

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

CAROLINE MENDES BARBOZA

**AVALIAÇÃO DAS REGIÕES DE BORDA SUPERFICIAL APÓS PROCESSOS DE
CORTES TÉRMICOS EM UM AÇO CARBONO COM E SEM PRÉ-TRATAMENTO
NANOCERÂMICO E REVESTIMENTO EM *E-COAT* ACRÍLICO**

CAXIAS DO SUL

2020

CAROLINE MENDES BARBOZA

**AVALIAÇÃO DAS REGIÕES DE BORDA SUPERFICIAL APÓS PROCESSOS DE
CORTES TÉRMICOS EM UM AÇO CARBONO COM E SEM PRÉ-TRATAMENTO
NANOCERÂMICO E REVESTIMENTO EM *E-COAT* ACRÍLICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a aprovação da disciplina de Trabalho de Conclusão do Curso II da Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul, sob orientação da Prof^a. Dr^a. Eliena Jonko e coordenação da Prof^a. Dr^a Janete Eunice Zorzi.

CAXIAS DO SUL

2020

CAROLINE MENDES BARBOZA

**AVALIAÇÃO DAS REGIÕES DE BORDA SUPERFICIAL APÓS PROCESSOS DE
CORTES TÉRMICOS EM UM AÇO CARBONO COM E SEM PRÉ-TRATAMENTO
NANOCERÂMICO E REVESTIMENTO EM E-COAT ACRÍLICO**

Trabalho de Conclusão de Curso II com
requisito para a aprovação da disciplina de
Trabalho de Conclusão do Curso de
Engenharia Química da Universidade de
Caxias do Sul.

Aprovado em 02 de dezembro de 2020.

Banca Examinadora

Orientadora
Prof^a. Dr^a Eliena Jonko
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Roberto Itacyr Mandelli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço incondicionalmente a Deus, por me guiar e me mostrar os melhores caminhos, além de me dar forças e sabedoria.

À minha família, em especial aos meus pais Antônio Henrique e Marivone Mendes, pelo investimento em mim e na minha carreira profissional, além de todos os ensinamentos, apoios, paciência, amor, carinho, ombro amigo e confiança depositada durante esta jornada acadêmica. Devo a eles tudo o que sou e tudo o que construí.

Ao amor de todas as minhas vidas, meu melhor amigo, meu porto seguro, meu namorado, Vinícius Lago, por sempre estar ao meu lado, por me incentivar todos os dias e por acreditar no meu potencial em todos os momentos. Graças a ele todos os momentos difíceis se tornaram mais leves e todos os momentos bons se tornaram melhores ainda.

À professora Dr^a. Eliena Jonko pelas orientações e auxílio na realização deste trabalho e aos professores Me. Roberto Itacyr Mandelli e Dr. Alexandre Vieceli, por aceitarem o convite em fazer parte da banca examinadora e estarem dispostos a contribuir com seus conhecimentos para o enriquecimento deste trabalho.

E por fim, mas com certeza não menos importante, agradeço ao meu exemplo e inspiração dentro da Engenharia Química. À pessoa mais corajosa e determinada que eu já conheci, àquela que me abriu portas, que me motiva diariamente e que vou levar como espelho por toda minha carreira profissional, Daiana Valéria Trombetta. Obrigada por fazer parte da minha caminhada e por me ensinar pilares importantes dentro da Engenharia.

RESUMO

Os cortes térmicos são bastante utilizados nas indústrias com a finalidade de obter-se peças metálicas manufaturadas com bom acabamento superficial e preservação de suas propriedades metalúrgicas, para utilização nos processos subsequentes de produção. Dessa forma, muitos aspectos que tendem a ser influenciados devido a esses processamentos térmicos como integridade superficial, microestrutura, zona termicamente afetada (ZTA), dureza e demais propriedades foram objeto de estudo deste trabalho. Aliado a esses fatores é importante ressaltar a proteção desses materiais metálicos quanto a processos corrosivos que tendem a deteriorar os mesmos dentro de ambientes industriais. Dessa forma, a aplicação de revestimentos orgânicos para proteção anticorrosiva aliado a um pré-tratamento químico adequado é a alternativa mais aplicável, sustentável e econômica atualmente, fazendo parte das avaliações presentes neste trabalho. Dentro deste contexto, foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV/FEG) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), a fim de avaliar a condição das regiões de borda de um aço carbono ASTM A570 Grau 36 após processamentos térmicos a *laser* CO₂ e a plasma. Também foi analisada a camada de pré-tratamento químico a base de produto nanocerâmico e revestimento orgânico por tecnologia em *E-coat* Acrílico. Observou-se a formação de micro trincas na superfície do aço e a presença de poros na deposição do pré-tratamento e do revestimento orgânico, além da não uniformidade da camada aplicada. A fim de avaliar a condição da microestrutura do aço carbono após os processamentos térmicos, foi possível observar a formação de uma ZTA composta por agulhas martensíticas de elevada dureza, tal propriedade comprovada através do ensaio de microdureza Vickers. De acordo com os parâmetros de corte utilizados, não foi possível observar a influência dos mesmos na rugosidade superficial do aço carbono, que permaneceu constante tanto no centro dos CP's, quanto nas bordas adjacentes aos cortes térmicos. Através do teste de aderência em grade foi possível determinar grau de aderência 0 ao revestimento aplicado, o que implica ao mesmo bom desempenho à proteção anticorrosiva tanto nos centros quanto nas bordas da superfície. Entretanto, no ensaio de névoa salina, concluiu-se que a tecnologia em *E-coat* Acrílico não atendeu a especificação do boletim técnico que determinava um tempo de exposição de, no mínimo, 500 horas. Observou-se também a presença de empolamento nas regiões de borda e centro da superfície. As avaliações realizadas neste trabalho comprovam que os processamentos térmicos tendem a influenciar nas propriedades do aço carbono nas regiões de bordas superficiais e que falhas ou mau desempenho na deposição do pré-tratamento químico e do revestimento orgânico, principalmente nessas regiões próximas as dos cortes podem promover processos corrosivos. Ademais, através das avaliações feitas neste trabalho, o *laser* CO₂ apresentou-se como o método de corte térmico mais adequado quando procura-se por melhor qualidade e acabamento de borda de peças que posterior irão passar por processos subsequentes de montagem nas indústrias.

Palavras chaves: Cortes térmicos industriais, *laser* CO₂, plasma, corrosão, pré-tratamento químico, nanocerâmico, revestimento orgânico e *E-coat* Acrílico.

ABSTRACT

Thermal cuts are widely used in industries in order to obtain manufactured metal parts with good surface finish and preservation of their metallurgical properties, for use in subsequent production processes. Thus, many aspects that tend to be influenced due to these thermal processes such as surface integrity, microstructure, thermally affected zone (ZTA), hardness and other properties were the object of study in this work. In addition to these factors, it is important to highlight the protection of these metallic materials against corrosive processes that tend to deteriorate them in industrial environments. Thus, the application of organic coatings for corrosion protection combined with an adequate chemical pretreatment is the most applicable, sustainable and economical alternative today, being part of the evaluations present in this work. Within this context, scanning electron microscopy analyzes with field emission (SEM / FEG) and dispersive energy spectroscopy (EDS) were carried out, in order to evaluate the condition of the edge regions of an ASTM A570 Grade 36 carbon steel after processing CO_2 laser and plasma thermal systems. The chemical pre-treatment layer based on a nanoceramic product and organic coating by Acrylic E-coat technology were also analyzed. It was observed the formation of micro cracks on the steel surface and the presence of pores in the deposition of the pre-treatment and the organic coating, in addition to the non-uniformity of the applied layer. In order to evaluate the condition of the microstructure of carbon steel after thermal processing, it was possible to observe the formation of a ZTA composed of martensitic needles of high hardness, such a property proved through the microhardness test of vickers. According to the cutting parameters used, it was not possible to observe their influence on the surface roughness of carbon steel, which remained constant both in the center of the CP's and in the edges adjacent to the thermal cuts. Through the grid adhesion test, it was possible to determine the degree of adhesion 0 to the applied coating, which implies the same good performance to the corrosion protection both in the centers and on the edges of the surface. However, in the salt spray test, it was concluded that the technology in E-coat Acrylic did not meet the specification of the technical bulletin that determined an exposure time of at least 500 hours. Blistering was also observed in the edge and center regions of the surface. The evaluations carried out in this work prove that thermal processing tends to influence the properties of carbon steel in regions with superficial edges and that failures or poor performance in the deposition of chemical pretreatment and organic coating, especially in those regions close to those of cuts can promote corrosive processes. In addition, through the evaluations made in this work, the CO_2 laser presented itself as the most appropriate thermal cutting method when looking for better quality and finishing of the edge of parts that later go through subsequent assembly processes in the industries.

Keywords: Industrial thermal cuts, CO_2 laser, plasma, corrosion, chemical pretreatment, nanoceramic, organic coating and Acrylic E-coat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microestrutura de um aço hipoeutetóide constituído por ferrita e perlita ..	20
Figura 2 – Estrutura de uma martensita na forma de agulhas	21
Figura 3 – Ilustração do feixe de raio <i>laser</i> CO ₂	26
Figura 4 – Processamento térmico de corte em plasma	27
Figura 5 – Comparação entre os tipos de perfil de rugosidade	32
Figura 6 – Morfologia das camadas de nanocerâmico e fosfatização sobre o aço ...	34
Figura 7 – Barreira de proteção dos revestimentos orgânicos a superfície metálica	35
Figura 8 – Processo de pintura por eletrodeposição	36
Figura 9 – Formação dos ácidos acrílico e metacrílico	39
Figura 10 – Processo de evaporação do solvente na camada de tinta	40
Figura 11 – Desenho técnico do corpo de prova em aço carbono	42
Figura 12 – Equipamento Bystronic de corte térmico a <i>laser</i> CO ₂	43
Figura 13 – Processamento a <i>laser</i> CO ₂ dos CP's.....	44
Figura 14 – Equipamento Oxipira de corte térmico a plasma.....	45
Figura 15 – Processamento a plasma dos CP's.....	45
Figura 16 – Fluxograma do processo de pré-tratamento e revestimento orgânico ...	46
Figura 17 – Composição química do banho de tinta por tecnologia em E-coat Acrílico	49
Figura 18 – Rampa de processo (tensão <i>versus</i> tempo).....	49
Figura 19 – Layout do embutimento dos CP's para o ensaio metalográfico	52
Figura 20 – Região de borda submetida ao ensaio de rugosidade superficial	54
Figura 21 – Imagens da região de borda dos CP's processados com <i>laser</i> CO ₂	58
Figura 22 – Imagens da região de borda do CP's processados a plasma	58
Figura 23 – MEV/FEG dos CP's com processamento a plasma utilizando pré-tratamento a base de nanocerâmico	59
Figura 24 – MEV/FEG dos CP's com processamento a <i>laser</i> CO ₂ utilizando pré-tratamento a base de nanocerâmico	60
Figura 25 – Análise de EDS da superfície dos corpos de prova cortados pelo processo de <i>laser</i> CO ₂	61
Figura 26 – Análise de EDS da superfície dos corpos de prova cortados pelo processo de plasma	61

Figura 27 – MEV/FEG das regiões de bordas com corte a plasma e revestidas com tecnologia <i>E-coat</i> Acrílico	63
Figura 28 – MEV/FEG das regiões de bordas com corte a <i>laser</i> CO ₂ e revestidas com tecnologia <i>E-coat</i> Acrílico	63
Figura 29 – MEV/FEG das regiões transversais com corte a plasma e revestidas com tecnologia <i>E-coat</i> Acrílico	65
Figura 30 – MEV/FEG das regiões transversais com corte a <i>laser</i> CO ₂ e revestidas .. com tecnologia <i>E-coat</i> Acrílico	65
Figura 31 – Região de núcleo do material base analisado. 500x de magnificação e Nital 5 %	66
Figura 32 – Metalografia das regiões processadas termicamente pelo corte a <i>laser</i> CO ₂	67
Figura 33 – Metalografia das regiões processadas termicamente pelo corte a plasma	68
Figura 34 – Região de amplificação da ZTA formada após o processamento a plasma	69
Figura 35 – Região de amplificação da ZTA formada após o processamento a <i>laser</i> CO ₂	69
Figura 36 – Regiões da ZTA submetidas ao ensaio de microdureza	70
Figura 37 – Relação entre dureza versus distância da borda para a ZTA formada após o processamento a plasma	72
Figura 38 – Relação entre dureza versus distância da borda para a ZTA formada após o processamento a <i>laser</i> CO ₂	72
Figura 39 – Ensaio de aderência nos CP's revestidos e processados a <i>laser</i> CO ₂ ..	75
Figura 40 – Ensaio de aderência nos CP's revestidos e processados a plasma	75
Figura 41 – Regiões de bordas e arestas da superfície revestida após o corte a plasma	80
Figura 42 – Regiões de bordas e arestas da superfície revestida após o corte a <i>laser</i> CO ₂	80
Figura 43 – Aspecto da incisão dos CP's (corte térmico a plasma) depois do deslocamento para verificação da migração subcutânea	82
Figura 44 – Aspecto da incisão dos CP's (corte térmico a <i>laser</i> CO ₂) depois do deslocamento para verificação da migração subcutânea	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comportamento do revestimento depositado nos CP's ao longo da exposição ao ensaio de névoa salina.....	76
Quadro 2 – Resumo dos resultados obtidos através das análises e dos ensaios realizados.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do aço carbono utilizado como CP	42
Tabela 2 – Especificação dos parâmetros	50
Tabela 3 – Grau de aderência de acordo com a norma NBR 11003.....	55
Tabela 4 – Valores de microdureza encontrados na ZTA pelo corte a plasma	71
Tabela 5 – Valores de microdureza encontrados na ZTA pelo corte a <i>laser</i> CO ₂	71
Tabela 6 – Valores de rugosidade encontrados na superfície de aço carbono processada a plasma (Ra)	73
Tabela 7 – Valores de rugosidade encontrados na superfície de aço carbono processada a <i>laser</i> CO ₂ (Ra).....	74

LISTA DE SIGLAS, TERMOS E ABREVIações

HCl	Ácido clorídrico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
H ₂ O	Água
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
As	Arsênio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C	Carbono
NaCl	Cloreto de sódio
CP	Corpo de prova
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CO ₂	Dióxido de carbono
S	Enxofre
F	Flúor
P	Fósforo
Ga	Gálio
H ₂	Gás hidrogênio
N ₂	Gás nitrogênio
He	Hélio
KOH	Hidróxido de Potássio
NaOH	Hidróxido de Sódio
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Mn	Manganês
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mo	Molibdênio
Nd:YAG	<i>Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet</i>
Ni	Níquel
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
(C ₄ H ₉) ₂ .SnO	Óxido de dibutilestanho
Fe ₂ O ₃ . xH ₂ O	Óxido de ferro hidratado
PEP	Pintura e-coat de peças

pH	Potencial hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
Se	Selênio
Si	Silício
VOC	<i>Volatile Organic Compunds</i>
Zn	Zinco
Zr	Zircônio
ZTA	Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampères
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
°C	Graus Celsius
L	Litro
m	Metro
µm	Micrometro
µS	Microsiemens
mm	Milímetro
mm ²	Milímetro quadrado
min	Minuto
nm	Nanometro
%	Porcentagem
kgf	Quilograma-força
HRB	Rockwell Hardness B
R _a	Rugosidade aritmética ou média
s	Segundo
HV	Vickers Hardness
V	Volt
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL.....	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	MICROESTRUTURA DE UM AÇO CARBONO.....	20
2.2	CORTES TÉRMICOS INDUSTRIAIS	21
2.2.1	Zona Termicamente Afetada (ZTA)	23
2.2.2	Princípio do processo a Laser	24
2.2.2.1	Corte a <i>laser</i> CO ₂	25
2.2.3	Princípio do processo em plasma	26
2.2.3.1	Corte em plasma	26
2.3	CORROSÃO.....	27
2.3.1	Definição	27
2.3.2	Corrosão no aço carbono	28
2.3.3	Mecanismos de proteção anticorrosiva	29
2.4	PROCESSOS DE PRÉ-TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS	30
2.4.1	Desengraxe alcalino	30
2.4.2	Pré-tratamento químico e mecânico	31
2.4.2.1	Jateamento abrasivo	31
2.4.2.2	Decapagem ácida.....	32
2.4.3	Processo de fosfatização versus processo nanocerâmico	33
2.4.3.1	Fosfatização	33
2.4.3.2	Nanocerâmico	33
2.4.3.2.1	<i>Desenvolvimento da nanotecnologia</i>	33
2.4.3.2.2	<i>Nanotecnologia aplicada ao tratamento de superfícies no âmbito industrial</i>	33
2.4.4	Enxáguas	35
2.5	REVESTIMENTOS ORGÂNICOS.....	35
2.5.1	Pintura por eletrodeposição	36
2.5.1.1	Definição	36

2.5.1.2	Composição das tintas	38
2.5.1.2.1	<i>Resina</i>	38
2.5.1.2.1.1	<i>Resina Acrílica</i>	39
2.5.1.2.2	<i>Pigmentos</i>	40
2.5.1.2.3	<i>Aditivos</i>	40
2.5.1.2.4	<i>Solventes</i>	40
2.6	PROCESSOS DE ESTUFAGEM E CURA DO FILME DE TINTA	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	MATERIAIS	42
3.1.1	Processamento térmico de corte a <i>laser</i> CO₂	42
3.1.2	Processamento térmico de corte a plasma	44
3.1.3	Processo de pré-tratamento e revestimento orgânico	45
3.1.3.1	Desengraxe alcalino	46
3.1.3.2	Enxágues I e II.....	47
3.1.3.3	Pré-tratamento químico por decapagem ácida.....	47
3.1.3.4	Neutralização das peças	47
3.1.3.5	Enxágues III e IV	47
3.1.3.6	Pré-tratamento em nanotecnologia por produto cerâmico.....	48
3.1.3.7	Enxágues V e VI.....	48
3.1.3.8	Revestimento orgânico por tecnologia em <i>E-coat</i> Acrílico.....	48
3.1.3.9	Ultrafiltrados e enxágue com água deionizada.....	50
3.1.3.10	Cura das peças pintadas	50
3.2	MÉTODOS	51
3.2.1	Microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV/FEG) e espectroscopia por dispersão em energia (EDS)	51
3.2.2	Ensaio de metalografia	52
3.2.3	Ensaio de microdureza de Vickers	53
3.2.4	Ensaio de rugosidade superficial	53
3.2.5	Ensaio de Aderência pelo método em grade	54
3.2.6	Ensaio de névoa salina (<i>Salt Spray</i>)	55
3.2.7	Migração subcutânea	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57

4.1	ANÁLISES DOS CORPOS DE PROVA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA POR EMISSÃO DE CAMPO (MEV/FEG) E ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO EM ENERGIA (EDS).....	57
4.1.1	Análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV/FEG) para os corpos de prova processados termicamente a <i>laser</i> CO₂ e a plasma	57
4.1.2	Análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV/FEG) e espectroscopia por dispersão em energia (EDS) para os corpos de prova processados termicamente a <i>laser</i> CO₂ e a plasma com deposição de pré-tratamento químico.....	59
4.1.3	Análises no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/FEG) para os corpos de prova processados termicamente a <i>laser</i> CO₂ e a plasma revestidos organicamente por tecnologia <i>E-coat</i> Acrílico	62
4.1.4	Análises no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/FEG) para a seção transversal dos corpos de prova processados termicamente a <i>laser</i> CO₂ e a plasma revestidos organicamente por tecnologia <i>E-coat</i> Acrílico	64
4.2	ENSAIO DE METALOGRAFIA DOS CORPOS DE PROVA PROCESSADOS TERMICAMENTE	66
4.3	ENSAIO DE MICRODUREZA DE VICKERS NA REGIÃO DE ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)	70
4.4	ENSAIO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA PROCESSADOS TERMICAMENTE	73
4.5	ENSAIO DE ADERÊNCIA PELO MÉTODO EM GRADE DO REVESTIMENTO ORGÂNICO APLICADO NOS CORPOS DE PROVA	75
4.6	ENSAIO DE NÉVOA SALINA (<i>SALT SPRAY</i>) NOS CORPOS DE PROVA REVESTIDOS ORGANICAMENTE	76
4.7	ENSAIO DE MIGRAÇÃO SUBCUTÂNEA NOS CORPOS DE PROVA REVESTIDOS ORGANICAMENTE	81
4.8	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	83

5	CONCLUSÃO.....	86
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

Em diversos segmentos do setor industrial, por exemplo, o automotivo, materiais metálicos como o aço carbono são submetidos a processos de cortes térmicos que, dependendo dos parâmetros de corte, podem influenciar diretamente na qualidade da superfície, principalmente se tratando de cantos vivos e arestas (bordas). Considerados como os processamentos térmicos de corte mais utilizados dentro das indústrias atualmente, o *laser* CO₂ e o plasma têm influência direta nos materiais metálicos, podendo provocar transformações externas e internas, muitas vezes indesejadas, nas estruturas do aço.

As regiões próximas aos cortes térmicos são consideradas críticas, uma vez que o processo de corrosão se inicia, preferencialmente, nessas áreas de bordas e arestas, progredindo posteriormente para o centro da superfície metálica. A corrosão é um processo de degradação química e eletroquímica de materiais que causa alerta nas indústrias mundiais. Um estudo da empresa norte-americana CCT Technologies avaliou que cerca de 4 % do PIB do Brasil é consumido por gastos gerados nos processos de corrosão, o que seria aproximadamente R\$ 292 bilhões no ano de 2019 em manutenções, retrabalhos, paralisações, contaminações e perda de eficiência produtiva (FATOR BRASIL, 2016).

Como alternativa à proteção de materiais metálicos contra processos corrosivos surgem os revestimentos orgânicos, que tem como base um processo de pintura por cataforese ou popularmente conhecido como *E-coat*. Dessa forma, muito mais do que para fins estéticos, os revestimentos orgânicos são utilizados por serem as melhores opções de proteção anticorrosiva das superfícies metálicas, como o aço carbono. Isto porque, esse processo de pintura abrange inúmeras vantagens além da proteção contra agentes corrosivos, a saber: isenção de metais pesados, baixo VOC (compostos orgânicos voláteis), economia de energia, automatização da linha, aumento da produtividade e formação de películas protetoras nas superfícies metálicas, principalmente em áreas onde há difícil acesso.

A busca incessante por sistemas que visam sustentabilidade, baixo custo, inovação tecnológica e menor tempo operacional faz com que as indústrias automotivas optem por modernização fabril e incremento na capacidade de produção. Diferentemente dos processos de pré-tratamento e *E-coat* convencionais, onde há utilização de jateamento por granalha e fosfatização, seguidos de um banho

por imersão em um tanque de tinta a base de resina epóxi, surge uma nova tecnologia de pintura por eletrodeposição catódica: o *E-coat* Acrílico. Aliando um pré-tratamento com decapagem ácida e nanotecnologia, além de um banho de tinta por imersão utilizando resina acrílica, esse método trás consigo menos impacto ambiental, menor custo energético e de processo, além de uma pintura por acabamento.

Neste contexto, este trabalho tem como propósito avaliar os cortes a *laser* CO₂ e a plasma nas regiões de borda superficial em um aço carbono com e sem pré-tratamento a base de nanocerâmico e revestimento orgânico por tecnologia em *E-coat* Acrílico.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as propriedades mecânicas, físico-químicas e microscópicas das regiões de borda superficial em um aço carbono após processamentos térmicos de corte a *laser* CO₂ e plasma, com e sem pré-tratamento químico a base de nanocerâmico e revestimento orgânico por tecnologia de *E-coat* Acrílico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Investigar a condição dos cortes térmicos a *laser* CO₂ e a plasma, além do revestimento orgânico por *E-coat* Acrílico de um aço carbono nas regiões superficiais de borda. Para alcançar o objetivo geral desse trabalho, pretende-se realizar as seguintes etapas:

- a) analisar por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo a região afetada pelo processo de corte a *laser* CO₂ e plasma, com a finalidade de observar ocorrência de trincas e fissuras, além de avaliar a influência dos cortes no filme de revestimento orgânico nessas regiões processadas termicamente;
- b) avaliar a microestrutura do material metálico após os processamentos térmicos a *laser* CO₂ e plasma por meio de ensaios metalográficos;
- c) investigar a influência dos cortes térmicos a *laser* CO₂ e a plasma na dureza e na rugosidade superficial de um aço carbono;
- d) comparar o desempenho à corrosão das superfícies metálicas pintadas quando submetidas aos dois tipos de corte, utilizando ensaios físico-químicos e determinar a morfologia da corrosão;
- e) avaliar a aderência do revestimento orgânico (*E-coat* Acrílico) nas regiões de corte a *laser* CO₂ e plasma (bordas) e o desempenho do pré-tratamento na superfície metálica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MICROESTRUTURA DE UM AÇO CARBONO

O aço carbono é constituído basicamente de ferro (Fe) e até 2,1 % em massa de carbono (C) teórico, além de possíveis impurezas como enxofre (S), fósforo (P) e manganês (Mn). A microestrutura deste material metálico é caracterizada basicamente pelos tipos de fases presentes e a maneira o qual elas estão arranjadas ou distribuídas (ROBERGE, 1999; STEIN, 2019; TELLES, 1976).

Um aço carbono pode ser classificado de acordo com o teor de carbono presente em sua microestrutura. Isto é, para teores inferiores a 0,76% em peso de carbono, o aço é caracterizado como hipoeutetóide. Para valores em torno de 0,76% é denominado aço eutetóide e para valores superiores a 0,76% o aço é classificado como hipereutetóide. A microestrutura dos aços hipoeutetóides é composta basicamente por ferrita e perlita. Com relação aos aços eutetóides predomina-se a presença de perlita e quando refere-se aos aços hipereutetóides, a perlita e a cementita constituem a microestrutura do material. A Figura 1 ilustra a estrutura de um aço hipoeutetóide (CALLISTER JR, 2016; STEIN, 2019).

Figura 1 – Microestrutura de um aço hipoeutetóide constituído por ferrita e perlita

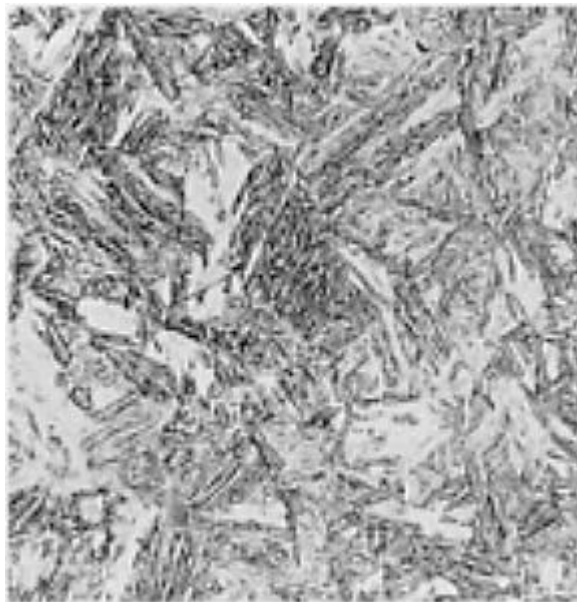


Fonte: Adaptado de Metals of Handbook (1985).

As transformações de fase que podem ocorrer em um aço carbono dependem basicamente dos processamentos térmicos os quais são submetidos e do teor de carbono presente na microestrutura do material. De acordo com Eroglu e Aksoy (2000), um aço carbono que possui uma estrutura básica de ferrita-perlita, tende a transformar-se em austenita durante uma alta taxa de aquecimento do material metálico e, posterior, originar microestruturas denominadas de martensitas quando ocorre um rápido resfriamento a temperatura ambiente da região processada (CALLISTER JR, 2016)

A microestrutura composta pela martensita nos aços-carbono também depende do teor de carbono dos aços. Se o aço contiver teores inferiores a 0,6% C, a martensita é formada por agulhas ou ripas. Entretanto, quando o teor em carbono aumenta para valores superiores a 0,6% C, começa a formar-se outro tipo de martensita, chamada martensita em placas. A Figura 2 ilustra a estrutura de uma martensita em forma de agulhas em um aço hipoeutetóide (CALLISTER JR, 2016; STEIN, 2019).

Figura 2 – Estrutura de uma martensita na forma de agulhas



Fonte: Adaptado de Metals of Handbook (1985).

2.2 CORTES TÉRMICOS INDUSTRIAIS

Os cortes térmicos são processos de manufatura que estão diretamente relacionados a uma fonte de calor concentrada e direcionada na superfície de uma

peça. Esse calor é transferido localmente para a peça através de condução, convecção ou absorção radioativa até o material atingir um estado (líquido ou vapor) que o torna facilmente removível com auxílio de um fluxo coaxial de pressão através de um gás de assistência. O corte é realizado de acordo com o dispositivo disponível, seja queimando, derretendo ou sublimando a superfície. Dessa forma, as várias metodologias aplicadas para fundir o material é o que difere um corte térmico do outro (CARISTAN, 2004; KRAJCARZ, 2014).

Dentre os muitos processos de cortes térmicos presentes na indústria, atualmente destacam-se o *laser* (CO₂, fibra, gás de excímeros, Nd:YAG e diodos), oxicorte e plasma. O *laser* CO₂ e o plasma têm ganhado força devido as suas melhores precisões de corte, velocidade, flexibilidade e produtividade (CONRADO, 2014; OLSEN, 1994).

Os processos térmicos podem causar deficiências no material, como alto estresse térmico, devido ao elevado aquecimento localizado da peça, levando a destruição e degradação de suas estruturas termicamente sensíveis. Dessa forma, quando o material é submetido a uma alta intensidade de calor, por um determinado intervalo de tempo, pode-se ter mudanças na microestrutura do material, influenciando na integridade superficial e nas propriedades do mesmo (CONRADO, 2014; LAURO *et al.*, 2014; SHUOCKER, 1989).

Os ambientes industriais são geralmente considerados nocivos; quando submetidos a altas temperaturas, como é o caso dos processamentos térmicos, os metais ficam mais suscetíveis a reagir diretamente com a atmosfera, aumentando a possibilidade de ocorrer oxidação. Isso deve-se ao fato de o metal quente estar exposto ao ar e a umidade relativa, podendo gerar escamas grossas de óxidos que aderem à superfície do mesmo, prejudicando suas regiões de bordas e arestas. (CARISTAN, 2014; OLIVEIRA, 2012; ROBERGE, 1999).

Da mesma forma, ao cortar um metal aumenta-se a reatividade do mesmo com gases presentes na atmosfera, principalmente o oxigênio. Essa reação química exotérmica tem consequências diretas no acabamento da borda e na integridade superficial do material metálico, podendo gerar rebarbas e escórias, além de dar início aos processos corrosivos. A partir disto, parâmetros como velocidade ou avanço, potência, corrente e gás de assistência devem ser controlados e avaliados a fim de amenizar, retardar ou negatizar essas irregularidades (CARISTAN, 2004; KRAJCARZ, 2014; ROBERGE, 1999).

Quando um processo térmico é realizado no material metálico com uma velocidade muito alta, pode-se ter um corte incompleto e geração de rebarbas, cuja característica é de um material sólido, aderente e irregular que se forma nas bordas do material. Entretanto, se o processo acontecer a uma velocidade muito baixa, maior é o contato da superfície metálica com o calor gerado pelo corte e pode-se queimar excessivamente a borda, afetando de forma negativa a qualidade do processo (CONRADO, 2014).

Outra maneira de ilustrar a influência dos cortes térmicos é através das tensões residuais que o material pode sofrer. Essas tensões sempre ocorrem quando certa área sofre alguma interferência por forças externas e internas, geralmente causadas por processos envolvendo cargas térmicas. Tais tensões residuais podem causar a formação de trincas e fraturas, bem como interferir negativamente nas propriedades mecânicas dos materiais (DAVIM, 2010).

Á nível de engenharia, a qualidade de borda de um material processado pode impactar na fabricação e montagem de componentes. Além disso, a segurança dos operadores é posta em risco ao manusear peças com arestas e bordas que possuam mau acabamento, isto é, com excesso de rebarbas e pontas afiadas (CARISTAN, 2014).

Por mais que tenha-se elevado controle e inspeção sobre os processos de cortes térmicos, deve-se levar em consideração que existem efeitos colaterais associados a esse sistema metalúrgico, uma vez que envolve um ciclo intenso de aquecimento e resfriamento. Dessa forma, os materiais submetidos a esses processamentos são acometidos de maneira que forma-se uma zona termicamente afetada (ZTA) na região próxima a linha de corte, tendenciando a influenciar nas propriedades do material (POWELL, 1998).

2.2.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

A ZTA é a região do material que não foi derretida, cuja microestrutura e propriedades são alteradas pelo calor. Cheng *et al.* (2004) realizou um estudo para a verificação da microestrutura de um aço baixo carbono após processamentos térmicos a *laser* e observou que a ZTA formada era composta por martensita, enquanto que o material base não afetado pelo corte possuía ferrita e perlita na sua microestrutura. Esta transformação de fase ocorrida deve-se ao fato do elevado

gradiente térmico proporcionado pelos cortes na região (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008)

O ciclo térmico intenso de aquecimento e resfriamento provocado pelos cortes gera uma região de elevada dureza, porém quebradiça. Isto é, a zona afetada pode danificar a ponto de gerar microtrincas ao longo das bordas do material e influenciar no desempenho do mesmo; dessa forma, a ZTA pode estar ligada muitas vezes a efeitos indesejáveis. Estudos relatam que o aumento da dureza na região de ZTA é devido à formação da martensita que se dá próximo à área de processamento térmico que o material foi submetido (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008; POWELL, 1998).

2.2.2 Princípio do processo a Laser

Essa tecnologia é utilizada na indústria quando refere-se à processos de soldagem, tratamentos térmicos e cortes de metais. De acordo com a sigla em inglês “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” *laser* significa “amplificação da luz por emissão estimulada da radiação” (CONRADO, 2014).

O conceito de raio *laser* foi postulado, primeiramente, por Albert Einstein em 1917, especificando que a luz em determinada frequência poderia estimular elétrons, em situações apropriadas, gerando mais luz na mesma frequência. Posteriormente, Bohr e Planck permitiram formular a teoria da mecânica quântica de Einstein em seus trabalhos. Só em 1960 o primeiro tubo de *laser* foi construído por Theodore Harold Mainman e, a partir daí, iniciaram-se os primeiros trabalhos experimentais sobre o processo a *laser* (CONRADO, 2014; POWELL, 1998).

De acordo com Caristan (2004) o corte de um material através do processo a *laser* está relacionado com a transferência de calor absorvida pela peça de trabalho. Ou seja, a radiação *laser* que atinge uma superfície é parcialmente absorvida e parcialmente refletida. Segundo Dahotre e Harimkar (2008), os processos de corte a *laser* são determinados e direcionados de acordo com as características de absorção da luz do material que se deseja trabalhar. Ademais, Powell (1998) ressalta que a eficiência do corte a *laser* depende da química geral do material e não da sua estrutura cristalina.

De acordo com Caristan (2004), os aços com teor de carbono próximo ou superiores a 0,40 % tendem a serem propensos a microfissuras nas bordas cortadas

pelos processos a *laser*, enquanto que materiais com porcentagem inferior a 0,15 % produzem bordas praticamente sem falhas ou rachaduras.

2.2.2.1 Corte a *laser* CO₂

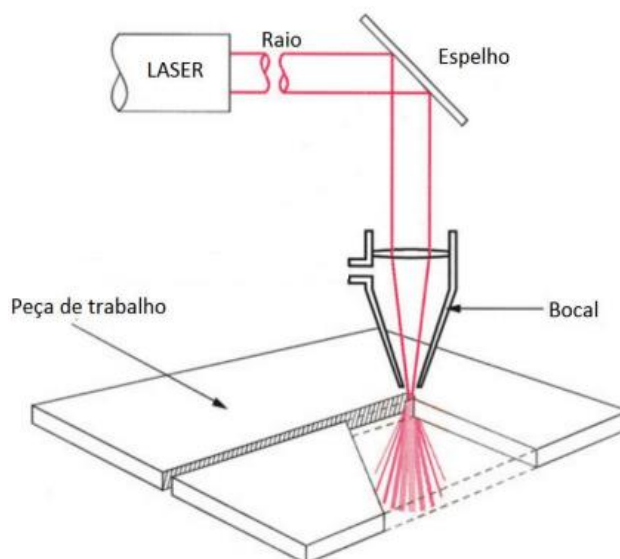
Basicamente o corte a *laser* CO₂ é um feixe de elétrons composto por uma mistura de baixa pressão de nitrogênio (N₂), hélio (He) e dióxido de carbono (CO₂). O processo se inicia quando as moléculas de nitrogênio passam por uma excitação vibracional através de descargas elétricas. Essa excitação está diretamente ligada com os níveis vibracionais do CO₂, que, através de uma troca energética com as moléculas de N₂, também se excitam e passam a emitir radiação infravermelha. O hélio está ligado com a potência de saída do feixe de radiação emitido pelo CO₂, que pode ser pulsada ou contínua, e com a dissipação do calor gerado no processo. Ademais, a adição de nitrogênio e hélio melhora a eficiência do feixe de radiação em até 25 % (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008; POWELL, 1998).

A molécula de CO₂ é triatômica e composta por dois átomos de oxigênio ligados a um átomo de carbono. O processo de descarga e emissão de radiação do *laser* CO₂ envolve bombardear as moléculas de dióxido de carbono em velocidades altas projetando um feixe de luz concentrado de elétrons excitados de intensa energia na forma de calor (CONRADO, 2014; POWELL, 1998).

O *laser* CO₂ é emitido através de espelhos e lentes gerando radiações com comprimentos de onda de até 10,6 µm (devido às transições entre níveis rotacionais-vibracionais da molécula de CO₂) e potências de 10 W/mm². Os espelhos podem ser de silício (Si) ou de molibdênio (Mo), já as lentes, dependendo da aplicação e da potência do feixe de *laser*, podem ser constituídas de zinco (Zn), selênio (Se), gálio (Ga) ou arsênio (As).

A velocidade ou avanço de corte, potência e pressão dos gases auxiliares são os parâmetros mais comumente controlados durante os processos de corte a *laser* CO₂, pois influenciam diretamente na qualidade peça. Esse processamento é escolhido na maioria das vezes para cortar chapas com espessura de até 20 mm, podendo estas ser de material metálico, polimérico ou até mesmo madeira. A Figura 3 ilustra simplificada o processo de corte a *laser* CO₂ (CONRADO, 2014; DIAS, 2015; POWELL, 1998).

Figura 3 – Ilustração do feixe de raio *laser* CO₂



Fonte: Dias (2015).

2.2.3 Princípio do processo em plasma

Os primeiros três estados da matéria são sólido, líquido e gasoso. Ao aplicar certa energia calorífica, resulta-se na troca de estado e a ionização de gases, gerando elétrons livres e íons positivos que têm capacidade de transportar corrente elétrica. O plasma nada mais é que um fluido composto de moléculas gasosas, íons e elétrons, sendo considerado o quarto estado da matéria (URTADO, 20--?).

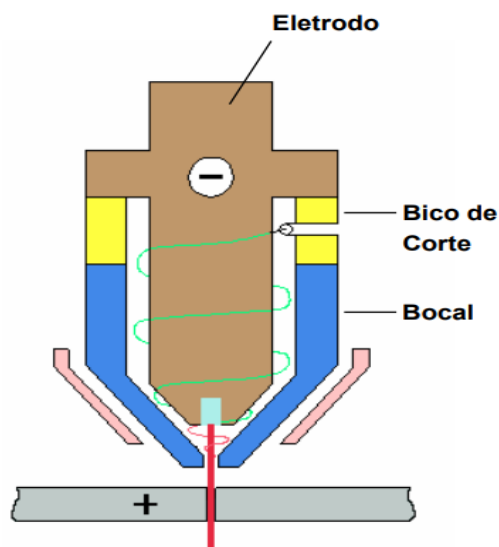
2.2.3.1 Corte em plasma

É uma tecnologia criada na década de 50 que utiliza um gás ionizado por meio de uma corrente elétrica em alta temperatura, possuindo capacidade de cortar qualquer material metálico condutor, como aços e metais não ferrosos (alumínio). O gás de trabalho mais utilizado é o ar, mas também pode-se optar, em dispositivos com elevada potência, argônio (Ar), nitrogênio (N₂), hidrogênio (H₂) ou dióxido de carbono (CO₂) (KRAJCARZ, 2014).

Parte do gás transforma-se em plasma e derrete a superfície de trabalho devido à alta intensidade de calor transferida, além de remover o material fundido para fora da zona de corte. A energia que derrete o material é fornecida pela formação de um arco voltaico (elétrico) de carga negativa entre a tocha de plasma e

o material que está sendo processado. A Figura 4 ilustra o processo de corte em plasma (PIMENTA, 2013).

Figura 4 – Processamento térmico de corte em plasma



Fonte: Urtado (20--?.).

Obtendo uma superfície com bom acabamento e elevada velocidade, o corte a plasma geralmente é utilizado para processar chapas de geometrias mais simples e espessura na faixa de 3 mm a 75 mm. Esse corte se popularizou devido à substituição do oxicorte e do *laser* em metais não ferrosos, isso porque o plasma tem disponibilidade de cortar qualquer material condutor (PIMENTA, 2013).

As principais variáveis do corte em plasma que devem ser controladas rigorosamente para garantir qualidade e produtividade do mesmo são: os gases utilizados, velocidade (avanço) de corte, corrente e tensão do arco voltaico, além da geometria da peça a ser processada. Esses parâmetros podem ter influência direta na integridade superficial do material metálico, como formação de ZTA, endurecimento e rebarbas (PIMENTA, 2013).

2.3 CORROSÃO

2.3.1 Definição

A corrosão é um processo espontâneo de deterioração de materiais, geralmente metálicos, transformando-os de modo que deixem de satisfazer adequadamente os fins para os quais são destinados. Esse processo pode ser uma degradação química ou eletroquímica associada ao ambiente no qual o metal está exposto, podendo, ainda, aliar-se a esforços mecânicos que tendem a oxidar o mesmo (GENTIL, 2011).

Afetando em grande parte os materiais metálicos, calcula-se que os processos corrosivos degradam um quarto da produção de aço no mundo, o que corresponde a 5 toneladas por segundo. Grande parcela dos metais e ligas não são termodinamicamente estáveis quando em contato com a atmosfera, dessa forma estima-se que esses materiais corroem de maneira espontânea (LANDOLT, 2007).

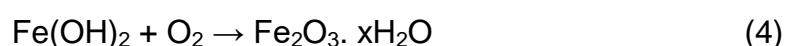
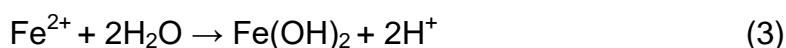
Pode-se associar os processos de corrosão com as reações de oxidação-redução que ocorrem na interface entre o metal e o meio. Quando os metais são oxidados, eles cedem elétrons, agindo, portanto, como agentes redutores. Dessa forma, qualquer substância que tenha função oxidante no meio o qual o metal está exposto, irá receber esses elétrons e a reação de oxidação irá ocorrer. A reação apresentada na reação da Equação (1) ilustra o processo de oxidação em metais (GENTIL, 2011; SANTO, 20--?).



Onde: ne é o número de elétrons cedido por um metal qualquer que atua como um agente redutor.

2.3.2 Corrosão no aço carbono

Por ser considerado um metal que possui uma condição termodinamicamente instável e aliado a um ambiente industrial em circunstâncias propensas a corrosão (presença de umidade e poluentes químicos), o contato direto do aço carbono com o meio corrosivo ataca-o de forma generalizada, formando camadas de óxidos (ferrugem) na sua superfície e deteriorando-o. As reações químicas apresentadas nas reações (2), (3) e (4) exemplificam a oxidação em metais quando trata-se do aço carbono (FAZENDA, 2005; ROBERGE, 1999; TELLES, 1976)).



Observa-se pelas reações acima que a água (H₂O) e o oxigênio (O₂) são compostos predominantes quando trata-se de corrosão em metais. A umidade relativa do ar é suficiente para proporcionar a quantidade de água necessária ao processo corrosivo, ao passo que o ar atmosférico, fornece quantidade suficiente para a contribuição de oxigênio (FAZENDA, 2005).

A formação do filme do produto de oxidação no aço carbono (Fe₂O₃ · xH₂O) é descontínua, permeável e com tendência a um crescimento indefinido até que se degrade completamente o material metálico. Dessa forma, sob o ponto de vista industrial, existe a necessidade primordial de proteção desses materiais metálicos contra os processos de corrosão (GENTIL, 2011).

2.3.3 Mecanismos de proteção anticorrosiva

Existem diversos métodos de proteção anticorrosiva, sejam eles metálicos ou não metálicos, orgânicos ou não orgânicos, poliméricos e cerâmicos. A galvanoplastia ou eletrodeposição metálica, por exemplo, utiliza metais nobres na proteção da superfície, como é o caso da niquelagem. Outro mecanismo de escudo a corrosão é a proteção catódica que parte de um metal de sacrifício para oxidar no lugar da superfície que se quer proteger (STEIN *et al.*, 2017).

Um método de proteção anticorrosiva que tem se destacado nas indústrias mundiais são os revestimentos orgânicos, como é o caso das tintas. Esse método tem por objetivo atender a alta demanda e a minimização de custos devido aos processos de corrosão que os materiais sofrem quando expostos a certos meios. Segundo Leidheiser (1982), revestimentos orgânicos atuam como uma barreira para reagentes nocivos ao substrato metálico, além de servirem como uma espécie de depósito para inibidores de corrosão (FONSECA *et al.*, 2009; STEIN *et al.*, 2017).

Para suportar a exposição prolongada a ambientes nocivos e operações severas, os aços necessitam de revestimentos orgânicos que possuam elevadas forças de adesão interfacial. Entretanto, antes de aplicar uma camada de revestimento orgânico em algum material, deve-se atentar-se as condições

superficiais do mesmo. Dessa forma, torna-se necessário realizar um pré-tratamento para alcançar uma superfície em condições que atenda os requisitos dos processos subsequentes, pois a grande maioria dos defeitos que ocorrem nos revestimentos é devido a falhas e interferências nos processos de pré-tratamento das superfícies (BEM, 2008; HUGHES, 2016).

2.4 PROCESSOS DE PRÉ-TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS

As condições prévias das superfícies metálicas são fatores determinantes para obter-se um revestimento uniforme e coeso. Dessa forma, a limpeza de um substrato deve ser feita adequadamente para que se remova qualquer tipo de contaminantes, como óleos, lubrificantes, ceras, carepas oxidadas (ferrugem), adesivos e demais sujidades responsáveis por prejudicar o desempenho dos revestimentos orgânicos. Ademais, as etapas do pré-tratamento são responsáveis por proporcionar um perfil de rugosidade na superfície metálica que seja capaz de oferecer boa aderência para o revestimento a ser aplicado posteriormente (BRUNO, 2018; UTECH, 2002).

Uma adesão adequada garante proteção contra a corrosão, impedindo a penetração de espécies nocivas ao substrato. Caso existam contaminantes na superfície metálica ou falhas nas etapas de preparação no pré-tratamento das superfícies, a adesão será prejudicada, não havendo, portanto, proteção completa do aço (HUGHES *et al.*, 2016; WICKS JR *et al.*, 2007).

Arestas e cantos vivos (bordas) são áreas que permitem a retenção de alguns aceleradores de corrosão, como água e eletrólitos. Dessa forma, as condições prévias do substrato (superfície metálica) que irá receber o revestimento orgânico nessas regiões devem ser consideradas fatores importantes quando se tratam de falhas em processos de pintura industrial (GENTIL, 2011).

2.4.1 Desengraxe alcalino

No caso das industriais automotivas, a grande maioria das peças apresentam sujidades comuns após os processos de cortes, dobras e montagens nas estamparias, como óleos de proteção, poeiras e lubrificantes. Dessa forma, a primeira etapa de pré-tratamento químico geralmente é uma lavagem em banhos

alcalinos contendo hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) ou até mesmo lavagens com água para remover essas sujidades e limpar superficialmente o material. Essa etapa, também chamada de desengraxe químico, não é responsável por remover ferrugem e nem oxidações provenientes de processos corrosivos anteriores ao pré-tratamento (BEM, 2008; BRITO; CENZI, 2019; SCHWEITZER, 2006).

2.4.2 Pré-tratamento químico e mecânico

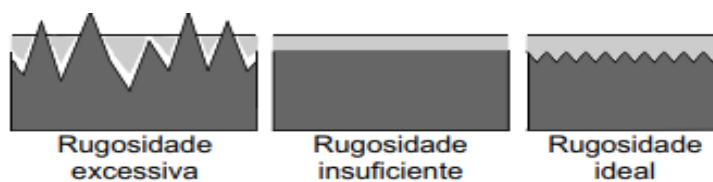
Muitos contaminantes presentes nas superfícies metálicas não são removíveis apenas nos processos de limpeza alcalina. É o caso de óxidos e carepas geralmente formados durante o processo de laminação do aço. Dessa forma, um pré-tratamento mecânico como jateamento ou um pré-tratamento químico como é o caso da decapagem ácida contribuem para a remoção dessas sujidades, além de fornecerem certa rugosidade à superfície para adesão futura do revestimento orgânico (BEM, 2008).

2.4.2.1 Jateamento abrasivo

É um processo onde, com auxílio de turbinas centrífugas ou ar comprimido, partículas abrasivas são lançadas a uma superfície metálica, a fim de eliminar quaisquer contaminante e garantir rugosidade à superfície, para que proporcione-se adesão adequada ao revestimento que posteriormente será aplicado. Dentre as partículas que podem ser utilizadas, destacam-se: areia, escória de cobre, granalha de ferro ou aço, óxidos de alumínio e esferas de vidro. Entretanto, por provocar problemas nas vias respiratórias e no pulmão devido ao pó que gera ao chocar-se com a superfície metálica, a areia foi proibida de ser utilizada nas cabines de pintura (FAZENDA, 2009).

A rugosidade medida na superfície metálica é chamada de perfil de rugosidade. Caso esse perfil esteja muito inferior, a adesão da tinta será prejudicada. Em contrapartida, um perfil muito elevado, pode-se levar a processos corrosivos. A Figura 5 ilustra a comparação entre os perfis de rugosidade que podem ser obtidos ao longo do processo de jateamento abrasivo (FAZENDA, 2009).

Figura 5 – Comparação entre os tipos de perfil de rugosidade

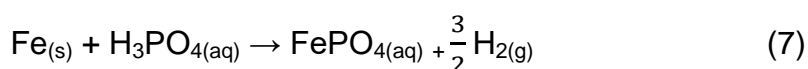
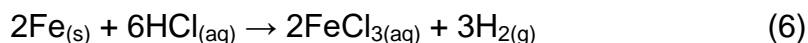
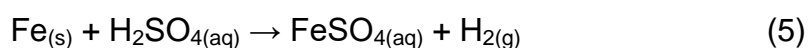


Fonte: Gnecco *et al.* (2003).

2.4.2.2 Decapagem ácida

Nos processos de decapagem ácida pode-se utilizar ácido clorídrico (HCl), ácido fosfórico (H₃PO₄) ou ácido sulfúrico (H₂SO₄). Normalmente opta-se por H₂SO₄, pois além de ser economicamente viável, é mais facilmente regenerado e vendido no mercado à concentrações mais elevadas. Além do ácido, no banho de decapagem também estão presentes inibidores de corrosão (aminas, aldeídos, proteínas ou mercaptanas) que visam barrar os ataques de agentes nocivos à superfície metálica (BASTOS, 2013; GENTIL, 2011; SANTOS, 20--?).

Durante o processo de decapagem ácida libera-se hidrogênio gasoso. Dessa forma, o processo deve ser feito com muito controle, removendo apenas a camada superficial não metálica, sem atacar o metal de base. Isso deve-se ao fato de que o hidrogênio molecular (H₂) liberado pode difundir-se nas regiões macroscópicas descontínuas do metal e, por pressão, formar bolhas que promovem fraturas e fissuras em alguns materiais metálicos. As reações químicas representadas pelas reações (5), (6) e (7) ilustram o processo químico que ocorre entre o material metálico e os ácidos comumente utilizados na decapagem ácida (SANTOS, 20--?).



Quando utilizam-se os processos de decapagem ácida, geralmente é necessário adicionar uma etapa de neutralização. Também denominado tanque de neutralizador, tem como função criar uma camada molecular de cargas negativas para neutralizar a acidez residual das peças após a passagem pelo tanque ácido. Dessa forma, evita-se a oxidação precoce das peças e contaminação ácida para os

tanques posteriores, principalmente para o tanque de tinta que deve ter todos os seus parâmetros controlados cautelosamente (BRITO; CENZI, 2019).

2.4.3 Processo de fosfatização versus processo nanocerâmico

2.4.3.1 Fosfatização

A próxima etapa que se procede no processo de pré-tratamento tem como principal objetivo garantir o desenvolvimento de ligações químicas na interface do metal que serão responsáveis pela aderência do revestimento. Esta etapa é comumente chamada de fosfatização, onde ocorre a formação de cristais que se ligam no metal, cobrindo a superfície e isolando eletrólitos nocivos da mesma. Aliado ao revestimento orgânico depositado, o processo de fosfatização garante elevada resistência anticorrosiva à superfície metálica (BEM, 2008; GNECCO *et al.*, 2003).

De outro modo, os fosfatos são grandes geradores de resíduos ambientais (lodo e borras em alta quantidade), além de possuírem metais pesados na sua composição, a saber: níquel (Ni), manganês (Mn), zinco (Zn), fósforo (P) e cromo (Cr). Dessa forma, as indústrias automotivas têm buscado por novas tecnologias a fim de substituir esse processo visando menos impactos ambientais e excelência na proteção anticorrosiva (ZARO, 2010).

2.4.3.2 Nanocerâmico

2.4.3.2.1 Desenvolvimento da nanotecnologia

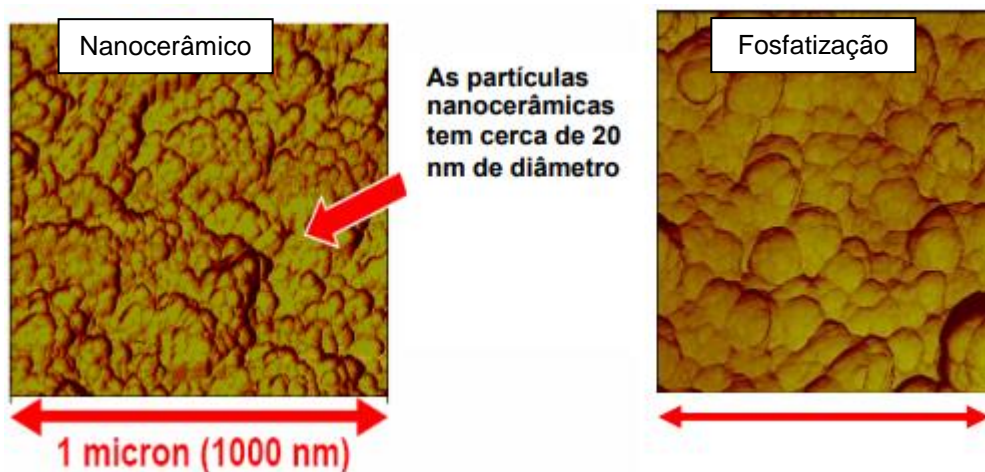
Utilizando como princípio básico a construção de estruturas a partir dos átomos, o termo *Nanotechnology* foi criado pelo professor Norio Taniguchi em 1974, em Tóquio. A definição de nanotecnologia se dá a todo desenvolvimento tecnológico que pertence a uma escala variando entre 0,1 a 100 nanômetros ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$). Dessa forma, relaciona-se a nanotecnologia a diversas áreas de pesquisa e produção (medicina, eletrônica, química, engenharia, física, computação) em escala atômica. (BENFICA *et al.*, 2016; BEZERRA *et al.*, 2017; BOSSARDI, 2007).

2.4.3.2.2 Nanotecnologia aplicada ao tratamento de superfícies no âmbito industrial

A indústria automotiva tem buscado por novas tecnologias referentes à sua linha de pré-tratamento para substituir a etapa de fosfatização comumente utilizada. Dessa forma, os processos de nanotecnologia, aplicando um filme composto de materiais cerâmicos isentos de metais pesados e redução na geração de efluentes, entram como alternativa ao processo de fosfatização (BENFICA *et al.*, 2016; BOSSARDI, 2007).

O revestimento nanocerâmico deposita na superfície metálica uma fina e uniforme camada de nanopartículas compostas por zircônio (Zr), flúor (F) e cobre (Cu) conferindo as propriedades importantes que irão influenciar diretamente no filme de tinta que será aplicado posteriormente: aderência, flexibilidade e resistência à corrosão. Essa fina camada cerâmica confere proteção à penetração de agentes nocivos à superfície metálica. A Figura 6 ilustra o comparativo entre as camadas obtidas no processo de nanocerâmico e fosfatização, através de um microscópio de força atômica (*Atomic Force Microscope*) (BOSSARDI, 2007; TESTA, 2005).

Figura 6 – Morfologia das camadas de nanocerâmico e fosfatização sobre o aço



Fonte: Adaptado de Testa (2005).

Diferentemente dos processos de fosfatização que utilizam temperaturas entre 50 e 55 °C, o processo nanocerâmico atua em temperatura ambiente. Ainda, com menor tempo de tratamento de superfície, menor manutenção do banho e redução significativa da geração de lodos e borras provenientes do processo, o tratamento nanocerâmico apresenta comportamento igual e, em alguns casos, superior à resistência à corrosão quando comparado com os processos de fosfatização convencionais (BOSSARDI, 2007; TESTA, 2005).

2.4.4 Enxágues

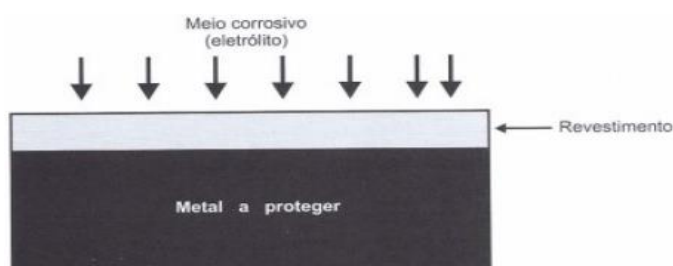
Os enxágues estão presentes ao longo de todo o pré-tratamento e têm como função básica remover o excesso de produtos químicos das peças para evitar arraste e contaminação ao longo do processo. Esses produtos químicos são derivados basicamente dos desengraxes, decapagem ácida, neutralização, fosfatização e nanocerâmico. Ademais, tem-se por cuidado e prevenção remover qualquer substância que possa entrar em contato com o banho de tinta após o pré-tratamento e prejudicar seu desempenho (BRITO; CENZI, 2019).

2.5 REVESTIMENTOS ORGÂNICOS

Os revestimentos orgânicos comumente utilizados são as tintas. Basicamente compostos por resinas, pigmentos, aditivos e solventes, esses protetores anticorrosivos são formulados de acordo com a sua necessidade de utilização e, sendo ineficientes, podem influenciar na deterioração da superfície do metal, iniciando processos corrosivos (FERREIRA, 2010).

Esse processo, através da formação de uma película semipermeável, aderida e uniforme sobre a superfície metálica, visa proteger o metal do meio corrosivo o qual está inserido. Dessa forma, cria-se uma “barreira” entre o meio corrosivo e o metal, protegendo o mesmo contra o acesso de agentes nocivos. A Figura 7 ilustra de forma simplificada o processo de deposição dos revestimentos orgânicos à superfície metálica. Entretanto, na prática, os revestimentos podem apresentar poros ou vazios que surgem após a deposição do filme na superfície, dessa forma, esses espaços permitem que o meio corrosivo entre em contato com a superfície (FONSECA *et al.*, 2009; STEIN *et al.*, 2017).

Figura 7 – Barreira de proteção dos revestimentos orgânicos a superfície metálica



Fonte: Nunes e Lobo (2007).

A adesão de um revestimento orgânico depende da composição do revestimento, da estrutura e natureza do substrato e do ambiente ao qual a superfície está exposta. A principal diferença entre os revestimentos orgânicos se dá na formulação das resinas e dos solventes utilizados no processo (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

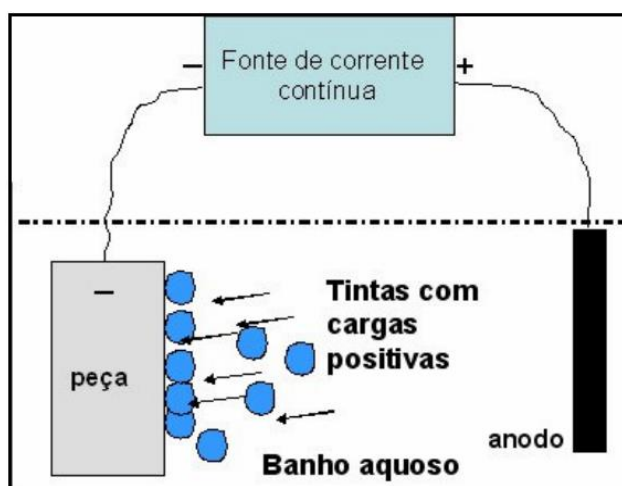
Existem vários tipos de aplicação de revestimentos em superfícies, os mais comuns são: pulverização por spray, pistola eletrostática e eletrodeposição. O método mais utilizado nas indústrias automotivas é o da eletrodeposição, principalmente processos catódicos, pois são considerados mais eficientes no quesito de proteção anticorrosiva, produtividade e sustentabilidade (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

2.5.1 Pintura por eletrodeposição

2.5.1.1 Definição

A pintura por eletrodeposição do tipo *E-coat* é um processo por imersão, onde, através da utilização de uma corrente elétrica contínua e uma diferença de potencial, deposita-se na superfície metálica um revestimento orgânico uniforme e coeso. A espessura do filme depositado é controlada pela voltagem aplicada diretamente ligada a um equipamento chamado retificador. O processo está ilustrado na Figura 8 (ELECTROCOATING, 2002; MONTAGNOLI, 2005).

Figura 8 – Processo de pintura por eletrodeposição

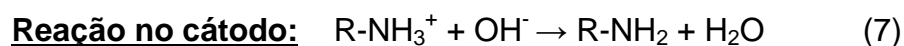


Fonte: Villes e Mainer (2005).

A peça a ser pintada é representada pelo polo negativo da reação e, através de uma fonte de corrente contínua, estabelece-se uma diferença de potencial de modo que as partículas orgânicas presentes na tinta sejam atraídas, depositando o filme na peça. Essa atração é possível, pois as macromoléculas presentes no revestimento orgânico podem ser protonizadas, ou seja, capazes de adquirirem carga positiva (MAINIER; VILLES, 2005).

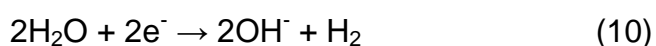
Enquanto as partículas do filme de revestimento se acumulam na superfície do material, a resistência do filme aumenta e essa deposição diminui. Ao passo que as regiões que não estão revestidas ainda, passarão a receber o filme, pois a sua resistividade é menor que nas superfícies já pintadas. Quando toda a superfície metálica estiver coberta com o filme de revestimento orgânico, isto é, eletricamente isolada, o processo de eletrodeposição se encerra (HUGHES, 2016; MOREIRA, 2015).

O retificador funciona como uma espécie de transportador de elétrons, movendo as cargas elétricas ao longo do processo. Neste contexto, as reações (7) e (8) ilustram a aplicação da corrente contínua na eletrodeposição do revestimento (PPG, 2016).



Durante o processo de eletrodeposição do filme, ocorrem quatro grandes fenômenos físico-químicos: eletrólise, eletroforese, eletrocoagulação e eletrosnose (JONES, 1979; PPG, 2016; VITOR *et al.*, 2018).

- I. **Eletrólise:** reação química de oxirredução dada uma aplicação de diferença de potencial elétrico (passagem de corrente elétrica). No processo de eletrólise da água as reações (9) e (10), respectivamente, ilustram a oxidação da água no ânodo, liberando gás oxigênio, e a redução da água no cátodo, liberando gás hidrogênio.



- II. **Eletroforese:** migração da partícula de tinta carregada eletricamente em direção ao objeto a ser pintado, sob a influência de um potencial elétrico;
- III. **Eletrocoagulação:** formação de um filme de tinta insolúvel em meio aquoso, através da troca de carga elétrica entre o íon e o polo contrário à sua carga;
- IV. **Eletrosmose:** O filme recém depositado na superfície é uma mistura de partículas de polímero e água. Dessa forma, para obter-se uma película densa e coesa, deve-se eliminar a água da mesma.

Como o revestimento da peça a ser pintada ocorre mediante a coagulação da pintura sobre a superfície, utiliza-se, através do processo de imersão convencional, uma corrente elétrica contínua que promove a reação de hidrólise da água, mudança de pH na superfície metálica e, por conseguinte, coagulação da pintura. Dessa forma, entende-se que este processo por eletrodeposição catódica só ocorre em superfícies que conduzam corrente elétrica (FAZENDA, 2005).

2.5.1.2 Composição das tintas

2.5.1.2.1 Resina

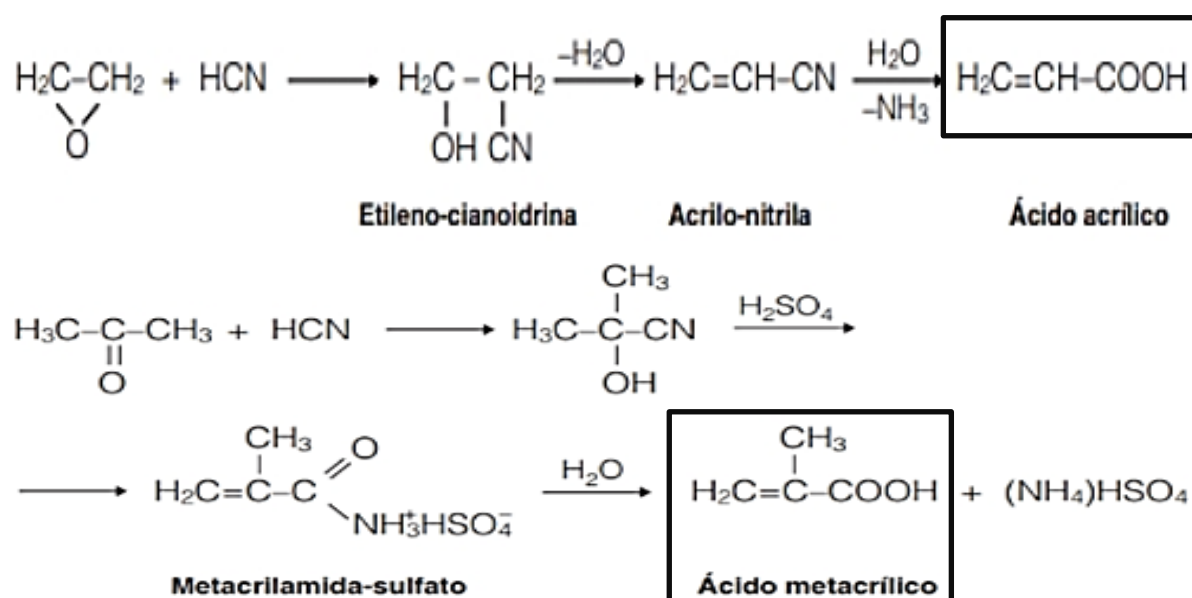
A resina é um polímero aquoso, não volátil, que parte do princípio de aglomerar as partículas dos pigmentos. Esse componente confere às tintas propriedades de resistência e durabilidade que podem ser formuladas de acordo com a necessidade do processo. As principais resinas utilizadas são: epoxídicas, acrílicas e híbridas (FAZENDA, 2009).

As resinas são geralmente divididas em classes de acordo com seu peso molecular. Os polímeros que normalmente não formarão filmes sólidos sem auxílio da adição de uma reação química são classificados como resinas de baixo peso molecular, por exemplo: resinas epóxis, alquídicas e fenólicas. Já os polímeros que formarão filmes sólidos adequados sem a necessidade de adição de reações químicas são classificados como resinas de alto peso molecular, a saber: acrílicas e PVA (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

2.5.1.2.1.1 Resina Acrílica

Resistência à decomposição pelos raios ultravioleta e compostos detergentes, controle de cor e desempenho elevado na aplicação de uma camada única, as resinas acrílicas são versáteis e solúveis em água. Os ácidos acrílico e metacrílico pertencentes ao grupo carboxila são responsáveis pela formação da base dessas resinas através de reações de esterificação (acrilatos e metacrilatos). A Figura 9 ilustra o processo de obtenção desses ácidos (FAZENDA, 2009; GENTIL, 2011).

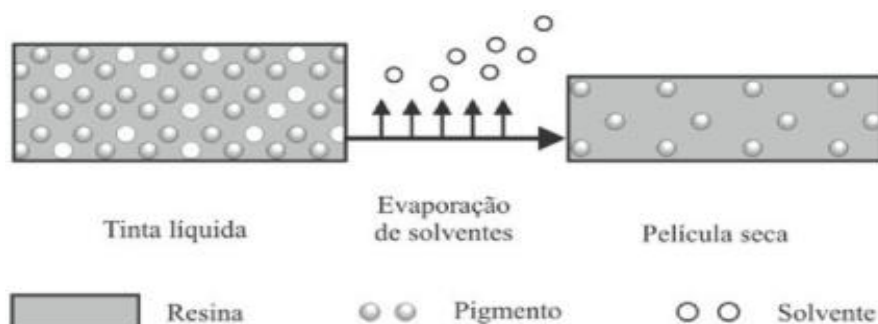
Figura 9 – Formação dos ácidos acrílico e metacrílico



Fonte: Adaptado de Fazenda (2009).

Após a evaporação completa do solvente, as moléculas da resina acrílica se unem a fim de solidificarem-se no formato de uma macromolécula coesa (mecanismo de polimerização por coalescência). As tintas por acabamento acrílico estão em contato direto com o meio corrosivo, dessa forma é de sua função garantir resistência química ao revestimento que está sendo aplicado. A Figura 10 ilustra simplificada o processo de evaporação do solvente (FAZENDA, 2009; GENTIL, 2011).

Figura 10 – Processo de evaporação do solvente na camada de tinta



Fonte: Gentil (2011).

2.5.1.2.2 Pigmentos

Os pigmentos são materiais sólidos que estão dispersos no ligante (resinas). Promovem cor, brilho, resistência corrosiva e são utilizados na eletrodeposição das tintas. Normalmente, os pigmentos podem ser orgânicos (associações cristalinas) ou inorgânicos (pigmentos brancos e coloridos, como dióxido de titânio, cromatos de chumbo, óxido de zinco, azul de ferro...) (ELECTROCOATING, 2002, FAZENDA, 2009; LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

2.5.1.2.3 Aditivos

São adicionados, em pequenas quantidades (0,2 a 0,5%), nas tintas para auxiliar em situações específicas e melhorar propriedades, além de amenizar problemas relacionados a defeitos que surgem tanto em condições físicas ou químicas, a saber: areação, bolhas, encolhimento e outros problemas que afetam a qualidade do revestimento. Os aditivos mais utilizados são os anticoagulantes, antiespumantes, dispersantes e secantes (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

2.5.1.2.4 Solventes

São componentes orgânicos 100 % voláteis originados do petróleo ou da cana de açúcar. A sua principal função é dissolver a resina e auxiliar na cura do revestimento que será aplicado na superfície, diminuindo a viscosidade da tinta (FAZENDA, 2009).

Parâmetros como odor, toxicidade, taxa de evaporação e custo devem ser avaliados criteriosamente na hora de escolher o tipo de solvente a ser utilizado na formulação das tintas. Isso deve-se ao fato de que, em ambientes industriais, por exemplo, problemas envolvendo toxicidade, inflamabilidade e odor precisam estar sob controle rigoroso. Atualmente, existe um forte crescimento na formulação de revestimentos que utilizam como base água deionizada em detrimento aos solventes, buscando melhorias e proteção ao meio ambiente e aos indivíduos (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

2.6 PROCESSOS DE ESTUFAGEM E CURA DO FILME DE TINTA

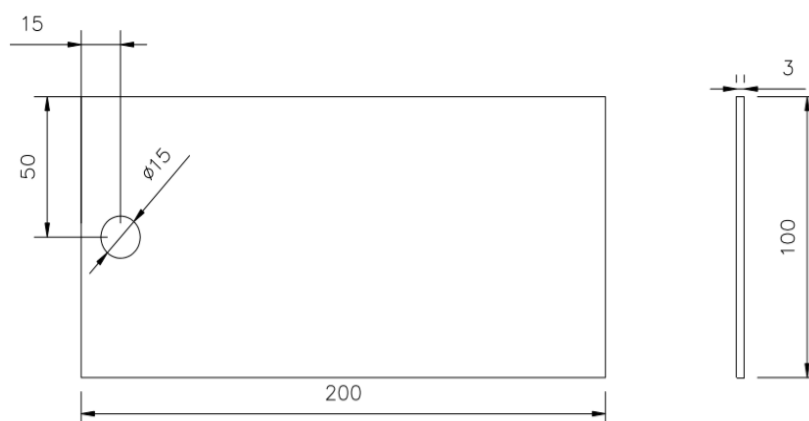
A cura é um processo pelo qual é formada a película de tinta, com evaporação do solvente seguida da polimerização. Para obter-se as propriedades químicas e mecânicas necessárias do revestimento orgânico, as peças devem permanecer dentro da estufa por determinado tempo e temperatura, geralmente especificados pelos fornecedores da tinta. Uma vez que esses parâmetros não sejam atingidos, pode-se ocasionar o deslocamento do filme de revestimento orgânico (BRITO; CENZI, 2019; SOARES, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Foi utilizado como corpo de prova (CP) aço carbono ASTM A570 Grau-36 laminado a quente e confeccionado em formato retangular com dimensões padrão de 200 mm x 100 mm em duplicata ou triplicata, todos contendo espessura de 3 mm. A Figura 11 ilustra o desenho do corpo de prova de aço carbono e suas respectivas dimensões, e a Tabela 1 a composição em porcentagem (%) do mesmo.

Figura 11 – Desenho técnico do corpo de prova em aço carbono



Fonte: A Autora (2020).

Tabela 1 – Composição do aço carbono utilizado como CP

AÇO CARBONO ASTM A570 Grau-36	
Componente	Composição máxima (%)
Carbono (C)	0,25
Manganês (Mn)	0,90
Fósforo (P)	0,04
Enxofre (S)	0,05

Fonte: A Autora (2020).

3.1.1 Processamento térmico de corte a *laser* CO₂

Para a avaliação das superfícies produzidas pelo corte a *laser* CO₂, os corpos de prova de aço carbono foram processados no equipamento da marca Bystronic

modelo BYSTAR 4020. As Figuras 12 e 13 ilustram o equipamento e o momento que as chapas metálicas foram cortadas. Para este processo em questão, o corte foi realizado de acordo com os seguintes parâmetros:

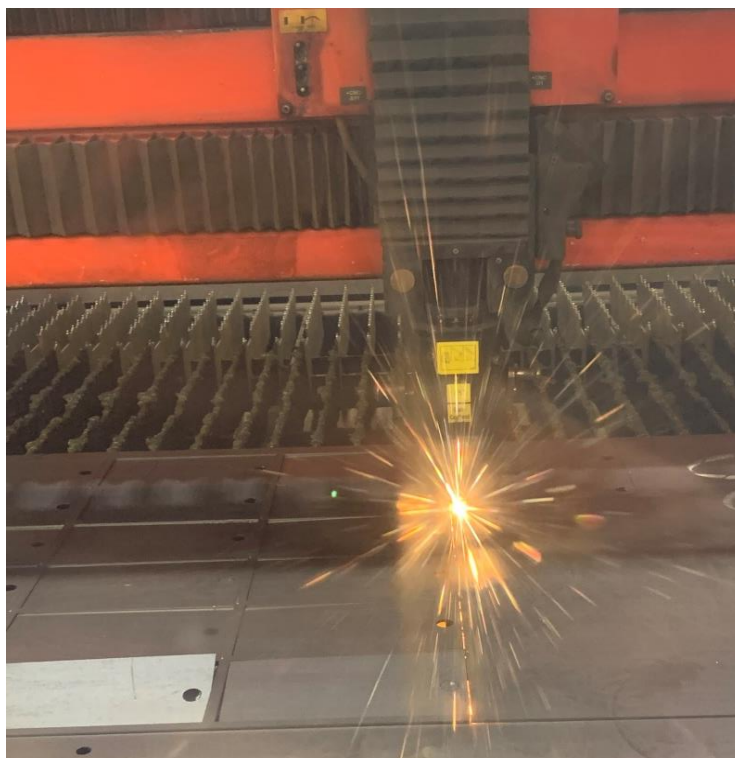
- Gases auxiliares: nitrogênio (N₂) e hélio (He);
- Tipo de corte: pulsado;
- Avanço: 4000 mm/min;
- Pressão de corte: 0,7 bar;
- Potência de laser: 3000 W.

Figura 12 – Equipamento Bystronic de corte térmico a *laser* CO₂



Fonte: A Autora (2020).

Figura 13 – Processamento a *laser* CO₂ dos CP's



Fonte: A Autora (2020).

3.1.2 Processamento térmico de corte a plasma

Para a avaliação das superfícies produzidas pelo corte em plasma, os corpos de prova foram processados no equipamento da marca Oxipira modelo C028. As Figuras 14 e 15 ilustram o equipamento e o momento de corte das chapas. Para o material metálico de aço carbono ASTM A570 Grau-36 com espessura de 3 mm, o equipamento realizou os cortes de acordo com os seguintes parâmetros:

- Gás auxiliar: O₂/ ar;
- Avanço: 4572 mm/min;
- Corrente: 80 A;
- Tensão: 117 V.

Figura 14 – Equipamento Oxipira de corte térmico a plasma



Fonte: A Autora (2020)

Figura 15 – Processamento a plasma dos CP's



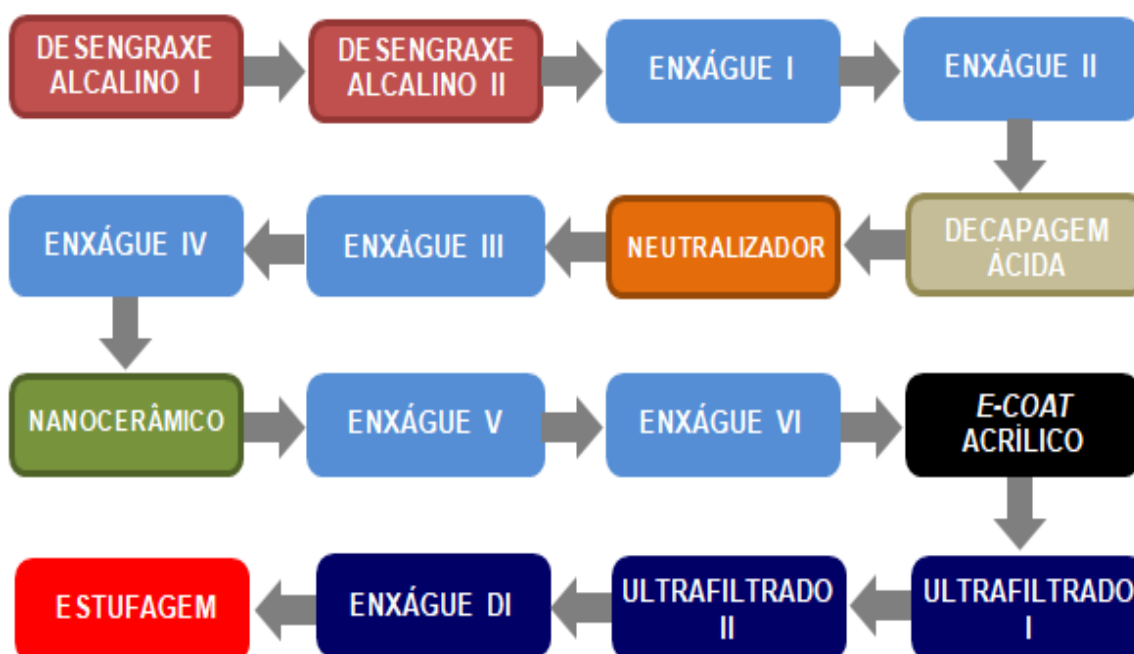
Fonte: A Autora (2020).

3.1.3 Processo de pré-tratamento e revestimento orgânico

Após os cortes térmicos de *laser* CO₂ e plasma, os corpos de prova passaram por um processo de pré-tratamento e pintura por imersão em 15 (quinze) tanques em um fluxo contínuo e automático. Em seguida, também de forma automática, os CP's foram introduzidos a uma estufa de cura. Essas etapas foram realizadas na área de pintura de peças em *E-coat* Acrílico (PEP) da empresa Randon Implementos, unidade Caxias do Sul.

Ressalta-se que todos os corpos de prova foram submetidos aos cortes térmicos, mas nem todos passaram pelos processos de pré-tratamento e revestimento orgânico. A Figura 16 ilustra os processos automáticos de pré-tratamento e pintura.

Figura 16 – Fluxograma do processo de pré-tratamento e revestimento orgânico



Fonte: A Autora (2020).

3.1.3.1 Desengraxe alcalino

Os corpos de prova foram desengraxados em uma lavagem alcalina através de um processo por imersão em dois tanques de 14.000 L contendo hidróxido de potássio (KOH), surfactantes, resíduos de óleo e água industrial a uma concentração de 4 %. Os corpos de prova permaneceram imersos nos tanques por um intervalo de tempo de 5 minutos em cada um a uma temperatura de 60 °C e pH > 12,0.

3.1.3.2 Enxágues I e II

Os corpos de prova foram imersos em dois tanques de 14.000 L contendo água industrial para realizar o enxágue das peças e remoção do excesso de produto químico após a passagem pelo tanque de desengraxe alcalino. Os CP's permaneceram imersos nos tanques por um intervalo de tempo de 1 minuto cada um a temperatura ambiente e pH na faixa de 7,0 a 12,0.

3.1.3.3 Pré-tratamento químico por decapagem ácida

Para a remoção de carepas e oxidação dos substratos, os corpos de prova foram imersos em um tanque de decapagem ácida, contendo 15.700 L com ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido fosfórico (H_3PO_4) inibidores de corrosão e água industrial a uma concentração aproximada de 15 %. Os corpos de prova permaneceram imersos no tanque por um intervalo de tempo de 10 minutos a uma temperatura de 60 °C e $pH < 3.0$.

3.1.3.4 Neutralização das peças

A fim de neutralizar os corpos de prova após o processo de decapagem ácida, os mesmos foram imersos em um tanque de 14.000 L composto basicamente por hidróxido de sódio (NaOH) e água industrial. Os corpos de prova permaneceram imersos no tanque por um intervalo de tempo de 2 minutos a temperatura ambiente e $pH > 11$.

3.1.3.5 Enxágues III e IV

Os corpos de prova foram imersos em dois tanques de 14.000 L para realizar o enxágue das peças e remoção do excesso de produto químico após a passagem pelo tanque de neutralizador. O tanque de enxágue III é composto por água industrial enquanto que o tanque de enxágue IV por água deionizada. Os corpos de prova permaneceram imersos nos tanques por um intervalo de tempo de 1 minuto cada um a temperatura ambiente.

3.1.3.6 Pré-tratamento em nanotecnologia por produto cerâmico

Com o objetivo de garantir proteção anticorrosiva ao material metálico, os corpos de prova foram imersos em um tanque de 13.000 L contendo água deionizada, flúor (F), zircônio (Zr) e cobre (Cu). Os mesmos permaneceram imersos no tanque baseado nos conceitos de nanotecnologia por um intervalo de tempo de 2 minutos, temperatura ambiente e pH em uma faixa de 4,4 a 5,2.

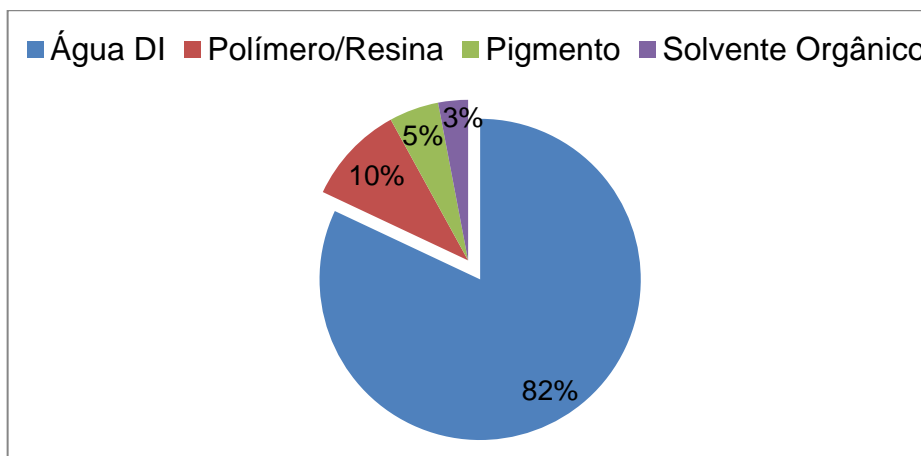
3.1.3.7 Enxágues V e VI

Os corpos de prova foram imersos em dois tanques de 14.000 L contendo água deionizada para realizar o enxágue das peças e remoção do excesso de produto químico após a passagem pelo tanque de nanocerâmico. Os corpos de prova permaneceram imersos nos tanques por um intervalo de tempo de 1 minuto cada um, a temperatura ambiente.

3.1.3.8 Revestimento orgânico por tecnologia em *E-coat* Acrílico

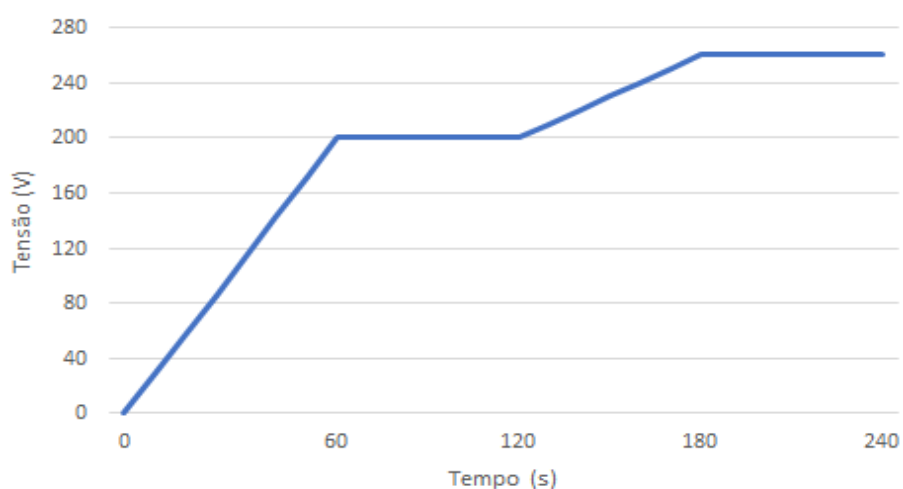
Para realizar a deposição do revestimento orgânico na peça metálica após a passagem pelo processo de pré-tratamento, os corpos de prova foram imersos em um tanque de tinta de 17.200 L. Composto basicamente por resina acrílica, negro de fumo, óxido de dibutilestanho $((C_4H_9)_2 SnO)$, água deionizada e solvente pph a Figura 17 ilustra a composição em porcentagem do tanque de tinta por tecnologia em *E-coat* Acrílico, cujos CP's foram processados.

Figura 17 – Composição química do banho de tinta por tecnologia em E-coat Acrílico



Fonte: A Autora (2020).

A espessura da camada do filme de tinta na superfície metálica está diretamente relacionada com a fonte de tensão presente no retificador. Desta forma, respeita-se uma rampa de processo (tensão *versus* tempo) responsável por depositar na peça uma camada de tinta com espessura mínima de 25 μm . A rampa está ilustrada de forma simplificada na Figura 18 e observa-se que o tempo de permanência dos corpos de prova dentro do tanque de tinta foi de 240 segundos, ou seja, 4 minutos.

Figura 18 – Rampa de processo (tensão *versus* tempo)

Fonte: A Autora (2020).

Para garantir a deposição do filme de revestimentos orgânico na superfície metálica, os seguintes parâmetros de processo são controlados seguindo as respectivas especificações:

- pH: 4,5 – 5,0;
- Teor de sólidos: 11,0 – 13,0 %;
- Condutividade: 350 – 950 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- Temperatura: 25 – 28 °C.

3.1.3.9 Ultrafiltrados e enxágue com água deionizada

Após a passagem pelo tanque de tinta, os corpos de prova foram imersos em três tanques de 14.000 L a fim de enxaguar as peças e recuperar uma porcentagem da tinta, funcionando em um fluxo fechado de cascata. Os ultrafiltrados I e II são compostos basicamente por água deionizada e permeados oriundos das membranas de ultrafiltração e o enxágue DI é composto apenas água deionizada. A Tabela 2 especifica os parâmetros mais importantes dos três últimos tanques do processo.

Tabela 2 – Especificação dos parâmetros

Tanques	% sólidos	Faixa de pH
Ultrafiltrado I	< 1,5 %	4,0 – 5,0
Ultrafiltrado II	< 1,0 %	4,0 – 5,0
Enxágue DI	< 0,5 %	4,0 – 7,0

Fonte: A Autora (2020).

3.1.3.10 Cura das peças pintadas

A última etapa do processamento dos corpos de prova foi a passagem por uma estufa que trabalha a um sistema de circulação forçada de ar, composta por ventiladores e queimadores. O processo de cura do filme de tinta é composto por duas etapas: zona de desidratação e a cura propriamente dita. Para a etapa de desidratação requer-se 10 minutos de processo em uma faixa de temperatura entre

100 e 120 °C. Na cura, o tempo de processo é em torno de 40 minutos a uma faixa de temperatura entre 200 e 210 °C.

3.2 MÉTODOS

A fim de analisar a região afetada pelo processo de corte a *laser* CO₂ e plasma nos materiais metálicos, além de avaliar a influência dos cortes no filme de revestimento orgânico nas regiões de bordas, bem como o desempenho da tecnologia em *E-coat* Acrílico, serão realizados os ensaios descritos a seguir.

3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV/FEG) e espectroscopia por dispersão em energia (EDS)

O princípio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV/FEG) é utilizar um feixe de elétrons incidente na superfície da amostra desejada, onde através desta interação entre feixe e amostra, resulta-se em um sinal de imagem. A fonte do feixe de elétrons emitido geralmente é um filamento de tungstênio (W) e os sinais são formados por elétrons e fótons que são coletados por detectores específicos e apropriados, modulando o brilho do monitor e permitindo observação da imagem (GOLDSTEIN *et al.*, 2003).

A análise de espectroscopia por dispersão em energia (EDS) é uma técnica que utiliza raios X de forma qualitativa e quantitativa a fim de fornecer a composição química (elementos presentes) da amostra desejada. Através do microscópio eletrônico de varredura, um feixe de elétrons primário incide na amostra, gerando os raios X, e interage com os átomos presentes nela. Dessa forma, os raios X produzidos são detectados por um detector de dispersão de energia e permite-se que os elementos que constituem a amostra sejam identificados (GOLDSTEIN *et al.*, 2003).

Para a avaliação da morfologia da superfície da região afetada pelos cortes a *laser* CO₂ e a plasma e da deposição do pré-tratamento químico e do revestimento orgânico nas regiões de borda superficial foram realizadas análises de MEV/FEG e EDS no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC), da Universidade de Caxias do Sul, através do microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo da marca Tescan MIRA3. Utilizou-se para as análises CP's de 32 mm x 10 mm.

Neste mesmo equipamento também foi realizada, diante da seção transversal dos CP's embutidos, a avaliação da espessura de camada do revestimento orgânico aplicado e outros aspectos como porosidades e defeitos que eventualmente poderiam estar presentes na região analisada. A seção transversal embutida também fez parte da região de borda superficial do CP revestido organicamente.

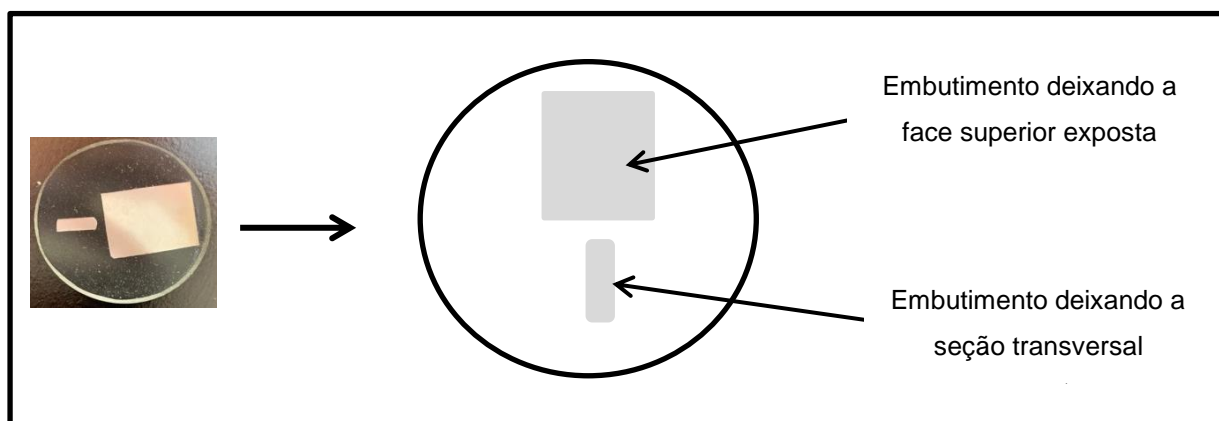
3.2.2 Ensaio de metalografia

O presente ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LAMEC), localizado no Bloco D da Universidade de Caxias do sul de acordo com a norma NBR 13284:95. Os CP's submetidos ao ensaio foram processados a *laser* CO₂ e a plasma, sem a aplicação do pré-tratamento nem do revestimento orgânico. O ensaio de metalografia foi realizado a fim de compreender o estudo da microestrutura dos corpos de prova após os processamentos térmicos.

Para a realização da metalografia foi feito embutimento, lixamento e polimento das regiões de interesse para obtenção de uma superfície plana e polida, além do ataque da mesma com o agente químico Nital 5 % (ácido nítrico + álcool). Após a preparação e o ataque químico utilizou-se um Microscópio de Projeção Invertida da marca Zeiss para realizar o ensaio de metalografia, juntamente com o *software* AxioVision.

Através do embutimento da seção transversal foi possível verificar o material base e a zona termicamente afetada. A Figura 19 ilustra o *layout* de embutimento dos CP's.

Figura 19 – Layout do embutimento dos CP's para o ensaio metalográfico



Fonte: A Autora (2020).

3.2.3 Ensaio de microdureza de Vickers

O ensaio de microdureza, baseado na norma NBR NM ISO 6507-1:2008/Er:2010 foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LAMEC), localizado no Bloco D da Universidade de Caxias do Sul com os corpos de prova processados termicamente a *laser* CO₂ a plasma sem a aplicação do pré-tratamento nem do revestimento orgânico. Para esse ensaio em questão, pretendeu-se avaliar a possível variação da dureza na superfície do material metálico processado termicamente.

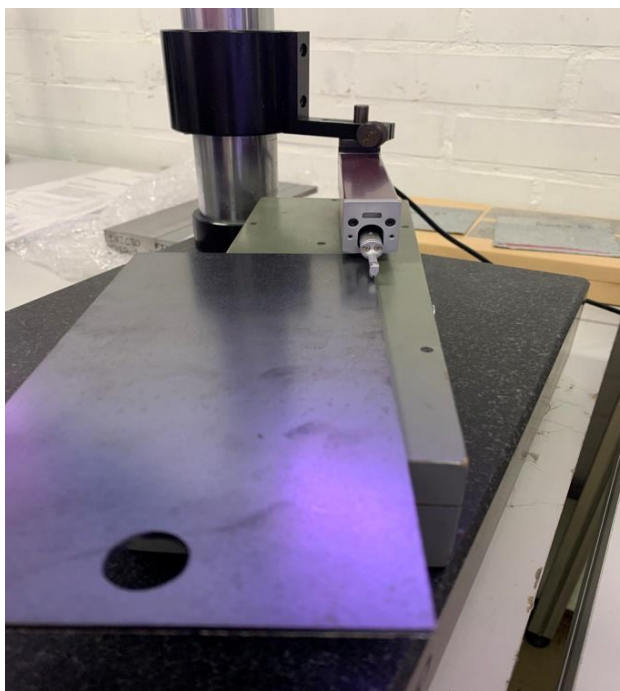
Para a realização do ensaio utilizou-se um Microdurômetro Vickers da marca Shimadzu, modelo HMV-2, uma carga de 0,025 kg e HV 0,2. Para determinar a dureza Vickers dos CP's, o primeiro ponto medido foi a uma distância de 0,3 mm da borda de corte e os demais pontos subsequentes foram incrementados ao longo da região da ZTA. O mesmo embutimento da seção transversal representado pela Figura 17 foi usado para a avaliação da dureza.

3.2.4 Ensaio de rugosidade superficial

O presente ensaio, baseado na norma NBR ISO 4288 foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LAMEC), localizado no Bloco D da Universidade de Caxias do Sul mediante ao uso de um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-301 para avaliar a superfície do material metálico após os processamentos térmicos de *laser* CO₂ e plasma, sem aplicação do pré-tratamento nem do revestimento orgânico.

As medições foram realizadas no centro (metade da chapa) e nas bordas da superfície dos CP's e as rugosidades das superfícies foram mensuradas através do parâmetro de rugosidade média (R_a). A Figura 20 ilustra a exata região de borda onde o ensaio foi realizado.

Figura 20 – Região de borda submetida ao ensaio de rugosidade superficial



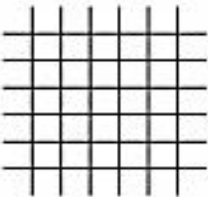


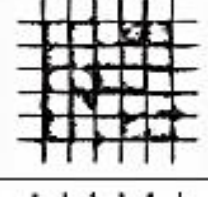

Fonte: A Autora (2020).

3.2.5 Ensaio de Aderência pelo método em grade

O ensaio de aderência foi realizado no Laboratório de Qualidade da empresa Randon Implementos, unidade Caxias do Sul, a fim de determinar o grau de adesão do revestimento orgânico após a etapa de pintura e cura. Baseado na norma NBR 11003, o ensaio foi realizado após 72 horas da aplicação da camada de tinta por tecnologia em *E-coat* Acrílico. O filme depositado na superfície metálica foi submetido a um corte pelo método em grade, pois a espessura da camada de tinta seca foi inferior a 70 μm .

O ensaio foi realizado utilizando um estilete, um gabarito em formato de grade e pressão suficiente para o corte atingir o substrato metálico, tanto no centro quanto nas extremidades próximas às bordas da superfície. Após a realização do corte, foi colocado um pedaço de fita adesiva filamentosa sobre a área cortada, fixando-a firmemente de modo que se garantiu contato suficiente com o filme. Passado um intervalo de tempo de 90 segundos, a fita foi removida puxando-a rapidamente do substrato revestido. O grau de aderência do revestimento orgânico na superfície metálica foi avaliado de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Grau de aderência de acordo com a norma NBR 11003.

Código	Figura
Gr ⁰ Nenhuma área da película destacada	
Gr ₁ Área da película destacada, cerca de 5 % da área quadriculada	
Gr ₂ Área da película destacada, cerca de 15 % da área quadriculada	
Gr ₃ Área da película destacada, cerca de 35 % da área quadriculada	
Gr ₄ Área da película destacada, cerca de 65 % da área quadriculada	

Fonte: Adaptado de NBR 11003 (2009).

3.2.6 Ensaio de névoa salina (*Salt Spray*)

O presente ensaio de névoa salina foi realizado conforme norma ASTM B117-18 e segundo o Procedimento de Ensaio interno LCOR - PE 001 Revisão 14, do Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial (LCOR), localizado no Bloco G da Universidade de Caxias do Sul. Utilizou-se como equipamento uma câmara fechada da marca Bass, modelo USX-6000/2009, identificada como CC.

Os CP's foram ensaiados em triplicata após a aplicação do pré-tratamento químico e do revestimento orgânico de tecnologia em *E-coat* Acrílico e não houve preparação das amostras, ou seja, não foi aplicado nenhum desengraxe e as bordas permaneceram sem nenhuma proteção. O empolamento da superfície revestida foi

avaliado conforme LCOR – PE 010 Rev 06 que atende aos requisitos da norma ASTM D714-02 (2017).

3.2.7 Migração subcutânea

O presente ensaio foi realizado no Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial (LCOR), localizado no Bloco G da Universidade de Caxias do Sul. A migração subcutânea foi avaliada segundo o Procedimento de Ensaio interno LCOR - PE 006 Revisão 08, conforme a norma ASTM D 1654-08(2016)⁸¹ - Procedimento A - Método Deslocamento (raspagem) com os CP's em triplicata. Para a realização do ensaio de migração subcutânea foi utilizado os mesmo CP's do ensaio de névoa salina.

Após os procedimentos para verificação da migração subcutânea, foram consideradas dez medidas ao longo da incisão da amostra com um paquímetro digital (P 01). Estas medidas foram realizadas a partir da incisão até a região onde o revestimento perdeu a aderência (um lado da raspagem) e perpendicular à incisão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

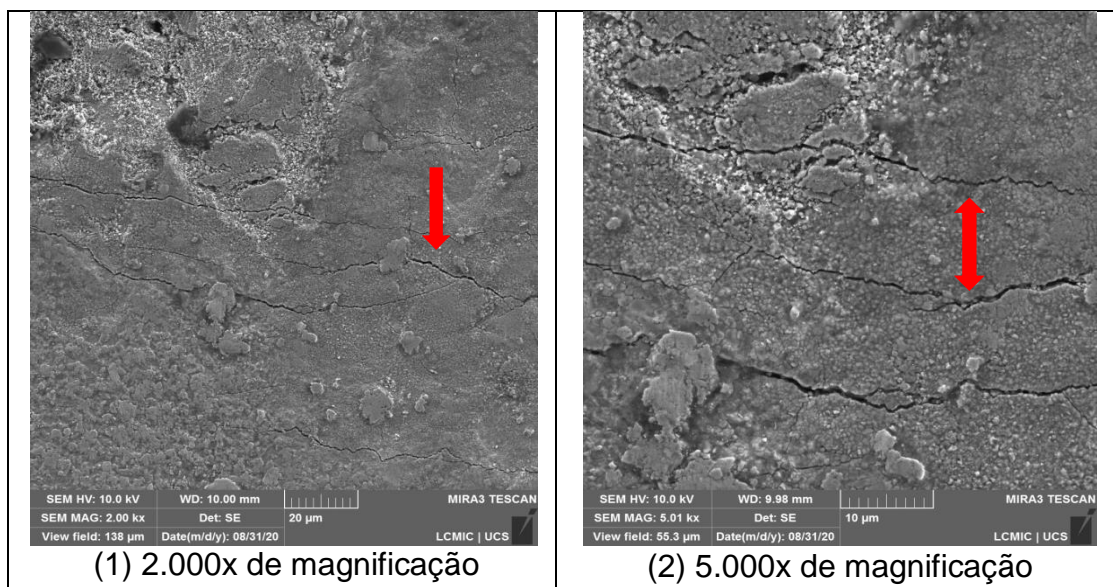
Conforme abordado nos itens anteriores deste trabalho, os revestimentos orgânicos e os processamentos térmicos são de grande importância e complexidade, estando associados a inúmeros fenômenos químicos e físicos. Decidiu-se direcionar as investigações para avaliar as possíveis influências dos cortes a *laser* CO₂ e a plasma, nas regiões superficiais de borda dos CP's de aço carbono, com e sem pré-tratamento e revestimento. Dessa forma, os resultados e as discussões das análises e dos ensaios realizados para esta avaliação são apresentados neste Capítulo, abordando temas como zona termicamente afetada (ZTA), microestrutura metálica, microdureza, rugosidade superficial, deposição de pré-tratamento químico, aderência do revestimento orgânico e resistência corrosiva.

4.1 ANÁLISES DOS CORPOS DE PROVA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA POR EMISSÃO DE CAMPO (MEV/FEG) E ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO EM ENERGIA (EDS)

4.1.1 Análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV/FEG) para os corpos de prova processados termicamente a *laser* CO₂ e a plasma

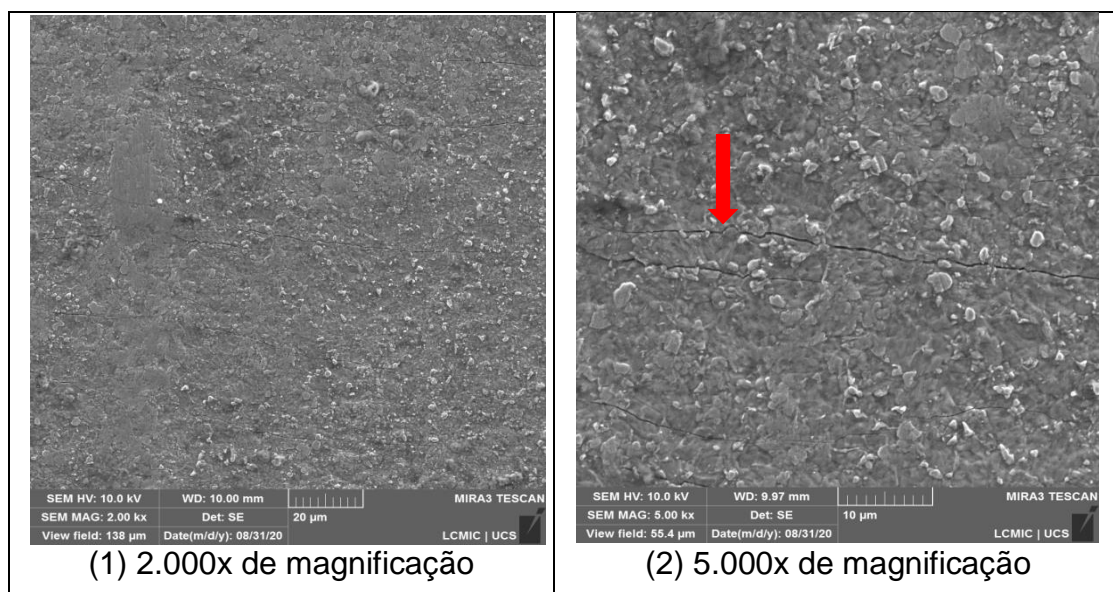
Nas Figuras 21 e 22 observam-se as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV/FEG) da superfície (bordas) dos CP's de aço carbono processados termicamente com *laser* CO₂ e plasma, respectivamente. Os corpos de prova foram analisados após os cortes térmicos, sem a aplicação de pré-tratamento químico nem revestimento orgânico. Ou seja, a análise de MEV/FEG foi realizada na superfície metálica próxima à região que foi submetida ao processamento térmico.

Figura 21 – Imagens da região de borda dos CP's processados com *laser* CO₂



Fonte: A Autora (2020).

Figura 22 – Imagens da região de borda do CP's processados a plasma



Fonte: A Autora (2020).

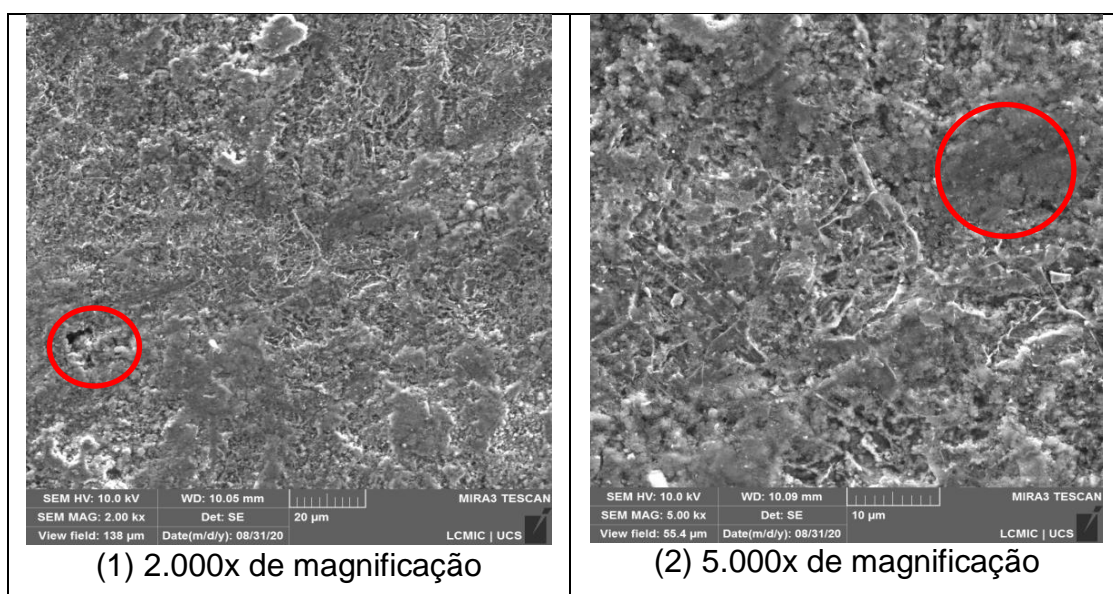
Por meio das análises pode-se observar o aparecimento de microtrincas na superfície dos CP's (bordas) próximas às regiões de processamento a *laser* CO₂ e plasma, com maior intensidade e predominância nos cortes a *laser* CO₂. Segundo Pimenta (2013) e Barényi (2016), a área de um metal que passa por um processo de corte térmico sofre alterações de sua estrutura metalúrgica, podendo desenvolver microtrincas ao longo da superfície. Isso deve-se ao fato da grande variação de

temperatura (aquecimento e resfriamento) presente na região adjacente ao corte, gerando uma série de tensões internas e levando a um possível aparecimento de microtrincas.

4.1.2 Análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV/FEG) e espectroscopia por dispersão em energia (EDS) para os corpos de prova processados termicamente a *laser* CO₂ e a plasma com deposição de pré-tratamento químico

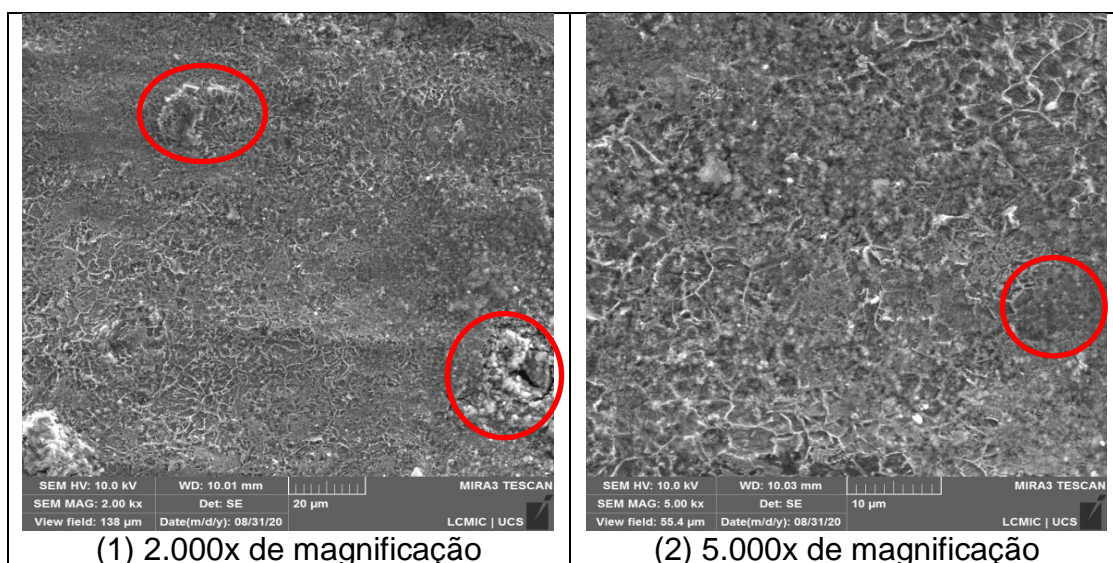
Para avaliar a condição do pré-tratamento químico depositado nos CP's, nas Figuras 23 e 24 observam-se as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV/FEG) da superfície (bordas) dos CP's de aço carbono processados termicamente com plasma e *laser* CO₂, respectivamente, e revestidos com pré-tratamento a base de produto nanocerâmico. Posteriormente, nestas mesmas regiões, foi realizada a análise de EDS.

Figura 23 – MEV/FEG dos CP's com processamento a plasma utilizando pré-tratamento a base de nanocerâmico



Fonte: A Autora (2020).

Figura 24 – MEV/FEG dos CP's com processamento a *laser* CO₂ utilizando pré-tratamento a base de nanocerâmico



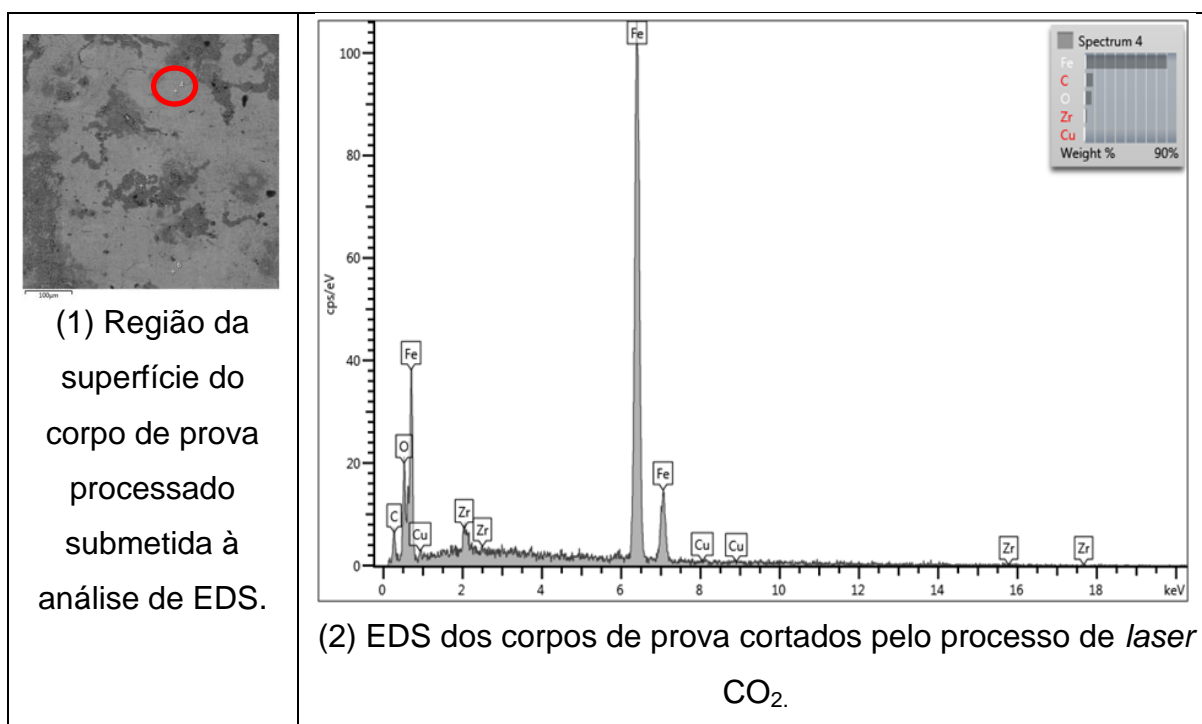
Fonte: A Autora (2020).

Pode-se observar semelhanças entre as regiões de bordas superficiais analisadas com relação à deposição da camada de nanocerâmico. Isto é, tanto para os CP's processados por plasma quanto por *laser* CO₂, nota-se a presença de pré-tratamento ao longo da superfície avaliada.

Conforme Bossardi (2007) também analisou em seus resultados, apesar da fina camada do revestimento nanométrico, é possível observar o recobrimento das imperfeições da superfície com o pré-tratamento. Dessa forma, nota-se através das Figuras 23 e 24 que o pré-tratamento a base de nanocerâmico foi capaz de recobrir as microtrincas observadas nas Figuras 21 e 22. Entretanto, é possível perceber “falhas” da deposição do mesmo e poros em algumas regiões, também observado em estudos feitos por Baldin (2013).

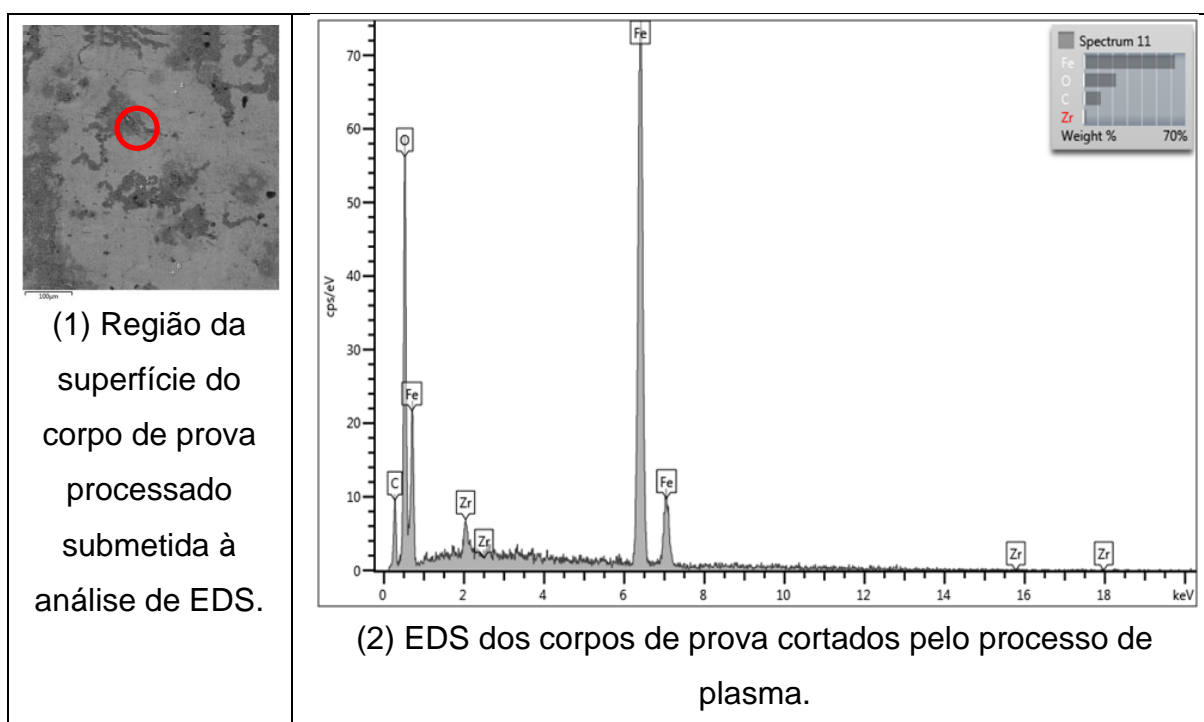
Pode-se supor que essas falhas são devidas às irregularidades da superfície que foi afetada pelos cortes térmicos ou também possíveis falhas da própria deposição e composição do pré-tratamento. Todavia, de acordo com as Figuras 25 e 26 embora a camada de nanocerâmico não seja completamente homogênea e uniforme ao longo das regiões de superfície de borda analisadas, os gráficos de MEV/EDS confirmam de forma qualitativa a presença do filme de pré-tratamento, ainda que em baixa intensidade.

Figura 25 – Análise de EDS da superfície dos corpos de prova cortados pelo processo de *laser* CO₂



Fonte: A Autora (2020).

Figura 26 – Análise de EDS da superfície dos corpos de prova cortados pelo processo de plasma



Fonte: A Autora (2020).

É importante ressaltar uma situação observada nos gráficos de EDS que Vasques (2016) também aponta em seus estudos: essa técnica de análise depende da densidade do material que está sendo avaliado e da tensão do feixe de elétrons (elétrons secundários). Dessa forma, os gráficos obtidos para os CP's estudados mostram picos de baixa intensidade para o zircônio (Zr) e alta intensidade de ferro (Fe). Isto é, devido à espessura do material nanocerâmico depositado ser pequena, permite-se apenas maior detecção e contribuição do material de base estudado (substrato de aço carbono). Entretanto, a análise de EDS qualifica e detecta a presença de deposição do pré-tratamento na superfície metálica analisada.

Pode-se observar a presença de zircônio (Zr) em ambas as regiões de bordas dos corpos de prova (*laser* CO₂ e plasma), mas, em específico, no CP processado a *laser* CO₂, percebe-se a presença de cobre (Cu), conforme Figura 25 (2). O principal componente da camada nanocerâmica é o zircônio (Zr), entretanto, a presença de cobre (Cu) também é importante e faz parte do processo de nanotecnologia, pois ele incrementa a resistência anticorrosiva do zircônio. Ou seja, sem a presença de cobre há perda significativa na resistência à corrosão.

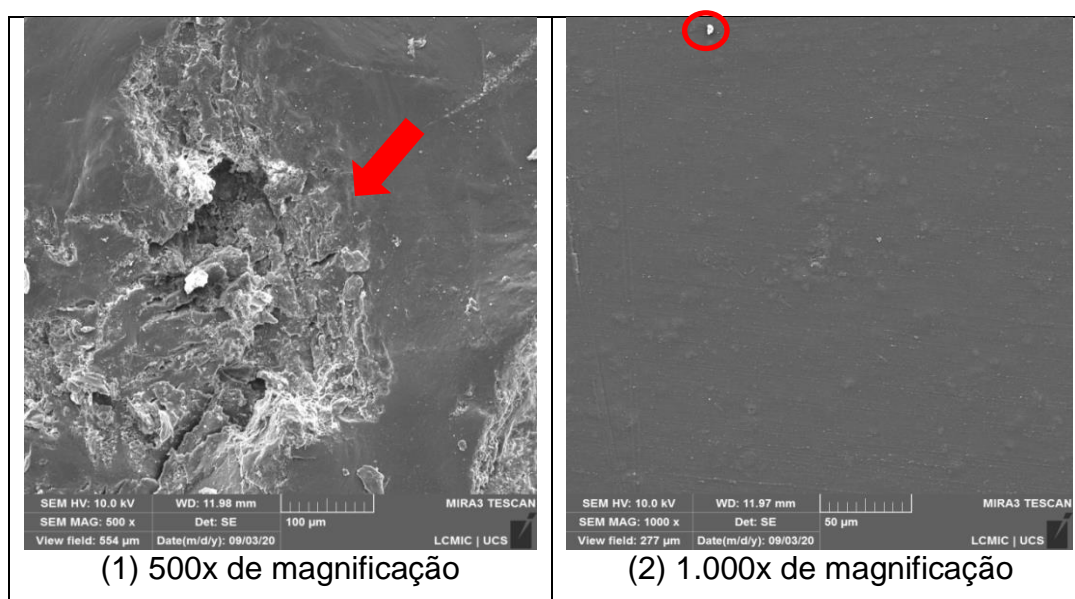
Pode-se atribuir essa falta de cobre (Cu) no CP processado a plasma a falhas na deposição do pré-tratamento químico e também a uma condição momentânea, uma vez que essa análise foi feita em pontos específicos da região. Dessa forma, poderia-se ter encontrado o elemento em outros pontos do CP que não analisados.

Por fim, de acordo com as Figuras 25 e 26 observa-se a presença de oxigênio (O) nas regiões analisadas. O mesmo elemento foi encontrado nas análises de Vasques (2016), juntamente com uma pequena porcentagem de carbono (C), proveniente da superfície de aço carbono. Pode-se supor que a presença de O é devido a formação de óxido de ferro (Fe₂O₃) após os cortes térmicos (camadas de óxidos que não foram removidas durante o pré-tratamento) e óxido de zircônio (ZrO₂) resultante da composição do pré-tratamento químico a base de nanocerâmico.

4.1.3 Análises no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/FEG) para os corpos de prova processados termicamente a *laser* CO₂ e a plasma revestidos organicamente por tecnologia *E-coat* Acrílico

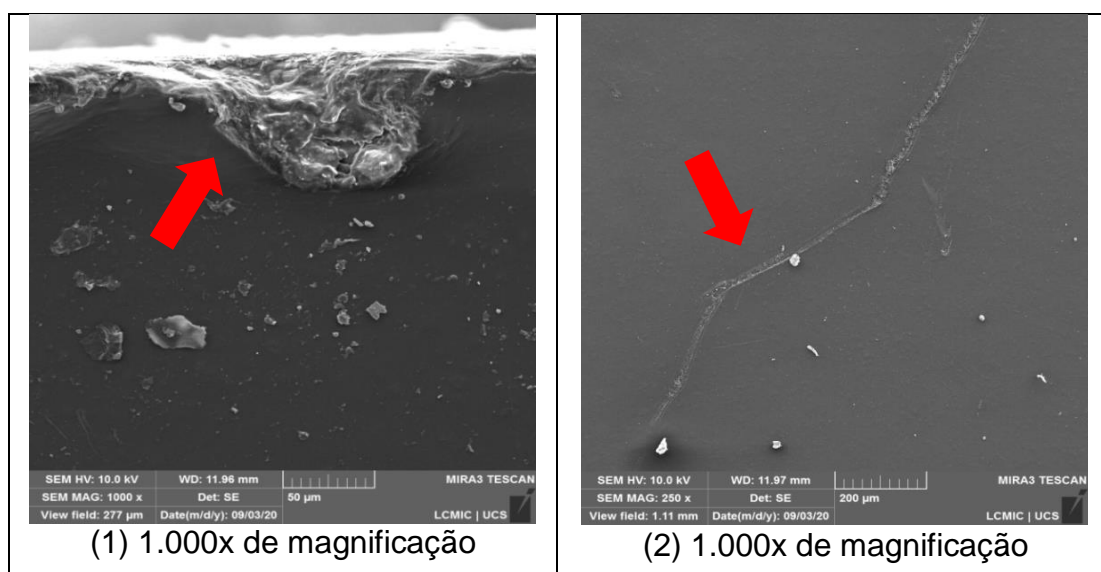
Após o pré-tratamento químico, alguns CP's foram revestidos organicamente por um processo em *E-coat* Acrílico. Nas Figuras 27 e 28 observam-se as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV/FEG) da superfície (bordas) dos CP's de aço carbono, processados termicamente com plasma e *laser* CO₂, respectivamente e revestidos com tecnologia em *E-coat* Acrílico.

Figura 27 – MEV/FEG das regiões de bordas com corte a plasma e revestidas com tecnologia *E-coat* Acrílico



Fonte: A Autora (2020).

Figura 28 – MEV/FEG das regiões de bordas com corte a *laser* CO₂ e revestidas com tecnologia *E-coat* Acrílico



Fonte: A Autora (2020).

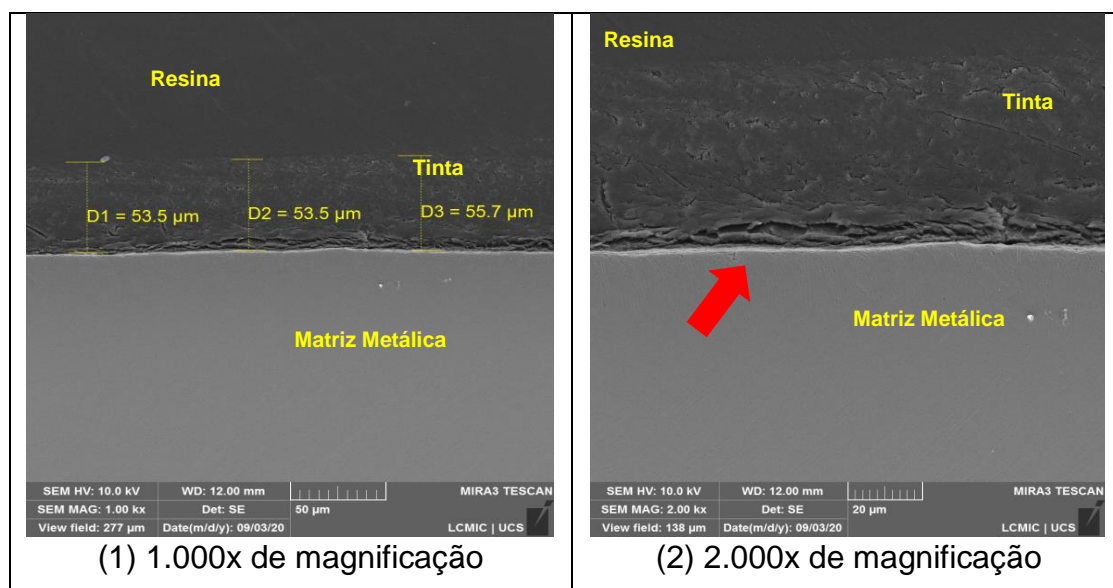
As áreas de bordas são mais irregulares devido aos processamentos térmicos que podem influenciar na integridade superficial das mesmas; um exemplo disso é a formação de rebarbas que se dá nessas regiões. A Figura 27 (1) retrata uma aresta que foi revestida organicamente após a formação de rebarbas pelo processo de corte a plasma. Da mesma maneira, mas em menor intensidade, a Figura 28 (1), também ilustra essa situação após o processamento a *laser* CO₂.

Pode-se observar pelas imagens a presença de irregularidades nas regiões próximas às regiões de corte das superfícies pintadas. Nessas áreas percebem-se alguns defeitos e heterogeneidades, enquanto que à medida que se afasta da borda a superfície revestida é mais lisa. Ou seja, as falhas e descontinuidades se dão em menor intensidade. Dessa forma, pode-se supor que os cortes térmicos influenciam na uniformidade da camada de tinta na superfície metálica, de modo que uma superfície irregular dificulta a deposição do filme de revestimento orgânico.

4.1.4 Análises no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/FEG) para a seção transversal dos corpos de prova processados termicamente a *laser* CO₂ e a plasma revestidos organicamente por tecnologia *E-coat* Acrílico

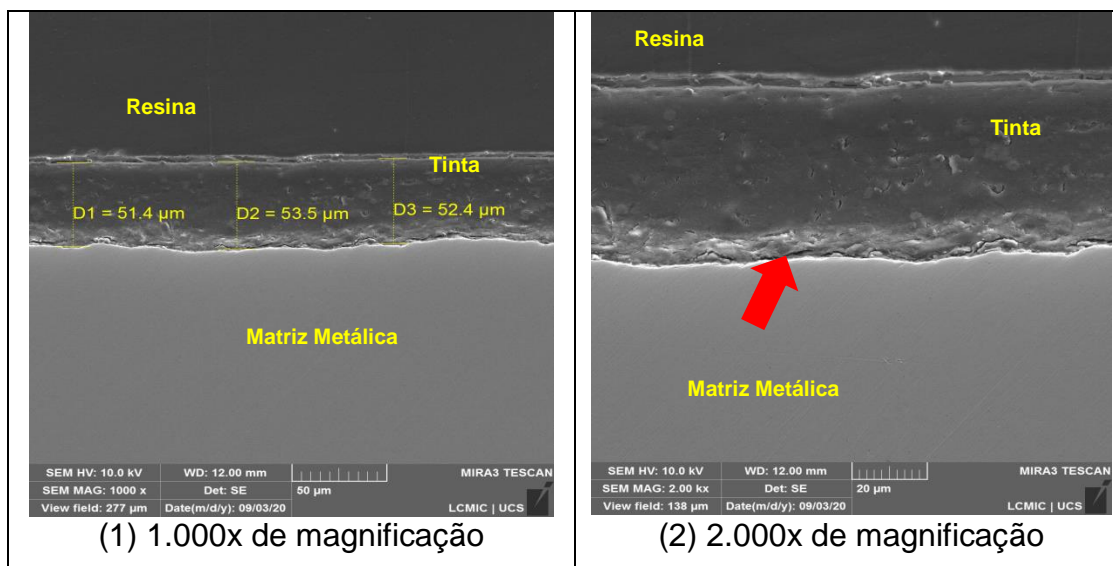
Nas Figuras 29 e 30 observam-se as microscopias eletrônicas de varredura (MEV/FEG) da seção transversal dos CP's de aço carbono processados termicamente com plasma e *laser* CO₂, respectivamente, revestidos organicamente com tecnologia em *E-coat* Acrílico. Esta análise foi realizada na superfície de borda dos CP's, onde a região superior mais escura é da resina de embutimento a frio, a intermediária é a seção transversal revestida com a camada de tinta orgânica e a região inferior mais clara é a matriz metálica.

Figura 29 – MEV/FEG das regiões transversais com corte a plasma e revestidas com tecnologia *E-coat* Acrílico



Fonte: A Autora (2020).

Figura 30 – MEV/FEG das regiões transversais com corte a *laser* CO₂ e revestidas com tecnologia *E-coat* Acrílico



Fonte: A Autora (2020).

Pode-se perceber uma maior irregularidade na área de seção transversal a plasma revestida organicamente, onde há predominância de poros, tendendo a formar uma região de deposição da camada de tinta não uniforme. Na área de corte transversal a *laser* CO₂, observa-se maior uniformidade e homogeneidade da camada de tinta depositada. A região de seção transversal para o processamento a

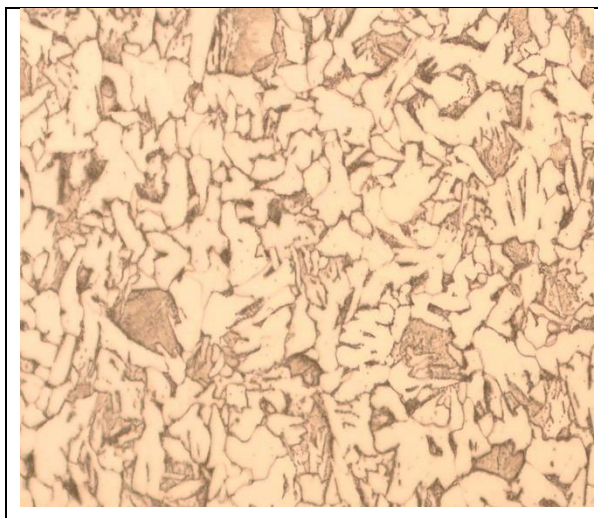
laser CO₂ que está esbranquiçada é devido ao alto carregamento de borda que ocorreu durante a análise de MEV/FEG, não interferindo nem influenciando nos resultados obtidos.

Na seção analisada, a espessura de camada para ambas as regiões é semelhante. Para a região transversal processada pelo corte a plasma a espessura de camada apresentou valores de: 53,5 μm, 53, 5 μm e 55,7 μm e para a região transversal processada pelo corte a *laser* CO₂ a espessura de camada apresentou valores de: 51,4 μm, 53,5 μm e 52,4 μm. Dessa forma, pode-se supor que o processo de corte térmico não interferiu na espessura da camada de tinta, mas devido à geração de uma superfície de borda irregular, influenciou na uniformidade do filme de revestimento orgânico depositado na região.

4.2 ENSAIO DE METALOGRAFIA DOS CORPOS DE PROVA PROCESSADOS TERMICAMENTE

A fim de avaliar a microestrutura do material metálico após os processamentos térmicos, foi realizado o ensaio de metalografia ao longo da região de borda da superfície metálica. A Figura 31 ilustra a região de núcleo do CP vista pelo microscópio que não foi afetada pelos cortes a *laser* CO₂ e a plasma.

Figura 31 – Região de núcleo do material base analisado. 500x de magnificação e Nital 5 %

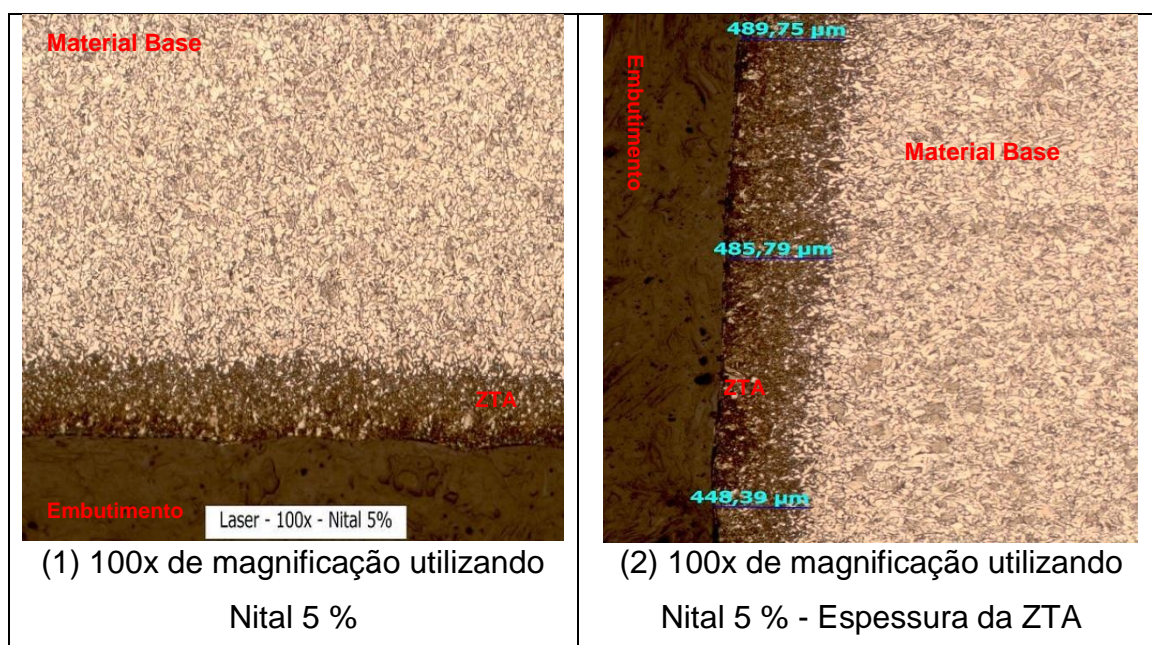


Fonte: A Autora (2020).

Por ter um teor de carbono em peso inferior a 0,76%, o aço carbono do CP's analisados caracteriza-se por ser um aço hipoeutetóide. Dessa forma, a sua microestrutura possui basicamente a presença de ferrita (regiões claras) e perlita (regiões mais escuras) como constituintes principais (CALLISTER JR, 2016; STEIN, 2019).

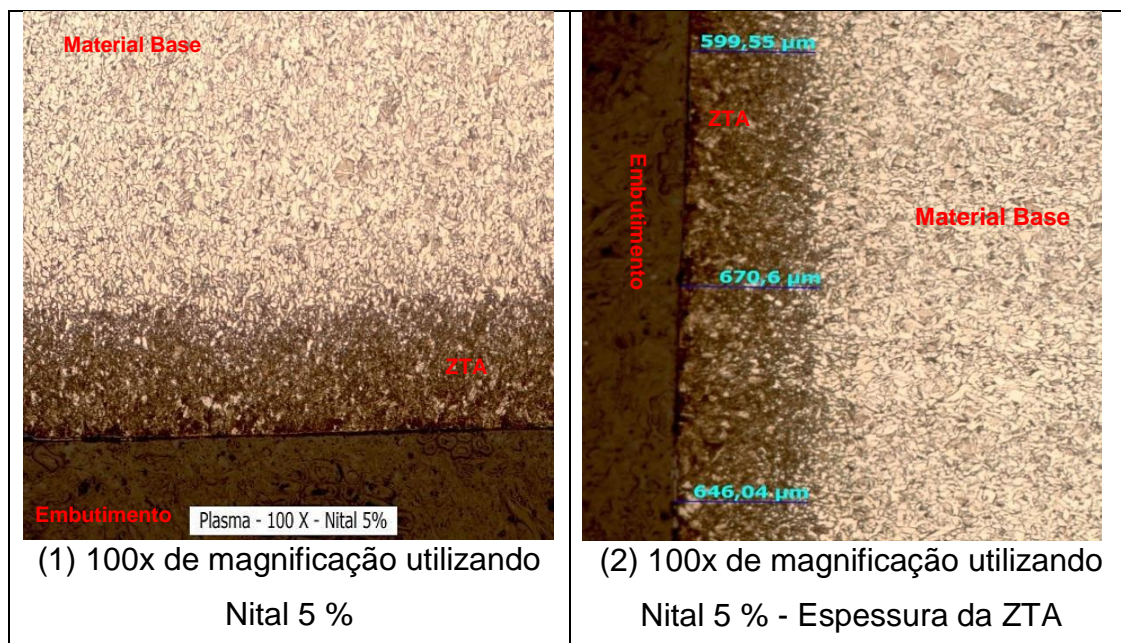
Nas Figuras 32 e 33 observam-se as imagens feitas pelo ensaio de metalografia das regiões processadas termicamente por *laser* CO₂ e plasma, respectivamente. A região mais clara é conhecida como núcleo e faz parte do material base, conforme visto na Figura 30, a mais escura é a zona de embutimento e a região intermediária é classificada como zona térmica afetada (ZTA). A ZTA formou-se quando o material metálico de aço carbono foi processado pelo *laser* CO₂ e pelo plasma.

Figura 32 – Metalografia das regiões processadas termicamente pelo corte a *laser* CO₂



Fonte: A Autora (2020).

Figura 33 – Metalografia das regiões processadas termicamente pelo corte a plasma



Fonte: A Autora (2020).

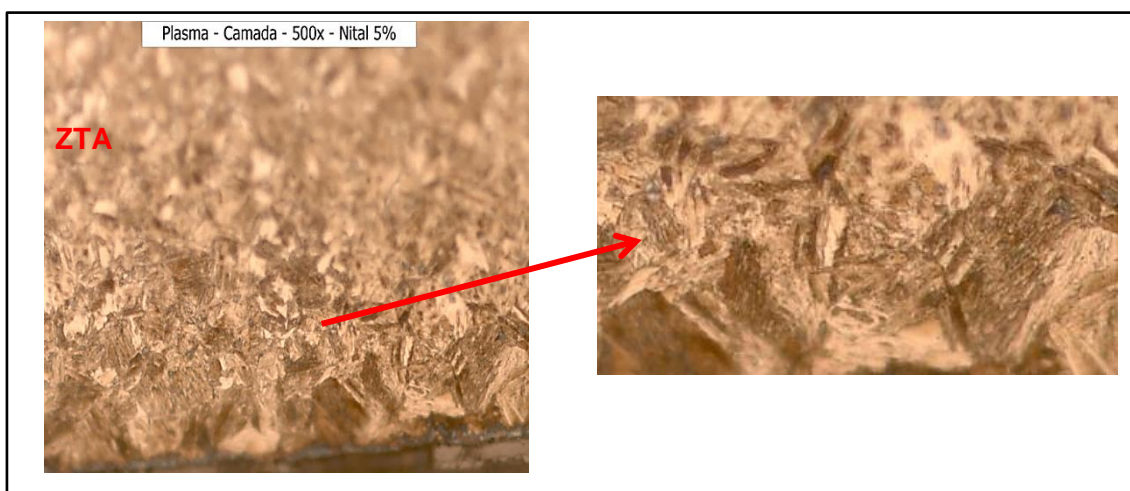
Pode-se observar pelas Figuras 32 (1) e 33 (1) que os processamentos térmicos afetam as regiões de bordas, tal situação evidenciada através do escurecimento das imagens. De acordo com Gehkre (2019), o uso de elevadas temperaturas no processo faz com que o material seja fundido, e com isso, as áreas remanescentes próximas ao local do corte (bordas) podem apresentar alterações em sua microestrutura. Conrado (2014) concluiu em seus estudos que quanto maior o aquecimento da região, mais espessa será a zona termicamente afetada.

Segundo ensaios realizados por Castro (2019) e Conrado (2014), as transformações da microestrutura se dão pelo resfriamento rápido dessas regiões mais próximas à extremidade de corte (bordas), pois existe uma troca de calor recorrente durante os processamentos térmicos, gerando um gradiente de temperatura que decai à medida que distanciam-se da borda da peça. Esse ciclo térmico de aquecimento e resfriamento intensos provocam mudanças na microestrutura do material, como transformações de fase.

Por meio das Figuras 32 (1) e 33 (1) pode-se perceber que a região submetida ao corte a *laser* CO₂ teve uma área afetada (ZTA) menor que a região submetida ao corte a plasma, com valores de espessura de 489,75 µm, 489,79 µm e 448,39 µm. Os valores de espessura afetada pelo plasma foram de 599,55 µm, 670,6 µm e 646,04 µm. Em um estudo feito por Barényi (2016), também foi possível

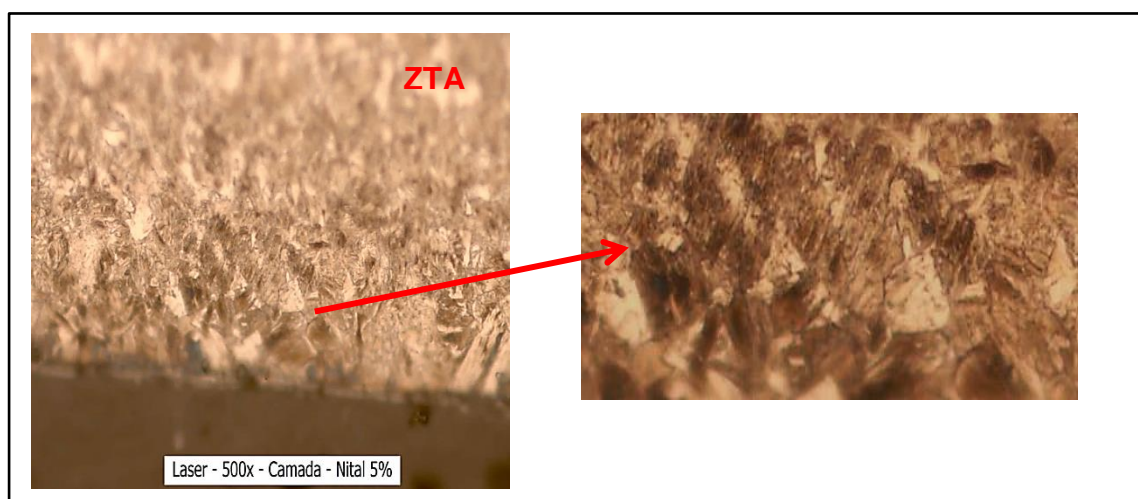
observar valores de ZTA superiores quando o material é processado pelo corte a plasma em comparação com a ZTA encontrada no corte a *laser* CO₂, além da formação de agulhas martensíticas na região afetada. As Figuras 34 e 35 amplificam as regiões de ZTA encontradas nas análises de metalografia após os processamentos a plasma e a *laser* CO₂, respectivamente.

Figura 34 – Região de amplificação da ZTA formada após o processamento a plasma



Fonte: A Autora (2020).

Figura 35 – Região de amplificação da ZTA formada após o processamento a *laser* CO₂



Fonte: A Autora (2020).

Após sofrer os ataques térmicos, percebe-se uma transformação de fase que é identificada pela presença de martensita (originada basicamente pelo rápido

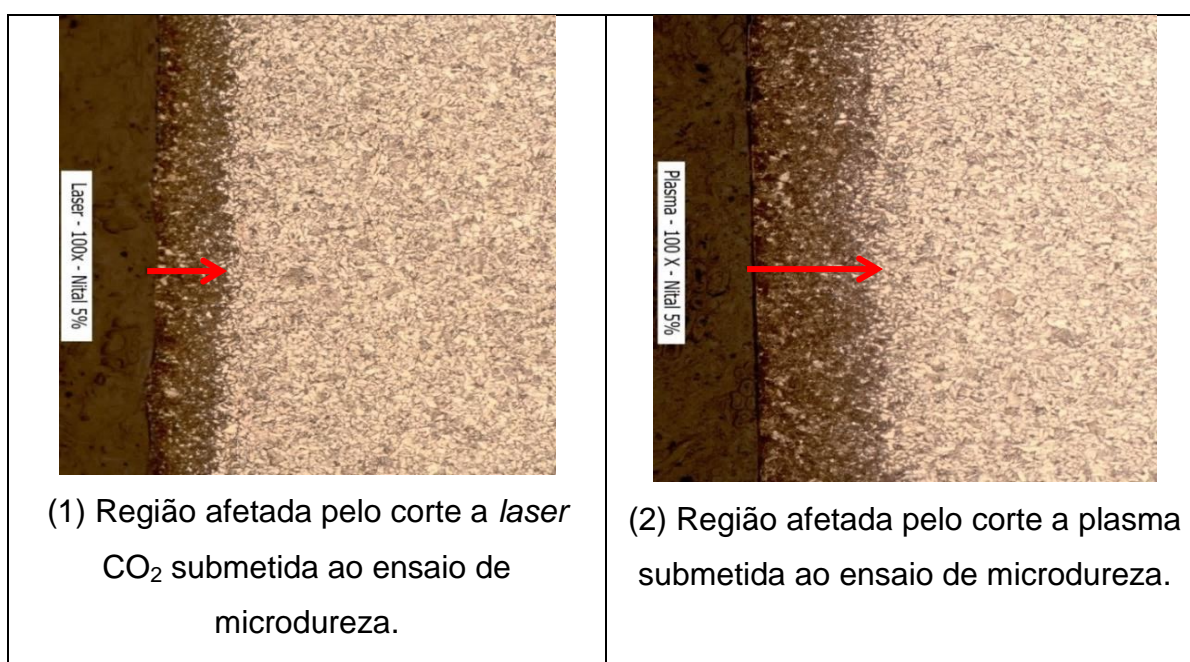
resfriamento da região após o corte). Também discutido por Eroglu e Aksoy (2000), um aço carbono que possui uma estrutura ferrita-perlita, tende a transformar-se em austenita durante uma alta taxa de aquecimento provocada por processamentos térmicos e, posterior, originar microestruturas martensíticas durante o rápido resfriamento da região.

Segundo Stein (2019), a estrutura da martensita gerada durante o rápido resfriamento da região depende do teor de C presente no aço, dessa forma, como o material base é constituído por teores inferiores a 0,6 % de C, a transformação de fase se dá por agulhas martensíticas. Da mesma forma, para o tipo de aço carbono utilizado nas avaliações, essas agulhas martensíticas também podem ser caracterizadas como martensitas de baixo teor de carbono.

4.3 ENSAIO DE MICRODUREZA DE VICKERS NA REGIÃO DE ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

A Figura 36 demonstra as regiões da ZTA dos CP's processados termicamente onde foi realizado o ensaio de microdureza (mesma região embutida e vista no ensaio metalográfico), a fim de analisar o comportamento desta propriedade mecânica ao longo da superfície afetada.

Figura 36 – Regiões da ZTA submetidas ao ensaio de microdureza



Fonte: A Autora (2020).

Percebe-se que para a região afetada pelo corte a *laser* CO₂, foi utilizada uma distância de varredura menor para melhor avaliá-la, pois a ZTA formada através deste processamento térmico foi menos espessa. As Tabelas 4 e 5 demonstram os valores de dureza encontrados nas regiões de ZTA dos CP's processados a plasma e *laser* CO₂, respectivamente, e as Figuras 37 e 38 estes mesmos valores na forma de gráficos.

Tabela 4 – Valores de microdureza encontrados na ZTA pelo corte a plasma

Distância (mm)	Dureza (HV)
0,3	535
0,6	522
0,9	567
0,95	506

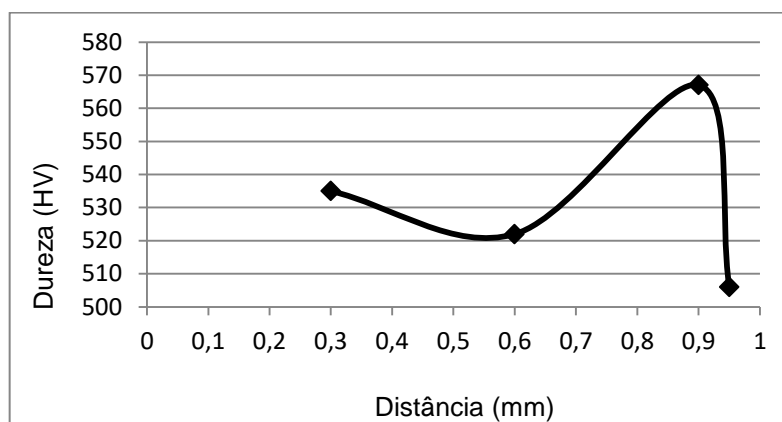
Fonte: A Autora (2020).

Tabela 5 – Valores de microdureza encontrados na ZTA pelo corte a *laser* CO₂

Distância (mm)	Dureza (HV)
0,3	522
0,6	527
0,7	450
0,75	400

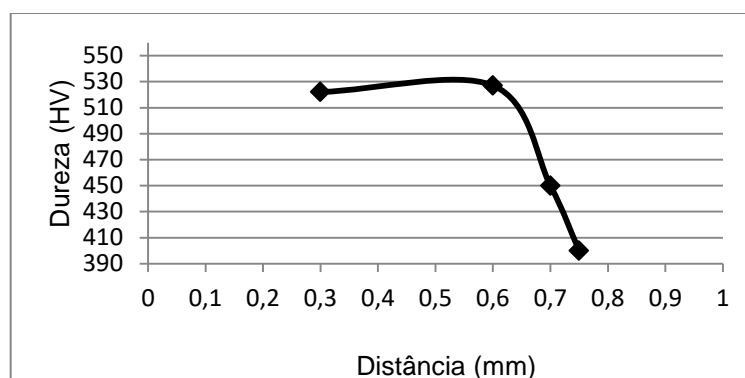
Fonte: A Autora (2020).

Figura 37 – Relação entre dureza versus distância da borda para a ZTA formada após o processamento a plasma



Fonte: A Autora (2020).

Figura 38 – Relação entre dureza versus distância da borda para a ZTA formada após o processamento a *laser* CO₂



Fonte: A Autora (2020).

Para fins de avaliação e comparação foi confirmado através do método de ensaio de dureza de Rockwell que o metal base de aço carbono ASTM A570 Grau-36 possui 79 HRB de dureza. Posteriormente, utilizando o *software* Uconeer, converteu-se esse valor para HV e obteve-se um valor de aproximadamente 146 HV, sendo este o valor de dureza característico do material base que não foi afetado pelos processamentos térmicos.

O aquecimento e resfriamento intenso na superfície devido aos cortes térmicos traz mudanças na microestrutura da mesma, podendo provocar possíveis transformações de fase. Após os processamentos de corte, verificou-se uma dureza superior na ZTA quando comparada ao material base. Conrado (2014) também avaliou a microdureza na ZTA após processamentos térmicos em materiais de aço

carbono e percebeu que os valores decresciam à medida que se afastava da região afetada pelos cortes. Isto é, próximo à região de corte, os valores de dureza eram maiores. Através de seus estudos, relacionou esse aumento devido à formação de uma fase martensítica que se dá na região de ZTA. Além disso, observou que a velocidade (avanço) do corte influencia no aumento e na diminuição da dureza, uma vez que variando esse parâmetro poderia ser afetada de forma significativa esta propriedade.

De maneira semelhante, Perini (2008) também observou um aumento na dureza entre o material base e a ZTA e atribuiu esse fenômeno à fase martensítica gerada durante os processamentos térmicos devido ao rápido resfriamento que ocorre nessa região. Dessa forma, sendo como característica da fase martensítica a elevada dureza, observa-se crescimento desta propriedade mecânica na região de ZTA analisada.

4.4 ENSAIO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA PROCESSADOS TERMICAMENTE

Realizou-se o ensaio nas regiões de centro e de borda das superfícies de aço carbono, a fim de comparar a influência dos cortes térmicos na rugosidade do material. As Tabelas 6 e 7 ilustram os valores de rugosidade (Ra) em μm encontrados para os CP's processados em plasma e *laser* CO₂, respectivamente.

Tabela 6 – Valores de rugosidade encontrados na superfície de aço carbono processada a plasma (Ra)

Região superficial em μm (centro)	Região superficial em μm (bordas)
0,39	0,50
0,56	0,64
0,69	0,47
0,43	0,56
0,46	0,45
Média = 0,506 μm	Média = 0,524 μm
Desvio padrão = 0,121 μm	Desvio padrão = 0,077 μm

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 7 – Valores de rugosidade encontrados na superfície de aço carbono processada a *laser* CO₂ (Ra)

Região superficial em μm (centro)	Região superficial em μm (bordas)
0,68	0,62
0,36	0,63
0,51	0,50
0,63	0,46
0,66	0,49
Média = 0,568 μm	Média = 0,540 μm
Desvio padrão = 0,134	Desvio padrão = 0,079

Fonte: A Autora (2020).

Segundo Gnecco e Fragata (2014), o perfil de rugosidade ao longo da região deve ser controlado, pois picos muito altos podem ultrapassar a camada de tinta e iniciar processos corrosivos. Entretanto, se a rugosidade for muito baixa, ou seja, a superfície estiver muito lisa, a tinta pode não aderir satisfatoriamente e, sem aderência do revestimento orgânico, também se inicia os processos de corrosão.

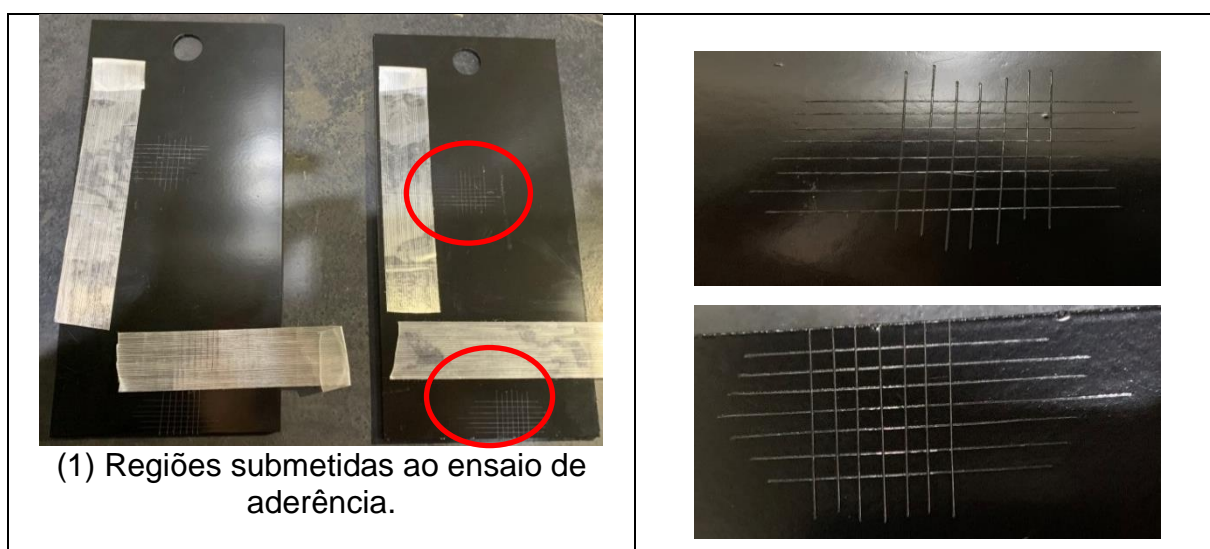
Ensaio e estudos feitos por Conrado (2014) apontam que o fator mais influente na rugosidade superficial é a pressão que o gás de corte exerce no material. Ou seja, quando valores altos de pressão são utilizados nos processos térmicos, tem-se variação e aumento significativo na rugosidade da superfície. Como para este trabalho em questão a pressão foi um fator não alterado, supõe-se que não houve influência da mesma na rugosidade dos CP's. O mesmo pode-se dizer dos demais parâmetros utilizados no corte.

Além disso, nota-se que, por serem corpos de prova de mesmo material, as rugosidades na região superficial do centro dos CP's são semelhantes em ambos os processamentos. Da mesma forma, as regiões de bordas não se diferem consideravelmente do centro da superfície, nem no processamento a plasma, nem no processamento a *laser* CO₂. Portanto, apesar de serem processos que utilizam elevadas temperaturas e que afetam significativamente, conforme ensaios anteriores, as regiões de bordas das superfícies metálicas, a rugosidade não foi um parâmetro que sofreu alterações com os dois tipos de corte.

4.5 ENSAIO DE ADERÊNCIA PELO MÉTODO EM GRADE DO REVESTIMENTO ORGÂNICO APLICADO NOS CORPOS DE PROVA

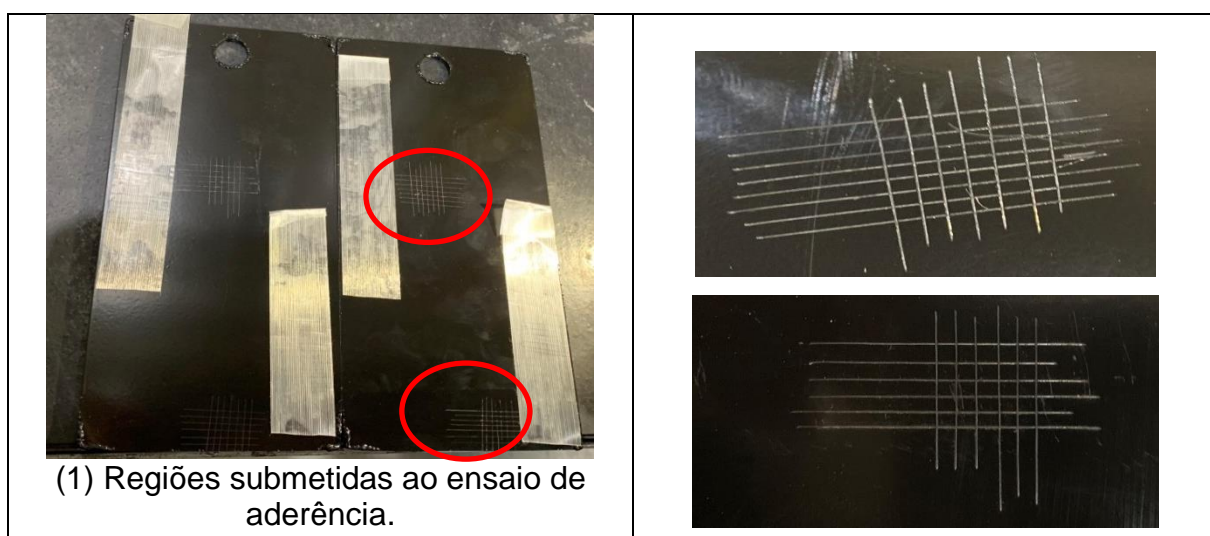
As Figuras 39 e 40 retratam a condição da camada de tinta seca depositada após o ensaio de aderência pelo método em grade nas regiões de centro e bordas dos CP's processados a *laser* CO₂ e a plasma, respectivamente, partindo do pressuposto que a espessura encontrada após pintura foi inferior a 70 µm. O ensaio foi realizado antes dos CP's serem expostos a névoa salina.

Figura 39 – Ensaio de aderência nos CP's revestidos e processados a *laser* CO₂



Fonte: A Autora (2020).

Figura 40 – Ensaio de aderência nos CP's revestidos e processados a plasma



Fonte: A Autora (2020).

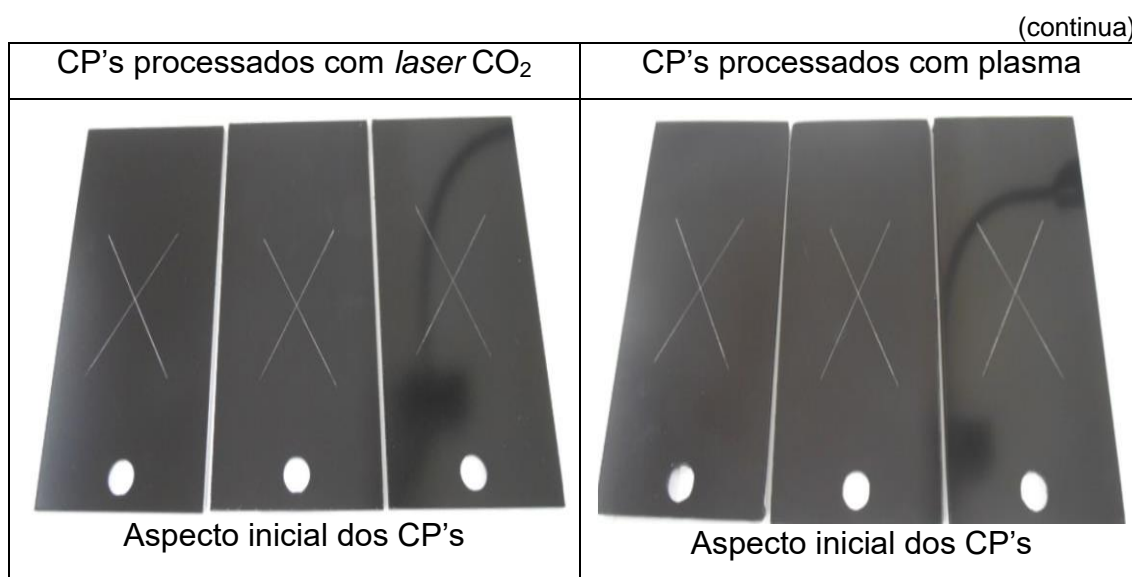
De acordo com o ensaio realizado avaliou-se que o grau de aderência do revestimento orgânico aplicado, tanto no centro, quanto nas extremidades dos corpos de prova se enquadra no Grau 0, ou seja, a película de tinta não apresentou nenhuma falha e nenhum tipo de destacamento, comprovando a eficácia da aderência do revestimento ao substrato metálico. Dickie (1994) relata em seus estudos que revestimentos eficazes só apresentam falhas de adesão quando submetidos a longos períodos de exposição em condições agressivas.

Dessa forma, pode-se dizer que para o ensaio em questão, após 72 horas de aplicação do pré-tratamento e do revestimento orgânico, os cortes térmicos não influenciaram na deposição do filme nas regiões de bordas. Ou seja, não houve perda de aderência da camada de tinta nessas áreas.

4.6 ENSAIO DE NÉVOA SALINA (*SALT SPRAY*) NOS CORPOS DE PROVA REVESTIDOS ORGANICAMENTE

Os CP's foram submetidos ao ensaio de névoa salina que durou aproximadamente 432 horas, a fim de verificar a resistência e o desempenho do revestimento orgânico aplicado na superfície, tanto na região de centro quanto na região de bordas e arestas. O Quadro 1 ilustra o comportamento do revestimento ao longo das horas em que estavam expostos os CP's processados termicamente a plasma e a *laser CO₂*.

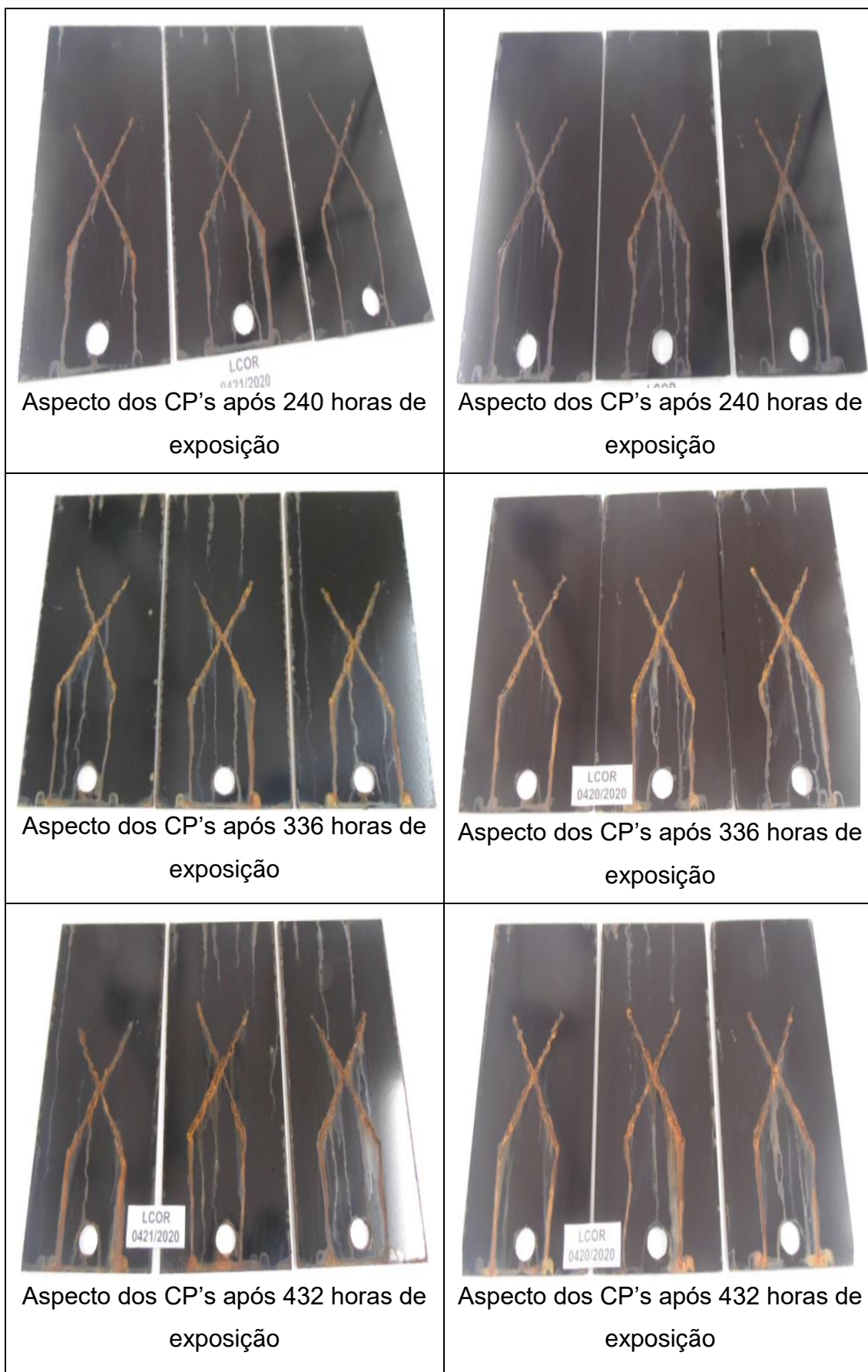
Quadro 1 – Comportamento do revestimento depositado nos CP's ao longo da exposição ao ensaio de névoa salina



(continua)



(conclusão)



Fonte: A Autora (2020).

A partir das primeiras 24 horas de ensaio pode-se verificar o aparecimento de corrosão vermelha nas incisões feitas no centro dos CP's, como já era esperado. Essa corrosão se intensificou com o passar das horas, iniciando nas regiões de bordas após 192 horas de exposição. Dessa forma, por meio das imagens, pode-se observar corrosão vermelha com escorrimento de produto de corrosão vermelha nas incisões das peças (centro) e também corrosão vermelha em várias regiões de borda (característico do processo corrosivo do Fe). Foi possível avaliar a condição de empolamento das superfícies revestidas e obteve-se empolamento grau oito pouco (8F) nas regiões de bordas e centro para ambos os processamentos térmicos.

De acordo com ensaios de exposição à névoa salina feitos por Pimenta e Gourlat-Santos (2016) também houve o aparecimento de produtos de corrosão vermelha em um aço carbono revestido. A presença dessa corrosão significa que o revestimento aplicado na superfície foi completamente consumido localmente e o substrato de aço carbono começou a ser corroído, levando a formação de óxidos de ferro (Fe_2O_3) que apresentam coloração avermelhada.

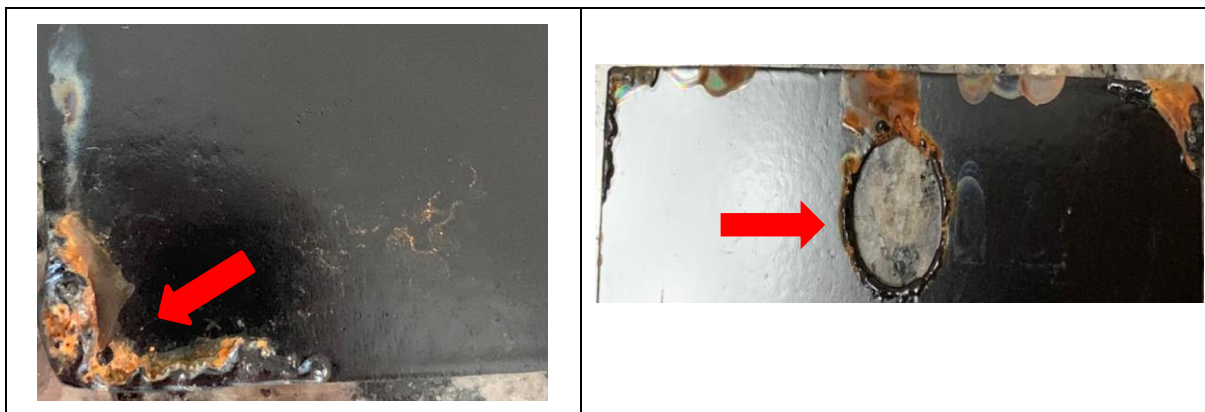
Segundo estudos feitos por Baldin (2013) a respeito de pré-tratamento nanocerâmico e revestimentos orgânicos pode-se dizer que o aparecimento de corrosão nas regiões superficiais de centro e borda dos CP's é devido à permeabilidade do revestimento. Isto é, as tintas são permeáveis à água e ao oxigênio, entretanto, fatores como tipo de substrato, características do revestimento aplicado, condição do tratamento superficial e interface metal/revestimento, são fatores que influenciam na condição de permeabilidade e comportamento na deposição do revestimento.

De acordo com o boletim técnico do fornecedor PPG (2012), a tecnologia de revestimento orgânico em *E-coat* Acrílico possui resistência à corrosão superior a 500 horas, o que não foi encontrado para o ensaio. Isto é, em menos de 432 horas de exposição, o revestimento já começou a apresentar aspectos expressivos de processo corrosivo, o que vai a detrimento ao que a tecnologia oferece. Pode-se atribuir essa condição às falhas na deposição do pré-tratamento químico e do revestimento orgânico, principalmente nas regiões de bordas que foram afetadas pelos processamentos térmicos a *laser* CO_2 e a plasma.

Pode-se perceber um comportamento semelhante nos CP's ensaiados com os dois tipos de corte, tanto no centro quando nas extremidades das superfícies. Entretanto, em algumas regiões específicas o processo corrosivo tem maior

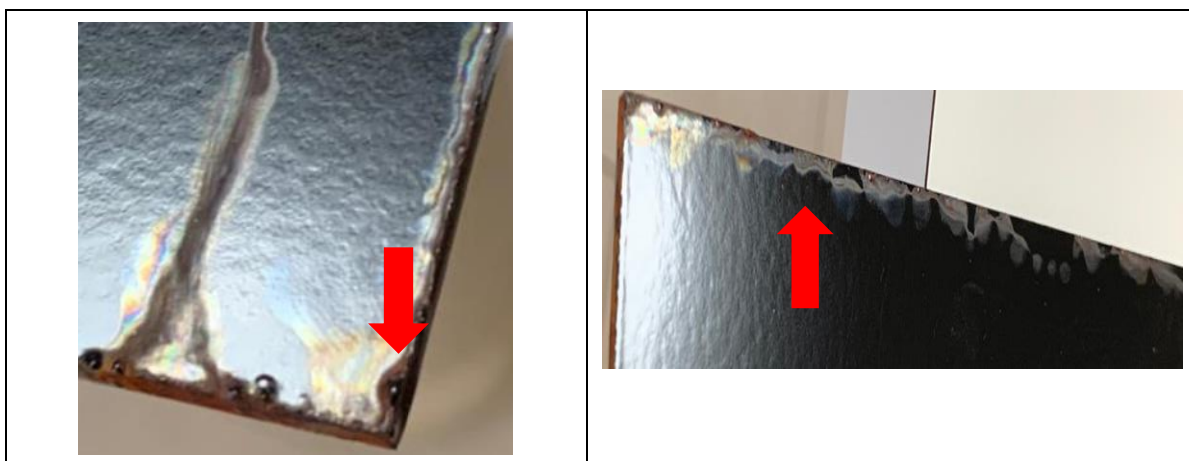
destaque nas superfícies submetidas aos cortes a *laser* CO₂ e em outras regiões esses defeitos tem maior expressividade nas áreas processadas a plasma. As Figuras 41 e 42 ressaltam as regiões de bordas e arestas mais afetadas nos CP's processados a plasma e *laser* CO₂, respectivamente.

Figura 41 – Regiões de bordas e arestas da superfície revestida após o corte a plasma



Fonte: A Autora (2020).

Figura 42 – Regiões de bordas e arestas da superfície revestida após o corte a *laser* CO₂



Fonte: A Autora (2020).

Percebe-se que as regiões de corte a plasma apresentam pontos maiores de corrosão nos cantos (arestas) da superfície após as 432 horas de exposição, uma vez que há formação de rebarbas durante o processamento térmico. Da mesma forma, durante o corte a *laser* CO₂, mesmo que em menor intensidade, também houve a geração de uma superfície irregular nessas áreas, dificultando a

uniformidade da deposição do revestimento e dando início a processos corrosivos. Sem proteção adequada e uniforme à superfície metálica, pode-se ter a penetração de contaminantes e iniciar pontos de corrosão.

Segundo estudos feitos por Dickie (1994), falhas na deposição do filme de tinta podem dar início a formação de corrosão nas bordas, assim como nas regiões onde há furações. Essas áreas desprotegidas tendem a permitir a entrada de eletrólitos e propagar a delaminação da tinta e, em alguns casos, até “levantar” o filme ao longo da superfície.

Conforme análises de MEV/EDS mostradas pode-se perceber que nessas regiões de borda há menor incidência na deposição do filme de pré-tratamento químico, situação que influencia diretamente na proteção anticorrosiva. Além disso, as regiões irregulares dificultam a deposição uniforme do pré-tratamento e da camada de tinta, ficando desprotegidas e iniciando os processos corrosivos. A presença de rebarbas, além da não uniformidade na deposição do pré-tratamento químico e da camada de tinta influenciam diretamente no desempenho da pintura, classificando, portanto, essas regiões de borda, como críticas para processos de pintura e revestimento.

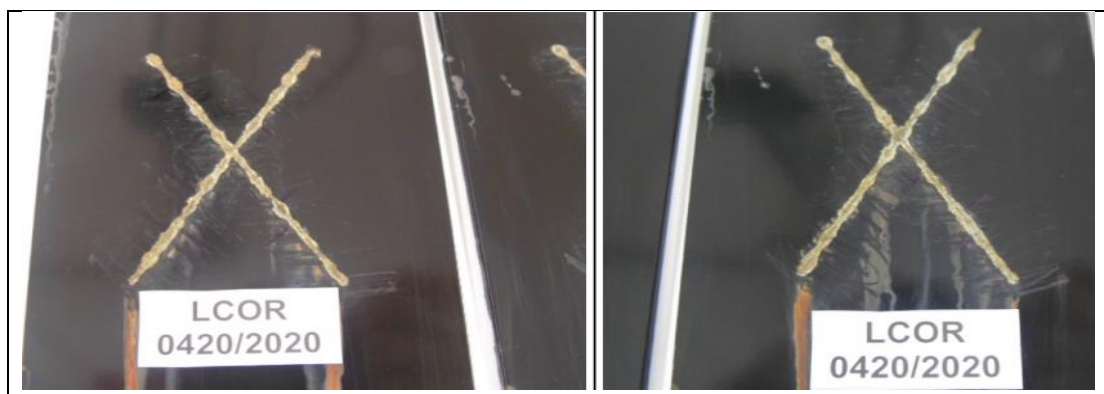
Outro fator determinante para a formação de processos corrosivos nas regiões de bordas superficiais revestidas foi a suposta presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) detectada pelas análises de MEV/FEG. Se o pré-tratamento químico não foi capaz de remover essa camada de óxido aderida na superfície, a película de tinta depositada tende a não aderir adequadamente no metal e, com o passar o tempo, essa carepa oxidada desprende-se do aço e causa deslocamento da tinta. Dessa forma, inicia-se os processos corrosivos.

Visando melhorar a proteção anticorrosiva da camada de tinta aplicada, pode-se atribuir uma investigação da condição do pré-tratamento depositado na superfície antes de receber o revestimento orgânico, uma vez que a grande maioria das causas de falhas prematuras em revestimentos, como o caso de processos corrosivos e empolamentos são decorrentes de algum tipo de erro na preparação da superfície (FAZENDA, 2009; GENTIL, 2011).

4.7 ENSAIO DE MIGRAÇÃO SUBCUTÂNEA NOS CORPOS DE PROVA REVESTIDOS ORGANICAMENTE

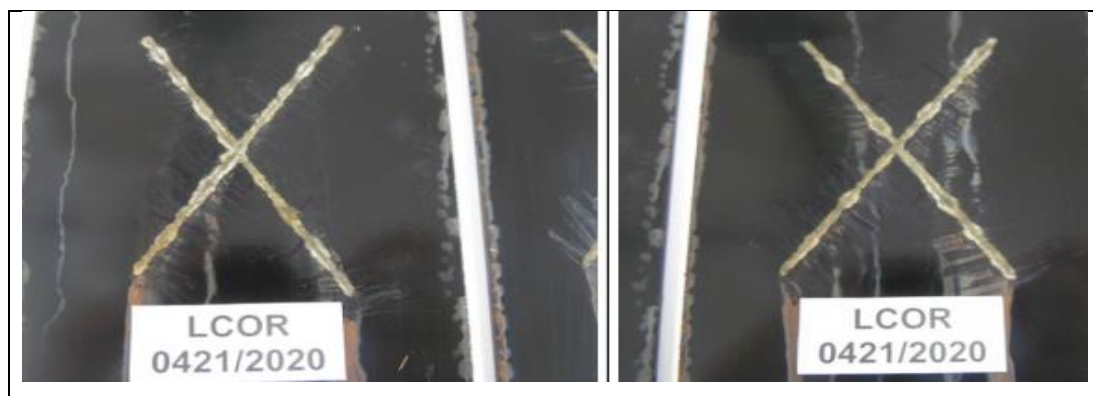
Após o tempo de 432 horas de exposição foi realizado o ensaio de migração subcutânea na incisão realizada no centro da superfície. As Figuras 43 e 44 ilustram a condição dos CP's após o ensaio.

Figura 43 – Aspecto da incisão dos CP's (corte térmico a plasma) depois do deslocamento para verificação da migração subcutânea



Fonte: A Autora (2020).

Figura 44 – Aspecto da incisão dos CP's (corte térmico a *laser* CO₂) depois do deslocamento para verificação da migração subcutânea



Fonte: A Autora (2020).

Como a região de centro das superfícies não é afetada pelos processos de cortes térmicos e recebeu a aplicação do mesmo pré-tratamento e do mesmo revestimento orgânico, observa-se semelhança na média de valores encontrados para o deslocamento da superfície revestida com tecnologia em *E-coat* Acrílico através do ensaio de migração subcutânea. Os valores máximo e mínimo encontrados e a média dos valores medidos para as amostras referentes ao processo de corte a plasma são:

- Média do deslocamento: 1,19 mm;
- Valor máximo encontrado: 2,30 mm;
- Valor mínimo encontrado: 0,52 mm;

Para as amostras referentes ao processo de corte a *laser* CO₂, os valores máximo e mínimo encontrados e a média dos valores medidos são:

- Média do deslocamento: 1,24 mm;
- Valor máximo encontrado: 1,75 mm;
- Valor mínimo encontrado: 0,65 mm;

De acordo com o boletim técnico do fornecedor PPG (2012) referente à tecnologia de revestimento orgânico em *E-coat* Acrílico, para até 500 horas de ensaio de *Salt Spray* pode-se ter de 0 a 3 mm de deslocamento da película de tinta. Portanto, para o presente ensaio realizado em 432 horas de exposição, o revestimento aplicado encontra-se dentro dos parâmetros especificados para a tecnologia. Ou seja, considera-se que houve pequena penetração de solução salina na interface do substrato com a camada de pré-tratamento nanocerâmico e o revestimento orgânico aplicado, indicando um bom desempenho do revestimento.

4.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Para fins de entendimento geral dos resultados obtidos através dos ensaios e das análises realizadas nos CP's, o Quadro 2 descreve, de forma resumida, os principais aspectos e as principais características abordadas e discutidas neste Capítulo.

Quadro 2 – Resumo dos resultados obtidos através das análises e dos ensaios realizados

(continua)

Ensaio/Análise	Resultados
MEV/FEG	<p>Formação de micro trincas na região de borda dos materiais metálicos em ambos os processamentos térmicos;</p> <p>Falhas na deposição do pré-tratamento químico e do revestimento orgânico (poros) nas regiões de borda em ambos os processamentos térmicos.</p>
MEV/EDS	<p>Composição do material base dos CP's (Fe e C);</p> <p>Deposição e composição do pré-tratamento químico depositado (Zr e Cu) nas regiões de borda, entretanto Cu apenas presente nas bordas processadas a <i>laser</i> CO₂;</p> <p>Suposta formação de Fe₂O₃ e ZrO₂ nas regiões de borda em ambos os processamentos térmicos.</p>
Metalografia	<p>Formação de uma zona térmica afetada (ZTA) em ambos os processamentos térmicos;</p> <p>Transformação na microestrutura do aço carbono (material base), indicando a formação de uma fase composta por agulhas martensíticas na ZTA em ambos os processamentos térmicos.</p> <p>CP's processados a plasma apresentaram espessura de ZTA superior que os processados a <i>laser</i> CO₂</p>
Microdureza	<p>Aumento na dureza entre a região de material base e a ZTA devido à formação de agulhas martensíticas, em ambos os processamentos térmicos;</p> <p>CP's processados a plasma apresentaram ZTA com valores maiores de dureza que os processados a <i>laser</i> CO₂.</p>
Rugosidade Superficial	<p>De acordo com os parâmetros de corte utilizados, esta propriedade não foi afetada em nenhum CP processado termicamente.</p>

(conclusão)

Aderência	<p>Não houve deslocamento da camada de tinta nos centros nem nas bordas das superfícies revestidas;</p> <p>Grau de aderência 0, indicando bom desempenho do revestimento orgânico após 72 horas de deposição da camada de tinta seca;</p> <p>Os CP's apresentaram comportamento semelhante quanto a aderência do revestimento em ambos os processamentos térmicos.</p>
Névoa Salina	<p>Exposição à névoa salina por 432 horas;</p> <p>Empolamento grau oito pouco (8F) nas regiões de bordas e centro em todos os CP's ensaiados;</p> <p>Formação de produto de corrosão vermelha no centro (incisão) nas primeiras 24 horas de ensaio e nas bordas/arestas dos CP's após 192 horas de ensaio;</p> <p>O revestimento orgânico não atendeu a especificação prescrita no boletim técnico sobre o tempo de exposição da camada de tinta ao ensaio de névoa salina;</p> <p>Os CP's apresentaram comportamento semelhante quanto à névoa salina em ambos os processamentos térmicos;</p>
Migração Subcutânea	<p>Média do deslocamento para os CP's processados a plasma: 1,19 mm;</p> <p>Média do deslocamento para os CP's processados a <i>laser</i> CO₂: 1,24 mm;</p> <p>O revestimento orgânico atendeu a especificação prescrita no boletim técnico sobre deslocamento da camada de tinta.</p>

Fonte: A Autora (2020).

5 CONCLUSÃO

As avaliações realizadas neste trabalho comprovam que os processamentos térmicos a *laser* CO₂ e plasma apresentam influências nas regiões de bordas superficiais. A partir do estudo conduzido e dos resultados obtidos, podem ser apontadas as conclusões apresentadas a seguir.

Observou-se pelas análises de MEV/FEG a existência de microtrincas e falhas na deposição do pré-tratamento químico e do revestimento orgânico, com presença de poros nas regiões de borda em ambos os processamentos térmicos a *laser* CO₂ e a plasma.

Percebeu-se a formação de uma ZTA de espessura e dureza superiores nos CP's submetidos ao processamento térmico a plasma quando comparado ao processamento a *laser* CO₂. As regiões afetadas foram caracterizadas pela presença de agulhas martensíticas nos dois métodos de corte industrial.

Não houve, por parte dos cortes térmicos, influência na rugosidade superficial dos CP's. Valores semelhantes de rugosidade (R_a) foram encontrados tanto no centro da superfície quanto nas regiões de bordas.

Houve empolamento grau oito pouco (8F) nas regiões de borda superficial e nas regiões de centro, em ambos os processamentos térmicos. Ademais, todos os CP's submetidos ao teste de aderência apresentaram grau de aderência 0 após 72 horas de deposição da camada de tinta seca.

Percebeu-se formação de produto de corrosão vermelha no centro (incisão) nas primeiras 24 horas de ensaio e nas bordas/arestas dos CP's após 192 horas de ensaio em ambos os processamentos térmicos. O ensaio de névoa salina foi interrompido após 432 horas de exposição, devido ao processo corrosivo avançado que os CP's expostos apresentaram neste intervalo de tempo.

A média do deslocamento para os CP's processados a plasma foi de 1,19 mm, enquanto que a média do deslocamento para os CP's processados a *laser* CO₂ foi de 1,24 mm, atendendo às especificações do fornecedor para o tempo de 432 horas de exposição em ensaio de névoa salina.

Com a intenção de comparar o desempenho dos dois métodos de cortes realizados, percebe-se que o processamento térmico a plasma afetou mais a região de borda, uma vez que gerou uma ZTA mais espessa e de maior dureza. Da mesma forma, observou-se visualmente a elevada geração de rebarbas nas bordas e

arestas desse tipo de corte, condição indesejada para processos industriais que necessitam de bom acabamento das peças.

Em suma, vale ressaltar a importância de se avaliar qual o melhor método de corte para a empresa, pois todas as variáveis (custos, produtividade, acabamento superficial, qualidade de borda e etc.) são relevantes para a melhor escolha do processamento. Para este trabalho, de acordo com as avaliações realizadas, o corte a *laser* CO₂ apresentou melhor condição para o processo industrial, principalmente na questão de acabamento e qualidade de borda, uma vez que são parâmetros indispensáveis, pois as peças cortadas passarão por processos subsequentes de montagem e necessitam de excelente qualidade superficial para evitar não conformidades nos produtos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros na área de pesquisa sobre cortes térmicos industriais, pré-tratamento químico e revestimento orgânico, pode-se sugerir os seguintes tópicos:

- I. Avaliar a quantidade e o tamanho das rebarbas geradas pelos dois processamentos térmicos estudados;
- II. Realizar a avaliação dos cortes térmicos a *laser* CO₂ e a plasma variando parâmetros de processo, como velocidade (avanço), potência, pressão do gás de assistência, entre outros;
- III. Comparar os cortes térmicos com outros tipos de corte, como *laser* de fibra e oxicorte;
- IV. Investigar os processos a *laser* CO₂ e plasma utilizando outros tipos de aço carbono;
- V. Comparar o desempenho quanto à proteção anticorrosiva, principalmente nas regiões de bordas, com outra tecnologia de revestimento.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A570 – 79**: Standard specification for hot-rolled carbon steel sheet and strip, structural quality. West Conshohocken, PA. 03 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B117 – 19**: Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. West Conshohocken, PA, 2019. 11 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D714 – 02**: Standard test method for evaluating degree of blistering of paints. West Conshohocken, PA. 06 p.
- ASM International. **Metals Handbook**. 9ª ed. Metallography and microstructures: ASM International, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO NBR 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) – rugosidade: método do perfil – regras e procedimentos para avaliação da rugosidade. Rio de Janeiro, 2008. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8094**: Material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição à névoa salina. Rio de Janeiro, 1983. 03 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8095**: Material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição à atmosfera úmida saturada – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015. 03 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8754**: Corpos-de-prova revestidos e expostos a ambientes corrosivos – método de avaliação. Rio de Janeiro, 1985. 03 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11003**: Tintas – determinação da aderência. Rio de Janeiro, 2009. 09 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13284/95**: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro, 1995. 03 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM ISO 6507-1**: Materiais metálicos - ensaio de dureza Vickers. parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008. 30 p.
- BALDIN, E. K. K. **Pré-tratamento do aço carbono AISI 1010 com revestimentos nanocerâmicos para pintura à base de resina poliéster**. Orientadora: Prof. Dra. Célia de Fraga Malfatti. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

BARÉNYI, I. Microstructure changes in cut face obtained by plasma and laser cutting of selected high strength steels. **UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering**, [S.l.] . v. 78. p. 234-240. Slovakia, 2016.

BASTOS, G. L.; GOETZ, C. M. Estudo da decapagem da carepa utilizando ácido clorídrico e sulfúrico em perfis de aço carbono A-570. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 53., 2013. **Anais [...]** Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2013/trabalhos/9/2503-14145.html>. Acesso em: 04 abr. 2020.

BEM, P.P. T. de. **Minimização do efluente gerado em pré-tratamento de pintura automotiva: um caso industrial**. Orientador: Profa. Dra. Maria José Jerônimo de Santana Ponte. 2008. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

BENFICA, R. A. *et al.* Avaliação da eficiência dos nanocerâmicos na resistência à corrosão de placas automobilísticas de aço carbono. Pós em Revista, Belo Horizonte, v.13, n.2, p.46-54, 2016.

BOSSARDI, K. **Nanotecnologia aplicada a tratamentos superficiais para o aço carbono 1020 como alternativa ao fosfato de zinco**. Orientador: Profa. Dra. Jane Zoppas Ferreira. 2007. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

BRITO, P.; CENZI, I. **Especificação técnica dos processos de pré-tratamento & pintura e-coat catódica acrílica**. 2. rev. 17 f. Sumaré, São Paulo, 2019.

BRUNO, G. U. **Avaliação da degradação natural e acelerada de revestimentos orgânicos**. Orientador: Prof. Dr. Álvaro Meneguzzi. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

CALLISTER, JR., W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARISTAN, C.L. **Laser cutting guide for manufacturing**. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2004.

CASTRO, B. B. **Falhas em aços alto carbono devido a danos de corte por plasma e laser**. Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade. 2019. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019.

CHENG *et. al.* Experimental study and computer simulation of fracture toughness of sheet metal after laser forming. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.], v. 26, p. 1222–1230, 2005.

CONRADO, R. D. **Efeitos do corte por laser sobre a integridade superficial de um aço médio carbono**. Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2009.

COSTA, S. A. M.; FAEZ, R. Implantação do sistema de recuperação de tintas em banho de lavagem de pintura por eletrodeposição. *In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 10.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS GRADUAÇÃO, 4., 2011, São José dos Campos. **Anais [...]**. São Paulo: Universidade do Vale da Paraíba, 2011. p. 356-359.

DAHOTRE, B. N.; HARIMKAR. P. S. **Laser fabrication and machining of materials**. Springer Science, 2008.

DAVIM, J.P. **Surface integrity in machining**. Springer: Londres, 2010.

DIAS, M.B. **Proposta de desenvolvimento de uma máquina de corte a laser para facilitar a prototipagem**. 2015. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília. Brasília, 2015. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13610/1/2015_MatheusBorgesDias.pdf. Acesso em: 02 maio. 2020.

DICKIE, R.A. Paint adhesion, corrosion protection and interfacial chemistry. **Progress in Organic Coatings**, [S.l.], v. 25, n.1, p. 3-22, Oct. 1994.

DOSSEL, K. F.; STREITBERGER, H. J. **Automotive paints and coatings**. 2 ed. Weinheim, Alemanha: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2008.

ELECTROCOATING. **A guidebook for finishers**. 1. ed. Cincinnati: The Electrocoat Association, 2002.

EROĞLU, M.; AKSOY, M. Effect of initial grain size on microstructure and toughness of intercritical heat-affected zone of a low carbon steel. **Materials Science and Engineering: A**, [S.l.], v.286, n.2, p. 289-297, July 2000.

FATOR BRASIL. **Brasil perde 4% do PIB com corrosão, diz estudo**. 22 dez 2016. Disponível em: https://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=334281. Acesso em: 26 abr. 2020.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas: ciência e tecnologia**. 4. ed. rev. e ampl. São Paulo, SP: Blücher, 2009.

FERREIRA, C. A. M. **Influência de sais insolúveis de carbonato precipitados no controle da corrosão de estruturas enterradas de aço carbono sob proteção catódica**. Orientador: José Antônio da Cunha Ponciano Gomes. 2010. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

FONSECA, S. K. *et al.* Caracterização e avaliação dos revestimentos poliméricos obtidos a partir de blends binária e ternária: PDMA/PVDF e PDMA/PVDF/CO-

PTFE. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS. 10., 2009. Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: ABpol. 2009. Disponível em: <https://222.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/1325.pdf>. Acesso em: 01. Abr. 2020.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GEHRKE, I. **Estudo do efeito da normalização no fresamento de superfícies cortadas a plasma em aço ABNT 1045**. Orientador: Prof. Dr. Gil M. P. Chagas. 2019. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Fabricação Mecânica) – Instituto Federal de Santa Catarina. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2019.

GERCK, E.; LIMA, J. L. O corte a laser: da teoria à máquina. *In*: INTERNATIONAL SEMINAR “LÁSERES: USOS Y APLICACIONES INDUSTRIALES”. 97., 1997. Cidade do México. **Anais** [...]. México: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 1997. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287108885_O_corte_a_laser_da_teor_a_maquina_tutorial. Acesso em: 05. Set. 2020.

GNECCO, C.; FRAGATA, F. Perfil de rugosidade de superfícies de aço carbono x espessura de tintas e de esquemas de pintura - um tema importante para ser debatido. *In*: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PINTURA ANTICORROSIVA. 2., 2014, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBPA. 2014. Disponível em: <http://www.abraco.org.br/src/uploads/2017/09/Perfil-de-Rugosidade-de-Superfcies-de-Ao-carbono-x-Espessura-de-Tintas-e-de-Esquemas-de-Pintura-Um-Tema-Importante-para-Ser-Debatido.pdf>. Acesso em: 29. Set. 2020.

GOLDSTEIN, Joseph et al. **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis**. New York: Plenum Publishers, 2003. 689 p.

HUGHES, E. A. *et al.* **Active protective coatings: new-generation coatings for metals**. v. 233. Springer Series in Materials Science, 2016.

KELLENS, K. *et al.* Energy and resource Efficiency of laser cutting process. **Physics Procedia**, [S.l.] v.56, p. 854-864, 2014.

KRAJCARZ, D. Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting. **Procedia Engineering**. [S.l.] v.69. p. 838-843. dec. 2014. *In*: DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION. 24., 2014. Kielce, Poland.

LAURO, C. H. *et al.* Influência da variação do tamanho de grão austenítico na qualidade superficial no processo de microfresamento do aço AISI H13 endurecido. **Revista Matéria**,-Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, jul./set. 2014.

LEIDHEISER JR, H. Corrosion of painted metals: a review. **Corrosion the Journal of Science & Engineering**, [S.l.], v. 38, p. 374-383, July 1982.

MONTAGNOLI, V. Filtração em linhas de pintura por eletrodeposição. **Revista Meio Filtrante**, Santo André, v. 17, p. 1, ano 4, nov./dez. 2005.

MOREIRA, M. P. **Avaliação de um trocador de calor utilizado no aquecimento de água de desengraxa**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini. 2015. 79 f. Relatório (Estágio em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2015.

NUNES, L. D. P.; LOBO, A. C. O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2007.

OLIVEIRA, A. R. de. **Corrosão e tratamento de superfície**. 104 f. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Belém, Pará. 2012. Disponível em: http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/corr_trat_superf/161012_corr_trat_superf.pdf. Acesso em: 04 jul. 2020.

PERINI, G. F. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. Orientador: Prof. Dr. Gabriel Vieira Santos. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2008.

PIMENTA, E. P. da S.; GOURLAT-SANTOS, S. Resistência à corrosão de aços revestidos com zinco submetidos ao teste em câmara de névoa salina. *In*: INTERCORR., 2016, Buzios. **Anais** [...]. Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2016/INTERCORR2016_074.pdf. Acesso em: 19. out. 2020.

PIMENTA, S. W. **Estudo comparativo entre os processos de corte plasma e jato d'água para chapa de aço inoxidável de 1" utilizado na construção de máquinas especiais**. 2013 49 f. Monografia (Pós Graduação em Engenharia de Soldagem) - Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, 2013.

POELMAN, M. et al. Electrochemical study of the corrosion behaviour the edges of electrocoated steel. **Progress in Organic Coatings**, [S.l.], v. 74, p. 453-460, July 2012.

POWELL, J. **CO₂ laser cutting**. 2 ed. Springer: Londres, 1998.

PPG INDUSTRIAL COATINGS. Treinamento sobre pintura e-coat módulo I: tipos de e-coat. **2016. 41 slides. color**.

ROBERGE, P. R. **Handbook of corrosion engineering**. McGraw-Hill, 1999.

SANTOS, L. C. **Estudo da decapagem da superfície do aço através da imersão ácida**. 20--?. 11 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Química). Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/tcc_1.pdf. Acesso em: 04 abr. 2020.

SCHWEITZER, P. A. **Paint and coatings: applications and corrosion resistance**. Taylor & Francis Group. 2006.

SOARES, B. B. **A utilização do modelo de simulação computacional para análise e modificação de um sistema de produção de pinturas automotivas.**

Orientador: Prof. Dr. Joanir Luís Kalnin. 2013. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2013.

STEIN, T.R. *et al.* **Tecnologia dos materiais.** Porto Alegre, RS: Sagah. 2019.

TELLES, P. C. da S. **Materiais para equipamentos de processo.** Rio de Janeiro: Interciência LTDA, 1976.

TESTA, A. Camadas de conversão nanocerâmicas. **Tratamento de Superfície.** São Paulo, n. 130. v.25, p. 38-43, 2005.

URTADO, E. **Corte e goivagem pelo processo plasma.** Volta Redonda. 50 slides, color. (20--?).

UTECH, B. **A guide to high-performance powder coating.** Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2002.

VASQUES, R.B. **Avaliação da resistência à corrosão do aço carbono com revestimento nanocerâmico à base de zircônio.** Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo. 2016. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

VILLAS, A. R. M.; MAINIER, B. F. Processo de deposição de tintas catódicas por eletroforese e suas correlações com a qualidade e o meio ambiente. *In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA – SEGeT, 2., 2005, Resende. Anais [...].* Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2005. p. 646-655. Disponível em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos05/261_Tinta.pdf. Acesso em: 02 abr. 2020.

VITOR, S. A. *et al.* Processo de pintura e revestimento superficial *e-coat*. **Revista Pesquisa e Ação.** Mogi das Cruzes, v. 4, n.1, p. 101-105, maio 2018.

WICKS JR, W. Z. *et al.* Organic coatings: science and technology. 3. ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2007. p. 121-144.

ZARO, G. **Revestimento nanocerâmico à base de Zr e Zr/Ti como pré-tratamento em aço galvanizado.** Orientador: Profa. Dra. Jane Zoppas Ferreira. 2010. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.