FT25 (Adaptado de (MELLALI *et al.*, 1997)).

Posteriormente, Fang e Chuang (1999) estudaram a influência do ângulo de jateamento na dureza superficial dos aços inoxidáveis AISI 430 e 304 utilizando abrasivo carbeto de silício. Esses autores verificaram que um ângulo de impacto de 90° com o corpo de prova produziu maior deformação plástica quando comparado a um ângulo de 60°, originando maiores resultados de dureza. Os aços inoxidáveis AISI 430 e 304 que antes do tratamento apresentavam a mesma dureza ($H_v = 185$) passaram a apresentar 270 e 282 após tratamento, respectivamente.

Este aumento na dureza ou no grau de encruamento do material caracterizou um aumento na resistência do material à erosão. Segundo os autores, o aumento na dureza para ângulos grandes pode estar relacionado também com o aprisionamento de fragmentos de partículas abrasivas na superfície do metal (FANG; CHUANG, 1999).

Chander *et al.* (2009) avaliaram algumas propriedades da superfície do aço com baixo teor de carbono (C 0.2%, Mn 0.3%, P 0.04%, S 0.05%) ao realizar ensaios de jateamento abrasivo com óxido de alumínio. Foram analisados parâmetros de rugosidade da superfície do material em relação à variação no tempo de exposição ao jateamento (15 a 180 s), a influência da distância de aplicação do jateamento (50 a 200 mm) e o ângulo de impacto das partículas (20 a 90°). Um aumento gradual no ângulo tende a aumentar a rugosidade, atingindo o valor mais elevado em um ângulo correspondente a 80° (Figura 15).

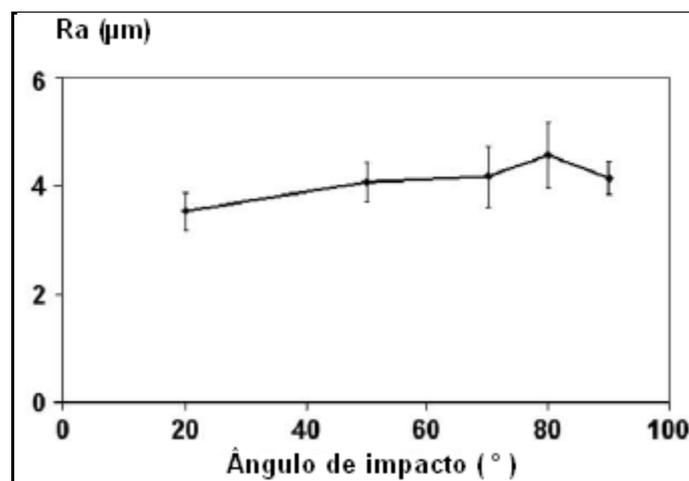


Figura 15 Variação na rugosidade do aço jateado em relação ao ângulo de impacto a uma pressão de 7 bar, distância de 100 mm, tempo de 1 minuto e granulometria de 24 mesh (Adaptado de (CHANDER *et al.*, 2009)).

Recentemente, Khameneh e Heydarzadeh (2010) investigaram os efeitos do jateamento com partículas de Al_2O_3 (355 – 500 μm) em aço inoxidável AISI 4130, submetido a diferentes tratamentos térmicos: recozimento, normalização e têmpera. A dureza Vickers do substrato após os tratamentos foi de 185, 275 e 415, respectivamente.

Ao longo do trabalho foram avaliados parâmetros como, distância de aplicação (25, 30 e 40 cm) entre o bocal e a peça, a pressão de trabalho (0,3; 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7 N/mm^2), tempo (3, 6 e 10 s) e o ângulo de jateamento (45 e 90°) com o objetivo de encontrar a combinação que resultasse numa rugosidade ideal.

Os resultados em termos de variação da rugosidade com o ângulo de jateamento são apresentados na figura 16 (KHAMENEH; HEYDARZADEH, 2010).

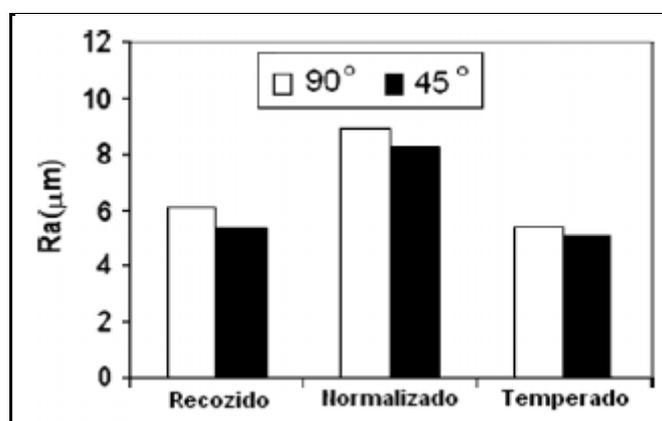


Figura 16 Efeito do ângulo de jateamento na rugosidade superficial (Adaptado de (KHAMENEH; HEYDARZADEH, 2010)).

Foi também verificado que o ângulo de jateamento afeta na força adesiva resultante entre o revestimento e o substrato. De acordo com os resultados, apesar do ângulo de 45° apresentar menor valores de rugosidade, ele apresentou o maior valor de resistência no teste *pull-off*, o que pode estar relacionado à menor quantidade de resíduos aderidos à superfície (KHAMENEH; HEYDARZADEH, 2010).

Mellali *et al.* (1997) avaliaram que a rugosidade Ra aumentou com a distância de jateamento até 100 mm, permaneceu quase constante até 150 mm, e depois diminuiu para maiores distâncias (Figura 17).

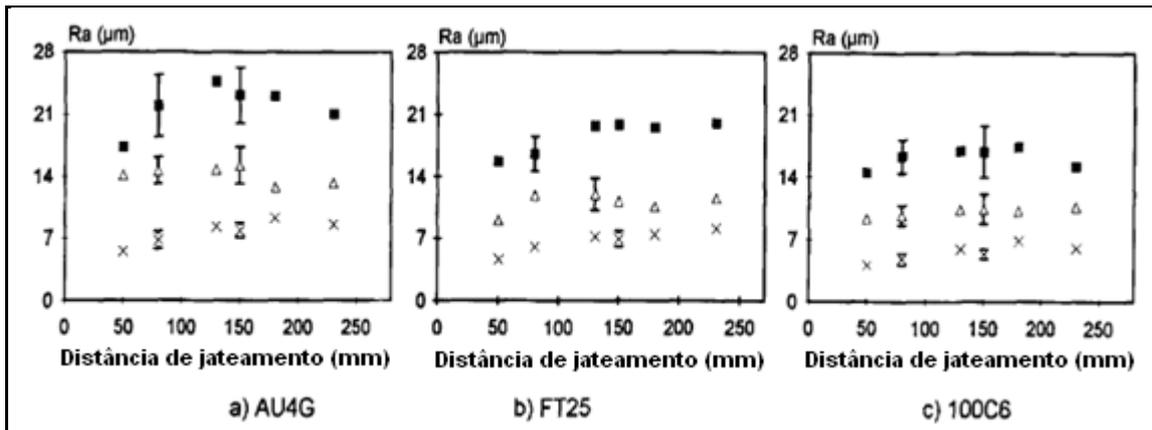


Figura 17 Influência da distância de jateamento, d , na Ra para três tamanhos de partículas e três materiais substratos ($p = 0,3$ MPa, um passe, máquina do tipo pressão) (Adaptado de (MELLALI *et al.*, 1997)).

Para os autores, para distâncias muito pequenas, a eficiência do impacto das partículas diminui em função dos choques ao longo do percurso. Quando a distância é muito grande, a partícula diminui de velocidade, especialmente para o caso de partículas pequenas cuja inércia é baixa (MELLALI *et al.*, 1997).

De acordo com os resultados obtidos por Chander *et al.* (2009), a influência da distância entre o alvo e o orifício de onde partem as partículas na rugosidade da superfície aumentou até uma distância de aproximadamente 100 mm, sendo que, abaixo deste valor a eficiência foi reduzida pelo fato das partículas de impacto colidirem com as partículas ricocheteadas. Ao atingir uma distância de 130 mm, os efeitos da energia cinética passam a ser relevantes de forma a reduzir a força de impacto do abrasivo, resultando em valores de rugosidade menores em relação aos obtidos com uma distância de 100 mm. Distâncias maiores que 130 mm não resultaram em grandes alterações nos valores de rugosidade (Figura 18).

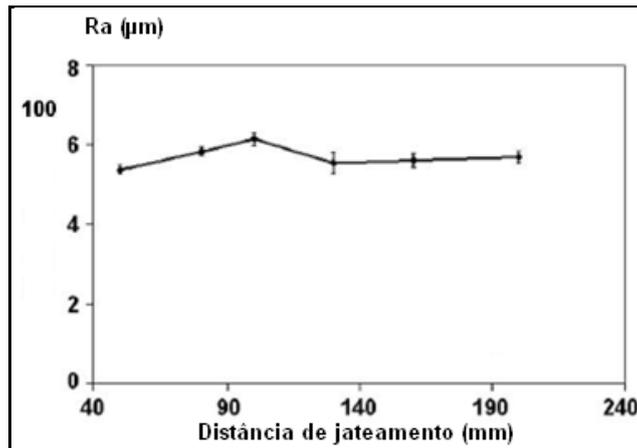


Figura 18 Variação na rugosidade do aço jateado em relação à distância de jateamento a uma pressão de 7 bar, ângulo de 90° , tempo de 1 minuto e granulometria de 24 mesh (Adaptado de (CHANDER *et al.*, 2009)).

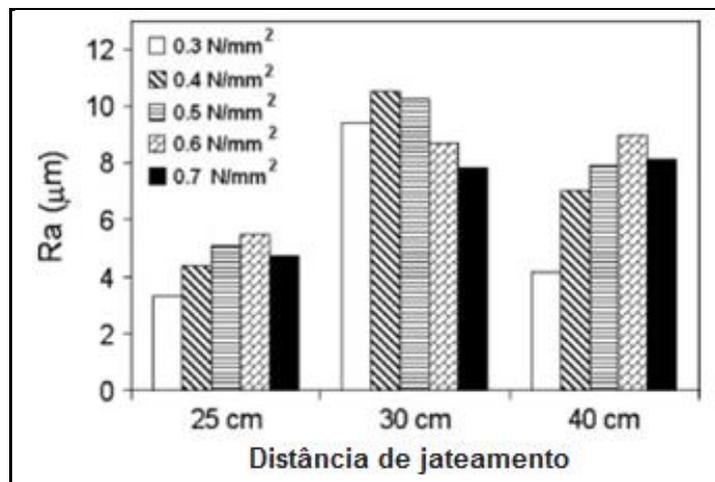


Figura 19 Efeito da distância e da pressão de jateamento na rugosidade do substrato recozido (tempo de jateamento = 3 s) (Adaptado de (KHAMENEH; HEYDARZADEH, 2010)).

Para o efeito da distância e da pressão (Figura 19), Khameneh e Heydarzadeh (2010) obtiveram os maiores valores de Ra a uma distância de jateamento de 30 cm, uma vez que, um aumento nesta, propiciou a redução no número de partículas colididas com o substrato, resultando em menores valores de rugosidade. Já numa distância de 25 cm, como o número de partículas colididas foi muito grande, menores valores de rugosidade foram obtidos, pelo fato do perfil de rugosidade uma vez aberto ser desfeito pelo choque massivo e constante de partículas.

Para Mellali *et al.* (1997), um aumento da pressão aumentou ligeiramente os parâmetros de rugosidade analisados, mas também promoveu quebra dos grãos

abrasivos e o aumento na quantidade de resíduos aderidos ao substrato após o tratamento, devido ao aumento no fluxo e na energia das partículas abrasivas.

Os efeitos sobre a rugosidade do substrato aumentaram continuamente com o aumento da pressão em ambos os tamanhos de grãos estudados (Figura 20). Observa-se também que os valores de rugosidade atingidos com um tamanho de grão maior foram superiores comparados aos obtidos com os de tamanho menor para as pressões impostas (SEN *et al.*, 2010).

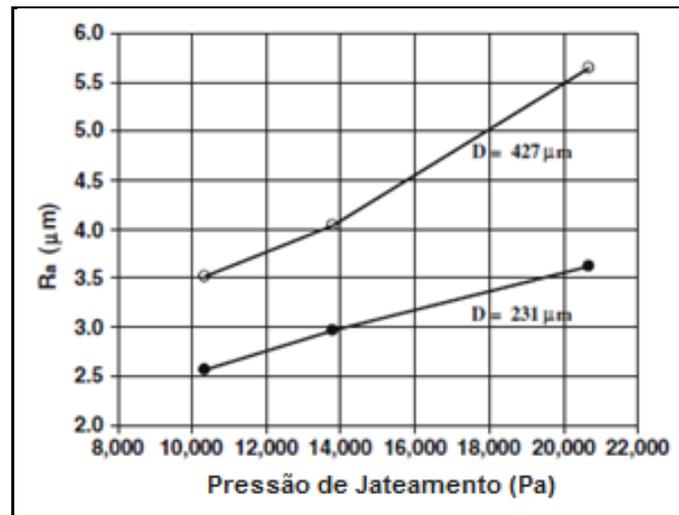


Figura 20 Variação da rugosidade do substrato aço carbono jateada (R_a) em função da pressão para dois tamanhos de grãos (427 e 231 μm) (Adaptado de (SEN *et al.*, 2010)).

No mesmo ano, Khameneh e Heydarzadeh (2010), verificaram que os valores de rugosidade aumentaram ligeiramente com o aumento no tempo de jateamento (Figura 21).

Foi também verificada a dependência dos valores de rugosidade em relação à pressão. Segundo os autores, um aumento na pressão do ar resulta em uma maior energia cinética dos grãos e, portanto, uma superfície mais áspera. Os autores ainda consideram que, o aumento no tempo ou na pressão de trabalho acima de certo limite, pode ocasionar a contaminação do substrato através do aprisionamento de resíduos de abrasivos na superfície, prejudicando a aderência entre o revestimento e o substrato (KHAMENEH; HEYDARZADEH, 2010).

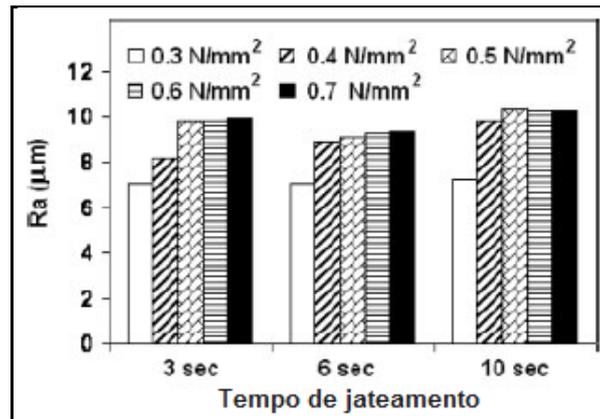


Figura 21 Efeito do tempo de jateamento na rugosidade em diferentes pressões de jateamento. (distância de jateamento = 40 cm) (Adaptado de (KHAMENEH; HEYDARZADEH, 2010)).

Em relação ao tempo, Chander *et al.* (2009) verificaram que a rugosidade da superfície aumentou com o aumento no tempo de jateamento, no intervalo de tempo compreendido entre 30 a 60 segundos (Figura 22).

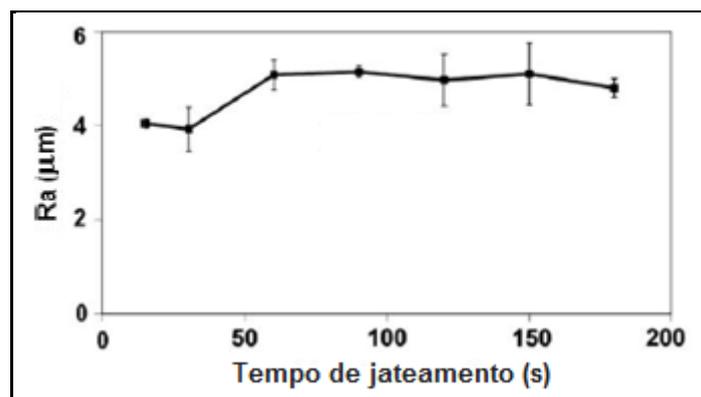


Figura 22 Variação na rugosidade em relação ao tempo de jateamento a uma pressão de 7 bar, ângulo de 90°, distância de 100mm e granulometria de 24 mesh (Adaptado de (CHANDER *et al.*, 2009)).

Para Mellali *et al.* (1997), a quantidade de resíduos na superfície após tratamento aumentou com o tempo de jateamento. Um tempo de jateamento entre 3 e 6 s foi suficiente para obter o maior valor de rugosidade, sendo que, acima deste intervalo a rugosidade não apresentou variações significativas.

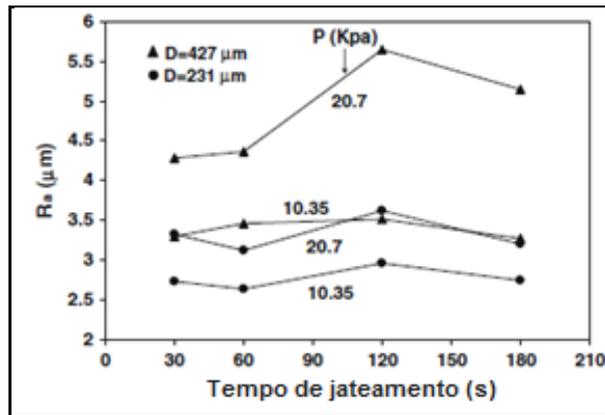


Figura 23 Variação da rugosidade do substrato de aço carbono jateada (R_a) em função do tempo de jateamento para várias combinações de pressão e tamanho de grão (Adaptado de (SEN *et al.*, 2010)).

Sen *et al.* (2010) ao analisarem o efeito da combinação entre a pressão e o tamanho do grão em relação ao tempo de jateamento (Figura 23), foi verificado que não houve significativa variação na rugosidade média da superfície (R_a) com o tempo, entretanto, em todos os casos a rugosidade apresentou um valor máximo no tempo de 120 s.

Segundo alguns autores, a contaminação e a molhabilidade das superfícies pós tratamento também exercem grande influência na aderência dos revestimentos.

No tratamento superficial do aço com baixo teor de carbono para eliminação de impurezas por jateamento abrasivo com óxido de alumínio, Momber e Wong (2005) avaliaram comparativamente a influência do jateamento em uma única etapa e o rejateamento nas propriedades da superfície do aço, a rugosidade da superfície, a molhabilidade, a dureza Vickers, o grau de contaminação da superfície e a resistência à tração pull-off dos revestimentos aplicados.

Neste trabalho, os resultados revelaram que o jateamento realizado em uma etapa elevou a rugosidade e que este aumento depende do número de etapas de jateamento (MOMBER; WONG, 2005).

Tanto o jateamento em uma única etapa quanto o rejateamento aumentaram a rugosidade quando comparada com superfícies não tratadas, porém, o rejateamento promoveu efeitos notáveis nas propriedades de superfície, aumentando a microdureza e resultando um menor perfil de rugosidade do substrato em comparação à superfícies

jateadas em um único estágio (Figura 24), por um fenômeno que ainda não está completamente claro, mas que pode estar relacionado à formação de regiões planas na superfície (MOMBER; WONG, 2005).

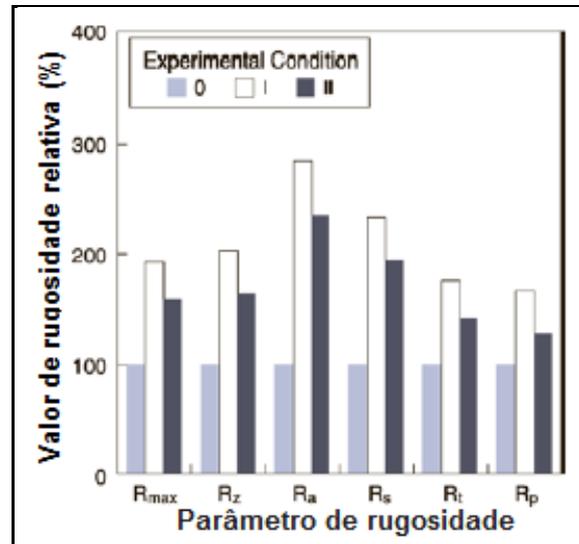


Figura 24 Modificação na rugosidade devido ao jateamento abrasivo, (0) Superfície sem tratamento, (I) Superfície jateada numa única etapa e (II) Superfície rejateada (Adaptado de (MOMBER; WONG, 2005)).

O ângulo de contato, resultante da interação entre o substrato metálico e um líquido é um parâmetro importante na avaliação da molhabilidade de uma superfície, visto que, qualquer alteração na molhabilidade pode afetar o desempenho de revestimentos (MOMBER; WONG, 2005).

Os resultados de molhabilidade da superfície encontrados por Momber e Wong (2005), foram menores para amostras que sofreram jateamento em única etapa quando comparado a amostras que não foram tratadas, no entanto, ambas apresentaram valores inferiores às superfícies que foram rejateadas. Visto que, um ângulo de contato elevado caracteriza baixa molhabilidade, o rejateamento deve prejudicar a aderência entre o revestimento e o substrato metálico.

De maneira geral, quanto maior a rugosidade da superfície melhor aderência entre o substrato e o revestimento. Segundo, Momber e Wong (2005), o grau de contaminação da superfície por resíduos do abrasivo não exerceu influência significativa sobre a adesão entre o substrato e o revestimento.

Conforme esperado, a superfície sem tratamento apresentou menor aderência e o jateamento em uma única etapa aumentou a aderência. Os autores verificaram que a contaminação por grãos fraturados não deteriorou aderência entre o revestimento e o substrato, sendo o parâmetro de rugosidade dominante no efeito de adesão (MOMBER; WONG, 2005).

Dentre as informações encontradas na literatura, poucas são consideradas consensuais, pois se trata de um assunto de relativa complexidade e de caráter experimental. As diretrizes encontradas, em sua maioria, apresentam um compêndio de informações que apontam certo grau de dificuldade, principalmente no que se refere à comparação de resultados obtidos experimentalmente, uma vez que as condições de jateamento e as causas resultantes destes processos ainda não são bem definidas.

2.5 PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIES

Os tratamentos superficiais, entre eles o jateamento, podem modificar as propriedades de superfície do substrato, as quais compreendem: energia de superfície e molhabilidade. Essas propriedades também influenciam a aderência de revestimentos (HARRIS; BEEVERS, 1999).

2.5.1 Ângulo de contato e energia de superfície

A molhabilidade de uma superfície sólida por um líquido depende do ângulo de contato estático (Θ) estabelecido em função do equilíbrio atingido entre as tensões interfaciais do líquido com o seu vapor (γ_{LV}) e a superfície sólida (γ_{SL}), conforme esquematizado na (Figura 25).

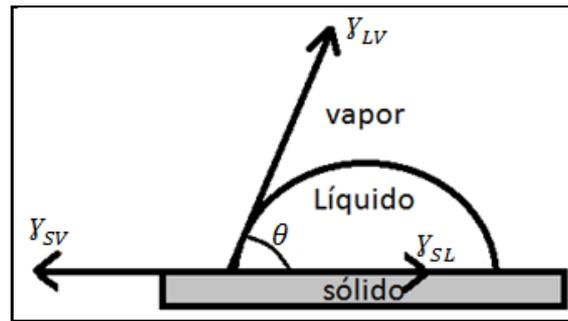


Figura 25 Representação do ângulo de contato sobre uma superfície. (Adaptado de (COMYN, 1992)).

A tendência de um determinado fluido de não se espalhar em uma superfície, “não molhar”, deve-se ao fato das moléculas que compõem o fluido interagirem preferencialmente entre si através de fortes forças de coesão em detrimento da adesão com a superfície sólida. O comportamento inverso, o espalhamento do fluido é favorecido pelas fortes forças de adesão (BUTT; GRAF; KAPPL, 2003).

Numa abordagem termodinâmica, estas duas situações distintas, atuando de forma a minimizar a energia total do sistema, são ditadas pelas energias das três interfaces, representadas pelas tensões superficiais que, por sua vez, na condição de equilíbrio, originam a relação, conhecida como equação de Young (COMYN, 1992),

$$Y_{SV} = Y_{SL} + Y_{LV} \cos \theta \quad \text{Equação 1}$$

A variação no ângulo de contato origina diferentes condições de molhabilidade. Desse modo, o ângulo de contato é uma medida de molhabilidade, quanto menor o ângulo, maior é a molhabilidade. Se o líquido for água, por exemplo, o sólido é dito hidrofóbico para ($\Theta > 90^\circ$), onde a fase líquida é considerada não molhante, hidrofílico para ($\Theta < 90^\circ$), sendo considerada molhante a fase líquida e, superhidrofílico ($\Theta = 0^\circ$), onde há o espalhamento completo da gota (MOMBER, 2008).

Considerações à respeito de energia de superfície também contribuem para o entendimento do fenômeno de adesão. A determinação da energia de superfície de um sólido é realizada de forma indireta através de medidas de ângulo de contato.

A tensão superficial tem sido interpretada como o trabalho necessário para aumentar a área superficial por uma unidade, num processo isotérmico e reversível, de

modo que pode ser expressa em unidade de força por unidade de comprimento ou por unidade de área. Nesta determinação, em geral, utiliza-se o comportamento de líquidos para medir o ângulo de contato em função da tensão superficial, para extrair medidas de energia de superfície dos materiais analisados. Estes resultados variam em função do método utilizado, os quais compreendem em: Método dos dois Líquidos ou Média Harmônica e Geométrica; Teoria Ácido-Base ou dos Três Líquidos e Aproximação de Zisman.

Neste trabalho foi utilizado o método dos dois líquidos, o método da média geométrica, uma vez que é o método mais apropriado para sistemas de elevada energia de superfície, como metais (COMYN, 1992). Neste método dois líquidos devem ser utilizados, um polar e outro apolar, geralmente água e diiodometano, respectivamente.

O trabalho de adesão, W_{SL} , entre um sólido e um líquido pode ser expresso pela equação de Dupré:

$$W_{SL} = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad \text{Equação 2}$$

Assim, combinando-se as equações (1) e (2), obtém-se a equação de Young-Dupré:

$$W_{SL} = (1 + \cos \theta)\gamma_{LV} \quad \text{Equação 3}$$

Segundo FOWKES (1964,1983 apud SANTOS, 2008) em seu trabalho, propôs que o trabalho de adesão é a soma das contribuições de interações dispersivas (apolares) e não dispersivas (polares),

$$W_{SL} = W_{SL}^d + W_{SL}^p + \dots \quad \text{Equação 4}$$

$$W_{SL}^d = 2(\gamma_{LV}^d \gamma_{SV}^d)^{1/2} \quad \text{Equação 5}$$

$$W_{SL}^p = 2(\gamma_{LV}^p \gamma_{SV}^p)^{1/2} \quad \text{Equação 6}$$

Owens, Wendt e Kaelble, estenderam a equação de Fowkes para uma forma mais geral ao substituir as equações (5) e (6) na equação (4),

$$W_{SL} = 2(\gamma_{LV}^d \gamma_{SV}^d)^{1/2} + 2(\gamma_{LV}^p \gamma_{SV}^p)^{1/2} \quad \text{Equação 7}$$

que, combinada com a equação (3), origina,

$$\gamma_{SL} = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - 2(\gamma_{LV}^d \gamma_{SV}^d)^{1/2} - 2(\gamma_{LV}^p \gamma_{SV}^p)^{1/2} \quad \text{Equação 8}$$

A substituição da equação 1 na equação 8, resulta na equação 9, que representa o método da média geométrica a qual estabelece uma maneira de estimar a energia de superfície de um sólido, usando dois líquidos com γ_{LV}^d e γ_{LV}^p conhecidos. Com a média do ângulo de contato, determina-se facilmente a energia de superfície do sólido, através da soma das componentes dispersiva (γ_{SV}^d) e polar (γ_{SV}^p).

$$\gamma_{LV}(1 + \cos \theta) = 2 \left[(\gamma_{LV}^d \gamma_{SV}^d)^{1/2} + (\gamma_{LV}^p \gamma_{SV}^p)^{1/2} \right] \quad \text{Equação 9}$$

O ângulo de contato real é obtido sobre uma superfície sólida idealizada, onde são verificadas as seguintes características: aspecto homogêneo, lisa, inerte, rígida e impermeável. No entanto, sob ponto de vista prático, os métodos convencionais de medida de ângulo de contato fornecem o ângulo de contato aparente, que se baseia em extrapolações e observações óticas. Desta forma, o ângulo de contato aparente pode ser muito diferente do ângulo real devido tanto às características químicas quanto morfológicas da superfície do substrato, originando o fenômeno de histerese. O tratamento deste fenômeno sob o ponto de vista matemático se torna complicado, pelo fato de não se ter clareza sobre a situação do equilíbrio termodinâmico, de modo que o sistema não é mais descrito somente por um estado de equilíbrio (NEUMANN, 2011).

Um das principais origens da histerese de ângulo de contato no caso de superfície de substratos metálicos são (NEUMANN, 2011): a rugosidade, contaminantes e heterogeneidade química.

A rugosidade da superfície exerce influência pela presença de irregularidades na escala microscópica, muitas vezes de mesma escala molecular do fluido ou até mesmo maiores, provocando uma variação local no ângulo de contato.

A presença de contaminantes em substratos também alteram localmente as características de molhabilidade da superfície.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental foi dividido em três partes, a saber: caracterização dos abrasivos, caracterização das superfícies jateadas e caracterização do desempenho anticorrosivo de revestimento orgânico aplicado nestas superfícies.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ABRASIVOS

Neste trabalho, quatro tipos de abrasivos foram utilizados, a saber: gralha de aço carbono (martensítico), gralha de aço inox (martensítico), bauxita sinterizada (*Sinterblast*[®]) e alumina desmagnetizada, todos com perfil angular.

Esta etapa de caracterização se deu com o objetivo de conhecer as informações dos boletins técnicos e melhor conhecer as propriedades dos abrasivos antes do uso. A escolha dos abrasivos foi baseada em sugestão do corpo técnico dos principais fornecedores disponíveis no mercado. Tendo em vista, a necessidade de abrir perfil de rugosidade em material de elevada dureza como é o aço super duplex. As propriedades avaliadas foram: densidade, dureza, condutividade e pH dos extratos aquosos, composição e distribuição granulométrica.

3.1.1 Densidade

A técnica utilizada para a determinação da densidade dos abrasivos foi a picnometria. A densidade por picnometria baseia-se na determinação da densidade aparente dos abrasivos através da medição direta da massa e indireta do volume do sólido em um meio líquido, neste caso água bidestilada em temperatura ambiente de 25°C, sendo realizadas quatro medidas por abrasivo.

3.1.2 Dureza

Os grãos abrasivos foram embutidos, numa prensa de embutimento *Simplimet* 1000 da *Buehler*, a quente em resina fenólica *Phenomet*[®], conhecida como baquelite.

Após o embutimento as amostras foram lixadas na politriz Ecomet 4000 da *Buehler* na sequência de 400 até 1500 # e por fim polidas com pasta de diamante de 3µm e 1µm.

Os ensaios de dureza foram realizados em um microdurômetro *Micromet* 5114 da *Buehler* de acordo com a norma ASTM E 384 (2010). As indentações foram criadas ao aplicar uma pré-carga de 100g, sendo que para cada tipo de abrasivo foi coletado um total de cinquenta medidas de dureza, as quais foram analisadas estatisticamente.

3.1.3 Condutividade e pH do extrato aquoso

As medidas de condutividade do extrato aquoso foram feitas com condutivímetro de bancada da Quimis modelo Q405M v.2.02. A determinação do pH foi realizada com pHmetro da Quimis modelo Q400MT v.1.01. Esses ensaios foram realizados em triplicata para cada abrasivo.

3.1.4 Composição

A análise de difração de raios-X é utilizada para caracterizar fases cristalinas presentes em materiais (CULLITY; STOCK, 2001). Assim, a composição cristalina dos abrasivos foi caracterizada através desta técnica. Para viabilizar as medidas, os materiais abrasivos foram aglomerados e embutidos em resina inerte. Os mesmos parâmetros ajustados para caracterizar os abrasivos foram utilizados nas análises de caracterização dos substratos jateados, conforme (3.3.2).

Neste trabalho, foi utilizado o difrator de raios-x *D8 Discover* da marca *Bruker*. A radiação utilizada foi a do Cobalto, com comprimento de onda de 1,78Å. A ótica primária utilizou um arranjo com espelho de *Goebel*, para garantir o paralelismo e um *Soller Slit* para boa colimação do feixe incidente sobre a amostra. A ótica secundária constou de um detector do tipo PSD (*Point Scanning Detector*) da marca *Lynx Eye*, com dispositivo para filtragem da radiação K β . A tensão e corrente utilizadas foram respectivamente 35 kVe 40 mA. O intervalo angular de medida, o tempo e o tamanho do passo variaram para cada tipo de amostra, dependendo das fases investigadas.

3.1.5 Distribuição granulométrica

Inicialmente os abrasivos foram reduzidos a pequenas porções representativas através do quarteamento. Posteriormente, estas porções foram dispostas em jogo de peneiras cuja sequência é apresentada na tabela 9.

Tabela 9 Sequência de peneiras ASTM E 11 (2009).

Abertura (mm)	ASTM
2,36	8
1,70	12
1,18	16
0,850	20
0,600	30
0,425	40
0,300	50
0,212	70

As análises de distribuição granulométrica foram realizadas em um peneirador automático Tyler Ro-Tap® 8” no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ. Após o tempo de peneiramento programado em 15 minutos, as porções retidas em cada peneira foram pesadas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES JATEADAS

A caracterização das superfícies jateadas constitui medidas do perfil de rugosidade, verificação de incrustações, análise de sais solúveis, condutividade e pH do extratos aquosos, dureza do substrato, ângulo de contato e energia de superfície, cinética de molhabilidade, perda de massa e suscetibilidade à corrosão por pite.

Antes do jateamento todas as amostras de aço carbono e aço super duplex usinadas, sendo submetidas a um desbaste de 300 µm de espessura nas faces, utilizando fluido de corte adequado, com o objetivo de eliminar eventuais tratamentos superficiais anteriores.

3.2.1 Jateamento abrasivo

Neste trabalho, foi avaliado o desempenho dos abrasivos no tratamento de superfície do aço super duplex com especificação UNS S 32760 comparativamente ao aço carbono ASTM A 516 G60. A composição química dos dois tipos de aço é apresentada na tabela 10.

Tabela 10 Composição química e dureza do aço super duplex UNS S 32760 e do aço carbono ASTM A 516 G 60.

UNS S 32760	Elemento	Cr	Mo	Ni	Mn	Cu	N	Dureza Vickers
	(%)	24,45	3,74	7,06	0,55	0,53	0,20	224
ASTM A516 G60	Elemento	C	Mn	P	S	Si		Dureza Vickers
	(%)	0,169	0,780	0,016	0,015	0,178		126

O jateamento foi feito com uma máquina de pressão da POLO-AR, modelo PU-70, com os seguintes abrasivos: granalha de aço carbono (martensítico), aço inox (martensítico), bauxita sinterizada e alumina desmagnetizada, todos com perfil angular, sendo identificados ao longo do trabalho como, granalha, aço inox, bauxita e alumina,

respectivamente. A composição química dos abrasivos de acordo com os boletins técnicos dos fornecedores se encontram nas tabelas 11 e 12.

Tabela 11 Composição química dos abrasivos bauxita e alumina de acordo com o boletim técnico do fornecedor.

Abrasivo	Composição química (%)					
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	K ₂ O
Bauxita sinterizada	76,3	14,10	6,2	1,95	0,35	0,49
Alumina desmagnetizada	>89	<3,5	<3,5	<3,5	-	-

Tabela 12 Composição química dos abrasivos granalha de aço carbono e aço inox de acordo com o boletim técnico do fornecedor.

Abrasivo	Composição química (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Aço Carbono (martensítico)	0,8-1,2	>0,4	0,6-1,2	<0,05	<0,05	-	-
Aço inox (martensítico)	2,0	<2,0	<2,0	-	-	30,0	<0,2

O grau de limpeza estabelecido corresponde à designação Sa3 “metal branco” da norma ISO 8501-1.

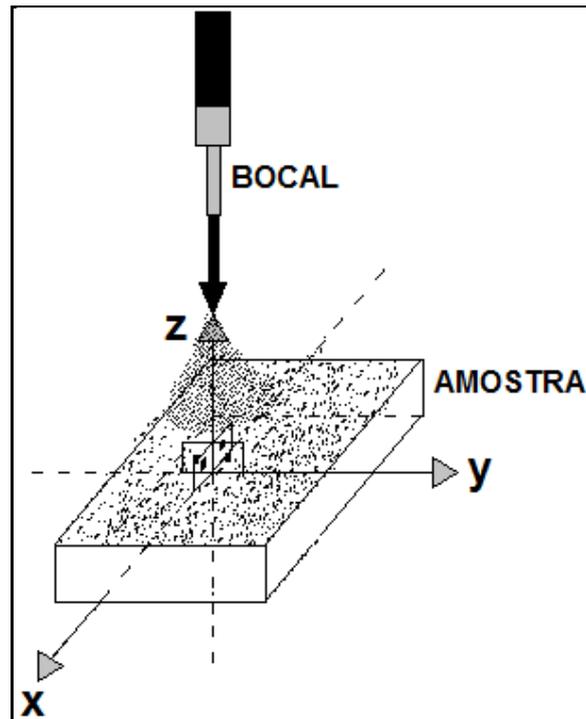


Figura 26 Ângulo de jateamento, 90°.

As condições de jateamento foram idênticas para os quatro abrasivos e estão descritas na tabela 13. Na figura 26, está o esquema de posicionamento das amostras em relação ao bico de jateamento, definindo ângulo de 90°.

Uma análise da variação do perfil de rugosidade foi realizada em função do tempo de jateamento. Para isto, foram utilizadas amostras com dimensões de 45 mm x 45 mm. O jateamento se deu na mesma região coletando valores de rugosidade com intervalos de 10 segundos até o primeiro minuto e, intervalos de 20 segundos até atingir 120 segundos de análise. Para cada tempo de análise foram coletadas 42 medidas de rugosidade, utilizando um rugosímetro mecânico Mod.123 Elcometer® como dispositivo de medida, com menor divisão equivalente a 0,002 mm.

Tabela 13 Condições de jateamento.

Condições de Jateamento	
Tipo (máquina)	Jato de pressão
Bico	5/16"
Pressão [psi]	100
Distância	25 cm
Ângulo	90°

Com essas análises se definem a tolerância de variação no perfil de rugosidade característico de cada aço e de cada abrasivo. Após definição do perfil de rugosidade, procedeu-se o jateamento de amostras com dimensões variadas visando à caracterização das superfícies jateadas e a aplicação de revestimento orgânico para avaliação de desempenho. O jateamento dessas amostras foi precedido por desengraxe com xileno.

3.3 ANÁLISES NO SUBSTRATO

3.3.1 Perfil de rugosidade

As análises das condições de superfície em termos de rugosidade dos corpos de prova jateados foi realizada através do uso de um rugosímetro mecânico.

O rugosímetro mecânico mede a altura entre picos e vales de uma superfície plana. Este medidor apresenta certas limitações e requer alguns cuidados em seu uso. Essas medidas foram realizadas em quatro corpos de prova de cada substrato por abrasivo, com dimensões (90 mm x 27 mm), sendo que em cada um deles foram coletadas nove medidas em cada face, totalizando dezoito medidas por corpo de prova. O parâmetro obtido para caracterização do perfil foi a altura entre pico e vale, em μm , tendo como linha de base a própria superfície do corpo de prova jateada.

Adicionalmente, após estas medidas os corpos de prova foram submetidos a um corte transversal, seguido de polimento na região do corte e analisadas em um microscópio ótico *Carl Zeiss*[®], controlado pelo software *AxioVision*[®]. Imagens sucessivas do perfil de rugosidade, com aumento de 200X foram obtidas e tratadas de forma a compor um mosaico com o objetivo de avaliar a forma dos picos e vales, bem como a distribuição das incrustações nestas regiões.

3.3.2 Difração de raios-X (DRX)

A DRX foi realizada em quatro amostras, com dimensões (45 mm x 45 mm x 5,5 mm). Adicionalmente, um corpo de prova de cada tipo de aço, sem jateamento, foi analisado e utilizado para comparação.

Esta caracterização visou à identificação de picos relativos à presença de fases cristalinas, diferentes das identificadas no material original, que tenham surgido em consequência do processo de jateamento. Os difratogramas obtidos foram indexados pelo banco de dados do JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*) (ICDD, 2012). Todas as análises foram realizadas em quadruplicata.

3.3.3 Análise de condutividade e pH de extrato aquosos

Com o objetivo avaliar a condição dos substratos metálicos após o jateamento foram realizadas medidas do teor de íons cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}), condutividade e pH em extrato aquosos. Estas análises se fizeram necessárias não apenas para quantificar a presença destes contaminantes em função dos diferentes tipos de abrasivos utilizados, mas auxiliar na interpretação do desempenho de revestimento anticorrosivo aplicado nessas superfícies. Os aquosos foram obtidos conforme procedimento que segue:

- ✓ Imersão, por 30 minutos, do substrato metálico em um béquer contendo água bidestilada em ebulição;
- ✓ Remoção do corpo de prova do banho com posterior lavagem com água quente, vertendo a mesma para o mesmo bécher;
- ✓ Evaporação do volume de água para 80 ml, seguido de resfriamento e filtração, avolumando para um balão volumétrico de 100 ml.

Com os extratos obtidos, a determinação do teor de cloreto foi realizada por colorimetria através da formação de um complexo de tiocianato férrico de coloração intensa, proporcional a concentração do íon cloreto, tendo a máxima absorbância em

460 nm, sendo este método aplicado a amostras que contenham de 0,1 mg/L a 10 mg/L de cloreto (SKOUGSTED *et al.*, 1979). Já o teor de sulfato foi quantificado por turbidimetria, através da preparação de uma curva com índice de turbidez em unidade (FTU) x concentração de sulfato (MCCOY, 1969). A curva de calibração foi adequada para detectar teores acima de 7 – 10 mg/L, o sulfato é medido pela formação de sulfato de bário obtido ao se adicionar cloreto de bário na amostra, com um estabilizante para mantê-lo em suspensão.

Assim, no cálculo do teor dos contaminantes foram consideradas a soma das áreas de dois corpos-de-prova com dimensões de (45 mm x 45 mm x 5,5 mm) para o aço carbono e (45 mm x 45 mm x 4,5 mm) para o super duplex.

3.3.4 Dureza do substrato

As medidas de dureza foram determinadas antes e após a etapa de jateamento com os diferentes tipos de abrasivos. As medidas foram realizadas num durômetro (escalas *Rockwell* e *Brinell*) *Buehler Macromet* 5101. Seis corpos de prova de cada tipo de substrato, com dimensões de 90 mm x 27 mm foram utilizados, sendo obtidas cinco indentações com espaçamentos aproximadamente iguais. Ao final, os valores de dureza foram convertidos para a escala *Vickers* de acordo com a norma ASTM E 140 (2007).

3.3.5 Ângulo de contato e energia de superfície

As medidas de ângulo de contato e energia de superfície foram feitas com água deionizada (fluido polar) e diiodometano (fluido apolar). Os valores das componentes polar e dispersiva das tensões superficiais dos líquidos utilizados encontram-se na tabela 14. Também foi avaliada a dinâmica de assentamento da tinta utilizada para revestir os corpos de prova.

Tabela 14 Propriedade dos líquidos utilizados (HARRIS; BEEVERS, 1999).

Líquido	Tensões superficiais (mJ/m ²)		
	γ_{LV}^d	γ_{LV}^p	γ_{LV}
Água deionizada	21,8	51	72,8
Diiodometano	49,5	1,3	50,8

Nesta determinação, foi empregado o goniômetro *Ramé-Hart* NRL A-100-00, do Laboratório de Superfícies Poliméricas e Asfálticas do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ, com o método da gota séssil. Este instrumento consiste em um sistema automatizado com software e câmera digital de alta resolução para análise e captura do ângulo de contato. A imagem da gota na condição de equilíbrio é capturada pela câmera e o ângulo de contato calculado após o software realizar o ajuste do contorno da gota a uma elipse, caracterizando o ângulo de contato estático.

As determinações foram conduzidas em temperatura média de 25°C e a evolução do ângulo de contato com os fluidos estudados foi avaliada nos primeiros 300 s após o contato da gota com os substratos jateados. As dimensões das amostras utilizadas nessas medidas eram de 90 mm x 27 mm. Foram utilizados três corpos de prova (frente e verso) de cada substrato por abrasivo, sendo os resultados expressos com base em 10 medidas, cada uma com 30 pontos, com intervalos de tempo de 10 segundos totalizando 300 segundos de ensaio.

A determinação da energia de superfície dos substratos foi realizada através do método da média geométrica. Com o conhecimento dos ângulos de contato estáticos estabelecidos pelos fluidos, foi possível determinar as energias de superfície para os substratos de aço carbono e aço super duplex através dos cálculos gerados pelo *software DROPimage Advanced*[®] vinculado ao equipamento.

A cinética de molhabilidade com a tinta, ou seja, a evolução do ângulo de contato com o tempo foi feita considerando os primeiros 200 s após o contato da gota com os substratos. Essas análises foram feitas em três corpos de prova (frente e verso). Foram coletadas vinte medidas com intervalos de 10 segundos totalizando 200 segundos de medida. O procedimento foi repetido dez vezes, para cada substrato tratado com os

diferentes abrasivos. O cálculo do ângulo de contato de equilíbrio foi baseado nos ângulos distribuídos ao longo da curva.

3.3.6 Perda de massa e suscetibilidade à corrosão por pite

Com o intuito de avaliar a influência dos abrasivos na velocidade de corrosão dos substratos, foi feito ensaio de perda de massa, segundo as normas ASTM G 1 (2003) e ASTM G 31 (2004). As amostras de aço carbono tinham dimensões de 5,5 mm x 45 mm x 45 mm. O ensaio foi realizado em meio NaCl 1% (p/p) em um volume de 2 litros de solução, respeitando a relação de volume mínimo de 5 ml / cm² recomendado pela norma.

Após o tempo de imersão de 352,27 horas, efetuou-se o procedimento de limpeza com a retirada das amostras e imersão, por um intervalo de aproximadamente de 1 minuto, em temperatura ambiente de 25°C na solução de *Clark* (HCl concentrado + 50 g SnCl₂ + 20 g SbO₃) para sofrerem decapagem. Depois da decapagem, as amostras foram lavadas com água destilada para retirada de possíveis produtos de corrosão, secas com acetona e expostas a um jato de ar frio. As amostras completamente secas, foram pesadas numa balança com precisão de 0,0001 g. Repetiu-se este procedimento até atingir o patamar de peso constante.

A taxa de corrosão foi calculada de acordo com a equação:

$$\text{Taxa de corrosão} = \frac{K \cdot W}{A \cdot T \cdot D} \quad \text{Equação 10}$$

onde,

K=8,76x10⁴ (mm/ano), W= perda de massa (g), A= área (cm²), T= tempo (horas) e D=densidade da amostra (g/cm³).

Já para o aço super duplex, foi avaliada a influência dos abrasivos na suscetibilidade à corrosão por pite, segundo a norma ASTM G48 (2011). A perda de massa por área total da amostra foi calculada (equação 10) após corpos de prova com dimensões 4,5 mm x 45 mm x 45 mm terem sido imersos em solução 10% em peso de

FeCl₃.6H₂O em água bidestilada por um período de 24 horas a uma temperatura de 50 ± 2 °C. A limpeza das amostras foi feita em solução 10% (v/v) HNO₃ em temperatura de 60 ° C. Posteriormente, foi realizada uma análise qualitativa da localização dos pites através de uma comparação visual antes e após os ensaios em um estereoscópio com aumento de 20x.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE REVESTIMENTO ORGÂNICO

A influência do tratamento de superfície dos dois aços com os diversos abrasivos, sobre o desempenho de revestimento orgânico, foi avaliada com ensaios de corrosão.

3.4.1 Preparação das amostras

Amostras dos dois aços com dimensões de 9 cm x 14 cm foram desengraxadas com xileno e jateadas até atingirem perfil de rugosidade característico de cada abrasivo. Em seguida, foi aplicada tinta epóxi comercial que atende a especificação N – 2680 da Petrobras. A tinta foi aplicada com trincha em duas demãos. A espessura seca média foi de 500 µm com tolerância de 20% de variação.

As espessuras foram medidas com medidor de espessura seca modelo 456² Elcometer®. Foram feitas nove medições distribuídas ao longo da extensão da área útil das placas sendo, três na parte inferior, três no meio e três na parte superior, respeitando um afastamento de 2 cm das bordas das amostras.

Antes da pintura foi colocada, em uma das faces, na parte inferior das amostras, uma fita adesiva de formato retangular com dimensões de 1 mm de largura e 50 mm de comprimento, a uma distância aproximada de 2,5 cm da borda e com inclinação de aproximadamente de 30 graus. A tinta foi aplicada nas amostras cobrindo esta fita adesiva. Após o tempo de cura do revestimento a fita foi removida, expondo o substrato metálico. Esse procedimento visou simular um dano no revestimento com

exposição do substrato metálico sem, no entanto, usar ferramentas, de risco, o que poderia mascarar os efeitos dos diferentes tratamentos superficiais no avanço da corrosão em torno desta área.

3.4.2 Ensaios de corrosão

Com as amostras pintadas foram realizados ensaio de imersão e ensaio cíclico. Esses ensaios foram realizados com amostras em triplicata.

3.4.2.1 Ensaio de Imersão

Neste ensaio os corpos de prova foram imersos em água destilada com temperatura a 40°C (Figura 27). Com o objetivo de uniformizar a temperatura no fundo do tanque, foi inserido um agitador mecânico, a uma velocidade de 500 rpm. Os corpos de prova foram apoiados numa placa de acrílico com orifícios posicionada acima do agitador. Desse modo, o fluido em contato com as placas estava praticamente estático. A duração deste ensaio foi de 2184 horas. Esse ensaio foi escolhido pelo seu efeito de rápida evidenciação da influência de tratamentos superficiais na perda de aderência dos revestimentos.



Figura 27 Aparato experimental para o ensaio de imersão.

3.4.2.2 Ensaio cíclico

O ensaio cíclico teve duração de onze ciclos de 168 horas cada, totalizando 1848 horas. As condições de ensaio seguiram a norma ISO 20340 (2003) (Tabela 15).

Tabela 15 Condições de exposição dos materiais no ensaio cíclico ISO 20340 (2003).

Exposição	Ambiente
Ciclo de:	
72 horas	-4 horas de exposição à radiação UV-A a $(60 \pm 3)^\circ\text{C}$; -4 horas de condensação a $(50 \pm 3)^\circ\text{C}$. 
72 horas	Névoa salina (Solução de NaCl a 3,5%) 
24 horas	Baixa temperatura $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 

A etapa de exposição à radiação ultravioleta alternada com a condensação foi conduzida numa câmara de ensaio acelerado modelo QUV-SE do fabricante Q-Lab. A exposição em névoa salina foi realizada numa câmara de névoa salina, modelo CCT 600

do mesmo fabricante. A condição em baixa temperatura foi realizada em um freezer horizontal (Figura 28).

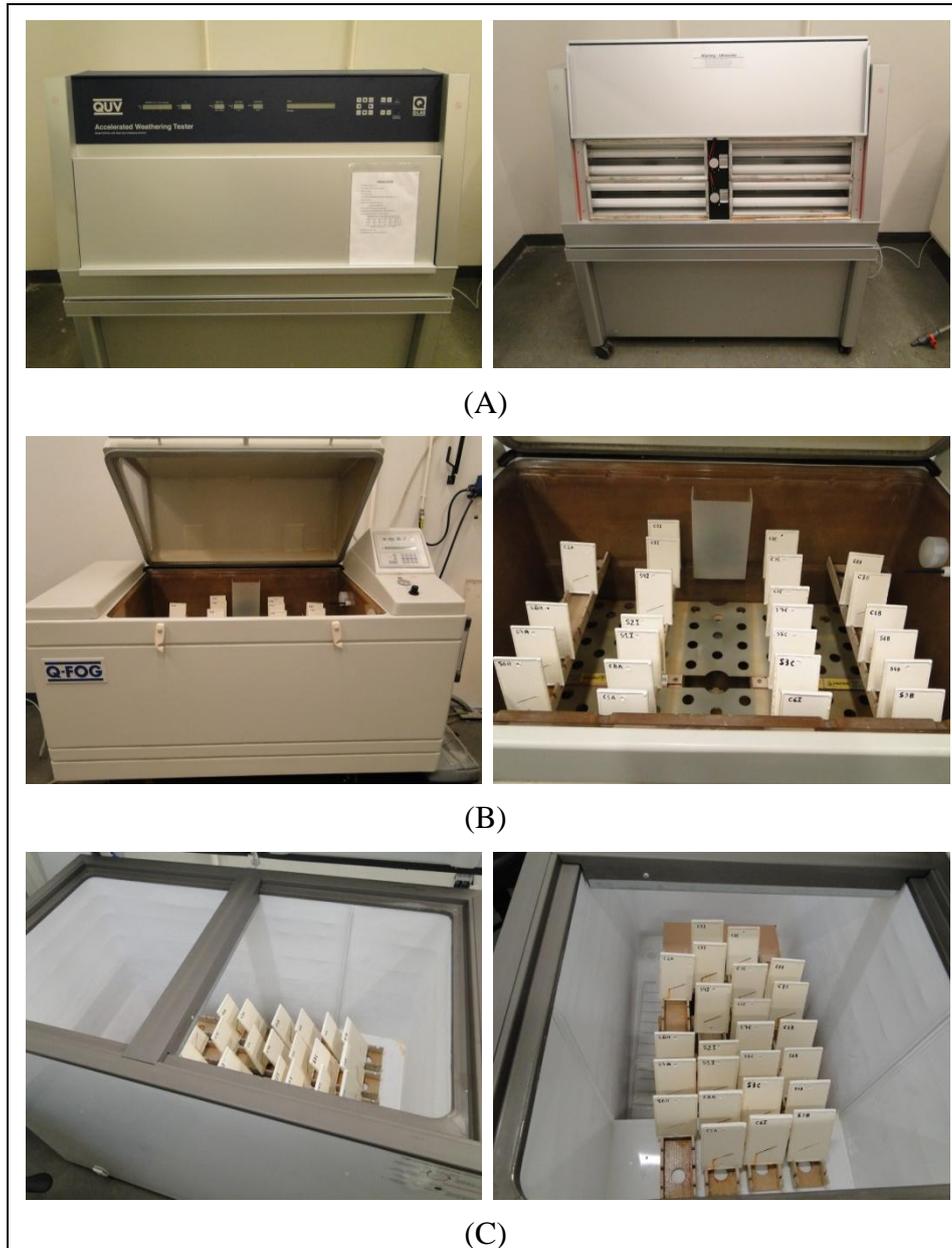


Figura 28 Exposições utilizadas no ensaio cíclico: (A) Câmara de UV/condensação, (B) Câmara de névoa salina, (C) Câmara de baixa temperatura.

3.5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Por questões de limitação do arranjo físico nos equipamentos, os corpos de prova do ensaio de cíclico foram analisados na face com risco “frente” apenas, e os corpos de prova do ensaio de imersão foram analisados em ambos os lados, com risco “frente” e no lado sem risco “verso”.

As amostras foram avaliadas antes dos ensaios de corrosão por aderência. Durante e após os ensaios de corrosão foram avaliados grau de empolamento ISO 4628-2 (2003), corrosão no substrato ASTM D 610 (2008), avanço da corrosão à partir do “risco” ISO 4628-8 (2005) e aderência ASTM D 4541 (2009).

3.5.1 Grau de empolamento

Esta caracterização se baseou na norma ISO 4628-2 (2003). A norma utiliza padrões fotográficos para medir o grau de empolamento das amostras (Figura 29). A classificação é feita através de dois parâmetros. O primeiro mede o tamanho do empolamento, classificando-os de 2 a 5, sendo que dois representa o menor estado de deterioração e cinco o maior. O segundo está relacionado com a densidade de empolamento na amostra classificada também de 2 a 5, sob o mesmo critério. Uma amostra, por exemplo, com densidade 3 e tamanho 5, de acordo com a norma, a classificação seria 3(5S).

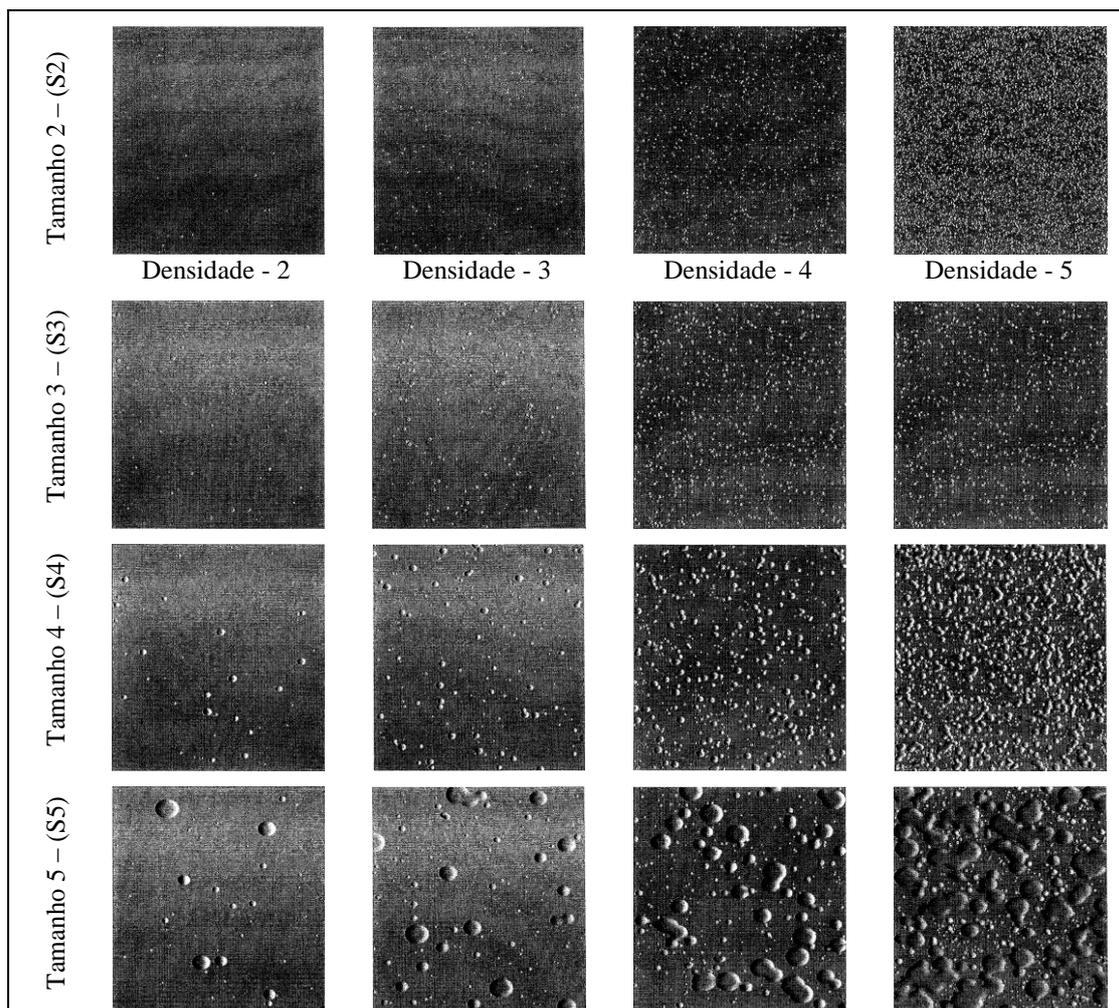


Figura 29 Padrões fotográficos da classificação do grau de empolamento ISO 4628-2 (2003).

3.5.2 Corrosão no substrato

A avaliação do grau de corrosão no substrato se baseou na norma ASTM D 610 (2008) que também utiliza padrões fotográficos. A classificação é feita de 0 a 10, sendo que zero representa uma superfície completamente oxidada e dez nenhum vestígio de corrosão no substrato. Classificações intermediárias estão relacionadas com o percentual da área corroída e os padrões visuais são mostrados na (Figura 30).

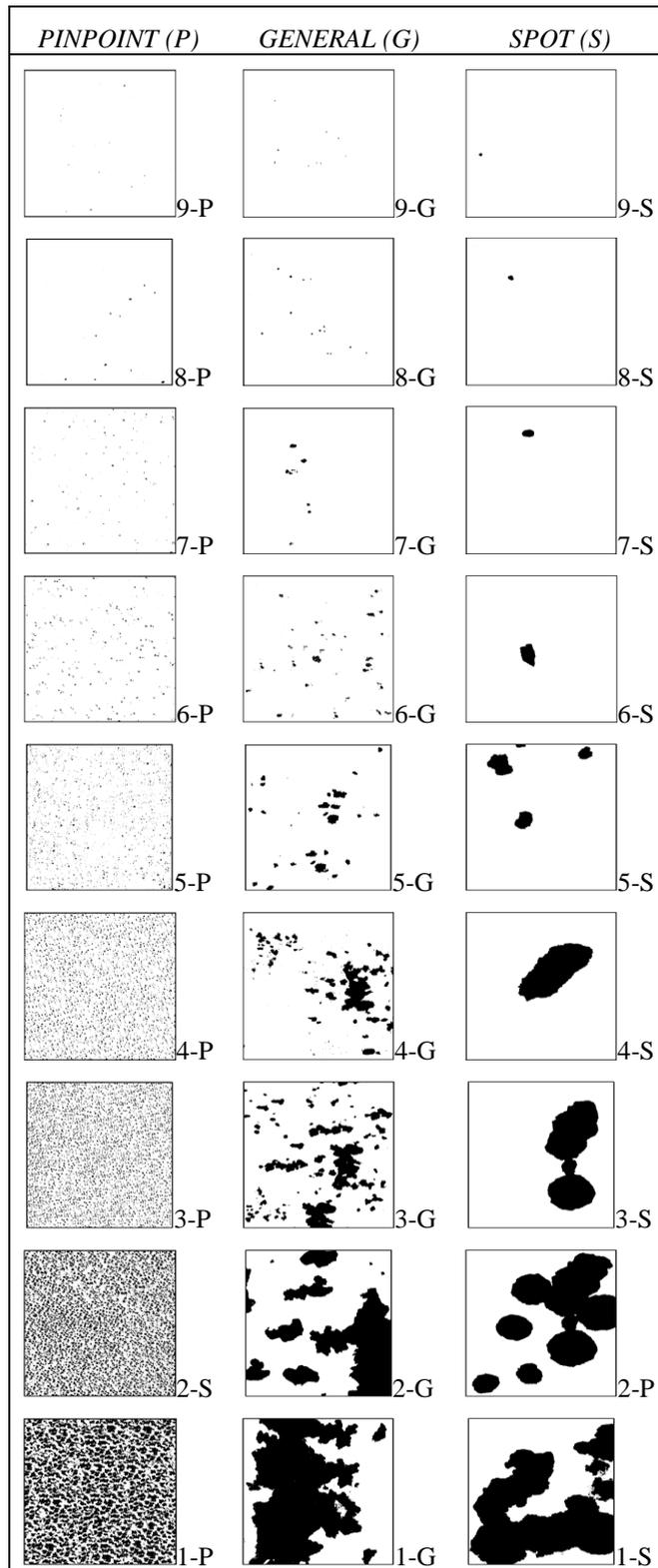


Figura 30 Padrões visuais de percentual de área corroída e suas classificações ASTM D 610 (2008).

3.5.3 Avanço à partir do risco

A análise do avanço da corrosão à partir do risco foi realizada com base na norma ISO 4628-8 (2005). Após os ensaios de corrosão, as regiões fragilizadas no entorno do “risco” foram destacadas com um estilete.

A norma admite distinção entre a extensão de área corroída e delaminada à partir do risco. Contudo, não se entende a relevância prática deste procedimento já que corrosão e delaminação, ambas estão relacionadas com deterioração da área revestida. Sendo assim, nesta dissertação não será feita diferenciação entre esses dois tipos de defeito. Duas formas de quantificar o avanço são possíveis, uma utiliza padrões fotográficos na escala de 1 a 5, sendo 1 o menor grau de corrosão e delaminação e, 5 o maior. A outra forma de avaliar consiste em um procedimento de cálculo baseado na quantificação da área ou na extensão linear do avanço. De acordo com a norma o procedimento de cálculo é preferível à utilização dos padrões fotográficos. Neste trabalho, optou-se pela análise de área. Para isto, imagens foram obtidas e tratadas com o *software Image-Pro Plus* v.4.5.0.29. Após a quantificação das áreas, o cálculo do avanço baseou-se em fórmulas sugeridas pela norma.

3.5.4 Ensaios de aderência

As aderências foram medidas pelo método de acordo com a norma ASTM D 4541 (2009). Foram feitas medidas em amostras conforme preparadas e após ensaios de corrosão. O equipamento utilizado foi o PATTI 110 *Coatings and Adhesive Tester*, pistão F8. Os dollies foram jateados com microesfera de vidro e limpos em banho de ultrassom com etanol durante vinte minutos antes da colagem. O adesivo empregado foi RENGEL SW 404 BR (Resina epóxi bisfenol), aguardando 72 horas para a cura completa.

Antes da colagem dos dollies a superfície do revestimento foi seca, levemente lixada e limpa com uma trincha macia. Foram feitas pelo menos três medidas de aderência em cada amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ABRASIVOS

4.1.1 Densidade aparente

As densidades dos abrasivos medidas por picnometria estão apresentadas na tabela 16. As granalhas de aço e aço inox apresentaram densidade de aproximadamente $7,5 \text{ g.cm}^{-3}$. diferentemente da alumina desmagnetizada e a bauxita que apresentaram densidades inferiores, com valores em torno de $3,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

Tabela 16 Densidade dos materiais abrasivos utilizados.

Abrasivo	Densidade (g/cm^3)
Granalha	$7,41 \pm 0,23$
Aço inox	$7,44 \pm 0,07$
Bauxita	$3,65 \pm 0,04$
Alumina	$3,73 \pm 0,01$

4.1.2 Microdureza

Para a granalha de aço carbono angular, de acordo com a norma SAE J 1993 (1996) e o boletim técnico do fornecedor, 90% dos grãos analisados devem apresentar uma dureza igual ou superior a 60 HRC ou 697 HV.

O histograma da distribuição de frequência e a distribuição normal dos valores de microdureza obtidos para essa granalha se encontram na figura 31 (a) e (b), respectivamente.

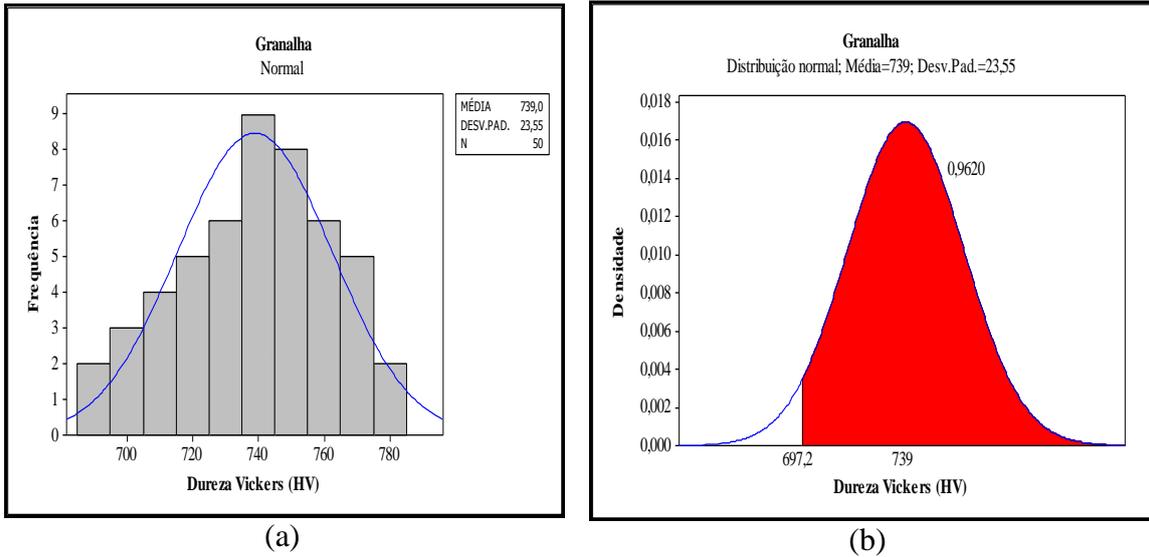


Figura 31 Distribuição dos valores de microdureza para a granalha.

De acordo com os resultados, o valor médio de dureza obtido foi $739,0 \text{ HV} \pm 23,55 \text{ HV}$, o que de acordo com a distribuição normal 96,2 % das medidas se encontram com dureza acima do estabelecido pela norma.

Na figura 32 (a) e (b) estão as distribuições obtidas para a granalha de aço inox. O valor médio de dureza obtido foi $701,2 \text{ HV} \pm 31,39 \text{ HV}$. De acordo com o boletim técnico do fornecedor esse abrasivo a dureza deveria compreender entre 640 - 750 HV.

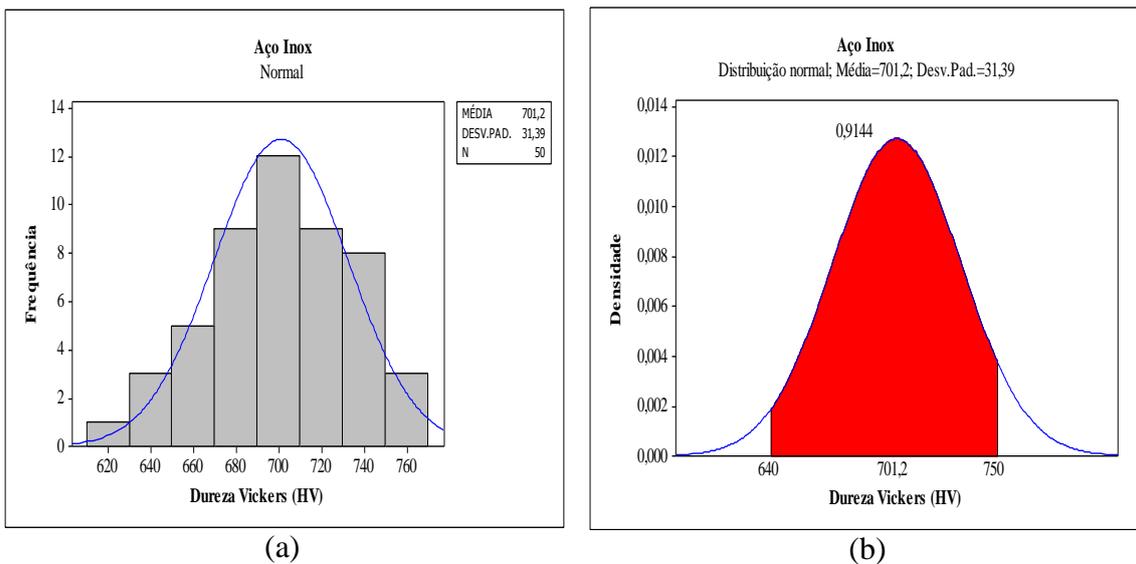


Figura 32 Distribuição dos valores de microdureza para o aço inox.

A distribuição normal dos dados obtidos revela que 91,44% dos valores de dureza obtidos efetivamente encontram-se nessa faixa.

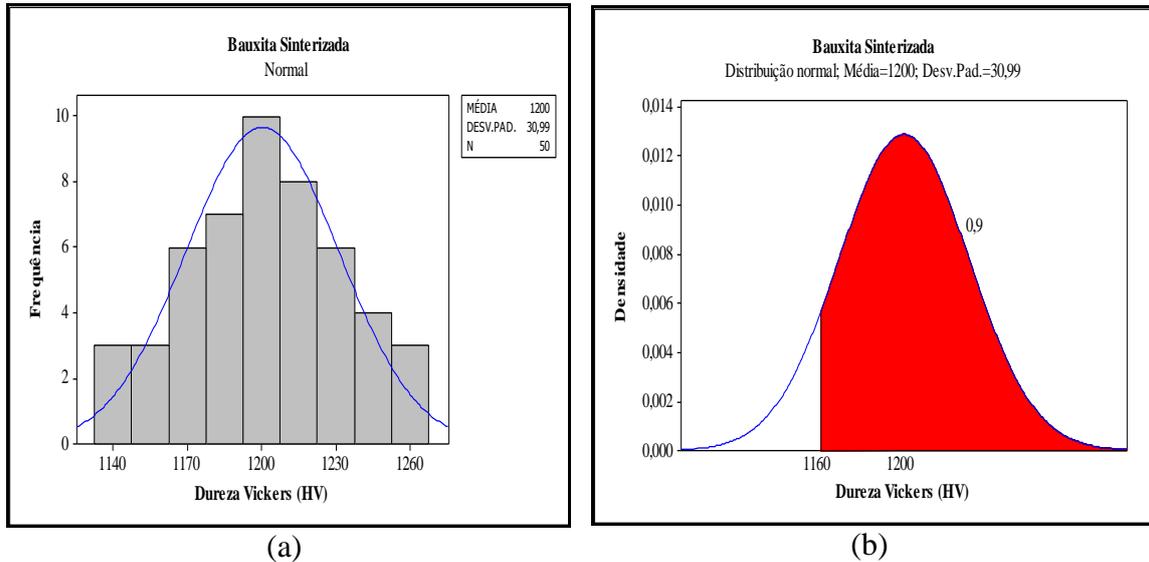


Figura 33 Distribuição dos valores de microdureza para a bauxita sinterizada.

A bauxita sinterizada, apresentou valor médio de dureza, na figura 33 (a) e (b), de 1200 HV \pm 30,99 HV, com 90% dos valores acima de 1160 HV. Essa informação não consta no boletim técnico deste abrasivo.

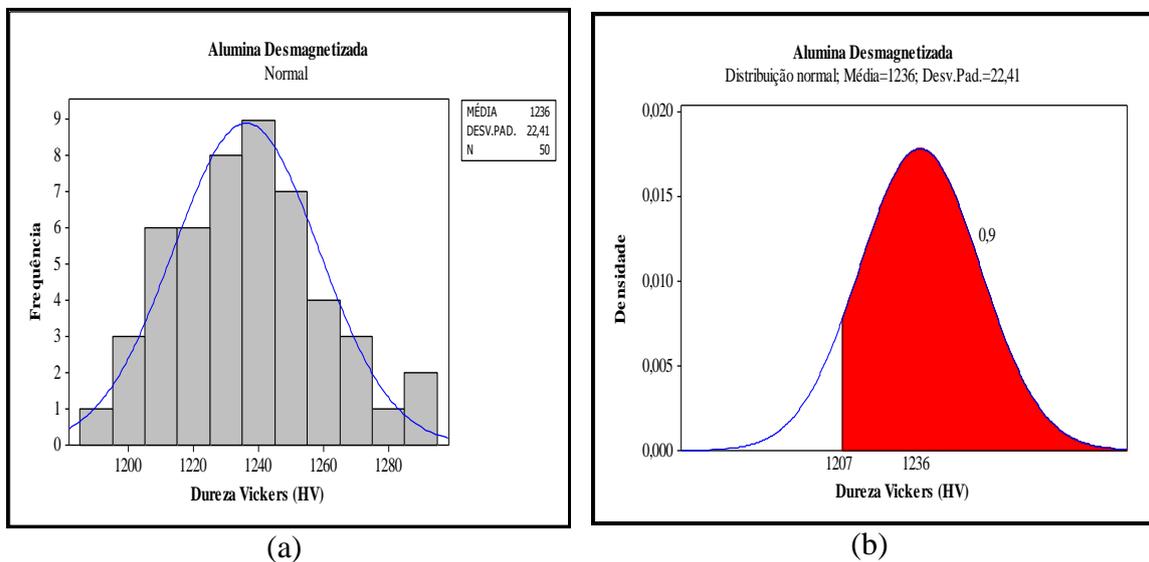


Figura 34 Distribuição dos valores de microdureza para a alumina desmagnetizada.

A alumina desmagnetizada apresentou dureza média de $1236 \text{ HV} \pm 22,41 \text{ HV}$, na figura 34 (a) e (b), com 90% das medidas acima de 1207 HV.

Comparando os resultados obtidos se verifica que as durezas da bauxita e da alumina são superiores às durezas das granalhas de aço e de aço inox. Veremos mais adiante que esse dado por si só não é suficiente para indicar a bauxita ou a alumina como abrasivos mais adequados para a abertura de perfis de rugosidade em substratos duros como é o aço super duplex.

4.1.3 Condutividade e pH do extrato aquoso

Na tabela 17 estão os valores de condutividade e pH medidos em extratos aquosos de cada abrasivo. As medidas foram conduzidas em temperatura média de 25°C e os valores de pH obtidos se encontram próximos da neutralidade, exceto para a alumina. Os valores de condutividade e pH da água utilizada na obtenção dos extratos foi, $1,4 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e 6,1, respectivamente.

Tabela 17 Condutividade e pH dos extratos aquosos.

Abrasivo	Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH
Granalha	$28,2 \pm 4,74$	$6,34 \pm 0,52$
Aço inox	$22,8 \pm 2,17$	$6,93 \pm 0,11$
Bauxita	$14,9 \pm 0,59$	$6,60 \pm 0,17$
Alumina	$3530,0 \pm 0,14$	$10,08 \pm 0,02$

Todos os abrasivos apresentam material solúvel em sua composição já que houve aumento na condutividade dos extratos comparativamente à água pura. O comportamento da alumina é o mais preocupante, pois o pH gerado no extrato aquoso, $\text{pH} \sim 10$, sugere a formação de uma interface alcalina entre o aço e o revestimento. Isso pode acelerar a perda de aderência e o surgimento de empolamento no revestimento.

O processo *Bayer* para a produção de alumina através do refino da bauxita, na etapa de digestão, promove-se uma reação para dissolver o hidróxido de alumínio da bauxita e reduzir o teor de sílica, viabilizada através da inserção no processo de uma

solução concentrada de hidróxido de sódio (ALCOA, 2012). Portanto dependendo da etapa em que for retirado o material para a fabricação do abrasivo, este pode ainda conter resíduos alcalinos.

4.1.4 Difração de raios-X (DRX)

Os abrasivos de aço inox, granalha de aço carbono, bauxita e alumina desmagnetizada foram analisados através de difração de raios-x para caracterização das fases cristalinas presentes nestes abrasivos, conforme apresentado na figura 35.

Nos difratogramas relativos aos abrasivos de aço inox e granalha de aço carbono, observaram-se as fases Fe (cúbica de corpo centrado – c.c.c.) para o aço carbono e uma fase ferrítica rica em cromo, CFeCr, também de estrutura c.c.c., para o aço inox, em concordância com as fases tipicamente encontradas nestes dois tipos de materiais. Conforme informação do boletim técnico destes abrasivos foi possível caracterizar a fase ferrítica como sendo uma fase de estrutura martensítica em ambos abrasivos.

Tabela 18 Caracterização das fases presentes nas análises de Raios-X dos abrasivos.

Identificação	Fase
1	Fe
2	CFeCr
3	Al ₂ O ₃ (polimorfa)
4	Fe ₂ O ₃
5	SiO ₂

Nos difratogramas relativos aos abrasivos bauxita e alumina desmagnetizada, observou-se a presença predominante da fase Al₂O₃. Esta fase apresentou diferentes estruturas cristalinas, indicando assim o polimorfismo do óxido de alumínio nos compostos de bauxita e alumina desmagnetizada. Também foram observados, no caso do abrasivo bauxita, as fases Fe₂O₃ e SiO₂ em menor quantidade. Estes resultados estão

mais uma vez de acordo com as composições apresentadas no boletim técnico do fornecedor. A tabela 18 apresenta um resumo das fases apresentadas na figura 35.

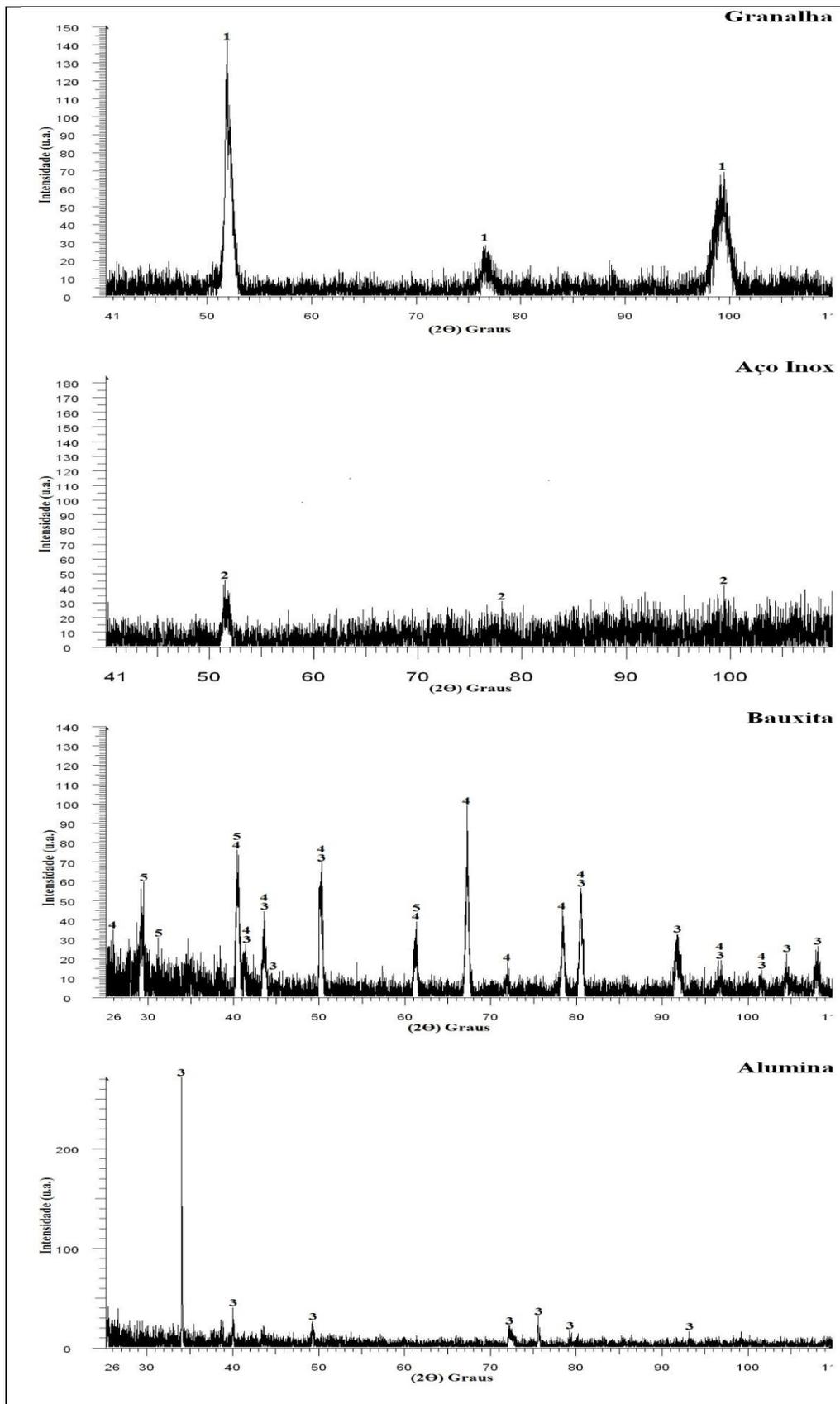


Figura 35 Resultados das análises dos difratogramas para os abrasivos granalha, aço inox, bauxita e alumina.

4.1.5 Distribuição granulométrica

Na figura 36 estão resultados obtidos para a distribuição granulométrica dos abrasivos conforme recebidos.

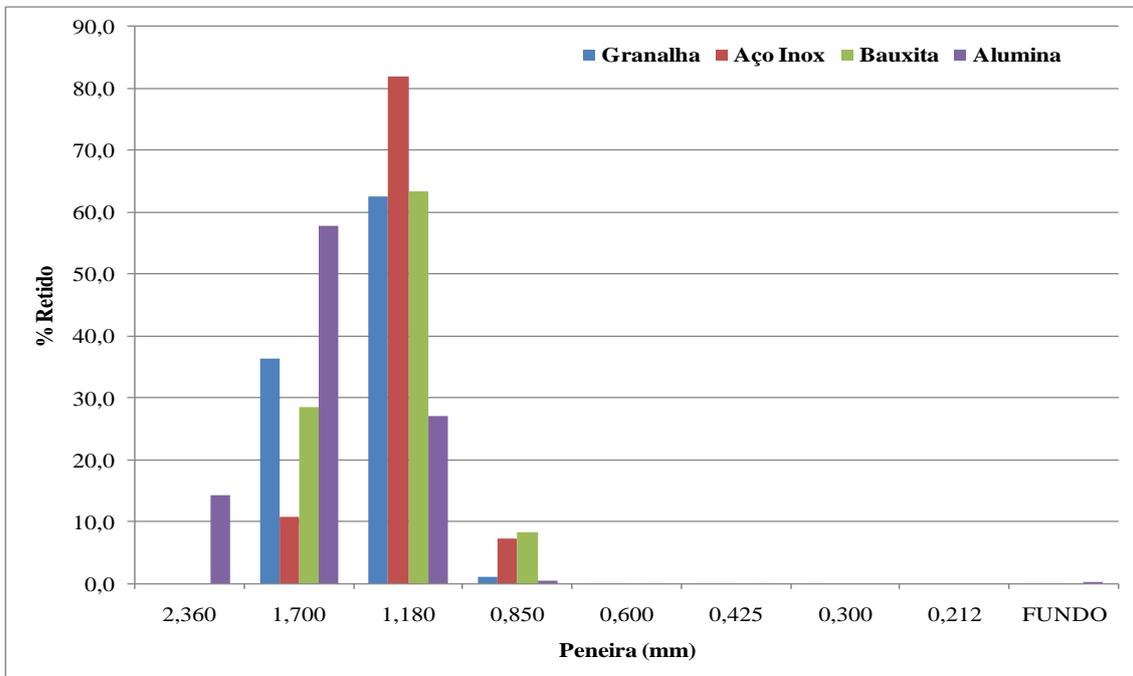


Figura 36 Distribuição granulométrica dos abrasivos na condição "como recebido".

Todos os abrasivos apresentaram um percentual acima de 90% de grãos com granulometria superior a 1,18 mm, sendo que, a alumina foi o abrasivo que apresentou a maior porcentagem de grãos mais grosseiros, totalizando 99,1% dos grãos acima de 1,18 mm. A alumina foi a única que apresentou grãos mais grosseiros retidos na peneira de 2,36 mm.

Tabela 19 Condição granulométrica dos abasivos "como recebido", de acordo com os fornecedores.

Abrasivo	Granulometria					
Granalha	Tamanho médio 1,4 mm					
Aço Inox	2,5 mm (traços)	2,0 mm (máx. 5%)	1,7 mm (20-30%)	1,4 mm (65-75%)	1,25 mm (máx. 10%)	Fundo (traços)
Bauxita	85% mínimo entre 1,7 e 1 mm					
Alumina	85% mínimo entre 2 e 1,4 mm					

Esses resultados se enquadraram nas informações dos boletins técnicos apresentadas na tabela 19.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES JATEADAS

4.2.1 Influência do tempo de jateamento

Foi feita a análise de comportamento do perfil de rugosidade em cada aço com o tempo de jateamento, mantendo-se a pressão, a distância do bico de jato e o ângulo de jateamento constantes. Na figura 37 estão os resultados obtidos para o jateamento dos aços super duplex e carbono com as granalhas de aço e aço inox. Na figura 38 estão os resultados obtidos para o jateamento com bauxita e alumina.

Nessas figuras, as duas linhas vermelhas pontilhadas delimitam o limite superior (LS) e inferior (LI) dos perfis de rugosidade obtidos. A linha verde pontilhada está posicionada no valor médio dos perfis até o tempo de 120 s. Tanto na figura 37 quanto na figura 38 se verifica que, após 60 s de jateamento, os pontos médios se posicionam abaixo da linha verde, mostrando uma diminuição dos perfis com o aumento do tempo de jateamento.

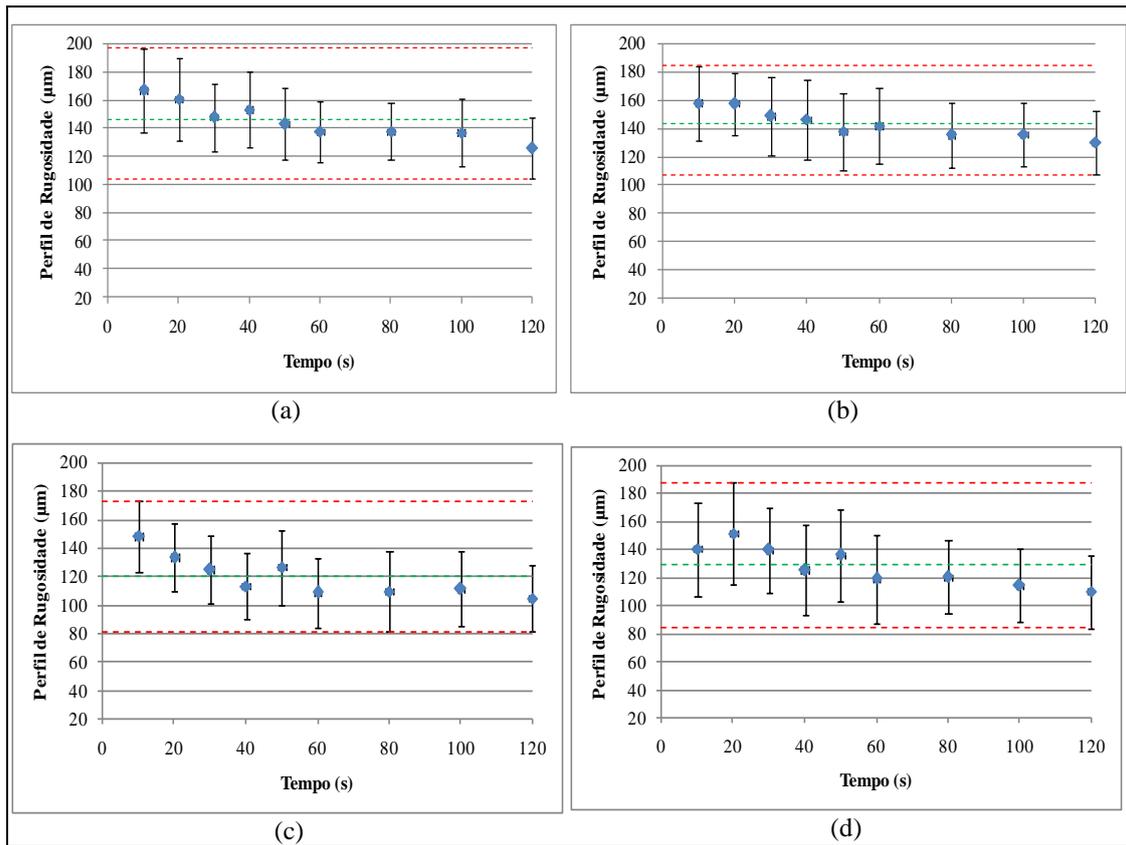


Figura 37 Variação do perfil de rugosidade com o tempo de jateamento: (a) super duplex jateado com granalha, (b) aço carbono jateado com granalha, (c) super duplex jateado com aço inox e (d) aço carbono jateado com aço inox.

Segundo Momber e Wong (2005), o desvio padrão nos valores das medidas de rugosidade dependem das condições experimentais. Em um de seus trabalhos os autores verificaram que a rugosidade de amostras sem tratamento apresentaram maiores desvios padrão do que amostras que sofreram rejateamento. Segundo os autores, o rejateamento, embora reduza o perfil médio de rugosidade, provavelmente origina um perfil mais regular. De acordo com os resultados obtidos nesta tese, neste caso correlacionado ao aumento no tempo de jateamento, não foi possível verificar o mesmo comportamento evidenciado por estes autores. Com efeito, não ocorre diminuição nas barras de erro (desvio padrão) com o aumento do tempo de jateamento.

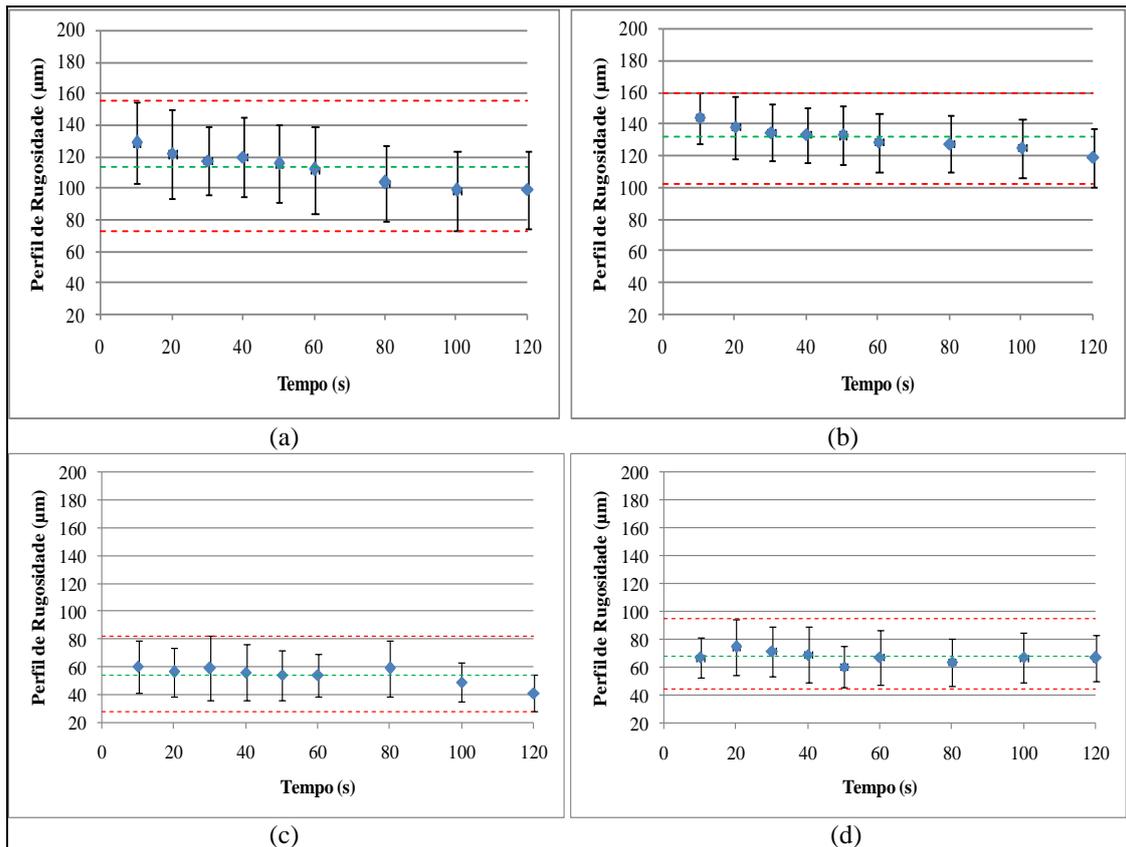


Figura 38 Variação do perfil de rugosidade com o tempo de jateamento: (a) super duplex jateado com bauxita, (b) aço carbono jateado com bauxita, (c) super duplex jateado com alumina e (d) aço carbono jateado com alumina.

Na figura 39 são apresentados os diferentes graus de texturização das superfícies atingidos ao final do processo de jateamento através da análise no estereoscópio.

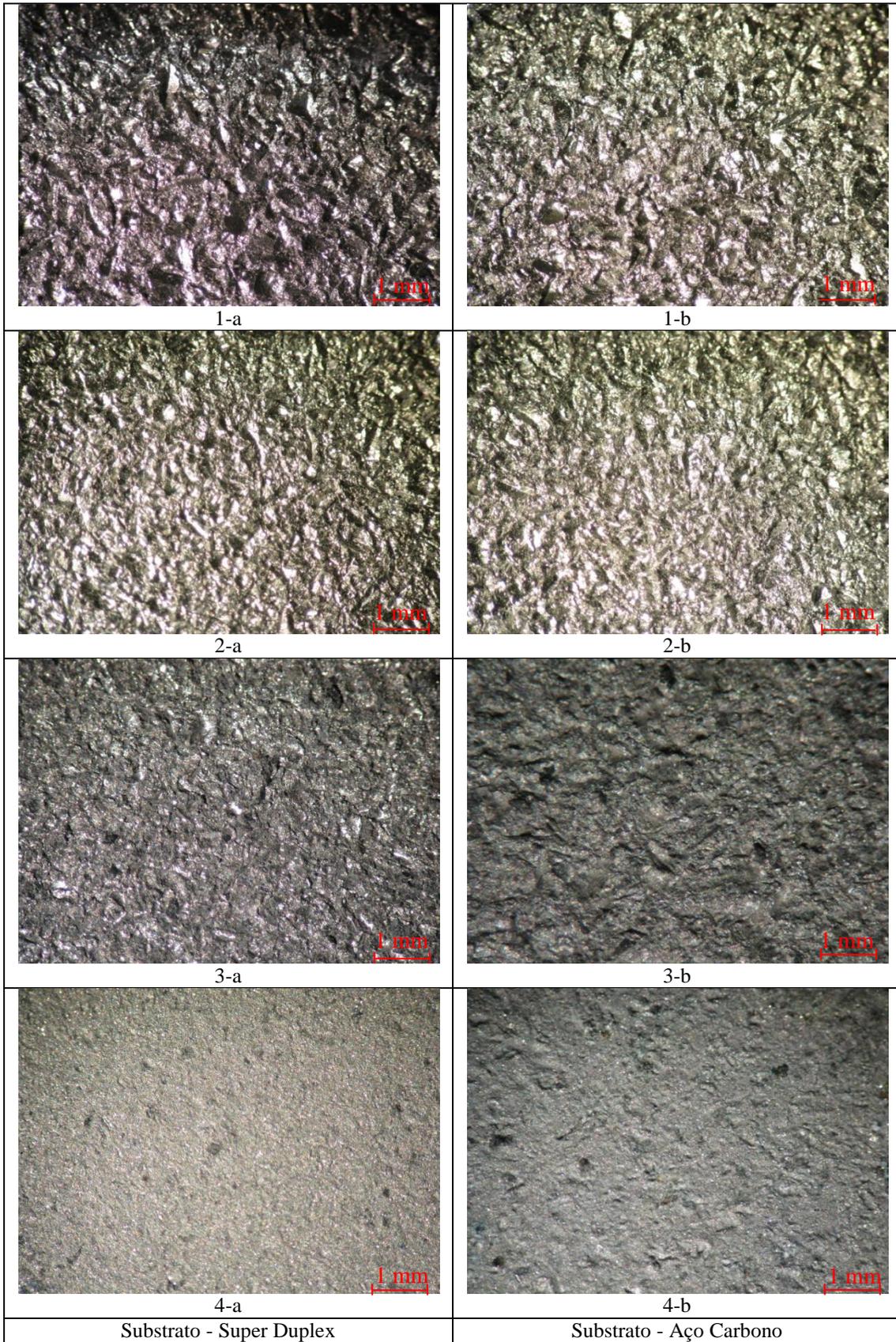


Figura 39 Diferenciação da textura das superfícies após o jateamento: (1-a-b) granalha de aço carbono, (2-a-b) aço inox, (3-a-b) bauxita sinterizada e (4-a-b) alumina desmagnetizada.

Na tabela 20 são apresentados os valores correspondentes ao perfil médio e a diferença (L.S – L.I) para cada abrasivo durante o jateamento do aço super duplex e do aço carbono. Embora, com algumas exceções, observa-se nesta tabela tendência à obtenção de perfis menores e mais heterogêneas no aço super duplex. Esse aspecto pode ser confirmado pelas micrografias em mosaico apresentadas na figura A1 do Anexo A.

Tabela 20 Perfis de rugosidade resultante dos corpos de prova jateados.

Abrasivo	Aço Super Duplex		Aço Carbono	
	Média (µm)	L.S - L.I (µm)	Média (µm)	L.S - L.I (µm)
Granalha	146	93	143	77
Aço Inox	120	97	129	103
Bauxita	113	82	132	58
Alumina	54	54	68	50

*L.S (Limite superior) **L.I (Limite inferior)

De acordo com a tabela 20, entre os abrasivos, a alumina foi a única que não gerou faixa de perfil de rugosidade de 100 µm, apesar de possuir granulometria mais grosseira conforme apresentado na figura 36.

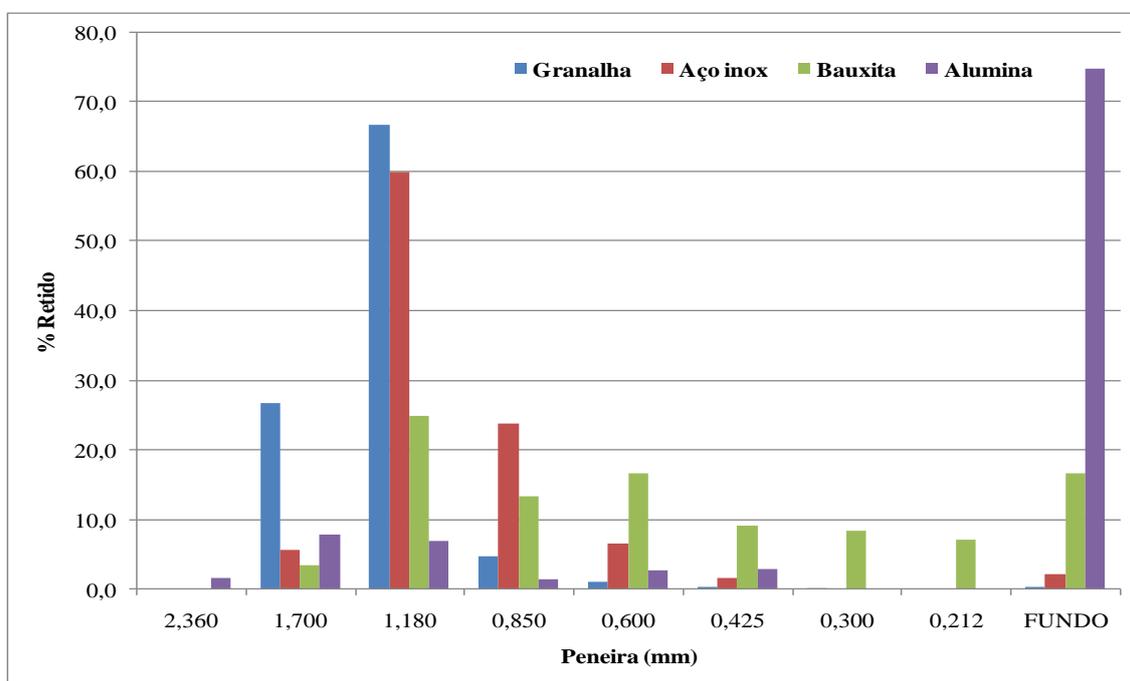


Figura 40 Distribuição granulométrica dos abrasivos após o uso.

Esse resultado pode ser explicado pela elevada fragmentação da alumina comparativamente aos demais abrasivos, conforme mostra a figura 40.

O menor grau de fragmentação foi verificado para a granalha de aço carbono, da porção analisada, apresentou 6,4% dos grãos com granulometria abaixo de 1,18 mm. A alumina apresentou 74,9% com granulometria abaixo de 0,212 mm. A bauxita também apresentou elevada fragmentação comparativamente às granalhas.

O trabalho com a alumina e a bauxita foi muito difícil, por causa da grande quantidade de material particulado gerada, expondo o operador a uma atividade insalubre. Esta fragmentação resultou em elevado consumo diferenciado de material, tabela 21, em função do jateamento de uma área estimada de aproximadamente 1,24 m² para o aço carbono e 1,22 m² para o aço super duplex.

Tabela 21 Consumo relativo a cada material abrasivo.

Abrasivo	Consumo (Kg)
Granalha	100
Aço Inox	100
Bauxita	200
Alumina	250

O critério adotado de perfil de rugosidade para cada abrasivo em cada substrato foi baseado em duas premissas: a primeira, enquadrar os perfis na média dos perfis (linhas verdes) obtidos ao longo dos 120 segundos, apresentando um coeficiente de variação máximo de 20% e, a segunda, que nenhum dos valores obtidos deveria estar fora dos limites indicados pelas linhas vermelhas nas figuras 37 e 38.

4.3 ANÁLISES NO SUBSTRATO

4.3.1 Difração de raios-X (DRX)

Os substratos de aço carbono e aço super duplex foram analisados através de difração de raios-x para identificação das fases cristalinas presentes. Estes substratos foram analisados em duas condições distintas, sendo:

1. Condição Como Recebido (C.R.) ou Branco – análise realizada antes do jateamento abrasivo;
2. Condição jateada – análise após a realização dos jateamentos com os diferentes tipos de abrasivos estudados.

A análise dos difratogramas para o substrato de super duplex, na condição como recebido, revelou a presença das fases austenita (γ) e ferrita (δ), características da matriz destes materiais apresentados na figura 41 e identificados pela tabela 22.

Tabela 22 Caracterização das fases presentes nas análises de raios-X dos substratos super duplex na condição como recebido e após os tratamentos.

Identificação	Fase
γ	Austenita
δ	Ferrita
3	Al ₂ O ₃ (polimorfo)

Na condição jateada, a análise dos difratogramas para o abrasivo granalha e aço inox não indicaram contaminação visível no substrato de aço super duplex quando comparados ao substrato na condição como recebido. Entretanto, é importante ressaltar que as fases constituintes destes abrasivos coincidem com as fases existentes nos substratos em questão. Esta situação pode não evidenciar possíveis contaminações destes abrasivos nos substratos jateados.

Para a bauxita sinterizada e alumina desmagnetizada, os difratogramas indicaram a contaminação na superfície dos substratos através da presença da fase Al₂O₃.

De modo a analisar de forma mais específica a contaminação dos substratos, foi realizado um ajuste de picos em todos os difratogramas obtidos, utilizando-se o método de Rietveld (RIETVELD, 1969).

Através deste método de ajuste, que usa como princípio a minimização de uma função residual da subtração do pico real com o pico simulado, foi possível realizar a quantificação das fases presentes na superfície dos substratos jateados. Esta quantificação evidenciou então os teores de abrasivos que aderiram à superfície dos substratos após o jateamento.

Assim, foi possível evidenciar-se as concentrações de bauxita e alumina aderidas aos substratos, visivelmente observadas pelos picos características nos difratogramas. A tabela 23 indica as quantidades obtidas:

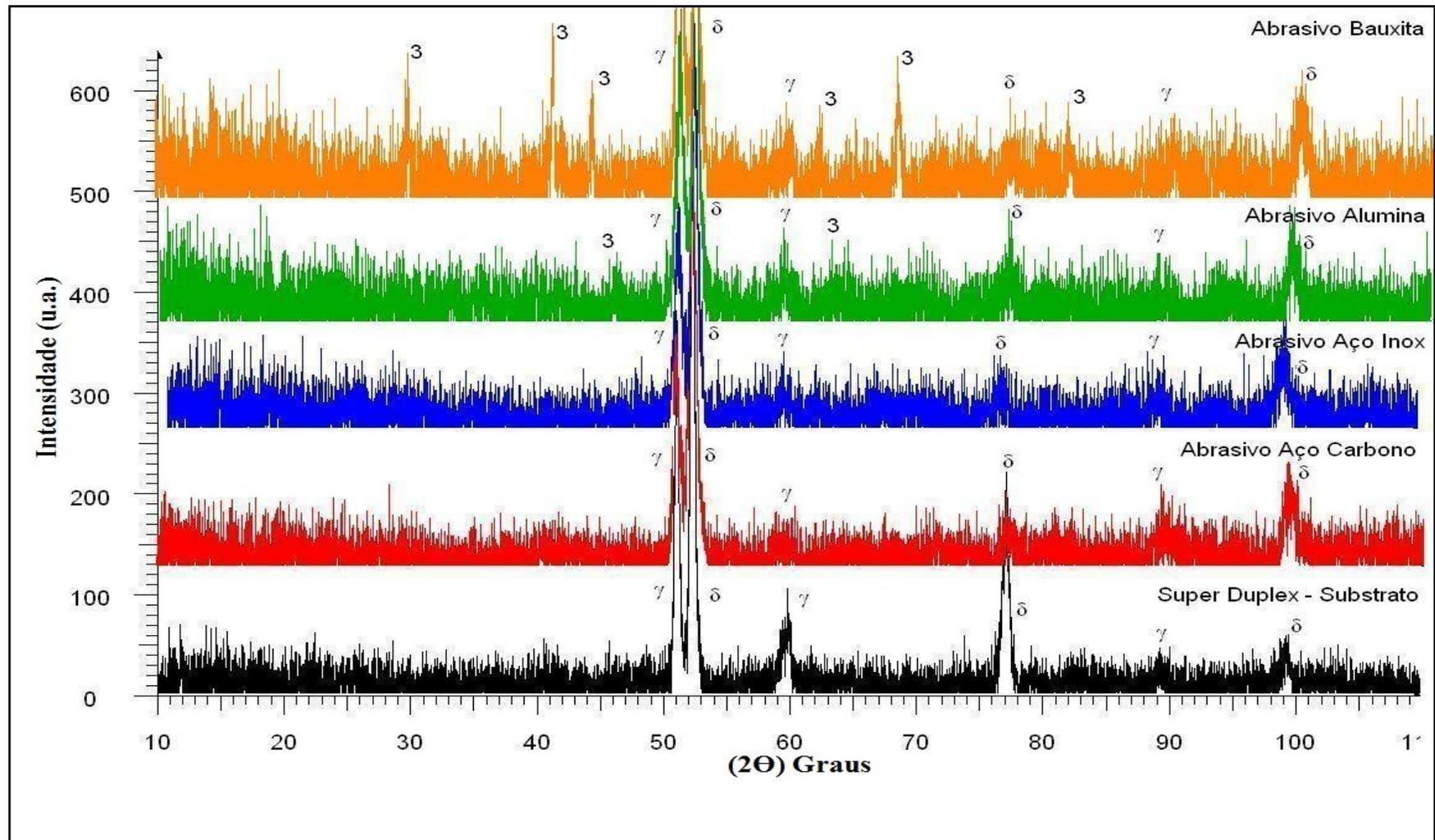


Figura 41 Difratoograma do substrato super duplex na condição "como recebido" e após os tratamentos.

Tabela 23 Percentual de elementos contaminantes quantificados pelo método de Rietveld no super duplex tratado com bauxita e alumina.

Abrasivo	Fases	Percentual Médio (%)
Bauxita	Al ₂ O ₃	37,88
Alumina	Al ₂ O ₃	3,18

Notou-se também que os substratos de super duplex jateados apresentaram teores de fases diferentes daqueles obtidos nos substratos da condição como recebido, conforme tabela 24. Isto pode indicar que, apesar de não visível no difratograma, a contaminação com granalha de aço carbono e aço inox no substrato super duplex pode ter ocorrido.

Tabela 24 Evolução das fases no substrato super duplex.

Substrato/Abrasivo	Martensita (%)	Ferrita (%)	Austenita (%)
Super Duplex / (C.R.)	0	70,58	29,42
Super Duplex / Aço carbono	16,83	52,01	31,17
Super Duplex / Inox	15,34	51,70	32,96

A análise do difratograma para o substrato de aço carbono, na condição como recebido, revelou a presença de uma fase ferro-carbono, indicando uma matriz ferrítica/perlítica, para este material identificados na tabela 25 e apresentados na figura 42.

De forma similar ao substrato super duplex, não foi possível identificar a contaminação no substrato de aço carbono no tratamento com os abrasivos granalha de aço carbono e aço inox, quando comparados com difratograma do mesmo substrato na condição como recebido.

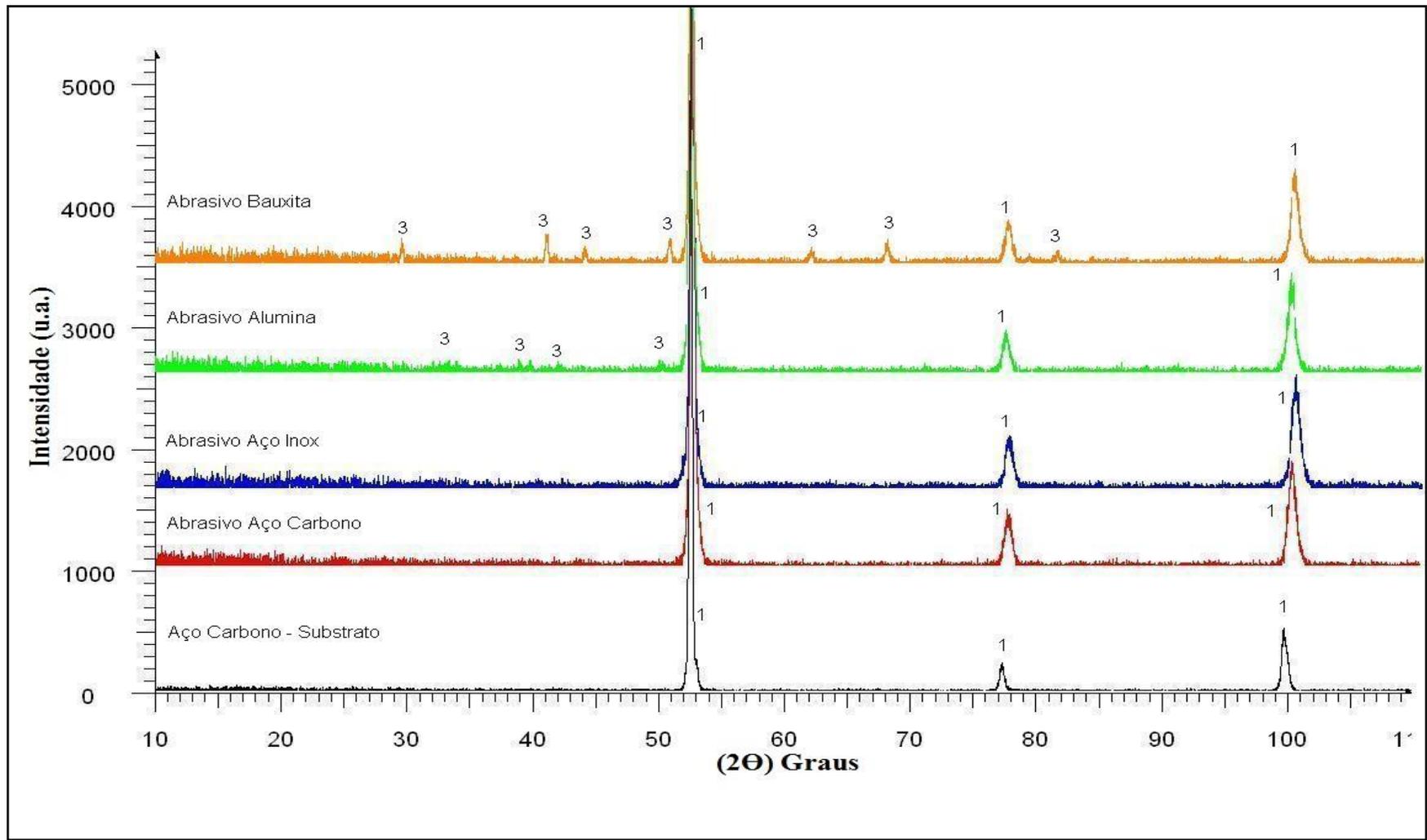


Figura 42 Difratoograma do substrato aço carbono na condição "como recebido" e após os tratamentos.

Tabela 25 Caracterização das fases presentes nas análises de raios-X dos substratos aço carbono na condição como recebido e após os tratamentos.

Identificação	Fase
1	Ferrita / Perlita - FeC
3	Al ₂ O ₃ (polimorfo)

Neste caso, também foi realizado um ajuste de picos pelo método de Rietveld, que evidenciou situações similares ao caso do aço super duplex.

O jateamento com bauxita e alumina originaram contaminação no substrato de aço carbono, conforme apresentado no difratograma, figura 42. A quantificação das fases presentes indicou valores apresentados na tabela 26:

Tabela 26 Percentual de elementos contaminantes quantificados pelo método de Rietveld no aço carbono tratado com bauxita e alumina.

Abrasivo	Fases	Percentual Médio (%)
Bauxita	Al ₂ O ₃	20,38
Alumina	Al ₂ O ₃	4,66

Notou-se também que os substratos de aço carbono jateados apresentaram teores de fases diferentes daqueles obtidos nos substratos da condição como recebido, conforme tabela 27. Isto pode indicar novamente que, apesar de não visível no difratograma, a contaminação com granalha de aço carbono e aço inox neste substrato pode ter ocorrido.

Tabela 27 Evolução das fases no substrato aço carbono.

Substrato/Abrasivo	Martensita (%)	Ferrita (%)
Aço Carbono / (C.R.)	75,17	24,83
Aço Carbono / Aço carbono	78,93	21,07
Aço Carbono / Inox	81,97	18,03

Assim, de maneira geral, verifica-se que ambos os substratos foram mais suscetíveis à contaminação com a bauxita em comparação ao tratamento com a alumina. Esses resultados possivelmente estão relacionados aos maiores perfis de rugosidade

atingidos com a bauxita comparados ao tratamento com a alumina em ambos os substratos.

De um modo geral o grau de incrustação dos abrasivos foi maior no aço super duplex do que no aço carbono. Uma possível explicação para este fato é que a maior dureza do super duplex tenha promovido fragmentação mais importante dos abrasivos, facilitando sua incrustação.

4.3.2 Análise de sais solúveis, condutividade e pH interfacial

Os resultados obtidos para o extrato aquoso das superfícies jateadas mostram um pH próximo da neutralidade para todos os abrasivos exceto para a alumina que apresentou um pH elevado em ambos os substratos, figura 43.

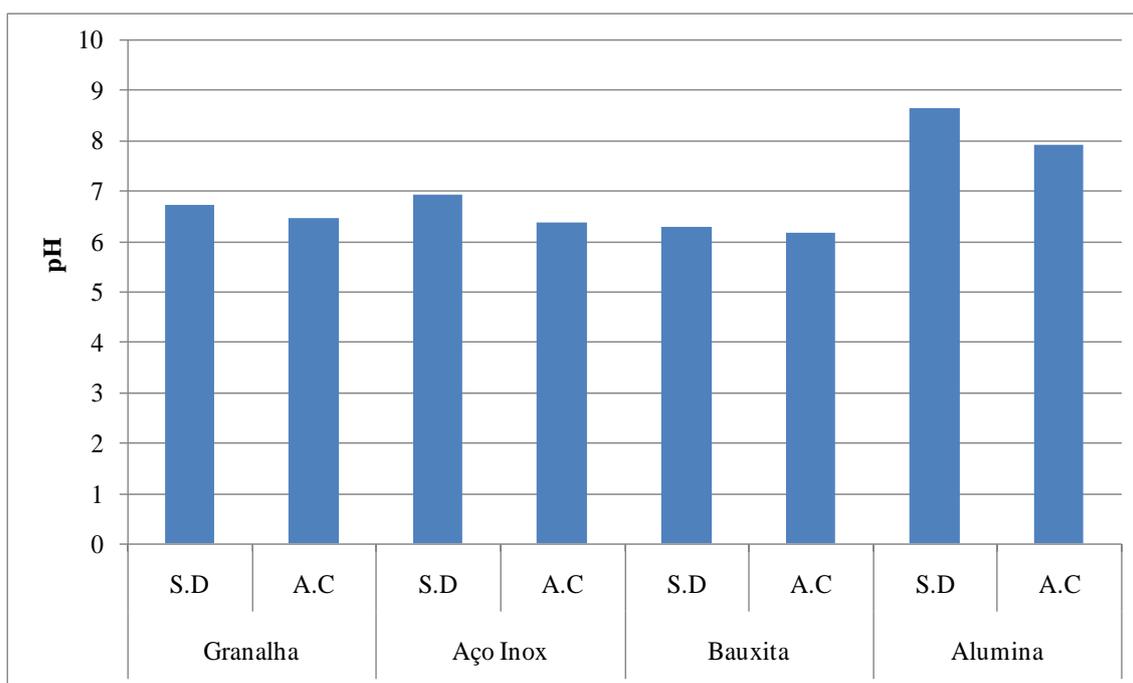


Figura 43 pH dos extratos aquosos das superfícies jateadas (S.D – Super Duplex, A.C – Aço Carbono).

Em função deste pH elevado para o abrasivo alumina, provavelmente relacionado ao seu processo de fabricação, observa-se conseqüentemente uma maior condutividade desta solução comparada às demais, figura 44.

O resultado que merece destaque é o pH alcalino verificado nos extratos aquosos de alumina desmagnetizada, uma vez que este influencia no desempenho de revestimentos orgânicos.

Os demais abrasivos geraram pH's entre 6 e 7, sendo que o aço super duplex apresentou valores superiores ao aço carbono, mesmo quando jateado com as granalhas metálicas. Esse comportamento é coerente com o maior grau de incrustação desses abrasivos no aço super duplex constatadas na DRX. O pH mais alcalino no super duplex, no caso das granalhas, pode ser consequência da corrosão dos abrasivos incrustados durante o procedimento de obtenção do extrato aquoso. O efeito mais importante da corrosão do abrasivo incrustado do que dos substratos propriamente ditos, sugere ação galvânica do super duplex sobre as incrustações. A bauxita incrustou mais do que os outros abrasivos, porém não tendo compostos passíveis de corrosão, apresentou os menores pH's.

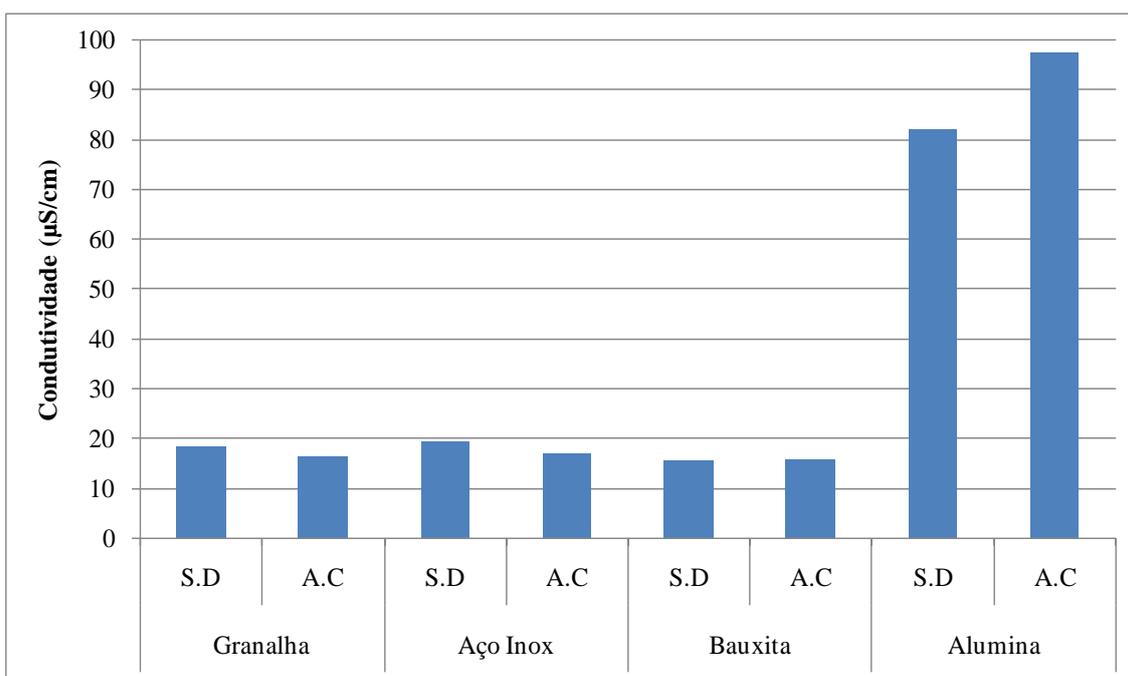


Figura 44 Condutividade dos extratos aquosos das superfícies jateadas (S.D – Super Duplex, A.C – Aço Carbono).

Segundo Morcillo *et al.* (1997), ao avaliar a influência de sais solúveis no efeito da corrosão na interface substrato/revestimento, em especial de ânions, sulfato

(SO₄⁻²) e cloreto (Cl⁻), os autores verificaram que o cloreto originou um maior efeito corrosivo.

Analisando o teor de cloreto nestes extratos, tabela 28, verifica-se que não existem diferenças significativas entre os abrasivos, nem valores que comprometam aplicações de esquemas de pintura. Os valores obtidos são inferiores aos estabelecidos por normas internacionais, tabela 3. Já para o sulfato o teor destes contaminantes ficou abaixo do limite de detecção da técnica, não sendo possível quantificá-los. Portanto, a maior condutividade dos extratos aquosos das superfícies que foram jateadas com alumina é devida ao pH mais elevado e não à contaminação dessas superfícies com sais solúveis.

Tabela 28 pH, condutividade e teor de cloreto para os extratos aquosos.

Substrato	Abrasivo	pH	Condutividade (µS/cm)	Concentração Cl⁻ (µg/cm²)
S.D	Granalha	6,72	18,26	2,6
A.C		6,45	16,42	3,2
S.D	Aço Inox	6,92	19,32	3,7
A.C		6,36	16,92	3,2
S.D	Bauxita	6,27	15,41	2,9
A.C		6,17	15,76	3,6
S.D	Alumina	8,63	81,9	3,2
A.C		7,91	97,4	2,4

*S.D (Super Duplex) **A.C (Aço Carbono)

4.3.3 Dureza do substrato

O jateamento abrasivo para se atingir os perfis de rugosidade desejados, não promoveu diferenças significativas na dureza do aço carbono, figura 45.

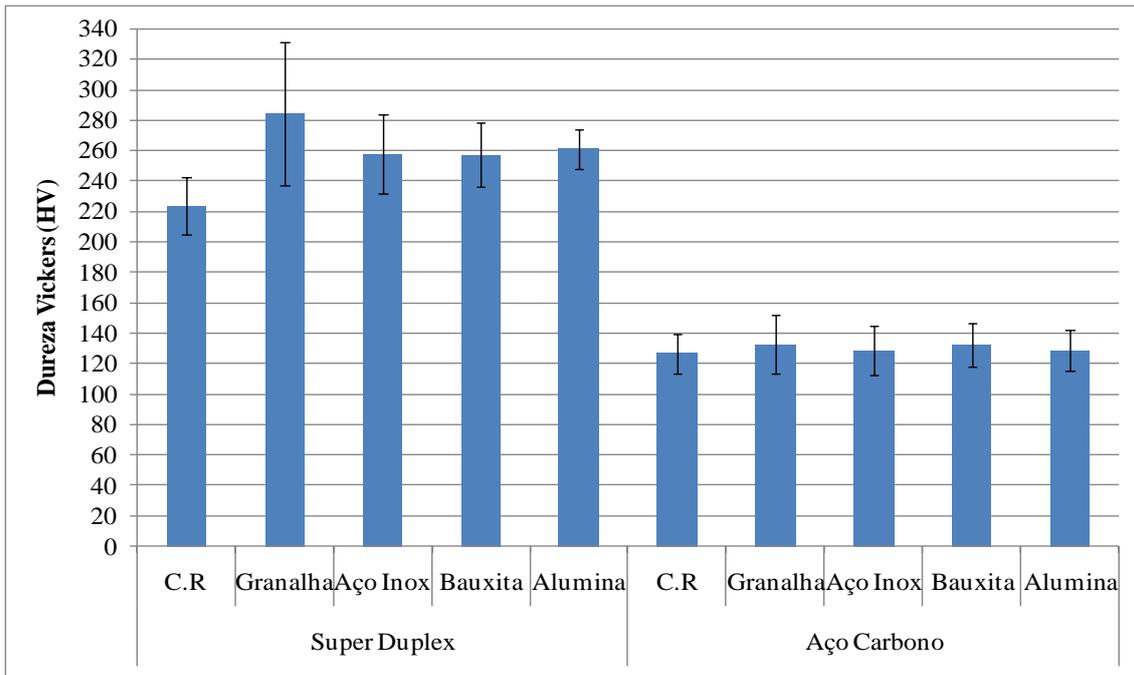


Figura 45 Dureza dos substratos antes e após o jateamento (C.R. - Como recebido).

No caso do aço super duplex houve aumento da dureza em 40 – 60 HV. Esse resultado pode estar relacionado ao maior grau de incrustação dos abrasivos no aço super duplex, conforme mostraram as simulações de DRX pelo método de Rietveld.

4.3.4 Ângulo de contato e energia de superfície

Na figura 46 estão os resultados de cálculo da energia de superfície dos substratos após jateamento com os quatro abrasivos, considerando suas componentes polar e dispersiva. Os valores dessas componentes são mostrados na tabela 29. Os ângulos de contato utilizados no cálculo das energias são mostrados na tabela 30.

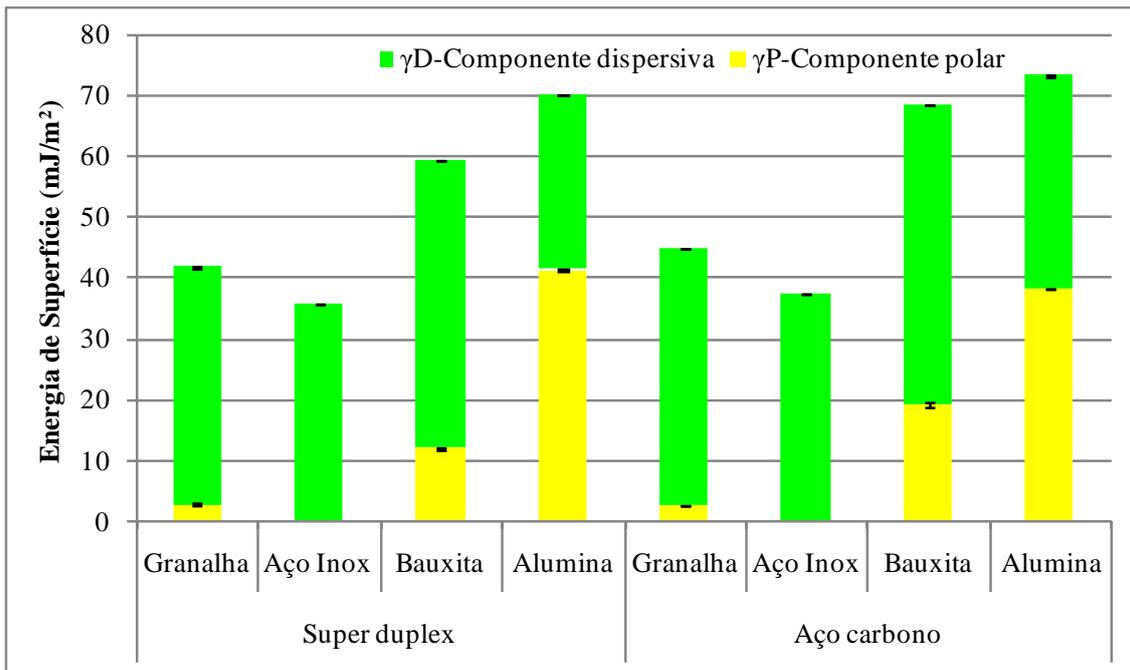


Figura 46 Efeito dos diferentes tratamentos de superfície na energia de superfície dos substratos.

De um modo geral, as energias calculadas para o aço super duplex foram menores em comparação ao aço carbono. Esse resultado sugere que a aderência de revestimentos pode ficar comprometida neste substrato.

Tabela 29 Energia de superfície dos substratos submetidos a diferentes tratamentos de superfícies.

Substrato	Abrasivo	Energia de superfície (mJ/m²)		
		γ^p	γ^d	γ^T
Super Duplex	Granalha	2,67±0,22	39,05±0,08	41,73±0,23
	Aço Inox	0,04±0,01	35,74±0,09	35,79±0,09
	Bauxita	11,99±0,25	47,39±0,09	59,37±0,25
	Alumina	41,25±0,13	28,94±0,09	70,20±0,11
Aço Carbono	Granalha	2,64±0,06	42,15±0,09	44,79±0,12
	Aço Inox	0,11±0,05	37,28±0,10	37,39±0,11
	Bauxita	19,26±0,40	49,26±0,11	68,51±0,40
	Alumina	38,24±0,16	34,99±0,08	73,23±0,15

Os resultados mostram que as maiores energias de superfície foram obtidas para os aços jateados com alumina. No entanto, nesse caso a componente polar também foi mais importante, provavelmente devido à alcalinização destas superfícies.

A elevada componente polar das energias de superfície dos substratos jateados com a alumina deve resultar numa cinética de molhabilidade mais lenta pela tinta. Outra influência importante deste parâmetro deve acontecer sobre a aderência do revestimento. Sendo o revestimento de natureza predominantemente apolar sua afinidade por este tipo de superfície deve ser menor.

Tabela 30 Ângulo de contato dos substratos submetidos a diferentes tratamentos de superfícies.

Substrato	Abrasivo	Ângulo de contato (°)	
		Água deionizada	Diiodometano
Super Duplex	Granalha	82,97±0,74	41,10±0,15
	Aço Inox	101,08±0,36	47,34±0,17
	Bauxita	55,79±0,48	21,30±0,29
	Alumina	18,16±0,30	59,36±0,16
Aço Carbono	Granalha	119,08±0,22	34,73±0,19
	Aço Inox	98,75±0,81	44,50±0,19
	Bauxita	40,43±0,76	14,22±0,52
	Alumina	13,60±0,58	48,71±0,15

As superfícies jateadas com aço inox foram aquelas que apresentaram as menores energias, praticamente sem componente polar, comparativamente aos demais abrasivos. Como o perfil de rugosidade desse tipo de amostra é semelhante ao das amostras jateadas com granalha e com bauxita, a componente mecânica que contribui para a aderência é muito semelhante, de modo que a menor energia superficial das amostras jateadas com aço inox pode influenciar negativamente a aderência de revestimentos. Essa hipótese será conferida na avaliação dos ensaios de corrosão.

4.3.5 Ângulo de contato e cinética de molhabilidade com a tinta

Nas figuras 47 e 48, estão as medidas de ângulo de contato da tinta em função do tempo para os aços super duplex e carbono jateados com os diferentes abrasivos, respectivamente.

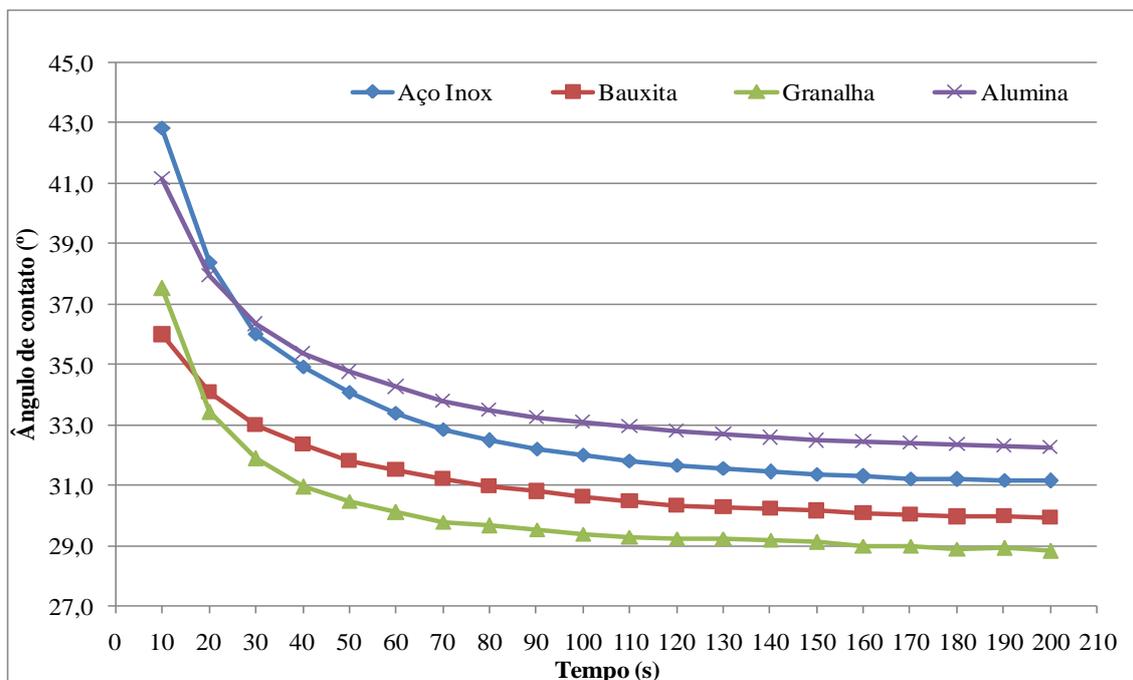


Figura 47 Cinética de molhabilidade da tinta no aço super duplex submetido aos diferentes tratamentos.

As variações dos ângulos de contato ao longo de 210 segundos em relação às superfícies, mostram que a cinética de molhabilidade possui uma tendência em diminuir o valor dos ângulos de contato em todos os tratamentos. Esse resultado sugere que os diferentes abrasivos geraram superfícies com caráter molhável.

De acordo com Harris e Beevers (1999), superfícies mais suaves exibem valores mais elevados de energia de superfície. As diferenças de molhabilidade entre superfícies rugosas e pouco rugosas podem estar relacionadas às características geométricas da superfície, as quais influenciam na propagação da gota. Este comportamento pode estar relacionado também com mudanças na composição química da superfície, em função de contaminantes.

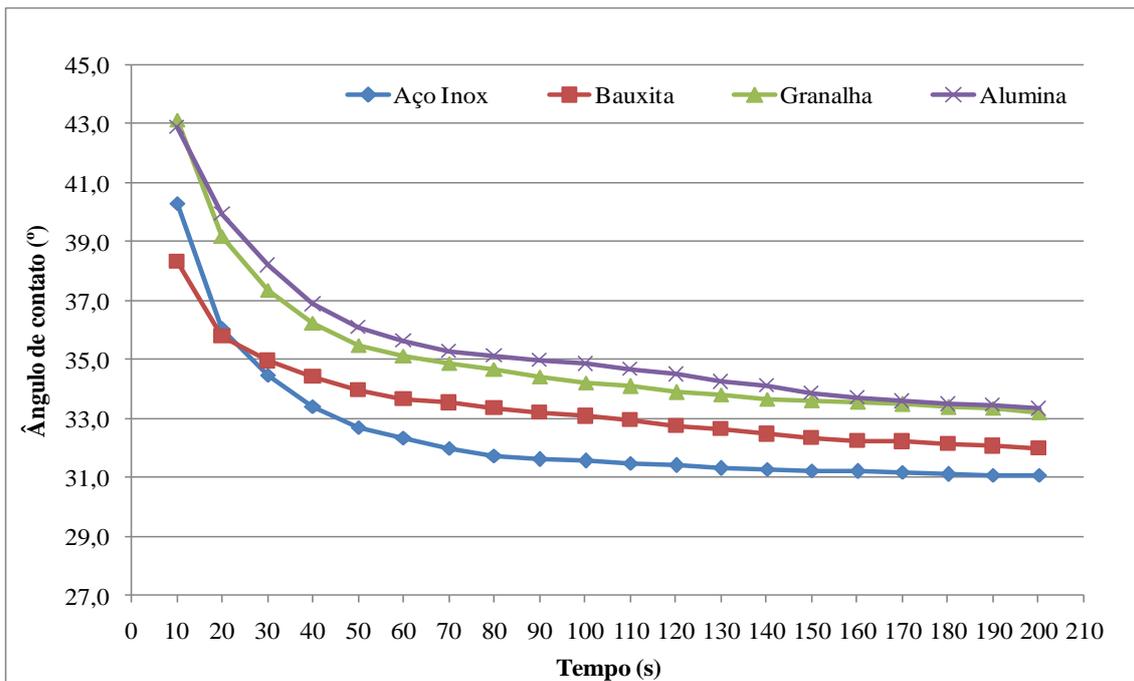


Figura 48 Cinética de molhabilidade da tinta no aço carbono submetido aos diferentes tratamentos.

Nas figuras 47 e 48 se verifica que as cinéticas de molhabilidade mais lentas foram obtidas para os substratos jateados com alumina. Lembrando que o perfil de rugosidade dessas superfícies é menor comparativamente aos outros abrasivos, e que o efeito da rugosidade é antagônico ao efeito da energia de superfície, se pode afirmar que, no caso da alumina, prevaleceu o efeito da componente polar desacelerando a cinética de molhabilidade pela tinta.

4.3.6 Medida de velocidade de corrosão e suscetibilidade à corrosão por pite

Nas figuras 49 e 50 estão os resultados de taxas de corrosão obtidas para os aços super duplex e carbono por ensaios de perda de massa, respectivamente.

As taxas de corrosão mostradas nas figuras 49 e 50 não consideram as diferenças de rugosidade entre os vários tipos de amostras. A fim de minimizar a influência das diferenças de área efetiva nesses resultados se procedeu a uma correção considerando que as diferenças de área seriam proporcionais às diferenças de rugosidade.

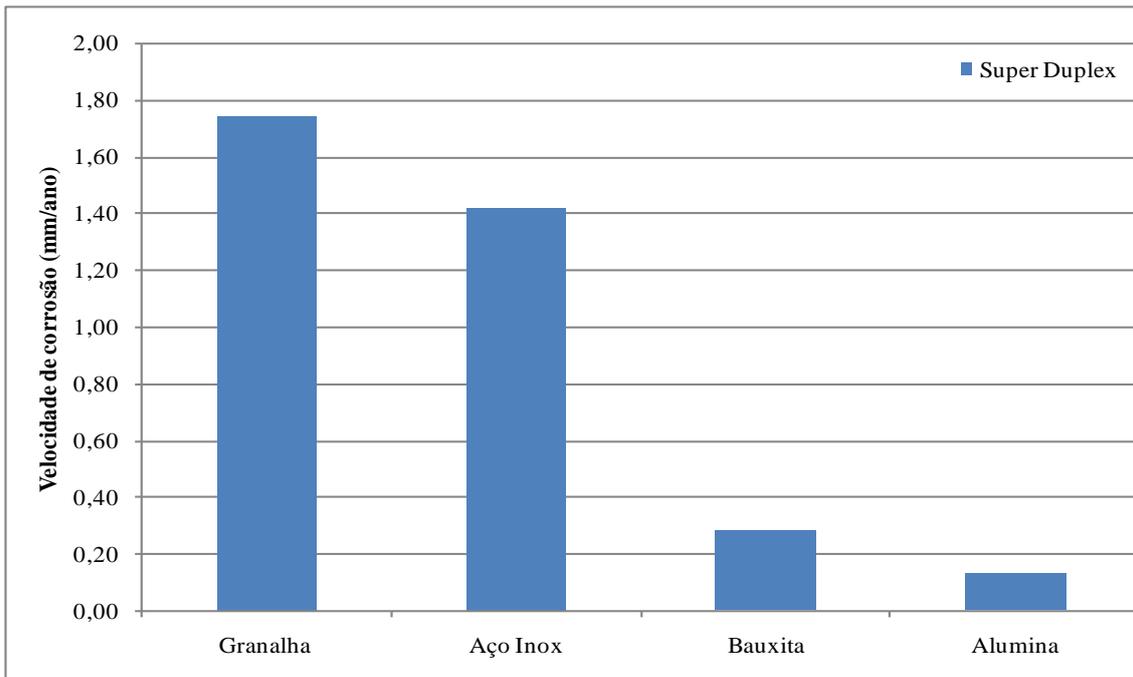


Figura 49 Taxa de corrosão do substrato super duplex submetidos a diferentes tratamentos superficiais.

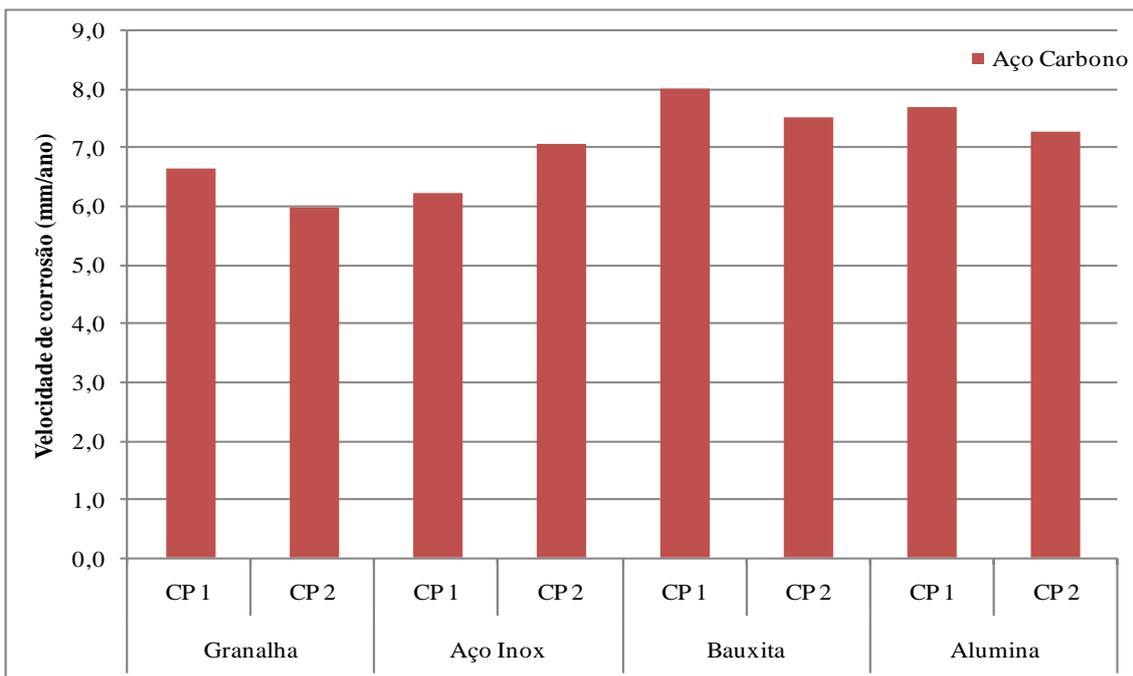


Figura 50 Taxa de corrosão do substrato aço carbono submetidos a diferentes tratamentos superficiais.

Na tabela 31, estão os valores de rugosidade média característicos de cada tipo de amostra com os respectivos fatores de correção (f) utilizados para as taxas de

corrosão. Como referência, foi utilizado o perfil de rugosidade das amostras jateadas com alumina. Diagramas de barra com as taxas de corrosão corrigidas são apresentados nas figuras 51 e 52.

Tabela 31 Fatores de correção das taxas de corrosão.

Abrasivo	Aço Super Duplex		Aço Carbono	
	Média (μm)	f	Média (μm)	f
Granalha	146	0,37	143	0,48
Aço Inox	120	0,45	129	0,53
Bauxita	113	0,48	132	0,52
Alumina	54	1	68	1

Analisando as taxas de corrosão das amostras jateadas de super duplex, verifica-se uma diferença onde as taxas corrigidas, figura 51, são menores em relação às taxas sem correção de área, figura 49. Essa correção, embora grosseira, igualou a velocidade de corrosão das amostras jateadas com bauxita e alumina.

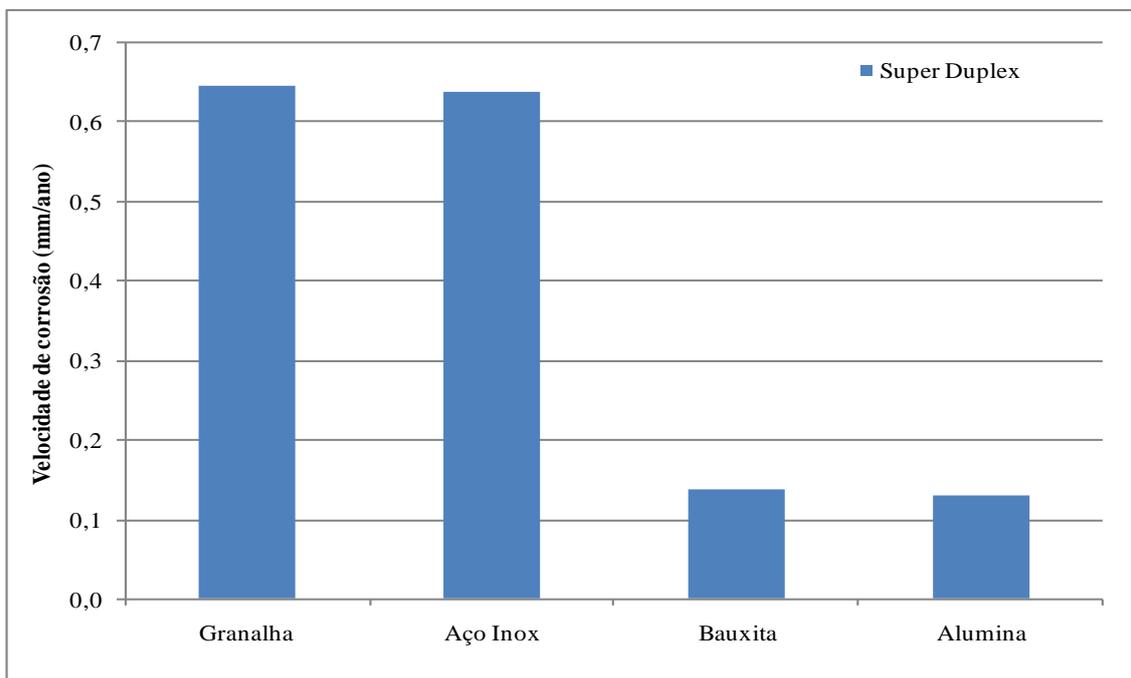


Figura 51 Taxa de corrosão corrigida do substrato super duplex submetidos a diferentes tratamentos superficiais.

As taxas de corrosão das amostras jateadas com bauxita e alumina são menores em comparação às amostras jateadas com granalha e aço inox. Nesses valores existe a contribuição do ataque dos grãos desses abrasivos que ficaram incrustados nas superfícies jateadas. Além disso, o super duplex pode ter efeito galvânico sobre a granalha e o aço inox.

Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM G 48 (2011) durante 24 horas. Nesse período não foi constatada a presença de pites no aço super duplex. De acordo com a norma, o processo de jateamento com os quatro abrasivos avaliados nesta tese não implicou em aumento da suscetibilidade à corrosão localizada deste aço.

Outro aspecto a ser considerado é que a alcalinização da interface no caso do jateamento com alumina não teve nenhum efeito significativo neste ensaio de corrosão para o aço super duplex.

Por outro lado, no caso do aço carbono jateado com alumina, figura 52, alcalinização da interface, promovida pela incrustação desse abrasivo, ativou muito a superfície. Com efeito, a taxa de corrosão das amostras jateadas com alumina está maior comparativamente aos demais abrasivos. Hipóteses que podem explicar esse resultado são que a alcalinização é mais importante nas regiões onde há incrustação, por exemplo, nos vales do perfil de rugosidade, conforme verificado nas imagens apresentadas na figura A2 do anexo A.

Nessas áreas a renovação de eletrólito é mais dificultada e o aço carbono sofreria corrosão por fendimento alcalino. Também se pode pensar na criação de pilhas ativo-passiva na superfície devido às heterogeneidades em pH local.

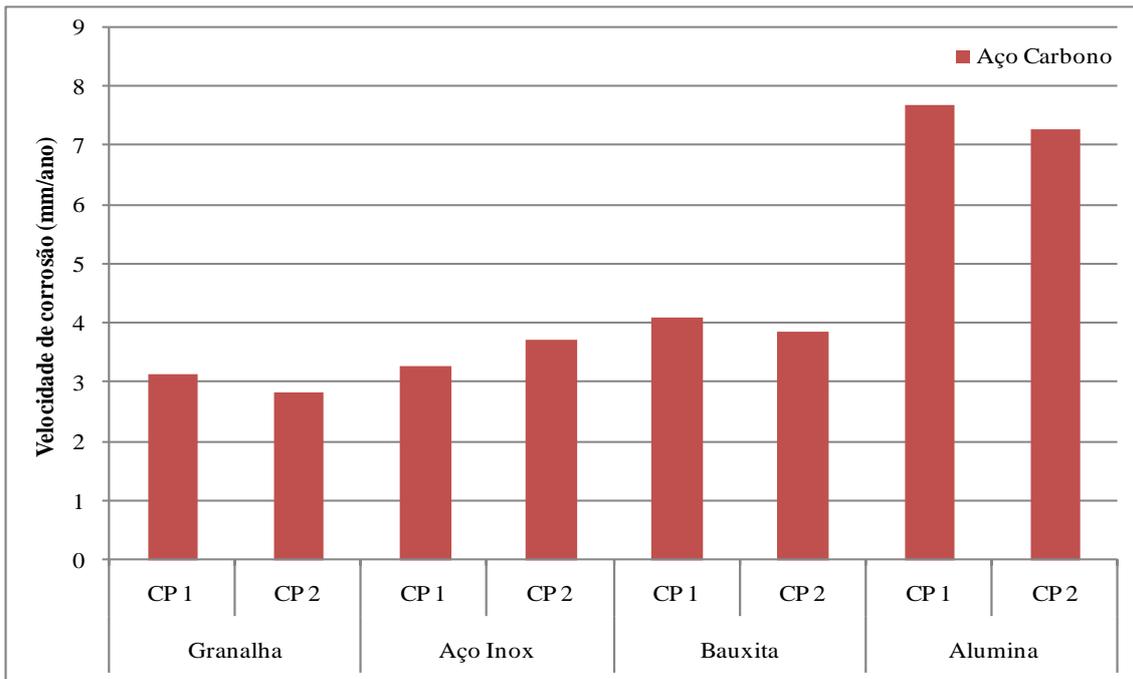


Figura 52 Taxa de corrosão corrigida do substrato aço carbono submetidos a diferentes tratamentos superficiais.

O fato da alcalinização ativar a corrosão foi surpreendente pois, esperava-se justamente o contrário. Mais adiante esses resultados serão relacionados com o avanço da corrosão em torno do risco em amostras revestidas.

4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE AMOSTRAS REVESTIDAS

A influência do jateamento com os diferentes abrasivos, sobre o desempenho de revestimento orgânico, foi avaliada para amostras em triplicata submetidas a ensaios de corrosão. Os ensaios foram, imersão em água destilada a 40 °C e ensaio cíclico conforme descrito na metodologia experimental.

De acordo com a literatura, a imersão em água destilada ou bidestilada é um ensaio muito eficaz na evidenciação de efeitos interfaciais no desempenho de revestimentos orgânicos (MORCILLO *et al.*, 1999). A permeação do revestimento pela água é intensificada por processo osmótico. Com isso, o efeito de tratamentos

superficiais e / ou contaminação da superfície metálica sobre o empolamento e perda de aderência do revestimento são mais rapidamente evidenciados.

O desempenho do revestimento foi avaliado pelo grau de empolamento, avanço de corrosão em torno do risco no revestimento e perda de aderência.

4.4.1 Grau de empolamento

Nas figuras 53 e 54 estão a densidade e o tamanho das bolhas observadas em cada tipo de amostra submetida ao ensaio de imersão. Os valores apresentados representam a classificação média das amostras em triplicata, avaliadas em ambos os lados.

Na figura 53 está uma avaliação intermediária, com 672 horas de ensaio. Na figura 54 está a avaliação ao final do ensaio, com 2184 horas.

Para o período de 672 horas, verifica-se que em ambos os substratos, o tratamento com a alumina apresentou o pior desempenho em termos de grau de empolamento, chegando a atingir o grau 4 para a densidade e tamanho de bolhas. Neste mesmo tempo de ensaio, observa-se uma maior tendência a maior grau de empolamento do super duplex, conforme denunciam os maiores índices para as amostras jateadas com inox e com bauxita, figura 53, comparativamente ao aço carbono.

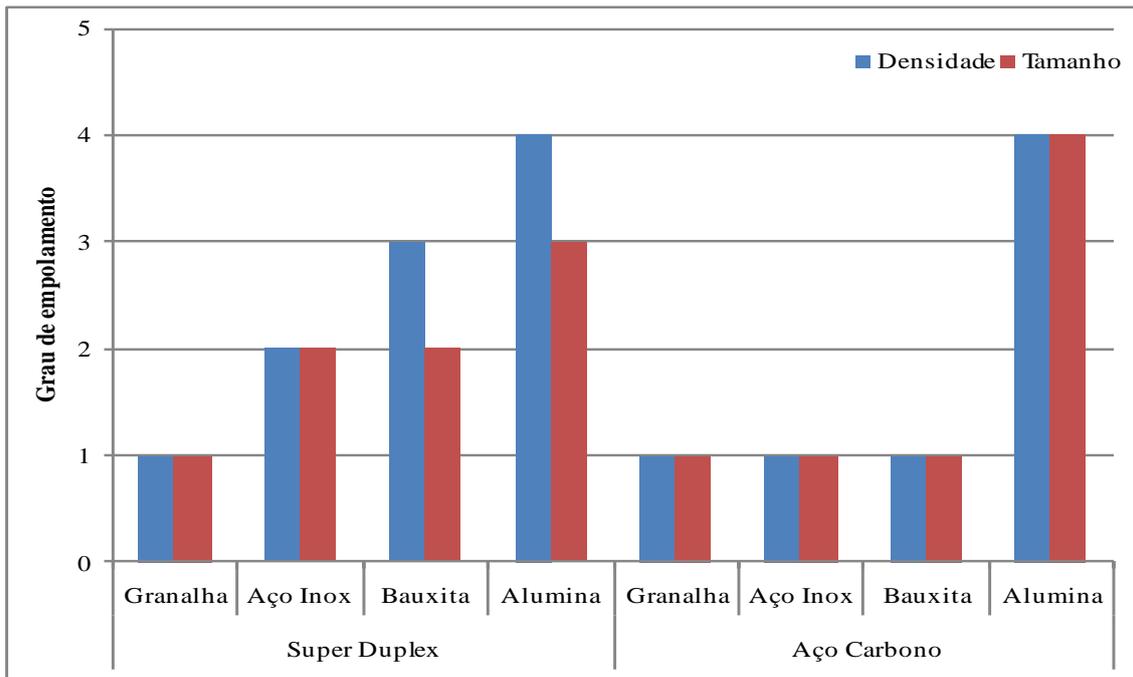


Figura 53 Classificação do grau de empolamento quanto à densidade e tamanho de bolhas com 672 horas de ensaio de imersão.

Ao final do ensaio, após 2184 horas, figura 54, pode-se observar claramente a evolução do empolamento em ambos os quesitos. O substrato super duplex, de maneira geral, apresenta um desempenho inferior comparado ao aço carbono. Analisando o desempenho por abrasivo, a alumina realmente implicou em pior desempenho em termos de grau de empolamento, ao atingir o limite de classificação para o parâmetro densidade de bolhas no substrato super duplex. Esse pior desempenho da alumina pode ser explicado pelo pH alcalino gerado por sua incrustação na interface com o revestimento.

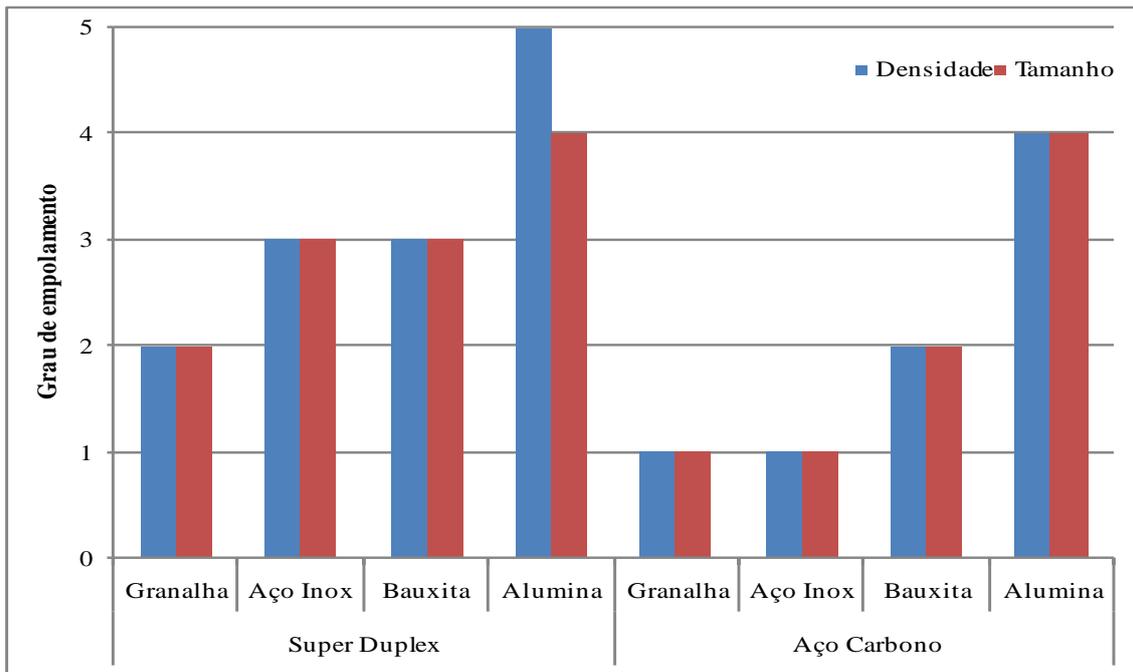


Figura 54 Classificação do grau de empolamento quanto à densidade e tamanho de bolhas ao final do ensaio de imersão com 2184 horas.

No ensaio cíclico não foi observado empolamento em nenhum tipo de amostra.

4.4.2 Avanço de corrosão à partir do risco

Na figura 55 estão fotografias representativas do processo de delaminação e corrosão nos substratos de aço super duplex e carbono após 2184 horas de imersão.

O avanço à partir do risco nos corpos de prova submetidos ao ensaio de imersão promoveu delaminação total do revestimento (100%) para o substrato super duplex. Sob esta delaminação, foi verificada a presença de produtos de corrosão nas amostras jateadas com granalha e aço inox. Devido à elevada nobreza do aço super duplex, possivelmente esta corrosão foi induzida por ação galvânica associada à ação do meio corrosivo sobre as partículas dos abrasivos incrustadas.

A corrosão se manifestou em maior grau no tratamento com a granalha que, de acordo com os padrões fotográficos baseados na norma ASTM D 610 (2008) foram enquadrados na classificação 1-P, apresentando uma densidade elevada de pontos de

corrosão distribuídos ao longo de toda extensão da área analisada. Nas amostras jateadas com aço inox, percebe-se um comportamento diferente ao apresentar pontos maiores, porém em menor densidade, sendo classificado como grau 3-G. O jateamento com bauxita e alumina não foi observada corrosão no substrato, nem mesmo na área do risco.

Abrasive

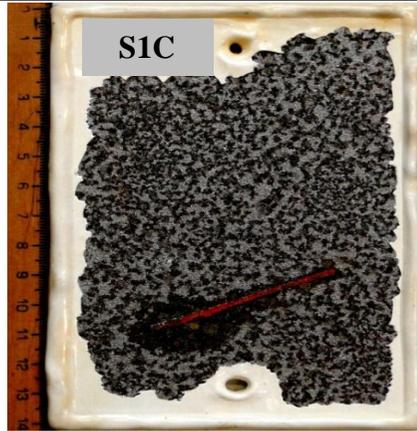
Granalha

Aço Inox

Bauxita

Alumina

Aço Super Duplex



S1C

1-P



S7I

3-G



S2B

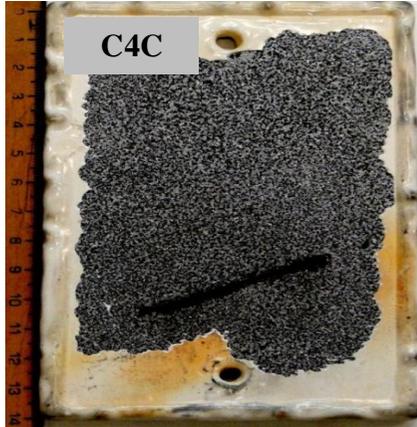
Sem Corrosão



S5A

Sem Corrosão

Aço Carbono



C4C

2-P



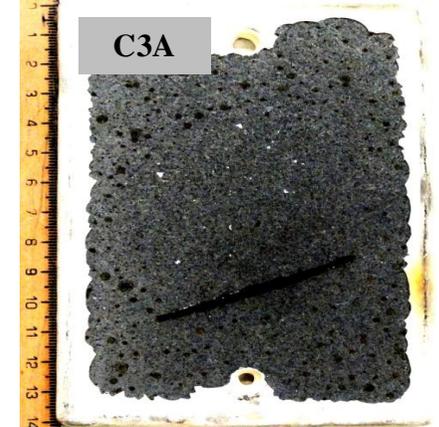
C1I

1-P



C5B

4-P



C3A

5-P

Figura 55 Delaminação e corrosão dos aços super duplex e carbono após imersão em água destilada a 40 °C.

Da mesma forma, para o substrato aço carbono foi constatada delaminação total em todos os tipos de amostra, exceto para o substrato tratado com bauxita, onde se pode verificar um pequeno avanço em dois dos três corpos de prova ensaiados, tabela 32.

Tabela 32 Quantificação do avanço à partir do risco para o substrato aço carbono ao final do ensaio de imersão.

Abrasivo	Avanço à partir do risco (ISO 4628-8 (2005))
Granalha	100% (Delaminação)
Aço Inox	
Bauxita	C2B - 3,02 mm / C5B - 33,61 mm / C8B - 1,59 mm
Alumina	100% (Delaminação)

No substrato de aço carbono houve corrosão vermelha nas regiões delaminadas em todos os tipos de amostra. A corrosão neste caso está relacionada ao ataque, dos abrasivos metálicos incrustados e também do substrato. Com efeito, corrosão vermelha também foi observada nas amostras jateadas com bauxita e com alumina.

Nesse caso a corrosão pode ser designada como “*pinpoint*” baseado nos padrões fotográficos da norma. Foi constatada a ocorrência em maior grau de corrosão para o abrasivo aço inox (1-P), seguido dos abrasivos granalha (2-P), bauxita (4-P) e para e para a alumina (5-P).

Mediante os desempenhos obtidos, sugere-se que possivelmente exista uma relação entre o grau de corrosão verificada nos substratos com a nobreza dos abrasivos incrustados. O aço super duplex apresentou maior grau de incrustação do que o aço carbono e o efeito das incrustações de granalha e aço inox neste aço foi muito marcante do ponto de vista da corrosão no substrato.

De uma forma geral, com 2184 horas de ensaio, pode-se observar o baixo desempenho deste revestimento neste ensaio. Talvez, uma melhor diferenciação frente aos diferentes tratamentos de superfícies, pudesse ter sido obtida, com a finalização do

ensaio em tempo menor. No entanto, estas falhas foram precoces, pois esse tipo de revestimento habitualmente resiste a cerca de 4000 horas nesse ensaio.

No ensaio cíclico, até 1184 horas, não foi verificada a presença de produtos de corrosão no risco nem a presença de empolamento nas amostras de super duplex jateadas com bauxita ou alumina, figura 56. Produtos de corrosão vermelha foram verificados apenas no risco das amostras jateadas com os abrasivos metálicos. Esse comportamento provavelmente foi induzido pelos grãos abrasivos incrustados na superfície do super duplex. Estes produtos de corrosão evidenciados em torno da incisão indicam o início do processo corrosivo cuja coloração típica alaranjada ou castanho-avermelhada sugerem a formação de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ou $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (n – número de moléculas de água) (GENTIL, 2007).

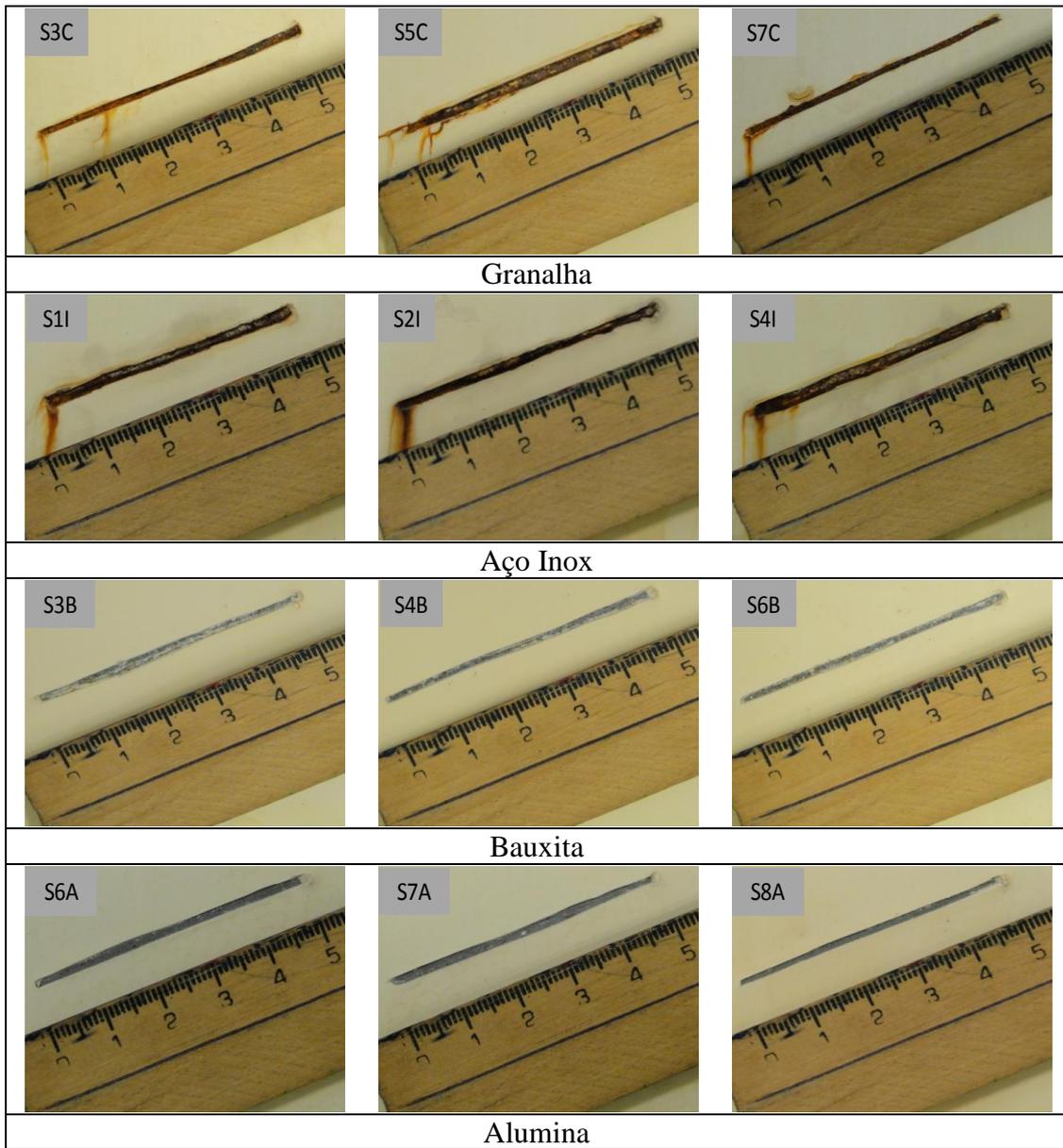


Figura 56 Ilustrações do comportamento do sistema em torno do risco para os substratos super duplex submetidos ao ensaio cíclico com 1184 horas.

Diferentemente no substrato de aço carbono, foi verificada a presença de processo corrosivo intenso, constatado através de produtos de corrosão volumosos na região em torno do risco e o surgimento de bolhas, figura 57.

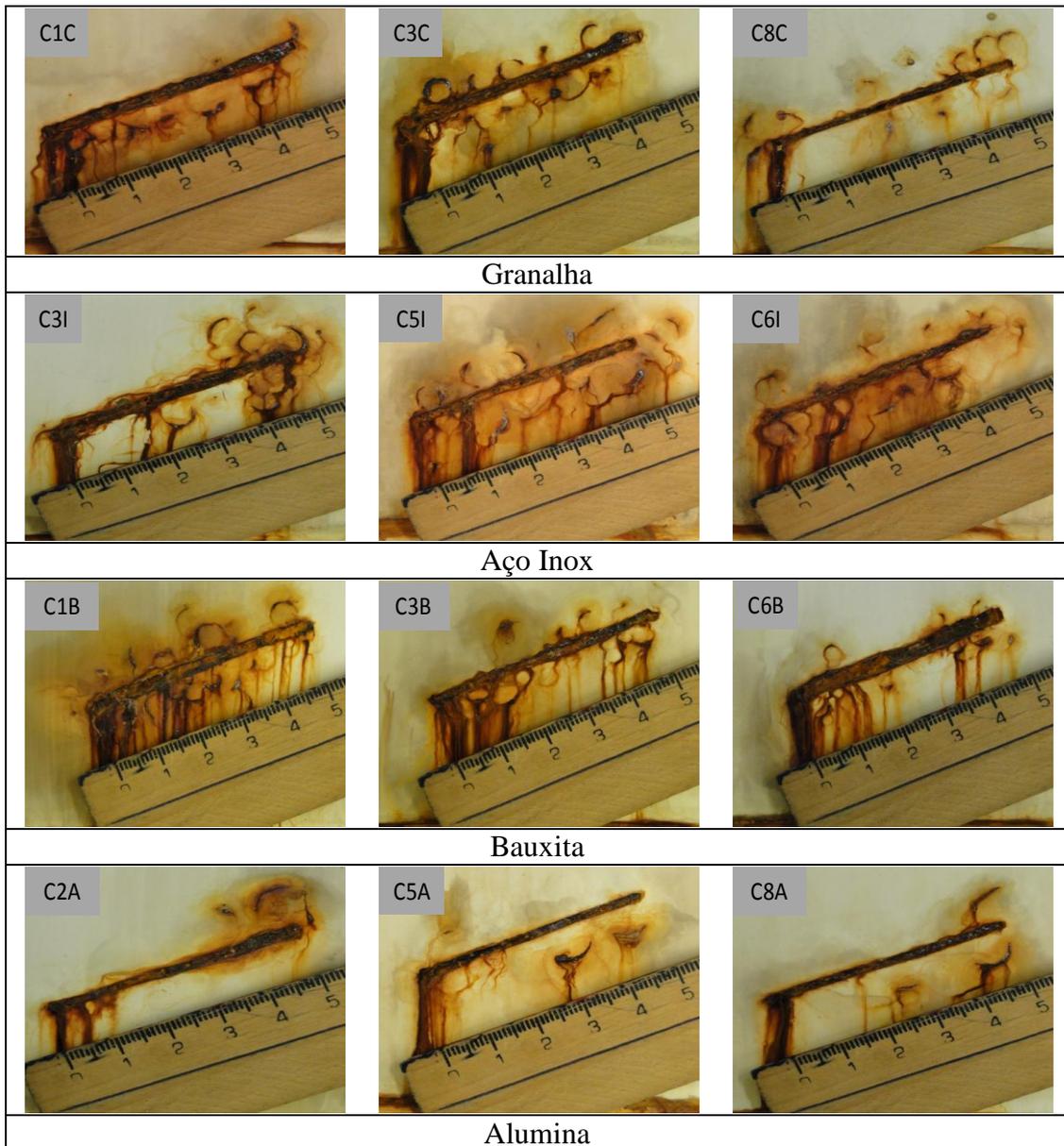


Figura 57 Ilustrações do empolamento em torno do risco para os substratos aço carbono submetidos ao ensaio cíclico com 1184 horas.

Nas figuras 58 e 59, estão fotografias de amostras em triplicata após retirada do revestimento delaminado em torno das áreas de risco para os aços super duplex e carbono, respectivamente. Na figura 58, o jateamento com alumina no substrato super duplex, resultou nos maiores valores de deslocamento do revestimento. Situação contrária foi constatada no tratamento com a bauxita, resultando nos menores valores de avanço. Esse mesmo comportamento foi verificado no substrato aço carbono, figura 59.

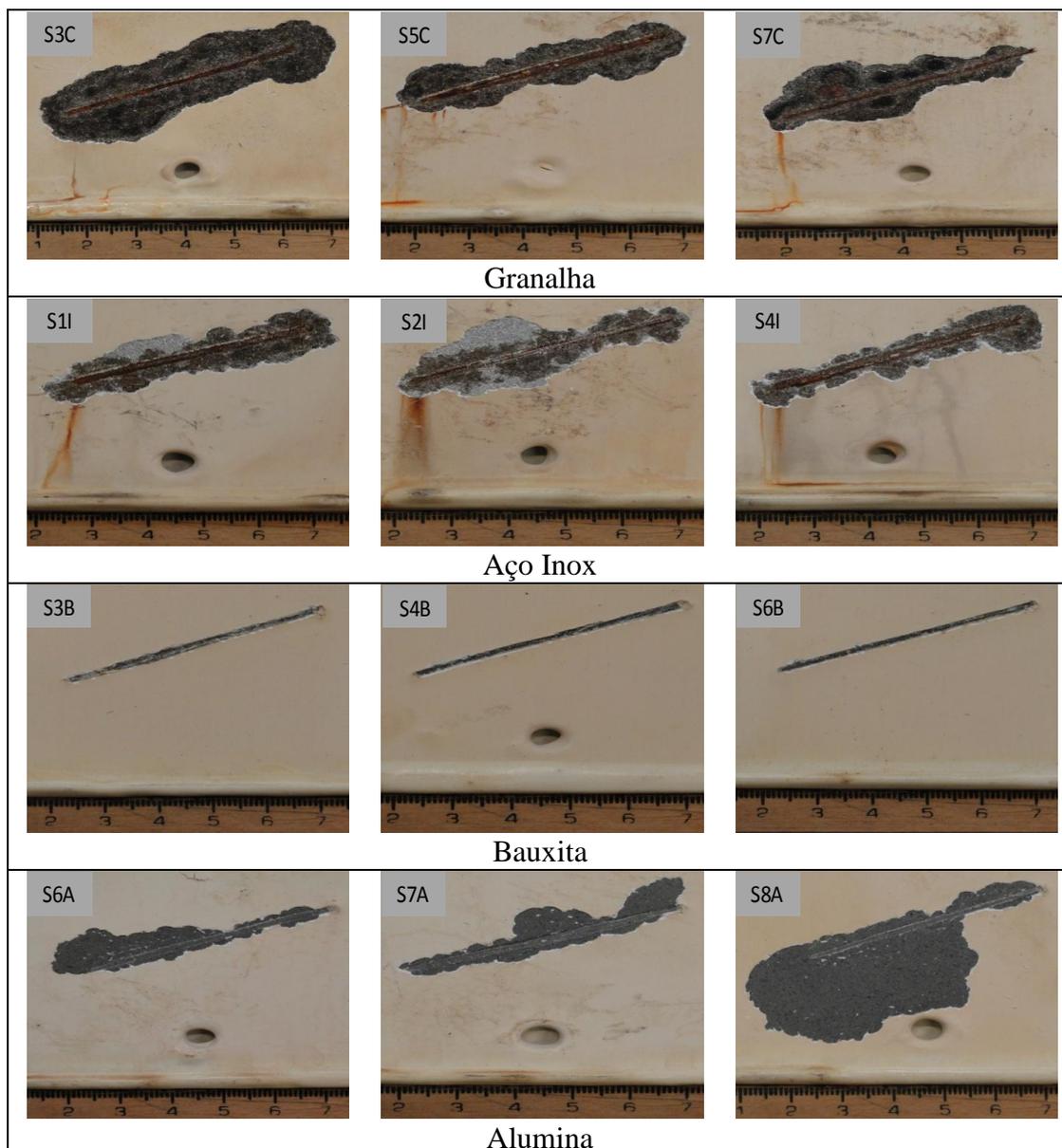


Figura 58 Avanço à partir do risco para o substrato super duplex ao final do ensaio cíclico.

Sugere-se que a corrosão associada à delaminação apresentada nos jateamentos com os abrasivos metálicos no substrato super duplex seja em decorrência da incrustação dos abrasivos.

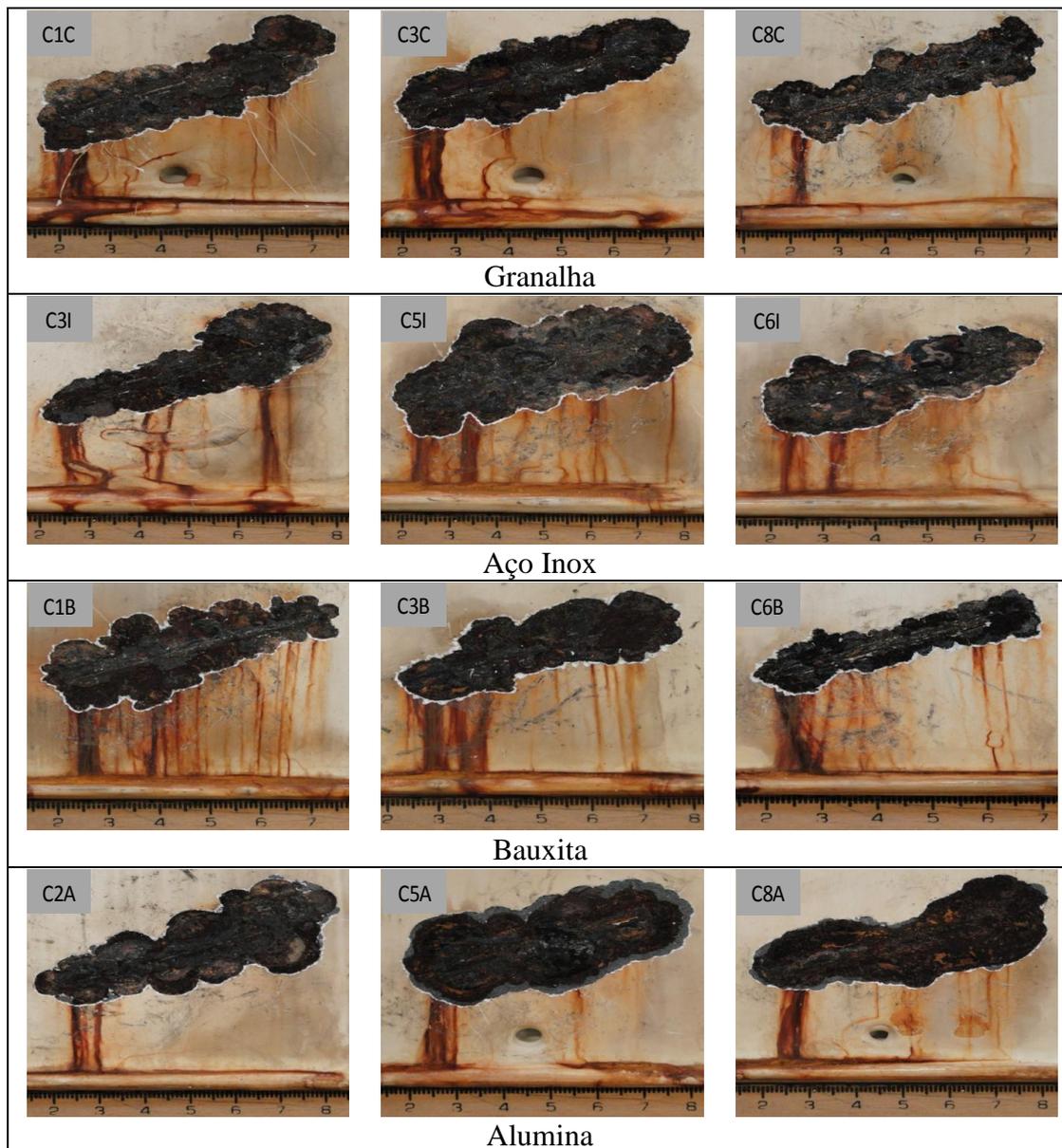


Figura 59 Avanço à partir do risco para o substrato aço carbono ao final do ensaio cíclico.

Na figura 60, estão as medidas de grau de avanço, considerando corrosão e delaminação em torno do risco, feitas por tratamento de imagem. Embora as medidas tenham sido feitas em triplicata, optou-se por adicionar as barras de erro, a fim de mostrar a dispersão dos resultados. Comparando-se o comportamento dos dois substratos para cada abrasivo, pode-se verificar que o grau de avanço à partir do risco no substrato super duplex foi inferior ao do substrato de aço carbono, figura 60. É importante observar que este foi o único quesito de desempenho avaliado nesta

dissertação em que o aço super duplex revestido apresentou vantagem comparativamente ao aço carbono.

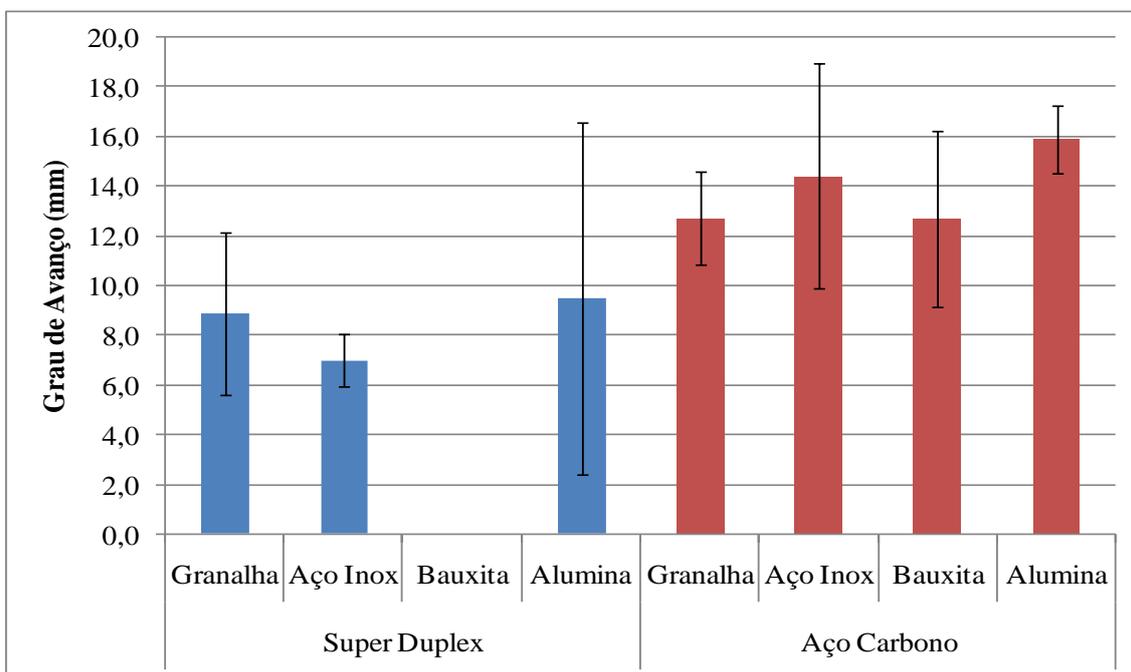


Figura 60 Avaliação do grau de avanço da delaminação nos substratos ao final do ensaio cíclico.

4.4.3 Medidas de aderência

Na figura 61, estão as medidas de aderência inicial realizadas pelo método *pull-off*. A quantidade de *dollies* arrancados, o número de amostras e o número de falhas do tipo A/B estão representados pela legenda no eixo horizontal. Por exemplo, no tratamento do aço super duplex com o abrasivo alumina (Alumina_10/2/1), os três índices indicam que foram colados um total de 10 *dollies* em 2 placas e entre eles uma foi falha por adesão do tipo (A/B) entre revestimento/substrato. Além da quantificação das falhas (A/B) entre os *dollies* arrancados, está destacada em vermelho a média atingida em termos de percentual de área verificada individualmente em cada tratamento.

Já nas medidas iniciais, foi possível constatar a diferenciação dos tratamentos superficiais sobre a aderência do revestimento nos dois substratos. Pode-se observar a incidência de falhas adesivas (A/B) somente nos tratamentos com alumina e aço inox

em ambos os substratos. A ocorrência de falhas (A/B) nos substratos jateados com alumina pode ser explicada pelos menores perfis de rugosidade gerados por este abrasivo. No caso do aço inox, as falhas (A/B) ocorrendo em ambos os substratos, podem ser consequência da energia superficial mais baixa gerada por este abrasivo, comparativamente à granalha e à bauxita.

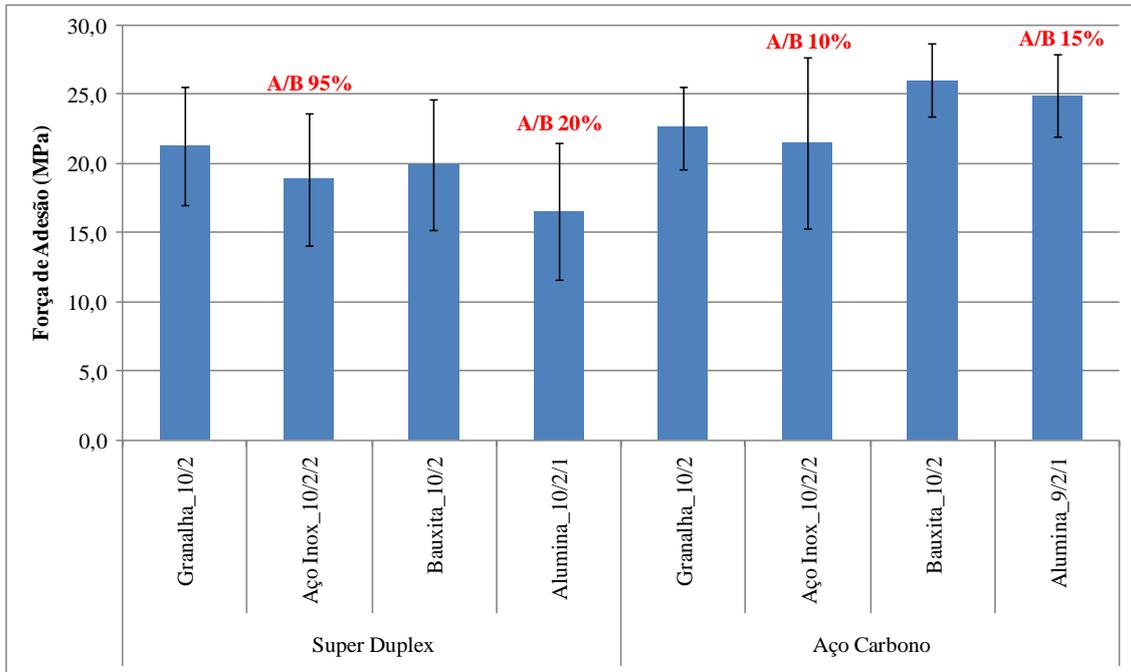


Figura 61 Resultados de *pull-off* das amostras na condição inicial.

Conforme já discutido anteriormente, houve descolamento total do revestimento em todos os tipos de amostras no lado com risco. Do outro lado, sem risco, foram realizadas medidas de aderência por *pull-off*. Foram obtidas falhas por adesão, com exposição total da área do pino (A/B 100%) em todos os tratamentos e em todos os *dollies*, exceto em 2 dos 11 avaliados no tratamento com a bauxita no substrato aço carbono, originando a maior tensão entre os tratamentos realizados, figura 62.

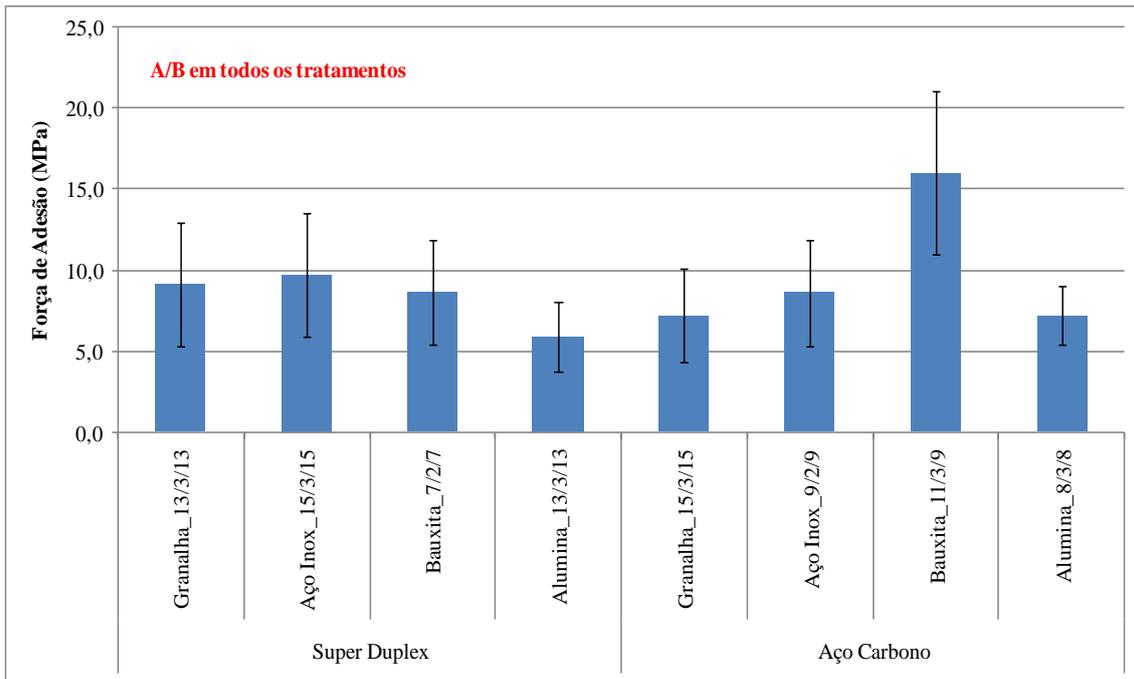


Figura 62 Resultados de *pull-off* das amostras submetidas ao ensaio de imersão ao final do ensaio.

As áreas de arrancamento dos *dollies* observadas por simples inspeção visual permitiu detectar a presença de pontos escuros de corrosão, figura 63, provavelmente relacionados com incrustação de abrasivos nos substratos metálicos, prejudicando a aderência dos revestimentos e resultando em baixas tensões, sem diferenciação que possa ser associada aos diferentes tratamentos de superfície.

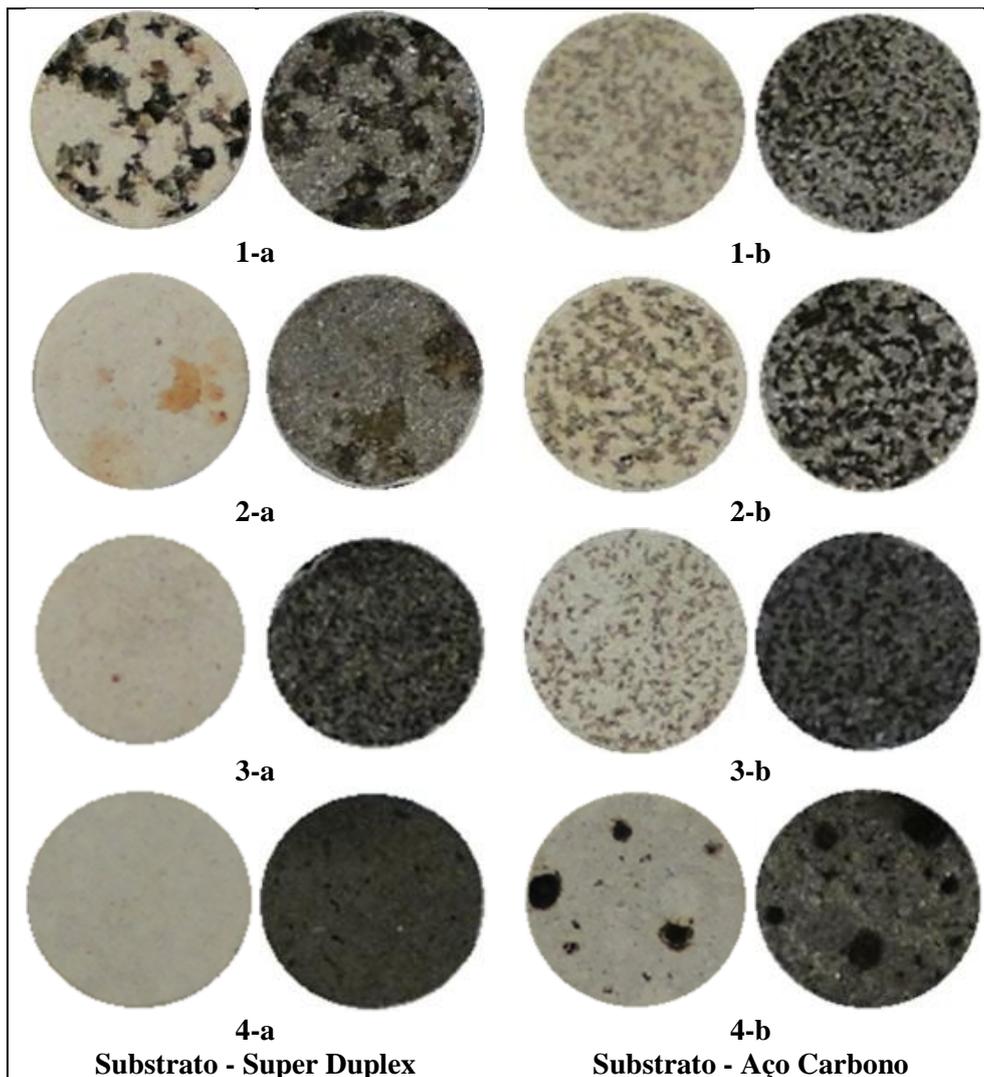


Figura 63 Contaminação nos *dollies* (esquerda) e nos substratos (direita), para os abrasivos: (1-a-b) granalha de aço carbono, (2-a-b) aço inox, (3-a-b) bauxita sinterizada e (4-a-b) alumina desmagnetizada.

Na figura 64, estão os resultados de *pull-off* obtidos para as amostras submetidas a 2184 horas de ensaio cíclico. Pode-se observar que a tendência das tensões de arrancamento serem inferiores no substrato super duplex quando comparadas ao substrato aço carbono permanecem. Apesar das menores tensões, verifica-se que não houve falha (A/B) nos tratamentos com bauxita e granalha no substrato super duplex. No entanto, nos tratamentos em que foi verificada falha do tipo (A/B), super duplex jateado com alumina e aço inox, estas foram proporcionalmente maiores do que no substrato aço carbono.

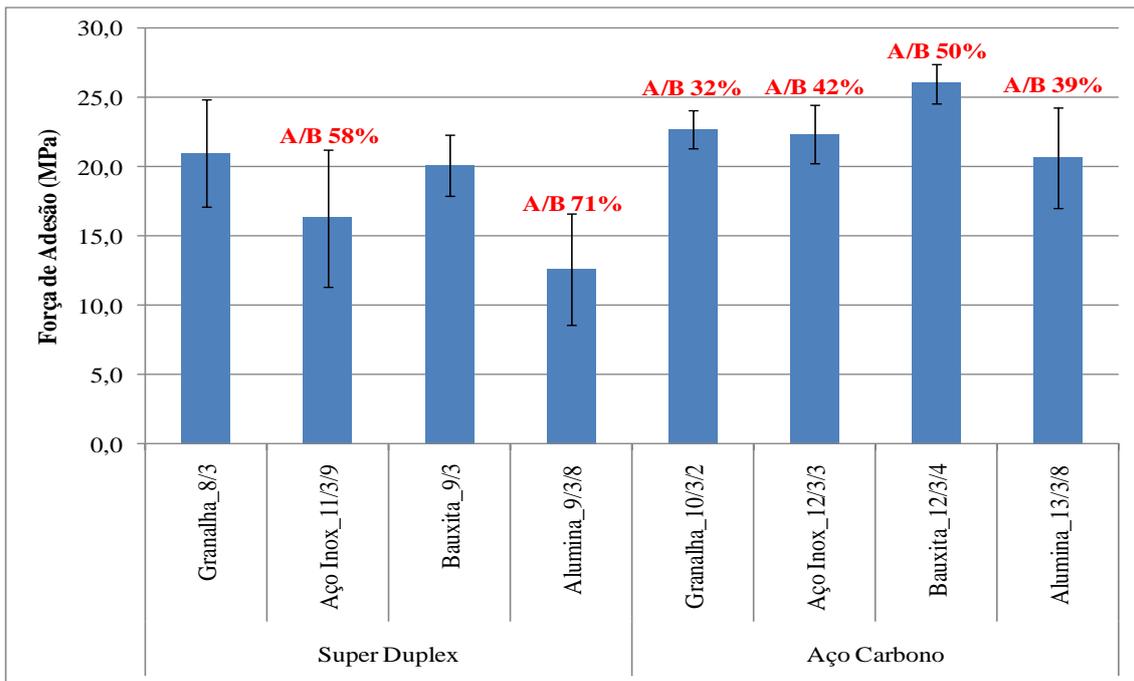


Figura 64 Resultados de *pull-off* das amostras submetidas ao ensaio cíclico ao final do ensaio.

Analisando individualmente o tratamento com alumina, pode-se verificar este resultou nas menores tensões médias em ambos os substratos. Segundo JOPP (1995 apud MOMBER, 2008), existe uma relação direta entre os valores de pH de materiais abrasivos no desempenho de sistemas de base epóxi, a preparação de superfície utilizando abrasivos com caráter alcalino apresentam baixo desempenho na proteção anticorrosiva e aderência.

Desta forma, na condição em que se encontra este abrasivo, sugere-se que ele não seja um bom abrasivo a ser empregado em preparações de superfícies em função do elevado pH dos extratos aquosos e baixo perfil de rugosidade obtidos.

Segundo Momber e Wong (2005), em um dos seus trabalhos a rugosidade se mostrou o fator predominante para promover a adesão entre um revestimento (epóxi) / substrato (aço carbono) comparado aos níveis de contaminação por grãos residuais obtidos pela técnica EDX.

Analisando os resultados destes pesquisadores comparativamente aos tratamentos realizados neste trabalho, pode-se constatar um comportamento semelhante.

O grau de incrustação da bauxita, conforme determinado pelo método de Rietveld, foi superior ao grau de incrustação do aço inox em super duplex. No entanto, as tensões de arrancamento são maiores com a bauxita. Além disso, ocorre falha A/B nas amostras jateadas com inox.

Coerentemente com as medidas iniciais, entre as amostras de ambos os substratos jateados com bauxita, inox e granalha, as menores tensões foram obtidas para o aço inox. Essa tendência pode estar associada às menores energias de superfície resultantes da ação deste abrasivo.

5 CONCLUSÃO

Foram selecionados quatro abrasivos comerciais de ampla aplicação industrial no jateamento de superfícies metálicas, a saber: granalha de aço carbono, granalha de aço inox, bauxita e alumina desmagnetizada.

A caracterização desses abrasivos mostrou que as densidades das granalhas metálicas são aproximadamente o dobro das densidades da bauxita e da alumina. A dureza desses materiais também é diferenciada. A dureza das granalhas metálicas é cerca de 720 HV, enquanto a que dos óxidos de alumínio é cerca de 1100 HV. Esses valores são muito superiores à dureza dos dois substratos investigados. Com efeito, o aço super duplex tem dureza de 224 HV e o aço carbono 126 HV. Portanto, essas diferenças sugerem efeito abrasivo eficiente dos quatro materiais selecionados.

Com o objetivo de conseguir perfil de rugosidade próximo a 110 μm foram selecionados abrasivos com granulometria entre 1,4 e 2,0 mm. Essa informação constando nos boletins técnicos foi comprovada experimentalmente.

A composição dos abrasivos também foi confirmada por difração de raios-X. A diferença básica entre a alumina e a bauxita está na presença de compostos de ferro e silício neste último. As granalhas metálicas têm estrutura martensítica.

É importante complementar as informações dos boletins técnicos com análises de pH e presença de sais solúveis em extratos aquosos dos abrasivos. Esses parâmetros são muito importantes, pois, influenciam no desempenho de revestimentos orgânicos. Nesse contexto o resultado que merece destaque é o pH alcalino verificado nos extratos aquosos de alumina desmagnetizada.

Com relação ao processo de jateamento, verificou-se que em ambos os substratos o aumento do tempo de jateamento implica em diminuição do perfil de rugosidade. Mantendo constantes a distância do bico de jato, o ângulo de jateamento e a pressão, obteve-se perfis de rugosidade comparáveis para os dois substratos com as granalhas metálicas e com a bauxita. A alumina gerou perfis menores nos dois substratos embora tivesse a mesma distribuição granulométrica dos outros abrasivos.

Justificando maior fragmentação da alumina, seguida da bauxita. Essa característica resultou no dobro de consumo destes abrasivos comparativamente às granalhas metálicas. O fato desses abrasivos gerarem muito material particulado implica em que se tenha muito cuidado na limpeza da superfície antes da aplicação do revestimento.

A caracterização dos substratos jateados por DRX mostrou que existem diferenças significativas no grau de incrustação dos abrasivos. Através do Método de Rietveld, verificou-se que as incrustações são maiores no aço super duplex em relação ao aço carbono.

Comparando o grau de incrustação de cada abrasivo verificou-se maior grau para a bauxita, seguida das granalhas metálicas e da alumina. Esse comportamento da alumina se justifica tanto pelo seu elevado grau de fragmentação quanto pelos menores perfis de rugosidade.

O pH dos extratos aquosos das superfícies jateadas mostra alcalinização significativa no caso da alumina. Os demais abrasivos geraram pH's entre 6 e 7, sendo que o aço super duplex apresentou valores superiores ao aço carbono, mesmo quando jateado com as granalhas metálicas. Esse comportamento é coerente com o maior grau de incrustação desses abrasivos no aço super duplex. O pH mais alcalino no super duplex, no caso das granalhas pode ser consequência da corrosão dos abrasivos incrustados durante o procedimento de obtenção do extrato aquoso. O efeito mais importante da corrosão do abrasivo incrustado do que dos substratos propriamente ditos, sugere ação galvânica do super duplex sobre as incrustações. A bauxita incrustou mais do que os outros abrasivos, porém não tendo compostos passíveis de corrosão, apresentou os menores pH's.

O maior grau de incrustação dos abrasivos no super duplex também resultou num aumento de dureza mais significativo do que no aço carbono. Essa propriedade da superfície não tem influência direta sobre o desempenho de revestimento orgânico. Por outro lado, a energia de superfície que pode exercer influência sobre a aderência dos revestimentos, apresentou diferenciação em função do substrato e do abrasivo. A alumina promoveu as maiores energias de superfície. No entanto, a alcalinização da

interface e os menores perfis de rugosidade foram preponderantes na implicação de piores graus de aderência do revestimento.

No caso da bauxita e das granalhas metálicas, os perfis de rugosidade foram semelhantes. Sendo assim, as diferenças em energia de superfície puderam ser associadas às diferenças de aderência do revestimento. Tanto nas medidas iniciais de aderência quanto após ensaio de corrosão, constatou-se pior desempenho para as superfícies jateadas com aço inox. Este abrasivo gerou as mais baixas energias de superfície. De um modo geral, as energias calculadas para o aço super duplex foram menores em comparação ao aço carbono. Esse resultado sugere que a aderência de revestimentos pode ficar comprometida neste substrato. As perdas de aderência dos ensaios de corrosão confirmaram essa interpretação.

Os ensaios de perda de massa com os substratos jateados revelaram as diferenças na ativação das superfícies. As maiores taxas de corrosão obtidas para o super duplex jateado com as granalhas metálicas, confirmaram que a incrustação desses abrasivos deixa a superfície muito mais ativa do que a bauxita ou a alumina. Esse resultado se reflete num maior avanço da corrosão em torno do risco no revestimento para amostras de super duplex jateadas com as granalhas metálicas. A presença de produtos de corrosão volumosos de coloração avermelhada confirma que a incrustação dos abrasivos metálicos foi responsável pelo maior avanço em comparação com a bauxita.

Os ensaios de perda de massa com o aço carbono mostraram que a alumina ativou muito mais a superfície do que os outros abrasivos. A interpretação deste resultado requer ensaios adicionais. Contudo, também se verificou um maior avanço em torno do risco no revestimento para esse tipo de amostra, aço carbono jateado com alumina.

De um modo geral, verificou-se que o aço super duplex requer mais cuidados na preparação de superfície em comparação ao aço carbono. Trata-se de um substrato que pode apresentar problemas de aderência devido à maior incrustação de abrasivos. Entre os abrasivos avaliados, se verificou que a bauxita resultou em melhor desempenho. No entanto, sua fragmentação elevada requer cuidados especiais na

limpeza da superfície. A elevada nobreza do aço super duplex restringe muito a escolha de abrasivos metálicos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCOA. *Alumina e produtos químicos – Processo de produção*. Disponível em:< http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom_page/mercados_alumina_processo.asp>. Acesso em: 18 de Setembro de 2012.

ALVAREZ-ARMAS, I., DEGALLAIX-MOREUIL, S., *Duplex Stainless Steels*. USA, Wiley - ISTE, 2009.

ASCONTEC. *Jateamento*. Disponível em:< <http://www.ascontecabrasivos.com.br/jat-oxido-de-aluminio-aloN.html>>. Acesso em: 10 de Abril de 2012.

ASTM A516/A516M – 10, *Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service*, ASTM, International, West Conshohocken, USA, 2010.

ASTM A789/A789M – 08a, *Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2008.

ASTM A790/A790 – 03, *Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2003.

ASTM D 854-10, *Standard Methods for Specific Gravity of soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2010.

ASTM D 4541-09, *Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2009.

ASTM D 610-08, *Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2008.

ASTM D 714-02, *Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints*, ASTM International, West Conshohocken, USA, Reaprovada em 2009.

ASTM E 140-07, *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2007.

ASTM E 11-09, *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2009.

ASTM E 384-10, *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2010.

ASTM G1-03, *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2003.

ASTM G31-72, *Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 1972, Reaprovada em 2004.

ASTM G48-11, *Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2011.

BHADESHIA, H. K. D. H., HONEYCOMBE, R. W. K., *Steels Microstructure And Properties*. 3 ed. Cambridge, Butterworth-Heinemann, 2006.

BUNSHAH, R. F., *Handbook Of Deposition Technologies For Films And Coatings: Science, Technology And Applications*. 2 ed. USA, Noyes Publications, 1994.

BUTT, H., GRAF, K., KAPPL, M., *Physics and Chemistry of Interfaces*. Weinheim, Wiley - VCH, 2003.

CANTON, M. A., *Abertura de Perfil de Ancoragem com Hidrojateamento à Pressão Ultra Elevada + Zirflocos*. In: WORKSHOP: PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIE & ADERÊNCIA. 2010, Macaé. Macaé: ABRACO, 2010. CD-ROM.

CHANDER, K. P., VASHISTA, M., SABIRUDDIN, K., *et al.*, "Effects Of Grit Blasting On Surface Properties Of Steel Substrates". *Materials and Design*. Vol. 30, N° 8 (Set), pp. 2895-2902, 2009.

CHIAVERINI, V., *Aços e Ferros Fundidos: Característicos Gerais, Tratamentos Térmicos e Principais Tipos*. 4 ed. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia, 1979.

COMYN, J., “Contact Angles And Adhesive bonding”. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Vol. 12, Nº 3, pp. 145-149, 1992.

CULLITY, B. D., STOCK, S. R., *Elements of X-Ray Diffraction*. USA, Addison-Wesley, 1956.

CYM. *Granalha de aço carbono*. Disponível em: <<http://www.cym.com.ar/portugues/informes/granalha-de-aco-ficha-tecnica.pdf>>. Acesso em: 02 de Janeiro de 2011.

DAVIS, J. R., *Handbook Of Thermal Spray Technology*. USA, ASM International, 2004.

DESTEC. *Parâmetros de rugosidade*. Disponível em <http://destec.no.sapo.pt/pdf/parametros_rugosidade.pdf>. Acesso em: 25 de Novembro de 2010.

DIN EN ISO 4628-8, Paints and varnishes – Evaluation of degradation of coatings – Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance – Assessment of degree of delamination and corrosion around a scribe, ISO, Germany, 2005.

ELFUSA. *Produtos*. Disponível em: <<http://www.elfusa.com.br/br/prod08-03.htm>>. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2011.

FANG, C. K., CHUANG, T. H., “Surface Morphologies and Erosion Rates Of Metallic Building Materials After Sandblasting”. *Wear*. Vol. 230, Nº 2 (Mai), pp. 156-164, 1999.

GENTIL, V., *Corrosão*. 5 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2007.

GNECCO, C., MARIANO, R., FERNANDES, F., *Tratamento de Superfície E Pintura*. Rio de Janeiro, IBS/CBCA, 2003.

GRANASAMINAS, *Granalha de aço carbono*. Disponível em: <<http://www.granasaminas.com.br/ftcarbono.htm>>. Acesso em: 02 de Janeiro de 2011.

HARRIS, A. F., BEEVERS, A., “The Effects Of Grit-Blasting On Surface Properties For Adhesion”. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Vol. 19, pp. 445-452, 1999.

ICDD, *International Centre for Diffraction Data*. Disponível em: <icdd.com>. Acesso em: 07 de Agosto de 2012.

INDA, *Limpeza e Preparação de Superfícies*. Disponível em: <<http://www.inda.org.br/limpeza.php>>. Acesso em: 24 de Novembro de 2010.

ISO 4628-2, Paints and varnishes – Evaluation of degradation of coatings – Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance – Assessment of degree of blistering, ISO, Switzerland, 2003.

ISO 8501-1, Preparation of steel substrates before application of paints and related products -- Visual assessment of surface cleanliness -- Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings, ISO, Switzerland, 2007.

ISO 20340, Paints and varnishes – Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures, ISO, Switzerland, 2003.

JOPP, H., *Ein Beitrag zum besseren Verständnis der Wirkungsweise des Strahlens auf die Festigkeit und Beständigkeit von Metallklebungen*. Dissertation, Kaiserslautern University, Kaiserslautern, Germany, 1995.

KHAMENEH, A. S., HEYDARZADEH, S. M., “Effect Of Grit-Blasting Parameters On The Surface Roughness And Adhesion Strength Of Sprayed Coating”. *Surface and Interface Analysis*. Vol. 42, N°6-7 (Fev), pp. 551-554, 2010.

KRAUSS, G., *Steels: Processing, Structure, And Performance*. Ohio, ASM International, 2005.

LIMA, C. C., TREVISAN, R., *Aspersão Térmica: Fundamentos E Aplicações*. 2 ed. São Paulo, Artliber, 2007.

LIPPOLD, J. C., KOTECKI, D. J., *Welding Metallurgy And Weldability Of Stainless Steels*. New Jersey, Wiley Interscience, 2005.

MARUYAMA, T., AKAGI, K., KOBAYASHI, T., “Effects of Blasting Parameters On Removability Of Residual Grit”. *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 15, N° 4 (Dez), pp. 817-821, 2006.

MATWEB. *Property Search*. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2011.

MEDTEC. Rugosímetros. Disponível em: <<http://www.medtec.com.br/produtos.php?categoria=26>>. Acesso em: 10 de Abril de 2012.

MCCOY, J. W., *Chemical Analysis Of Industrial Water*. New York, Chemical Publishing Company Inc, 1969.

MELLALI, M., GRIMAUD, A., LEGER, A. C., FAUCHAIS, P., LU, J., “Alumina Grit Blasting Parameters for Surface Preparation In The Plasma Spraying Operation”. *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 6, N° 2 (Jun), pp. 217-227, 1997.

MELLALI, M., GRIMAUD, A., FAUCHAIS, P., “Parameters Controlling the Sand Blasting Substrates for Plasma Spraying”. *7Th International Thermal Spray Conference*. Boston, pp. 227–232, 1994.

MENEZES, D. D., *Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio Aplicados pelas Técnicas de Arco Elétrico e Chama Convencional, em meio Cloreto*, tese D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

MOMBER, A., *Blast Cleaning Technology*. Hamburg, Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

MOMBER, A. W., WONG, Y.C., “Overblasting Effects On Surface Properties Of Low-Carbon Steel”. *Journal of Coatings Technology and Research*. Vol. 2 (Abr), N° 6, pp. 453-461, 2005.

MORCILLO, M., BASTIDAS, J. M., SIMANCAS, J., GALVAN, J. C., “The effect of the abrasive work mix on paint performance over blasted steel”. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 36, N° 5, pp.4-8, 1989.

MORCILLO, M., “Soluble Salts: Their Effect on Premature Degradation of Anticorrosive Paints”. *Progress in Organic Coatings*. Vol. 36 (Jul), N° 3, pp. 137-147, 1999.

NEUMANN, A. W., DAVID, R., ZUO, Y., *Applied Surface Thermodynamics*. 2 ed. London, CRC Press, 2011.

NUNES, L. P., LOBO, A. C. O., *Pintura Industrial Na Proteção Anticorrosiva*. Rio de Janeiro, LTC, 1990.

OLYMPUS. *Microscópios e sistemas digitais*. Disponível em: <
http://www.olympuslatinoamerica.com/portuguese/seg/seg_home_port.asp?d=2>.
Acesso em: 12 de Junho de 2012.

PACKHAM, D. E., “Surface Energy, Surface Topography And Adhesion”. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Vol 23, N° 6, pp. 437-448, 2003.

RIETVELD, H. M., “A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures”. *Journal of Applied Crystallography*, Vol. 2 (Nov), pp.65-71, 1969.

RODRIGUESBRANDAO. *Granalha de aço inoxidável*. Disponível em:
<<http://www.rodriguesbrandao.pt/info3.htm>>. Acesso em: 02 de Janeiro de 2011.

SAE J 1993, Cast Steel Grit - For Information on Composition and Shapes, SAE International, Warrendale, 1996.

SANTOS, A. R., *Efeito da oxidação anódica de titânio comercialmente puro revestido ou não com fibronectina na interface osteoblastos humanos-superfície de titânio*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

SEN, D., NAVEEN, M. C., RAO, D. S., *et al.*, “Influence Of Grit Blasting On The Roughness And The Bond Strength Of Detonation Sprayed Coating”. *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 19, Nº 4 (Jun), pp. 805-815, 2010.

SKOUGSTED, M. W., FISHMAN, M. J., FRIEDMAN, L. C., ERDMANN, D. E., DUNCAN, S. S., *et al.*, *Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey*. 2 ed. USA, USGS, 1979.

SPONGE-JET. Disponível em: <www.spongejet.com>. Acesso em: 13 de Junho de 2012.

TECJATO. *Bauxita Sinterizada*. Disponível em: <<http://tecjato.com.br/index.php/tplprodutoint/id/101>>. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2011.

TOTTEN, G. E., *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. 2 ed. USA, CRC Press, 2006.

TREIBACHER. *Graus de Limpeza*. Disponível em: <<http://www.treibacher.com.br/pdf/alo-branco-EK8A.pdf>>. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2011

VILELA, R. B. V., BONCIANI, M., *Leis que proíbem o uso de jato de Areia*. Disponível em: <<http://www.zirtec.com.br/areia/leis.htm>>. Acesso em: 30 de Novembro de 2010.

ZIRTEC. *SINTER-BALL e SINTER-BLAST*. Disponível em: < <http://www.zirtec.com.br/>>. Acesso em: 29 de Novembro de 2010.

ZIRTEC. *Graus de Limpeza*. Disponível em: < <http://www.zirtec.com.br/>>. Acesso em: 30 de Novembro de 2010.

7 ANEXO A

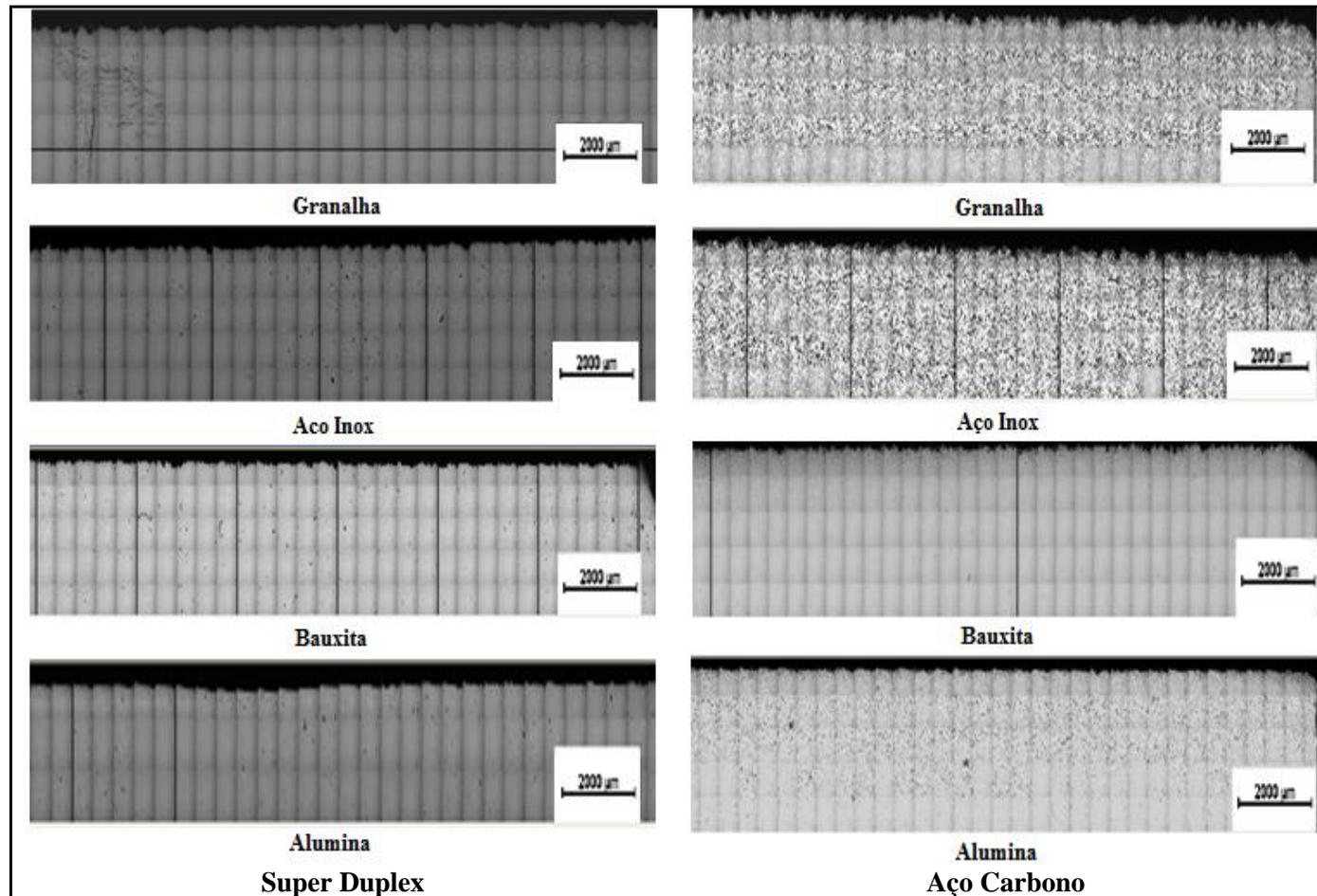


Figura A1 Mosaico de micrografias em corte transversal dos substratos jateados. Aspecto do perfil de rugosidade.

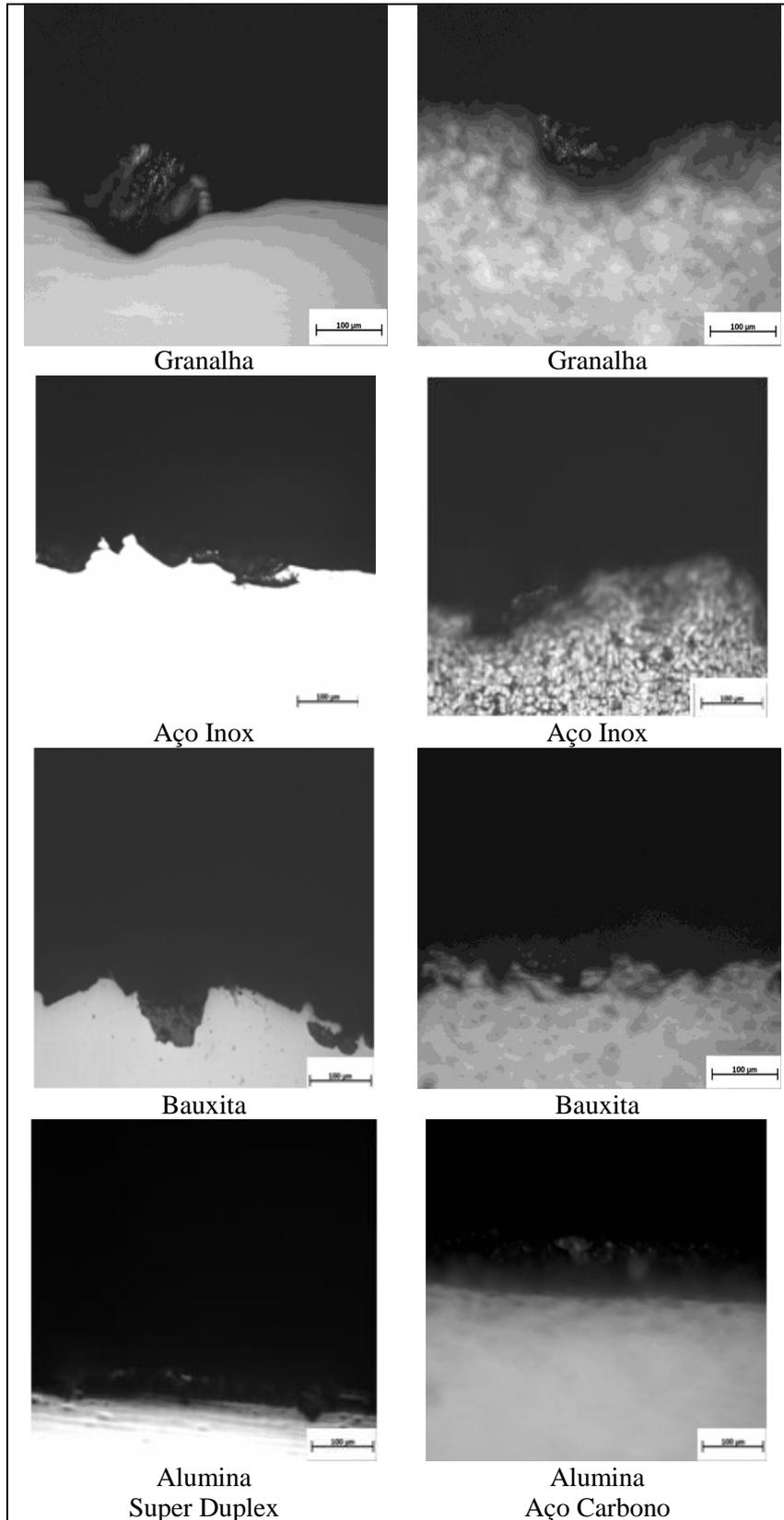


Figura A2 Micrografias dos substratos jateados. Aspecto de incrustações em vales do perfil de rugosidade.