

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JONATHAS LUCIANO DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS TEMPO E DENSIDADE DE
CORRENTE NAS PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS
GALVANIZADOS ELETROLITICAMENTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

JONATHAS LUCIANO DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS TEMPO E DENSIDADE DE
CORRENTE NAS PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS
GALVANIZADOS ELETROLITICAMENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

CURITIBA
2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS TEMPO E DENSIDADE DE CORRENTE NAS PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS GALVANIZADOS ELETROLITICAMENTE, realizado pelo aluno Jonathas Luciano de Oliveira, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova
Departamento de Engenharia Mecânica, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Euclides Alexandre Bernardelli
Departamento de Engenharia Mecânica, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Eduardo Mauro do Nascimento
Departamento de Engenharia Mecânica, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 5 de julho de 2016.

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso (ou Programa)

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, em especial:

- À UTFPR, por possibilitar um ambiente de intenso aprendizado e formação profissional;
- Ao professor, orientador e amigo, Rodrigo Lupinacci Villanova, pela energia e disposição sempre presente, pelas diversas conversas sobre o tema, pelo interesse constante em orientar e ajudar;
- Às empresas ZincoFer Zincagem Ltda e Nova Era Galvanização Ltda, por fornecer produtos e assessoria;
- Aos professores Júlio Neves e Paulo Borges e ao técnico laboratorial Alexandre Gonçalves, que me ajudaram, transmitindo conhecimentos e ensinamentos;
- Ao Grupo de Materiais (GrMat) da UTFPR, por ceder os laboratórios, inclusive nos finais de semana, para execução dos experimentos;
- Aos amigos que sempre estiveram torcendo pelas minhas conquistas;
- Aos meus irmãos, Débora e Dário, pelo companheirismo e amizade;
- Aos meus pais, Jesus e Maria, pela compreensão e apoio durante todo o período de graduação;
- À minha namorada, Tania, pela amizade, apoio, incentivo, compreensão e paciência que tem para comigo;

"Begin at the beginning,"the King said, very gravely, "and go on till you come to the
end: then stop."

Lewis Carroll, Alice in Wonderland

RESUMO

OLIVEIRA, Jonathas Luciano. INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS TEMPO E DENSIDADE DE CORRENTE NAS PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS GALVANIZADOS ELETROLITICAMENTE. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O processo de eletrodeposição metálica é amplamente utilizado pela indústria para obtenção de peças que possuam características decorativas, resistência à abrasão e corrosão, entre outras. A chamada zincagem é um dos processos de eletrodeposição que tem por objetivo a formação de uma camada de conversão de zinco que atuará como metal de sacrifício quando depositada sobre ligas de ferro, por exemplo. Para uma melhor qualidade de revestimento, é necessário compreender como determinadas variáveis atuam durante a eletrodeposição. Levando isto em consideração, este trabalho se propôs a analisar as variáveis tempo (5, 10 e 15 minutos) e densidade de corrente (0,8, 1,0 e 1,2 A/dm²), no processo de galvanização eletrolítica utilizando zinco metálico, e as consequências da variação desses parâmetros na espessura de camada, microdureza, adesão e características topográficas superficiais. Para os experimentos foram utilizadas amostras de aço SAE 1010 que passaram pelo mesmo processo de preparação, de forma a obter menor dispersão nos valores obtidos. Os resultados obtidos relacionam tempo e densidade de corrente com espessura e microdureza. Ao observar as micrografias eletrônicas, tem-se uma homogeneidade em todas as condições experimentais, resultado este vinculado ao pré tratamento nas amostras. Todos os experimentos obtiveram um aumento da espessura de camada com o tempo e com o aumento da densidade de corrente, porém para algumas configurações de *set up* a camada se mostrou mais compacta, enquanto para as com alta densidade de corrente houveram porosidade e trincas. As análises de microdurezas decaem com o aumento da espessura, contudo os valores obtidos podem ter tido grande influência nos experimentos em que a camada possuíam regiões porosas. Além disso, não foi possível obter relação coerente entre as variáveis manipuladas e ensaio de riscamento devido a baixa carga aplicada e rugosidade da amostra.

Palavras-chave: Eletrodeposição, revestimento, corrosão, zinco.

LISTA DE SIGLAS

SAE	Society of Automotive Engineers
PNB	Produto Nacional Bruto
US\$	<i>United States Dollar</i>
AISI	American Iron and Steel Institute
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
EDS	Energy-Dispersive Spectroscopy
GrMat	Grupo de Materiais
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Comparação do consumo <i>per capita</i>	16
Figura 2.1 – Exemplo de peça com corrosão catódica.	18
Figura 2.2 – Exemplo de peça metálica com proteção catódica.	18
Figura 2.3 – Modelo básico de uma célula de eletrodeposição	19
Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de eletrodeposição com anodo solúvel.	20
Figura 2.5 – Representação esquemática do processo de eletrodeposição com anodo insolúvel.	20
Figura 2.6 – Peça galvanizada com manchas provocadas por impurezas.	21
Figura 2.7 – Ilustração esquemática para posicionamentos de material não condutor para diminuir região de alta densidade de corrente na peça.	22
Figura 2.8 – Ilustração esquemática para posicionamento do ânodo para eletrodeposição no interior de peças tubulares.	22
Figura 3.1 – Fluxograma do processo de galvanização eletrolítica.	27
Figura 3.2 – Geometria e principais dimensões das amostras.	29
Figura 4.1 – Variação da Tensão <i>vs</i> tempo nos experimento 1, 2 e 3.	33
Figura 4.2 – Variação da Tensão <i>vs</i> tempo nos experimentos 4, 2 e 5.	34
Figura 4.3 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 4. Ampliação 10000x.	35
Figura 4.4 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 2. Ampliação 10000x.	36
Figura 4.5 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 5. Ampliação 10000x.	36
Figura 4.6 – Espessuras mensuradas no MEV	38
Figura 4.7 – Espessura de camada <i>versus</i> tempo	38
Figura 4.8 – Espessuras mensuradas no MEV	39
Figura 4.9 – Espessura de camada <i>versus</i> densidade de corrente	40
Figura 4.10–Micrografia eletrônica da seção transversal de amostra do experimento 3 com presença de trincas.	41
Figura 4.11–Gráfico de pontos de dureza Vickers nos experimentos 1, 2 e 3.	42
Figura 4.12–Gráfico de pontos de dureza Vickers nos experimentos 4, 2 e 5.	42
Figura 4.13–Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 1	43
Figura 4.14–Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 2	44
Figura 4.15–Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 3	45
Figura 4.16–Micrografia eletrônica sobre o risco do experimento 1 com falha do tipo flambagem.	46
Figura 4.17–Micrografia eletrônica sobre o risco do experimento 2 com falha do tipo flambagem.	47

Figura 4.18–Exemplo de espessura de camada de conversão. Amostra 1, experimento 4.	47
Figura A.1–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra em estado de fabricação.	53
Figura A.2–Parâmetros de rugosidade da amostra em estado de fabricação.	53
Figura A.3–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra em estado de fabricação.	54
Figura A.4–Parâmetros de rugosidade da amostra em estado de fabricação.	54
Figura A.5–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra em estado de fabricação.	55
Figura A.6–Parâmetros de rugosidade da amostra em estado de fabricação.	55
Figura A.7–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra após decapagem.	56
Figura A.8–Parâmetros de rugosidade da amostra após decapagem.	56
Figura A.9–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra após decapagem.	57
Figura A.10–Parâmetros de rugosidade da amostra após decapagem.	57
Figura A.11–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra após decapagem.	58
Figura A.12–Parâmetros de rugosidade da amostra após decapagem.	58
Figura A.13–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra lixada.	59
Figura A.14–Parâmetros de rugosidade da amostra lixada.	59
Figura A.15–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra lixada.	60
Figura A.16–Parâmetros de rugosidade da amostra lixada.	60
Figura A.17–Modelagem via interferômetro da superfície da amostra lixada.	61
Figura A.18–Parâmetros de rugosidade da amostra lixada.	61
Figura B.1–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.	62
Figura B.2–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.	63
Figura B.3–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.	63
Figura B.4–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.	64
Figura B.5–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.	64
Figura B.6–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.	65
Figura B.7–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 2.	65
Figura B.8–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 2.	66
Figura B.9–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 2.	66
Figura B.10–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 2.	67
Figura B.11–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 3.	67
Figura B.12–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 3.	68
Figura B.13–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 3.	68
Figura B.14–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 3.	69
Figura B.15–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 4.	69
Figura B.16–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 4.	70

Figura B.17–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 4.	70
Figura B.18–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 4.	71
Figura B.19–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 5.	71
Figura B.20–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 5.	72
Figura B.21–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 5.	72
Figura B.22–Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 5.	73
Figura B.23–Micrografia eletrônica da amostra após decapagem.	73
Figura B.24–Micrografia eletrônica da amostra após decapagem.	74
Figura B.25–Micrografia eletrônica da amostra após decapagem.	74
Figura B.26–Micrografia eletrônica da amostra após decapagem.	75
Figura C.1 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 1.	76
Figura C.2 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 2.	77
Figura C.3 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 3.	77
Figura C.4 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 4.	78
Figura C.5 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 5.	78
Figura D.1 – Relatório do EDS na amostra 1, experimento 1.	80
Figura D.2 – Relatório do EDS na amostra 1 sobre mancha, experimento 1.	81
Figura D.3 – Relatório do EDS na amostra 1, experimento 3.	82
Figura D.4 – Relatório do EDS na amostra 1, experimento 4.	83
Figura D.5 – Relatório do EDS na amostra 1, experimento 5.	84
Figura E.1 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 1	86
Figura E.2 – Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 1	87
Figura E.3 – Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 1	88
Figura E.4 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 2	89
Figura E.5 – Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 2	90
Figura E.6 – Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 2	91
Figura E.7 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 3	92
Figura E.8 – Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 3	93
Figura E.9 – Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 3	94
Figura E.10–Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 4	95
Figura E.11–Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 4	96
Figura E.12–Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 4	97
Figura E.13–Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 5	98
Figura E.14–Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 5	99
Figura E.15–Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 5	100
Figura F.1 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 1. .	101
Figura F.2 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 1. .	102
Figura F.3 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 1. .	102
Figura F.4 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 2. .	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores típicos de eficiência de corrente catódica para alguns banhos comerciais.	23
Tabela 3.1 – Composição química do aço SAE 1010 com 4mm laminado a quente. .	28
Tabela 3.2 – Descrição das condições operacionais do banho sem cianeto - Processo Surtec 704	30
Tabela 3.3 – Parâmetros de tempo e densidade de corrente para os experimentos. .	30
Tabela 4.1 – Medições de potencial (V) dos experimentos 1, 2 e 3.	32
Tabela 4.2 – Medições de potencial (V) dos experimentos 4, 2 e 5.	34
Tabela 4.3 – Composição percentual na superfície nos experimentos 4, 2 e 5 com variação da densidade de corrente.	37
Tabela 4.4 – Composição percentual na superfície nos experimentos 1, 2 e 3 com variação do tempo.	37
Tabela 4.5 – Espessuras dos experimentos 1, 2 e 3 obtidas com densidade de corrente constante	37
Tabela 4.6 – Espessuras dos experimentos 4, 2 e 5 obtidas com tempo constante . .	39
Tabela 4.7 – Comparação das espessuras das amostras galvanizadas com a lei de Faraday.	40
Tabela 4.8 – Microdureza nos experimento 1, 2 e 3 com densidade de corrente constante	41
Tabela 4.9 – Microdureza nos experimento 4, 2 e 5 com tempo constante	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contexto	15
1.2	Objetivo	15
1.3	Justificativa	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Revestimentos metálicos	17
2.1.1	Eletrodeposição	18
2.1.1.1	Processo com anodo solúvel	19
2.1.1.2	Processo com anodo insolúvel	20
2.1.2	Reação no cátodo	20
2.1.3	Densidade de corrente	21
2.1.4	Eficiência de corrente	23
2.2	Reação de redução de hidrogênio	24
2.3	Espessuras dos revestimentos obtidos	25
2.4	Aderência	25
3	METODOLOGIA	26
3.1	Materiais	28
3.1.1	Preparação das amostras	28
3.1.2	Processo Surtec	29
3.1.3	Eletrodeposição	30
3.2	Métodos	30
3.2.1	Dureza após eletrodeposição	31
3.2.2	Micrografia eletrônica	31
3.2.3	Espectroscopia de energia dispersiva	31
3.2.4	Ensaio de riscamento	31
3.2.5	Análise de interferometria	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	Galvanização	32
4.1.1	Galvanização variando o tempo	32
4.1.2	Galvanização variando a densidade de corrente	33
4.2	Análise por micrografia eletrônica e espectrometria	34
4.3	Espessura de camada	37
4.4	Análise da microdureza	40

4.5	Ensaio de riscamento	43
5	CONCLUSÕES	48
	Referências	50
APÊNDICE A	RUGOSIDADE DAS AMOSTRAS	52
APÊNDICE B	MICROGRAFIAS ELETRÔNICAS DAS AMOSTRAS	62
APÊNDICE C	MICROGRAFIAS ELETRÔNICAS DE AMOSTRAS GALVANIZADAS SEM ABRASÃO MECÂNICA .	76
APÊNDICE D	RELATÓRIOS DE ESPECTROMETRIA PARA OS EXPERIMENTOS	79
APÊNDICE E	PERFÍS DOS RISCOS	85
APÊNDICE F	IMAGENS DOS RISCOS	101
APÊNDICE G	MICROGRAFIAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA CAMADA ELETRODEPOSITADA	107
ANEXO A	BOTETIM TÉCNICO DO DESENGRAXANTE INDUS- TRIAL ABS-30A	122
ANEXO B	COMPOSIÇÃO DOS ELETRÓLITOS DO BANHO DE ELETRODEPOSIÇÃO	124
ANEXO C	PROCESSO SURTEC 704	126

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Estima-se que no Brasil os gastos com produtos e tratamentos de combate à corrosão cheguem a US\$ 10 bilhões e boa parte deles na indústria petrolífera. Além do fator meio ambiente, essa preocupação se torna maior pelos amargos prejuízos financeiros decorrentes deste processo químico (MACEDO, 2014). Na falta de dados estatísticos, estima-se o custo da corrosão em 3,5% do PNB (GENTIL, 2003). No caso brasileiro, em que o PNB é de US\$ 2,246 trilhão (MUNDIAL, 2013), o custo da corrosão é de aproximadamente US\$ 78,61 bilhão ao ano.

De todo o aço produzido no mundo, 20% é utilizado para repor o aço perdido através do processo de corrosão (GENTIL, 2003). O emprego do processo de galvanização permite estender a vida útil de uma peça metálica, já com processo de zincagem a fogo, utilizando alumínio, a vida útil pode chegar a 30 anos (PALMA et al., 1998). Comparando com outros processo, tais como pintura, pintura eletrostática e outros revestimentos orgânicos, que podem fazer uma ótima proteção a longo prazo se usada junto com a galvanização, percebe-se que a vida útil da peça não chega a cinco anos, pois apenas a pintura não diminui o risco de corrosão a longo prazo.

É perceptível que mecanismos de combate a corrosão são importantes no setor metalúrgico e, para tal, é necessário um estudo para melhorar os processos já existentes. Embora existam processos em que se utilizam outros materiais e métodos (ASSOCIATION, 2011), neste trabalho será elaborado um estudo através do processo de galvanização eletrolítica utilizando o zinco como elemento anódico.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do projeto é analisar e comparar variáveis do processo de eletrodeposição eletrolítica com as propriedades intrínsecas do revestimento, tais como Tempo de Eletrodeposição e Densidade de corrente.

1.3 JUSTIFICATIVA

Visto o grau de importância do setor de revestimentos metálicos na proteção contra a corrosão, é necessário que se tenha maneiras práticas para poder aplicar esse conhecimento nas pequenas e médias indústrias do setor no Brasil. É sabido que o número de indústrias que trabalham com revestimentos a base de zinco é muito pequeno quando comparado à média da América do Norte ou da Europa (IZC, 2013). Como o consumo de

zinco no Brasil é baixo, como exemplifica a Figura 1.1, há um grande potencial de crescimento. Devido a essa realidade brasileira, até mesmo estratégias de marketing específicas para o setor foram desenvolvidas, (NETO, 2010).

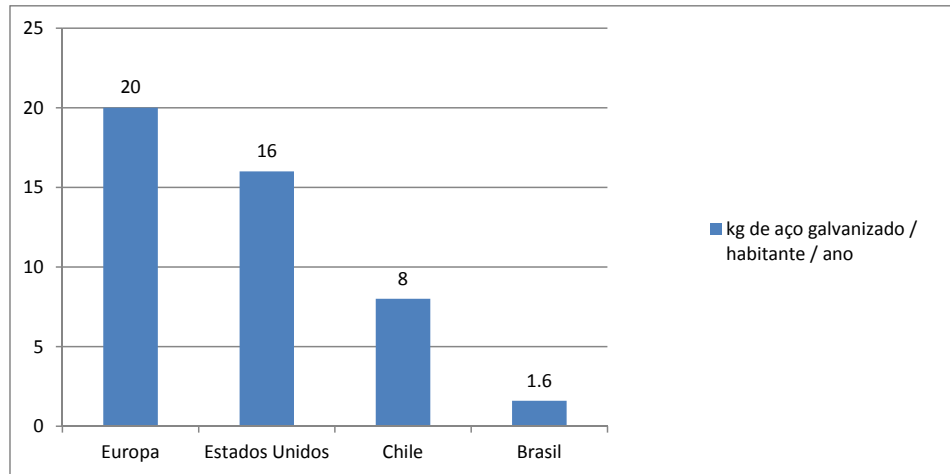


Figura 1.1 – Comparação do consumo *per capita*

Fonte: IZC (2013)

Também é necessário considerar o nível de qualidade exigido pelo cliente. Ao se ter conhecimento do processo, conseguindo controlar e gerenciar as variáveis, é possível entregar um produto que satisfaça o consumidor final com qualidade e garantia.

Outro fator atrativo neste trabalho é a possibilidade de não apenas oferecer um serviço e sim fornecer diferentes soluções ao cliente. Para tal, é pré-requisito ter conhecimento das condições ambientais e de trabalho em que a peça ou equipamento será exposta durante a vida útil. Desta forma, a capacidade de controle das variáveis de processo possibilita características técnicas ao serviço e não apenas um processo galvânico usual.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVESTIMENTOS METÁLICOS

Os revestimentos metálicos são utilizados para diferentes fins e, na maioria das vezes, há uma combinação dessas finalidades, (GENTIL, 2003), por exemplo:

- decorativa - ouro, prata, zinco, níquel, cromo;
- resistência ao atrito - índio, cobre;
- resistência à oxidação em contatos elétricos - estanho, prata, ouro, ródio;
- endurecimento superficial - cromo;
- resistência à corrosão - cromo, níquel, alumínio, zinco, cádmio, estanho;
- recuperação de peças desgastadas - cromo.

Para GENTIL (2003), os metais empregados nos revestimentos anticorrosivos possuem mecanismos de proteção explicados por diversos fatores, como:

- formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos ou outros compostos, pela reação com os oxidantes do meio corrosivo (caso do alumínio, cromo, níquel e zinco);
- os metais usados nos revestimentos apresentam valores elevados de sobretensão ou sobrevoltagem, sendo por isso mais resistentes ao ataque ácido em meios não aerados (caso do estanho, chumbo, zinco e cádmio).

A qualidade do revestimento empregado sobre a peça metálica vai depender da boa aderência e impermeabilidade da película. Em revestimentos catódicos, em relação ao material revestido, a película deve ser perfeitamente livre de falhas. Caso contrário, há formação de pilha galvânica devido a presença de eletrólitos na atmosfera ambiente. Isto leva há uma rápida corrosão do material revestido, pois há uma pequena área anódica para uma grande área catódica, (GENTIL, 2003). Um exemplo deste tipo de corrosão pode ser visualizado na Figura 2.1.

Já os revestimentos anódicos não apresentam os mesmo problema do revestimento catódico, isto porque o material revestido se comporta como anodo da pilha, ou seja, em caso de ruptura da película, este é corroído em vez do metal de base. Na Figura 2.2 tem-se um exemplo de proteção anódica. Neste tipo, o revestimento deve possuir baixa taxa de corrosão.



Figura 2.1 – Exemplo de peça com corrosão catódica.

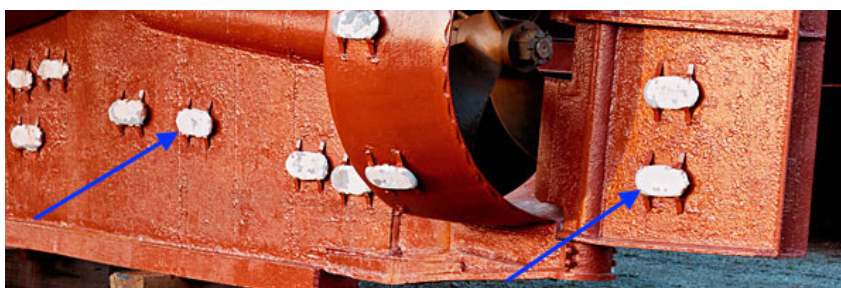


Figura 2.2 – Exemplo de peça metálica com proteção catódica.

Sabe-se que há uma grande quantidade de processos de aplicação, tais como: eletrodeposição, imersão a quente, aspersão térmica, difusão, deposição química, deposição por deslocamento galvânico, deposição por evaporação a vácuo, deposição mecânica, deposição por explosão e colaminação, (GENTIL, 2003), porém, visando apenas proteção contra corrosão atmosférica, os revestimentos mais utilizados são aplicados por eletrodeposição, imersão a quente e deposição por aspersão térmica (PANASSION, 1993).

2.1.1 ELETRODEPOSIÇÃO

O processo de eletrodeposição é utilizado com finalidade de se obter revestimentos de pequena espessura e relativamente livre de poros. Economicamente é viável pois obtém-se a finalidade pretendida com uma fina camada de metal de revestimento. A eletrodeposição é geralmente utilizada para revestir peças utilizando ouro, prata, estanho, cobre, cádmio, níquel, cromo e zinco, (GENTIL, 2003). No processo de eletrodeposição a peça a ser revestida é inserida numa cuba eletrolítica contendo sais do metal de revestimento, Figura 2.3. O anodo utilizado neste processo pode ser ou não o metal a ser depositado, de forma que tem-se anodo solúvel e anodo insolúvel. Quando o anodo é solúvel, este é da mesma natureza do material depositado no processo. Neste caso, no anodo tem-se a reação de oxidação que acaba fazendo o processo de reposição dos íons consumidos na reação de redução no cátodo.

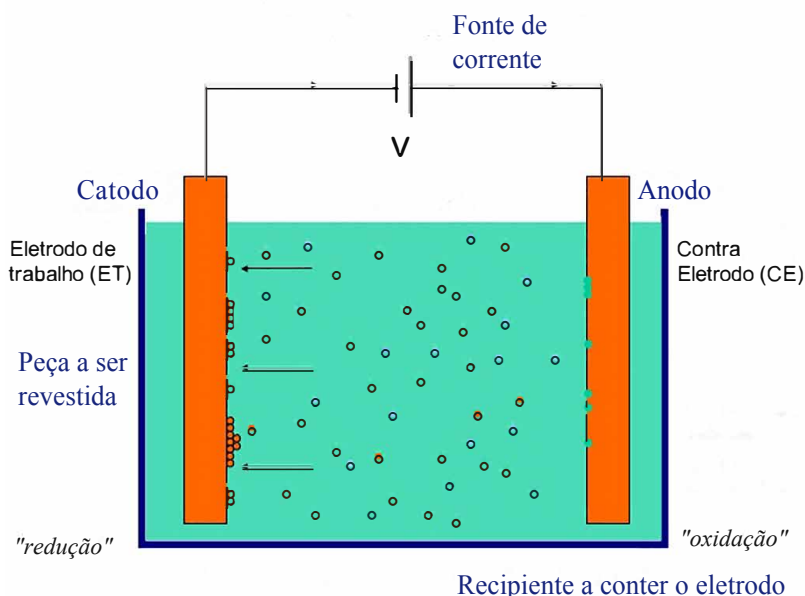


Figura 2.3 – Modelo básico de uma célula de eletrodeposição
Fonte: IZC (2013)

O eletrólito, comumente denominado banho, na maioria das vezes, é uma solução aquosa concentrada que contém íons do metal de revestimento (Me^{Z+}). A principal reação ocorre no cátodo, onde ocorre a redução do íon metálico, segundo a reação $Me^{Z+} + ze \rightarrow Me$. A reação de oxidação ocorre no ânodo, cujo mecanismo vai depender da natureza do ânodo, que pode ser solúvel ou insolúvel.

2.1.1.1 Processo com ânodo solúvel

O processo com ânodo solúvel é o mais utilizado nas indústrias, o ânodo é da mesma espécie química do metal a ser depositado, um esquema básico está ilustrado na Figura 2.4. Neste processo tem-se que no cátodo ocorre a reação de deposição do metal ($Me^{Z+} + ze \rightarrow Me$) e no ânodo tem-se a dissolução do metal ($Me \rightarrow Me^{Z+} + ze$), que repõe os íons consumidos continuamente na deposição. Na prática são necessários ajustes periódicos da concentração de íon metálico no banho, pois as eficiências de corrente dos processos anódicos e catódicos são, em geral, desiguais, sem contar que há perda de eletrólito devido ao "arraste" ao se retirar as peças do banho, (PANASSION, 1993; WINAND, 2011).

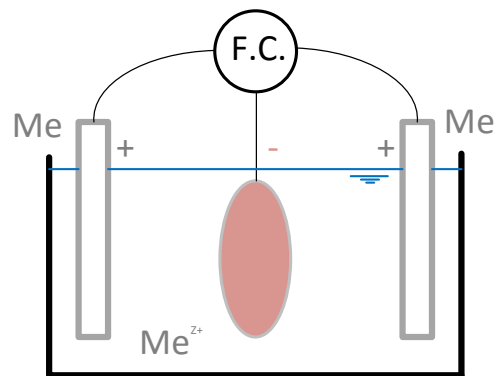


Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de eletrodeposição com anodo solúvel.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.1.1.2 Processo com anodo insolúvel

No caso do processo com anodo insolúvel, este é um metal que não sofre dissolução durante o processo, ou seja, é um anodo passivo. Nele ocorre a reação de evolução do oxigênio. Para que as concentrações de íons mantenham-se constante, faz-se uso de sais complexos que contém a substância a ser depositada sobre a peça metálica. Esse processo é comumente utilizado para formação de camada de conversão de materiais nobres (PANASSION, 1993). Após os anos 70 houve grande avanço na composição dos eletrólitos utilizando sais dissolvidos, o que possibilitou num aumento da eficiência e altas densidades de corrente (WINAND, 2011), diminuindo assim o tempo de processo.

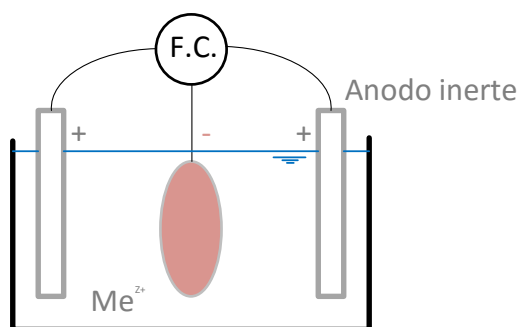


Figura 2.5 – Representação esquemática do processo de eletrodeposição com anodo insolúvel.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.1.2 REAÇÃO NO CÁTODO

Esta é a principal reação de interesse de estudo no processo de eletrodeposição. É na reação de redução que o revestimento metálico acontece. Todavia, nem sempre o banho contém apenas cátions da espécie química do metal a ser depositado. Essas outras

espécies chamadas impurezas depositam-se em regiões de baixa densidade de corrente (PANASSION, 1993). O resultado de um banho com alta concentração de impurezas são peças com baixa qualidade que apresentam manchas escuras, como pode ser visualizado na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Peça galvanizada com manchas provocadas por impurezas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro cátion que reduz no catodo é o hidrogênio, formando assim o gás hidrogênio. Fato este que pode trazer consequências para o substrato, pois pode modificar as propriedades devido a fragilização por hidrogênio (CASANOVA et al., 1997). Hillier e Robinson (2006) executaram um estudo sobre os efeitos do pH do eletrólito e qual a proporção de hidrogênio é absorvido no material. Para o aço AISI 4340 foi necessário $1,5 \times 10^{-7} \text{gH}_{\text{átomos}}/\text{cm}^2$ para que houvesse fragilização por hidrogênio.

2.1.3 DENSIDADE DE CORRENTE

A densidade de corrente é a razão entre a corrente elétrica do sistema e a área molhada do eletrodo (catodo ou anodo) (PANASSION, 1993). Numa célula de eletrodeposição, quando aplicado uma corrente externa I , as densidades de corrente são obtidas através das Equações 2.1 e 2.2.

$$i_c = \frac{I}{A_c} \quad (2.1)$$

$$i_a = \frac{I}{A_a} \quad (2.2)$$

onde:

- i : densidade de corrente catódica (c), anódica (a);
- I : corrente da fonte de corrente;

- A: área molhada do cátodo (c), anodo (a).

O controle da densidade de corrente é necessário pois dependendo da faixa de operação o revestimento pode apresentar rugosidade excessiva, manchas escuras e fragilidade. Um fator que favorece o surgimento de tais discontinuidades é a geometria da peça, pois quanto maior a complexidade de forma, mais penoso se torna o controle da densidade de corrente para manter um revestimento uniforme. Na prática é difícil encontrar um valor ideal para a densidade de corrente, a complexidade da peça faz com que algumas regiões tenham valores acima do limite e outras regiões valores abaixo. Essa variação faz com que o depósito do metal sobre a peça não seja uniforme. Há algumas técnicas para diminuir essa variação como, por exemplo, modificar a geometria do cátodo e utilizar cátodos auxiliares. Na Figura 2.7 pode-se visualizar que em peças retangulares é possível inserir barreiras para diminuir a intensidade da densidade de corrente. Já em peças de formato tubular (Figura 2.8) é possível inserir um ânodo dentro da peça para que seja possível a eletrodeposição também na parte interior do tubo (PANASSION, 1993).

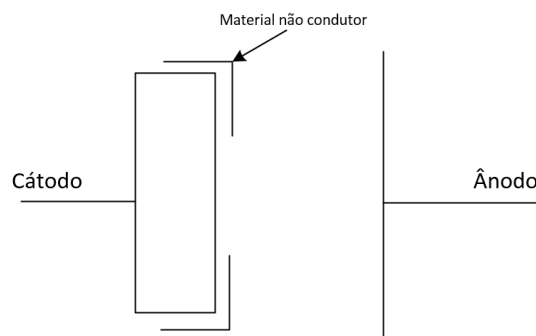


Figura 2.7 – Ilustração esquemática para posicionamentos de material não condutor para diminuir região de alta densidade de corrente na peça.

Fonte: Elaborada pelo autor.

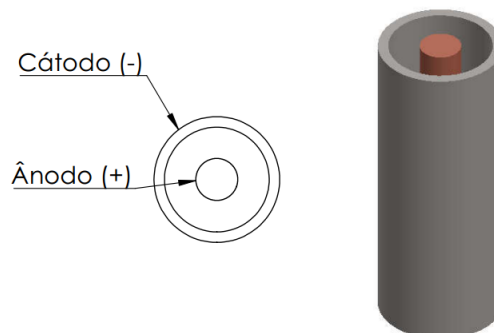


Figura 2.8 – Ilustração esquemática para posicionamento do ânodo para eletrodeposição no interior de peças tubulares.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.1.4 EFICIÊNCIA DE CORRENTE

A eficiência de corrente no processo de eletrodeposição é razão entre a energia efetivamente utilizada para a deposição e a energia total fornecida para o processo. Pelas Equações 2.3 e 2.4 podem-se obter os respectivos valores de eficiência de corrente catódica e anódica. No caso da reação de redução, essa eficiência é denominada catódica e, na oxidação, anódica. Se a eficiência de corrente catódica é de 80%, por exemplo, tem-se que 80% da energia é utilizada para a deposição e 20% na redução de outros cátions presentes no eletrólito, sendo principal a redução do hidrogênio (PANASSION, 1993).

$$e_c = \frac{I_{Mc}}{E_t} \quad (2.3)$$

$$e_a = \frac{I_{Ma}}{E_t} \quad (2.4)$$

onde:

- e : eficiência de corrente;
- I_{Mc} : Energia consumida efetivamente;
- E_t : Energia total.

Na prática, o objetivo é obter o menor tempo de eletrodeposição, consequentemente a eficiência de corrente é um dos parâmetros mais importantes. Na Tabela 2.1 pode-se observar que para o mesmo tipo de banho a eficiência de corrente varia muito (PANASSION, 1993). As condições operacionais do eletrólito são comercializados levando em consideração a eficiência da corrente. Algumas variáveis são: a temperatura de operação, composição do banho, densidade de corrente e tipo de movimentação, parado ou rotativo (WIERCINSKI, 2015).

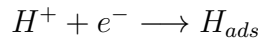
Tabela 2.1 – Valores típicos de eficiência de corrente catódica para alguns banhos comerciais.

Banho	Eficiência de corrente catódica (%)
Cobre ácido	95 - 100
Cobre alcalino	30 - 100
Níquel	70 - 100
Cromo	10 - 25
Estanho ácido	100
Estanho alcalino	30 - 100
Cádmio	85 - 98
Zinco ácido	100
Zinco alcalino	30 - 100

Fonte: (PANASSION, 1993)

2.2 REAÇÃO DE REDUÇÃO DE HIDROGÊNIO

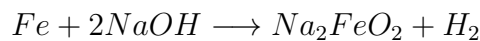
A redução do hidrogênio no cátodo é umas das principais reações do processo, sendo que a quantidade de gás hidrogênio formado é inversamente proporcional à eficiência da corrente catódica. A formação do gás hidrogênio ocorre em duas etapas, são elas:



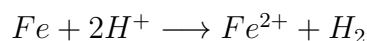
No cátodo as reações são formadas em ambientes aleatórios e vagueiam sobre a superfície até encontrar outro átomo de hidrogênio. Porém neste percurso existe a possibilidade de que o átomo de hidrogênio penetre no substrato, pois este caminha por difusão em direção a áreas preferenciais. Nas regiões em que houver alta concentração de hidrogênio, o metal de base acaba por ser afetado e tendo suas propriedades alteradas, (PANASSION, 1993).

Na eletrodeposição a peça metálica passa por três etapas em que é possível ocorrer absorção de hidrogênio nascente na peça (GENTIL, 2003), são elas:

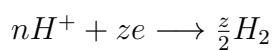
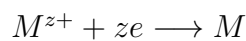
Desengraxante - reação entre solução concentrada de hidróxido de sódio aquecida e aço:



Decapagem ácida - o hidrogênio é gerado pela ação de ácido clorídrico ou sulfúrico sobre o metal:



Eletrodeposição eletrolítica - a reação ocorre no cátodo, onde tanto o hidrogênio quanto o metal é formado:



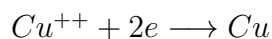
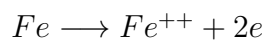
Peças de aço com alta resistência à tração, acima de 1200MPa, podem apresentar falhas em serviço devido a incorporação de hidrogênio durante a eletrodeposição. Para diminuir os efeitos da fragilização por hidrogênio é necessário aquecer a peça a 190°C por três horas em no máximo quatro horas após a eletrodeposição (ASTM, 2013). O aquecimento do material pode comprometer as características originais, portanto é necessário que a escolha do material leve em conta que o processo de eletrodeposição e o processo de aquecimento, de forma a reduzir a fragilização por hidrogênio (PANASSION, 1993).

2.3 ESPESSURAS DOS REVESTIMENTOS OBTIDOS

O processo de eletrodeposição permite a obtenção de camadas de baixa espessuras, na ordem de $0,05\mu\text{m}$, o que torna o processo economicamente viável, principalmente quando se trata de materiais como cromo, ouro e prata. Espessuras mais elevadas também é possível no processo de eletro refino, por exemplo, sendo que placas com espessuras da ordem de centímetros são obtidas. Geralmente o processo de eletrodeposição é utilizado para obtenção de revestimentos resistentes à corrosão, neste caso a espessura média da camada é em torno de $40\mu\text{m}$. Para valores acima de $40\mu\text{m}$ convém investir noutro processo, como aspersão térmica. Quando necessita-se de resistência à abrasão ou desgaste, utiliza-se a aplicação de cromo duro através de eletrodeposição com camadas de até $100\mu\text{m}$ (PANASSION, 1993).

2.4 ADERÊNCIA

A aderência entre revestimento e substrato está relacionado com o pré-tratamento de limpeza adequado. Peças desengraxadas e decapadas não apresentam problemas de aderência, porém há casos que estão aquém do pré-tratamento. Isso ocorre quando se deposita um metal mais nobre sobre o substrato. Por exemplo, tentar depositar cobre num banho ácido sobre o aço, ocorre corrosão do aço por deslocamento galvânico,



Para contornar esse problema, utiliza-se cobre em banhos alcalinos para que haja melhor aderência ao substrato ou introduzir o cátodo com a corrente ligada (PANASSION, 1993).

No caso do zinco, há uma boa aderência pois este é um metal de sacrifício, menos nobre do que o aço. Porém, caso exista um intervalo de tempo muito grande entre a decapagem e a eletrodeposição, o material fica suscetível à formação de óxidos sobre a superfície, formando assim regiões de baixa aderência. A falta de aderência, caso de aços inoxidáveis e alumínio, pode ser um problema comum e deve ser contornado utilizando banhos que ativam a superfície de forma a dificultar a formação de óxidos na superfície.

3 METODOLOGIA

O procedimento experimental consistiu em obter chapa de aço SAE 1010 e cortar a laser para obter as amostras com geometrias idênticas. Em seguida preparar as amostras (limpeza, decapagem, lixamento) para o processo de eletrodeposição (Figura 3.1) modificando o tempo de permanência no processo assim como a densidade de corrente do sistema. Posteriormente foram realizadas medidas de dureza da superfície, dureza ao riscamento, medições de espessura de camada e medidas de rugosidade das amostras. Além disso foram realizadas micrografias eletrônicas, para visualizar a topografia das amostras, e espectrometria para detectar os elementos químicos na camada.

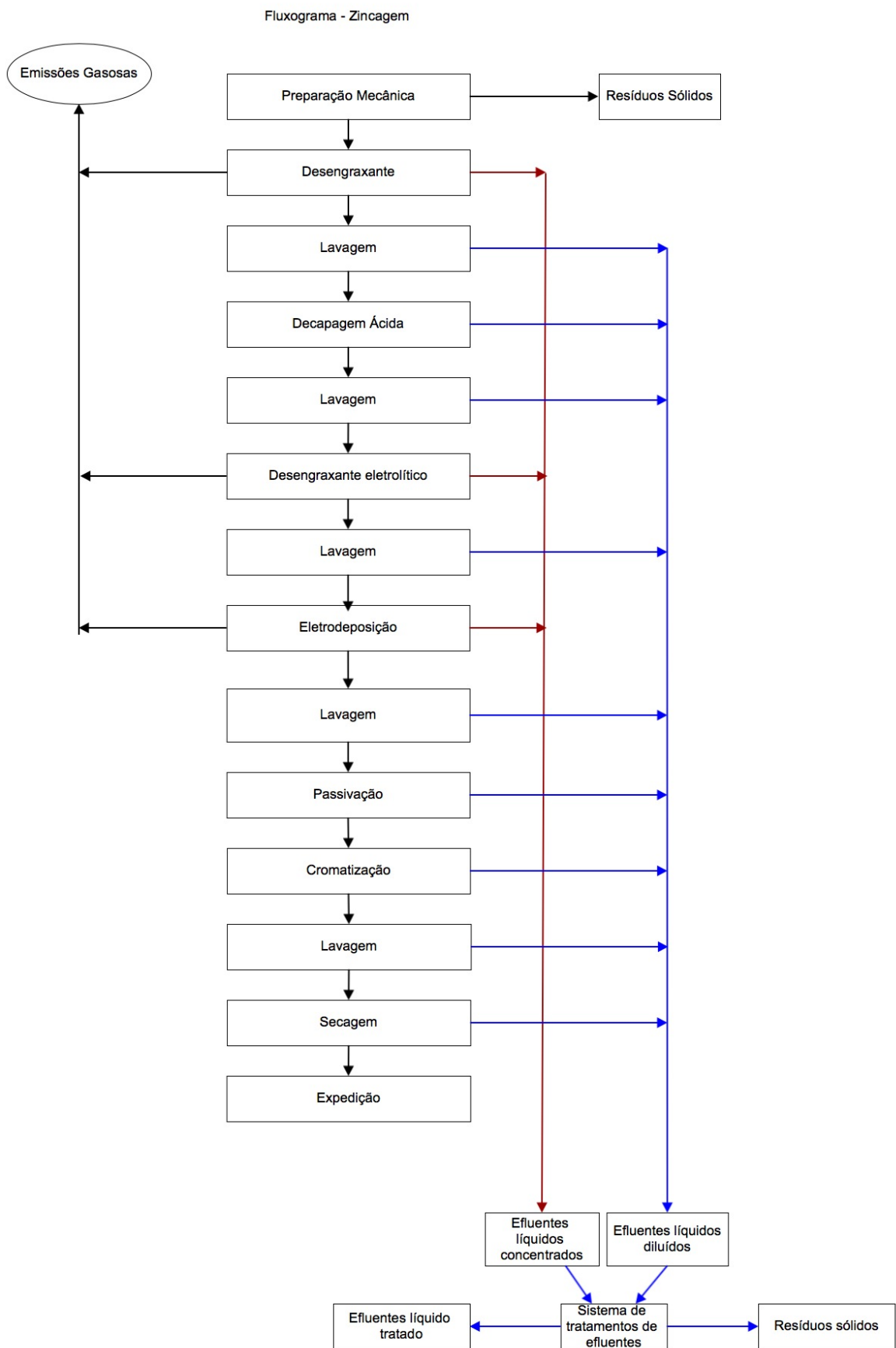


Figura 3.1 – Fluxograma do processo de galvanização eletrolítica.

Fonte: Elaborada pelo autor

3.1 MATERIAIS

3.1.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A chapa de aço SAE 1010 utilizada para os procedimentos experimentais foi fornecida pela empresa Metalúrgica Angelin LTDA, localizada em Curitiba, Paraná, com composição química nominal conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do aço SAE 1010 com 4mm laminado a quente.

Elemento	Quantidade
Carbono, C	0,08 - 0,13
Manganês, Mn	0,30 - 0,60
Fósforo, P_{max}	0,03
Enxofre, S_{max}	0,05

Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

Após a chapa ser cortada a laser, pela empresa Mega Corte Serviços Industriais localizada em Curitiba-(PR), obteve-se peças com as dimensões apresentadas na Figura 3.2. Essas peças, agora amostras, passaram por um processo de limpeza que consistiu em:

Limpeza mecânica: etapa de remoção de rebarbas e remoção do excesso de graxa utilizando sabão industrial ABS-30A da Alkon (Anexo A) e escova de cerdas poliméricas de média dureza;

Limpeza química: para remover qualquer resquício de materiais graxos e poliméricos da superfície, as amostras permaneceram por duas horas numa solução aquosa a 35% de hidróxido de sódio, a temperatura ambiente, com constante movimentação;

Decapagem: após a limpeza química, usualmente chamada de desengraxamento, as amostras passam por uma solução aquosa a 25% de ácido clorídrico para remoção dos óxidos (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3);

Abrasão mecânica: como a chapa em estado de fornecimento apresenta uma rugosidade elevada, utilizou-se uma sequência de lixas d'água (250, 400 e 600) para reduzir a rugosidade e uniformizar a superfície. É importante frisar que não é intenção deixar a superfície polida, pois esta diminui a aderência da camada sobre o substrato;

Ativação: inserção das amostras em uma solução aquosa a 15% de HCl durante 15s;

Eletrodeposição: tratamento eletrolítico para formação da camada de conversão de zinco;

Passivação inserção das amostras durante 15s em uma solução aquosa a 12% de ZINKO TRIAZUL do fornecedor DILETA Ltda.

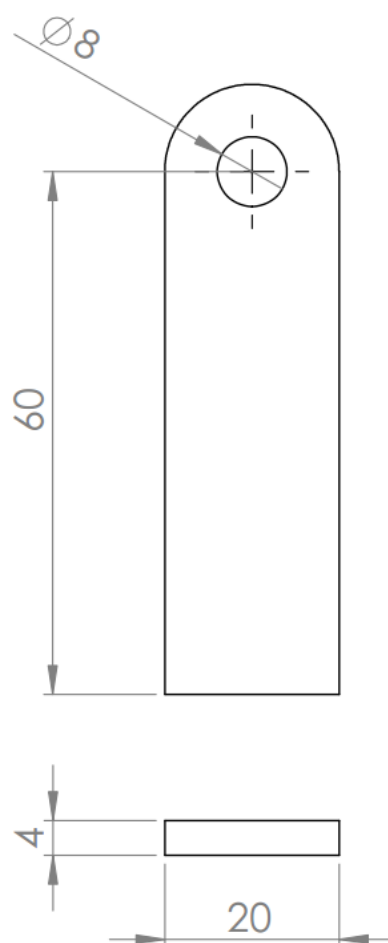


Figura 3.2 – Geometria e principais dimensões das amostras.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

3.1.2 PROCESSO SURTEC

O eletrólito da eletrodeposição podem ter diversas fórmulas e composições e são escolhidos conforme modelo de linha de processo (WIERCINSKI, 2015). A empresa ZincoFer Zincagem, localizada em Curitiba-PR, disponibilizou 50l de banho alcalino sem cianeto conforme processo Surtec 704, Tabela 3.2 (Anexo C).

Tabela 3.2 – Descrição das condições operacionais do banho sem cianeto - Processo Surtec 704

Zinco Metal	8 - 17g/l
Óxido de Zinco (pureza > 99,8%)	10 - 21 g/l
Soda Cáustica	110 - 150g/l
Carbonato de Sódio	< 80g/l
SURTEC 704 I Aditivo	5 - 15ml/l
SURTEC 704 II Abrilhantador	1 - 3ml/l
SURTEC 704 Condicionador	5 - 15ml/l
SURTEC 704 Purificador	0 - 4 ml/l
SURTEC 704 I Supressor	1ml/l
Temperatura	22 - 44°C
Densidade de corrente	0,5 - 6A/dm ²

Fonte: (SILOS, 2009)

3.1.3 ELETRODEPOSIÇÃO

Para o presente trabalho decidiu-se variar os parâmetros de tempo e densidade de corrente de forma a comparar os resultados com o trabalho de (POPOOLA et al., 2012). Com isso, foram elaborados cinco experimentos conforme exemplificado na Tabela 3.3 e cada experimento conta com quatro amostras que posteriormente foram utilizadas para a elaboração das análises.

Tabela 3.3 – Parâmetros de tempo e densidade de corrente para os experimentos.

		Tempo		
		5	10	15
i_c	0,8		Experimento 4	
	1,0	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
	1,2		Experimento 5	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2016

Nesses experimentos as variáveis manipuladas são tempo e densidade de corrente, enquanto as variáveis controladas são tensão, corrente e temperatura. Após a realização do processo de eletrodeposição as amostras foram passivadas durante 15 s numa solução de ácido nítrico e sais de cromo de forma a evitar o início da oxidação do zinco sobre a peça. Após finalizar a etapa de eletrodeposição, as amostras foram cortadas utilizando uma cortadeira de precisão Minitom - Struers - munido de disco de corte diamantado com 50 rpm, de forma a diminuir a possibilidade de deslocamento da camada galvanizada.

3.2 MÉTODOS

Após a preparação das amostras, estas foram utilizadas para realização das análises de dureza e aderência, espessura de camada,

3.2.1 DUREZA APÓS ELETRODEPOSIÇÃO

Foi utilizado o microdurômetro Shimadzu HMV-2 do laboratório do GrMatS da UTFPR para realização de medições de dureza da superfície. Foram realizados testes para adquirir os valores de dureza Vickers com carga de 10g. Foram feitas cinco medições por amostras e posteriormente foi feito o cálculo de média e desvio padrão por amostra.

3.2.2 MICROGRAFIA ELETRÔNICA

O microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo EVO MA15, foi utilizado para obtenção de micrografias da superfície de forma a poder comparar as diferentes topografias nos experimentos. O equipamento também foi utilizado para medir a espessura de camada média de zinco nas amostras. As amostras foram antecipadamente limpas apenas com álcool e utilizando luvas de látex para que não houvesse partículas sobre a superfície. A etapa posterior foi fixar cada amostra sobre um suporte e feito o contato elétrico da superfície com a base do suporte de fixação com um fita adesiva de cobre, melhorando assim o contato elétrico com a base.

3.2.3 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA

Foi utilizado o equipamento EDS Oxford, modelo X-Max, para análise dos elementos químicos da amostra de forma a evidenciar a porcentagem dos elementos, assim como para evidenciar a presença de elementos estranhos à amostra.

3.2.4 ENSAIO DE RISCAMENTO

No laboratório do GrMat da UTFPR foi utilizado também o tribômetro modelo UMT-2, produzido pela CETR. As amostras foram fixadas no porta-amostra por parafusos, de forma a manter o sistema rígido o suficiente para evitar a movimentação da peça durante o ensaio. A ponta de diamante utilizada foi do tipo Vickers e carga variável de 2 a 8N. A carga variou de forma linear com velocidade de 0,02mm/s e três riscos foram realizados por amostra.

3.2.5 ANÁLISE DE INTERFEROMETRIA

O equipamento perfilômetro Taylor Hobson Talysurf CCI Lite, do laboratório de metrologia, foi utilizado para medir a rugosidade 3D das amostras em estado de fornecimento e após processo de preparação. Para medição da rugosidade, foram feitas três análises em locais aleatórios na amostra. Este mesmo equipamento possibilitou a obtenção do perfil e modelamento 3D do risco obtido no ensaio de *scratch test*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 GALVANIZAÇÃO

4.1.1 GALVANIZAÇÃO VARIANDO O TEMPO

Para o experimento em que a densidade de corrente permanecia constante e o tempo variava em 5, 10 e 15 minutos, obteve-se as medições que podem ser visualizados os valores de tensão (V), corrente (A), e temperatura da cuba em °C (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Medições de potencial (V) dos experimentos 1, 2 e 3.

Experimento:	1	2	3
Tempo (min):	5	10	15
i_c (A/dm ²):	1,0		
Temperatura (°C):	22,4	22,8	23,5
Medição	Tensão (V):		
1	3,62	3,62	3,59
2	3,65	3,65	3,67
3	3,70	3,70	3,73
4	3,73	3,73	3,78
5	3,74	3,74	3,83
6	3,76	3,76	3,83
7	3,77	3,77	3,83
8	3,78	3,78	3,84
9	3,79	3,79	3,84
10	3,81	3,81	3,85
Média:	3,74	3,74	3,78

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

Com medições obtidas e representadas na Tabela 4.1 percebe-se pouca variação da temperatura durante os experimentos, este fato é condizente com o procedimento padrão da empresa ZincoFer Zincagem Ltda, que não possui mecanismos para manter o banho a uma temperatura constante, pois trabalha-se em condições intermitentes e não constantes durante os turnos. Caso fosse processo de galvanização eletrolítica contínua, seria necessário um trocador de calor para reduzir a temperatura do banho que, segundo o procedimento Surtec 704 (Anexo C) o ideal seria que a temperatura do eletrólito estivesse na faixa de 26 a 30°C.

Nos experimentos 1, 2 e 3 a densidade de corrente permaneceu constante, porém o potencial aumentou durante o procedimento devido à queda da resistência no banho, como pode ser visualizado nas Figura 4.1. É possível observar que o potencial tende a estabilizar após um determinado tempo e isto está relacionado com o mecanismo de formação da

camada de conversão sobre a peça. Após um certo tempo a taxa de redução se iguala à taxa de oxidação, no experimento 3, em aproximadamente 7,5 minutos, o potencial do eletrodo estabilizou em 3,8V. Um experimento adicional utilizando os mesmos parâmetros do experimento 3, porém com tempo de 7,5 minutos, seria necessário para verificar e comparar as microdurezas e espessura.

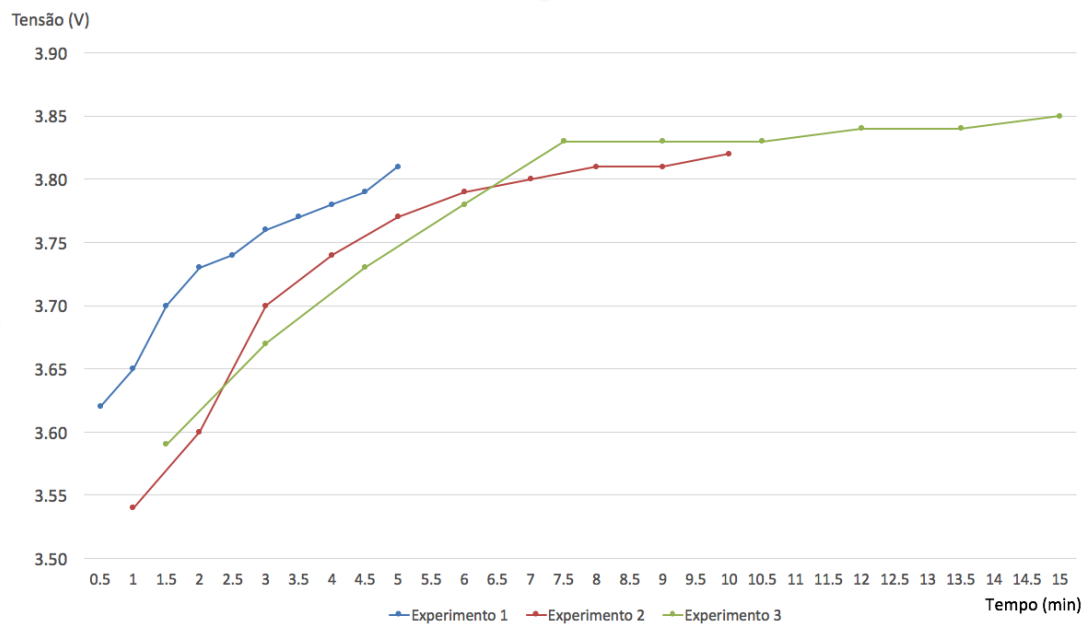


Figura 4.1 – Variação da Tensão *vs* tempo nos experimento 1, 2 e 3.

Fonte: Autoria própria, 2016.

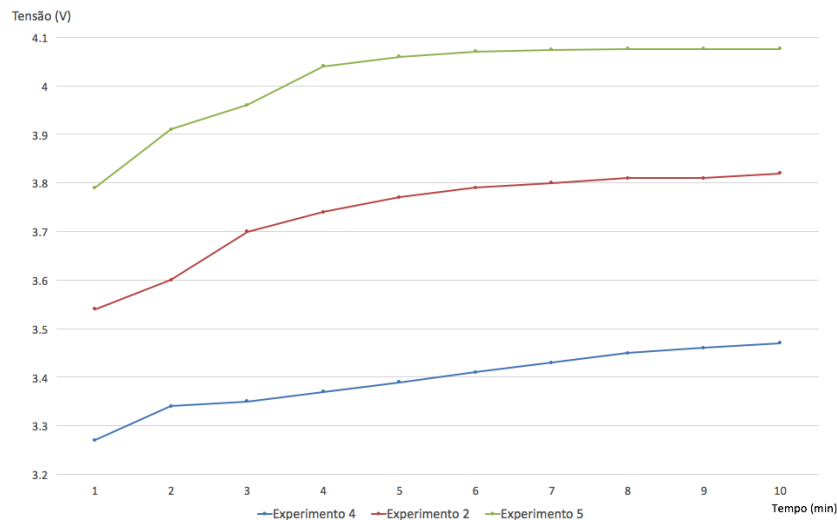
4.1.2 GALVANIZAÇÃO VARIANDO A DENSIDADE DE CORRENTE

Na galvanização com variação da densidade de corrente nas amostras (0,8, 1,0 e 1,2 A/dm²) e tempo de dez minutos, obteve-se as medidas evidenciadas na Tabela 4.2. Nos valores obtidos observa-se que a corrente total permaneceu constante, o que permite concluir que as densidades de corrente também permaneceram constante nas amostras, e que a temperatura do eletrólito sofreu pouca variação. Já a tensão obteve variações significativas nos três experimentos, conforme Figura 4.2, sendo condizente com a lei de Ohm - isto é, se a corrente é constante, o potencial e a resistência são inversamente proporcionais.

Tabela 4.2 – Medições de potencial (V) dos experimentos 4, 2 e 5.

Experimento:	4	2	5
Tempo (min):	10		
i_c (A/dm ²):	0,8	1,0	1,2
Temperatura (°C):	22,3	22,8	23,1
Medição	Tensão (V):		
1	3,27	3,62	3,79
2	3,34	3,65	3,91
3	3,35	3,70	3,96
4	3,37	3,73	4,04
5	3,39	3,74	4,06
6	3,41	3,76	4,07
7	3,43	3,77	4,07
8	3,45	3,78	4,08
9	3,46	3,79	4,08
10	3,47	3,81	4,08
Média:	3,39	3,74	4,01

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

Figura 4.2 – Variação da Tensão *vs* tempo nos experimentos 4, 2 e 5.

Fonte: Autoria própria, 2016.

4.2 ANÁLISE POR MICROGRAFIA ELETRÔNICA E ESPECTROMETRIA

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam a superfície da amostra galvanizada com zinco com densidades de corrente de 0,8, 1,0 e 1,2 A/dm². Visualmente as três amostras apresentam-se completamente cobertas por zinco e a cristalografia do zinco é fina o bastante para não ser possível detectar com ampliação de 10000 vezes. A razão de tal uniformidade está relacionado com a preparação da amostra e também pode ter sido influenciado pela composição química do banho (RAHMAN et al., 2009) e (POPOOLA; FAYOMI, 2011). Segundo Popoola et al. (2012) com aumento do potencial aplicado, ou

seja, maior tensão e maior densidade de corrente, faz com que os grãos mais finos se formem na superfície. Embora nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 não possa ser observado grandes cristais, em experimento anterior com condições de trabalho semelhantes, porém sem tratamento de lixamento na superfície das amostras, pode-se visualizar a formação de grãos. No Apêndice C podem ser visualizadas as micrografias eletrônicas das amostras galvanizadas sem abrasão mecânica. Já no Apêndice B tem-se as micrografias eletrônicas dos demais experimentos executados conforme metodologia aqui apresentada.

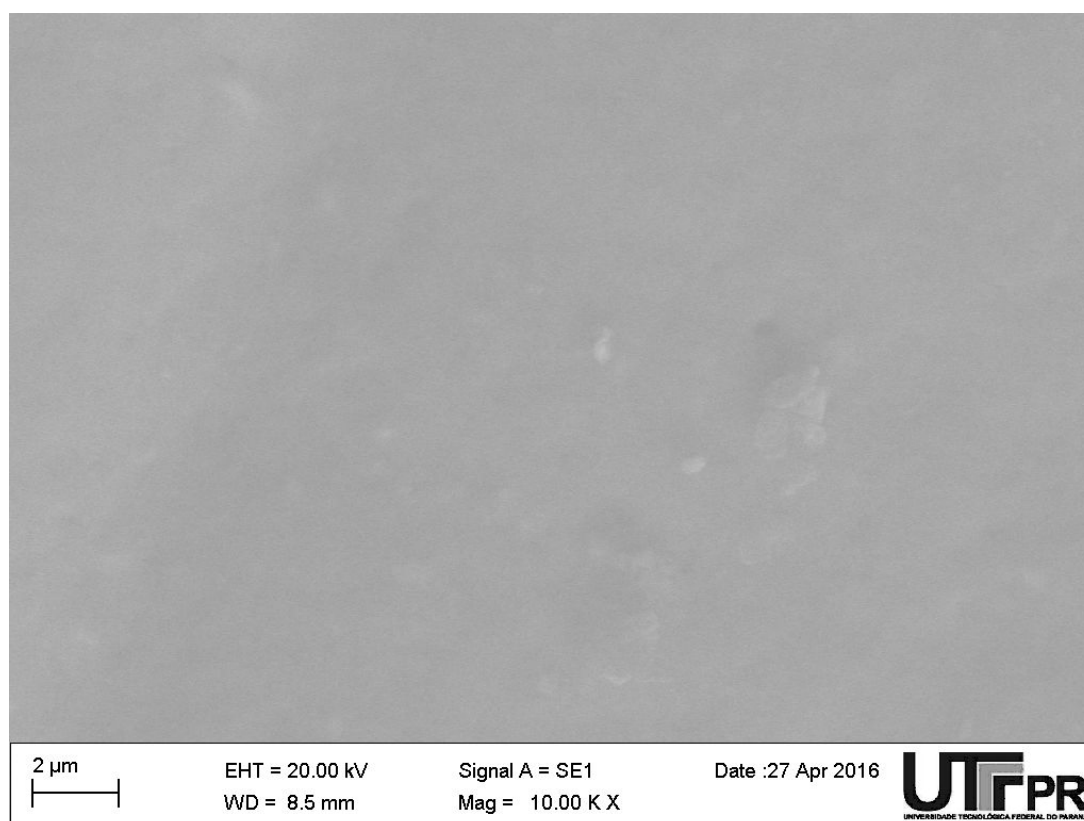


Figura 4.3 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 4. Ampliação 10000x.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

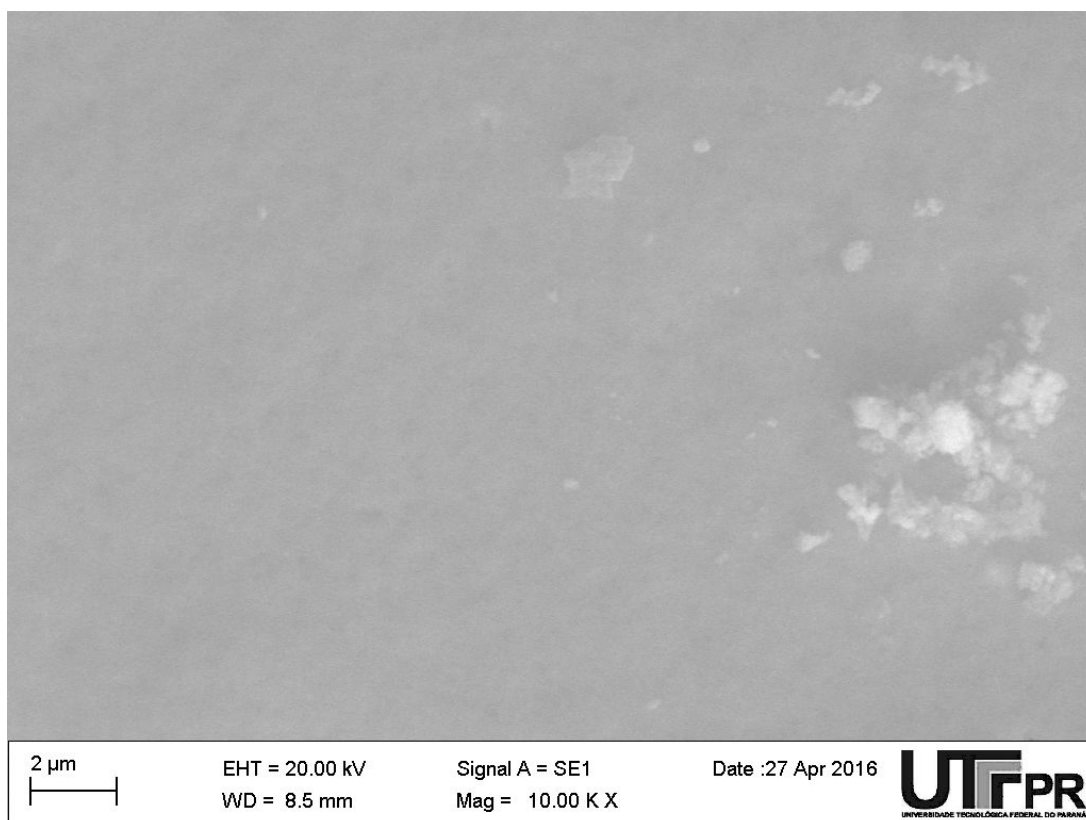


Figura 4.4 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 2. Ampliação 10000x.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

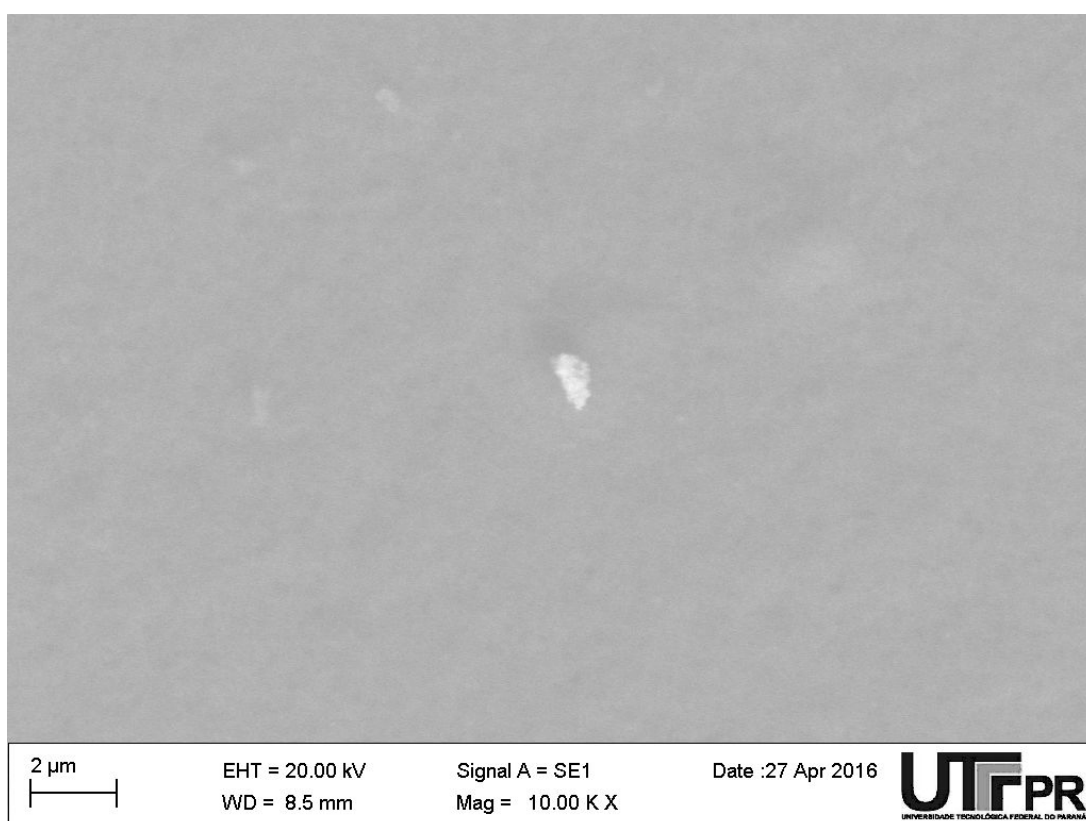


Figura 4.5 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 5. Ampliação 10000x.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

O resultado das análises de espectrometria conforme Tabelas 4.3 e 4.4, mostram que as amostras apresentam grande quantidade de zinco, em média de 86% e uma pequena porcentagem de cromo, aproximadamente 0,43%, formado sobre a superfície durante o processo de passivação. No Apêndice D tem-se os relatórios de espectrometria dos experimentos apresentados.

Tabela 4.3 – Composição percentual na superfície nos experimentos 4, 2 e 5 com variação da densidade de corrente.

	i_c	Cr	Fe	Zn
Experimento 4	7,45	0,44	2,69	83,24
Experimento 2	5,32	0,43	2,96	86,01
Experimento 5	5,84	0,33	1,93	86,49

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

Tabela 4.4 – Composição percentual na superfície nos experimentos 1, 2 e 3 com variação do tempo.

	Tempo	Cr	Fe	Zn
Experimento 1	5,01	0,42	4,11	85,28
Experimento 2	5,32	0,43	2,96	86,01
Experimento 3	6,22	0,43	1,53	86,56

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

4.3 ESPESSURA DE CAMADA

A espessura de camada galvanizada tende a aumentar conforme o tempo de eletrodeposição (PANASSION, 1993), isso foi comprovado durante os experimentos 1, 2 e 3. Após a galvanização, utilizou-se o MEV para medir as camadas, sendo que as imagens podem ser visualizadas no Apêndice G. Na Tabela 4.5 tem-se os valores das espessuras e suas respectivas médias *versus* o tempo de eletrodeposição e com isso construiu-se os gráficos das Figuras 4.6 e 4.7.

Tabela 4.5 – Espessuras dos experimentos 1, 2 e 3 obtidas com densidade de corrente constante

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Tempo	5	10	15
Medição 1 (μm)	2,2	5,1	7,2
Medição 2 (μm)	3,8	4,5	6,3
Medição 3 (μm)	4,1	5,4	8,9
Medição 4 (μm)	3,5	4,4	8,1
Medição 5 (μm)	2,9	4,6	6,6
Média (μm)	3,3	4,9	7,4

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

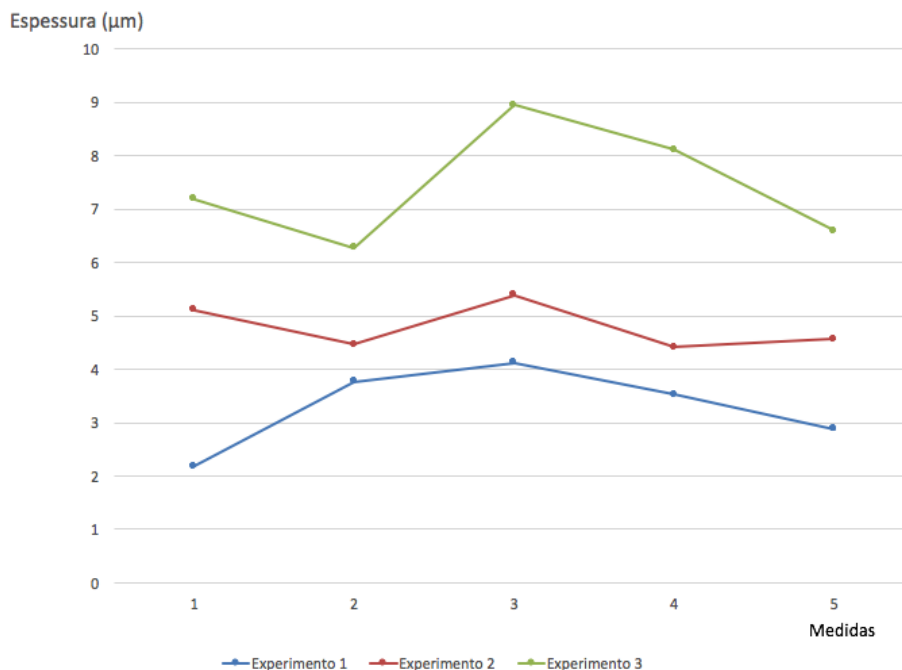


Figura 4.6 – Espessuras mensuradas no MEV

Fonte: Elaborada pelo autor

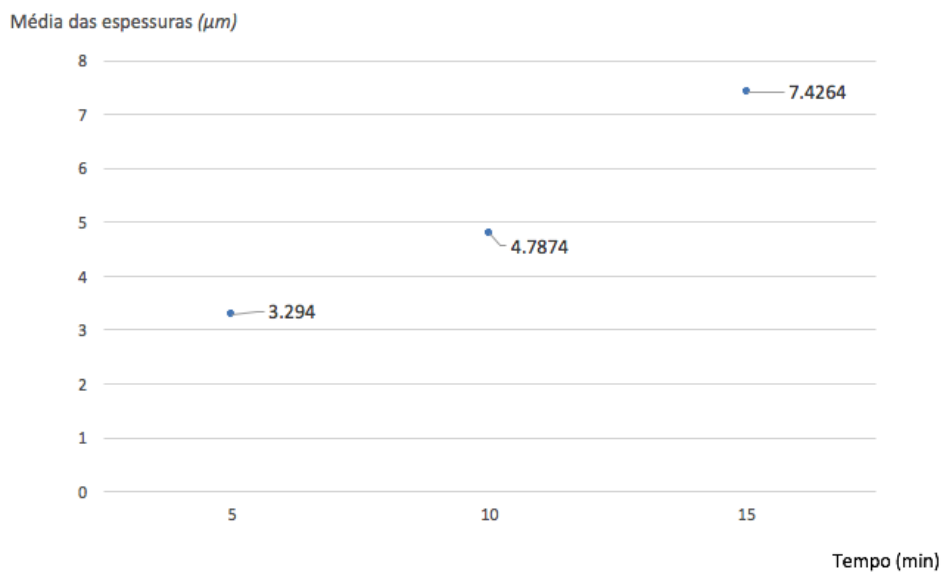


Figura 4.7 – Espessura de camada *versus* tempo

Fonte: Elaborada pelo autor

Já quando o tempo permanece constante e apenas a densidade de corrente é manipulada, a camada de conversão também cresce, como pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.9. Os valores mensurados podem ser visualizados na Tabela 4.6. Obviamente há um limite de crescimento da camada, conforme discutido na revisão bibliográfica, (PANASSION, 1993), que depende das condições da solução eletrolítica e material.

Tabela 4.6 – Espessuras dos experimentos 4, 2 e 5 obtidas com tempo constante

	Experimento 4	Experimento 2	Experimento 5
i_c (A/dm ²):	0,8	1	1,2
Medição 1	3,8	5,1	8,9
Medição 2	4,2	4,5	8,3
Medição 3	3,8	5,4	8,2
Medição 4	4,0	4,4	8,5
Medição 5	4,0	4,6	8,2
Média:	3,96	4,80	8,42

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

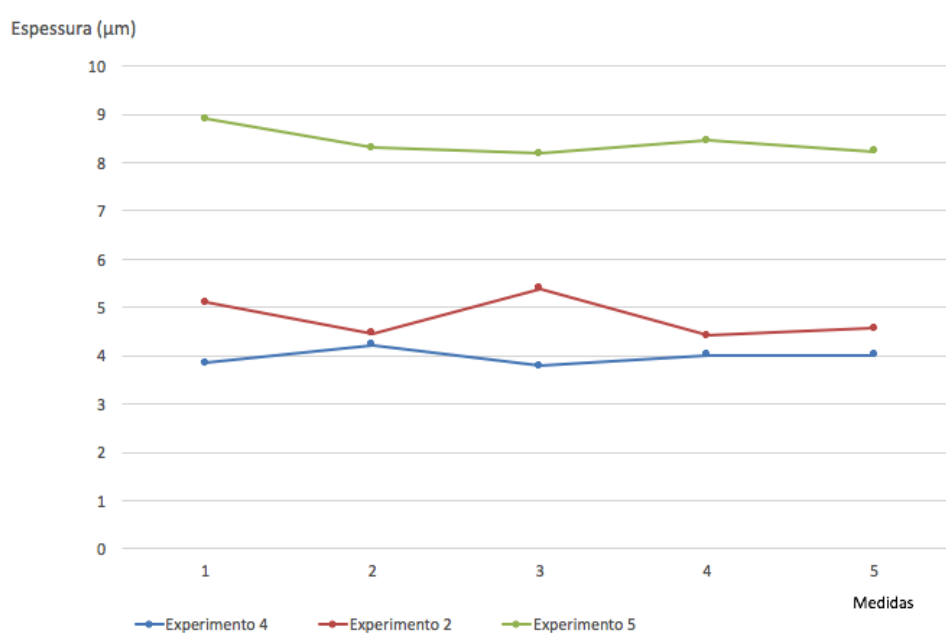
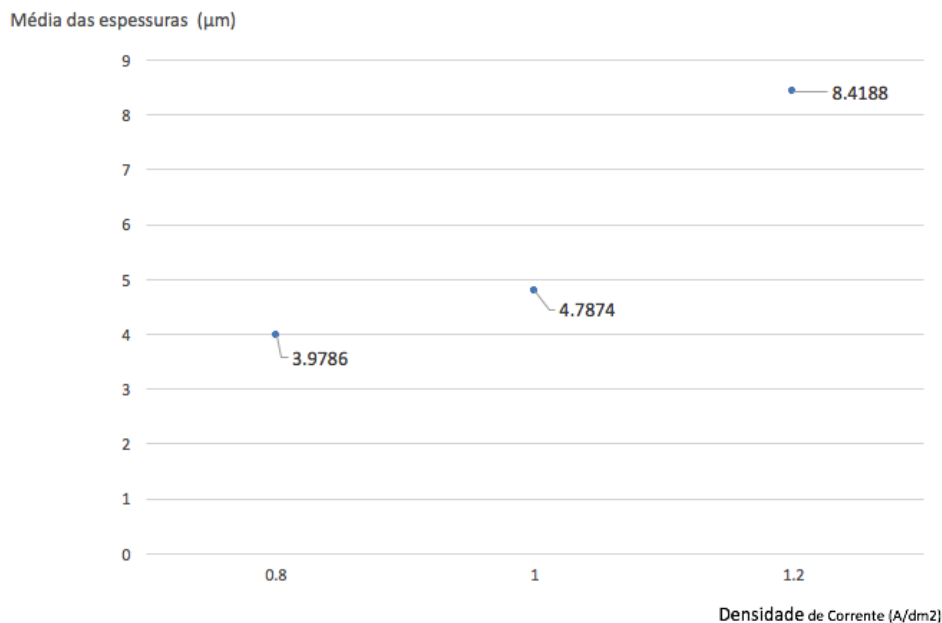


Figura 4.8 – Espessuras mensuradas no MEV

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.9 – Espessura de camada *versus* densidade de corrente

Fonte: Elaborada pelo autor

Pela lei de Faraday é possível calcular a massa depositada e também a espessura de camada. Na Tabela 4.7 tem-se os valores literais e numéricos das espessuras. Observa-se que o erro é relativamente grande, isto está relacionado com a geometria da amostra, uma vez que a área utilizada na lei de Faraday é considerada como uma superfície bidimensional com densidade de corrente uniforme em todos os pontos. Fatos que não ocorrem nos experimentos aqui expostos, pois há alta densidade de corrente nas bordas (efeito de borda) e todas as faces da amostra estão polarizadas e não apenas uma superfície.

Tabela 4.7 – Comparação das espessuras das amostras galvanizadas com a lei de Faraday.

Área total (dm ²):	1,13				
Peso Atômico do Zn (u):	65,38				
Densidade do Zn (g/cm ²):	7,14				
Experimento	1	2	3	4	5
Tempo (min):	5	10	15	10	10
i_c (A/dm ²):	1	1	1	0,8	1,2
Corrente (A):	1,1	1,1	1,1	0,9	1,4
Massa depositada (g):	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3
Espessura média (µm):	2,8	5,7	8,5	4,6	6,8
Espessura calculada (µm):	3,3	4,8	7,4	4,0	8,4
Erro (%):	13,6	-18,9	-15,0	-14,5	18,8

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

4.4 ANÁLISE DA MICRODUREZA

A eletrodeposição de zinco sobre a superfície do aço SAE 1010 fez com que a microdureza diminuísse conforme o aumento da espessura de camada e densidade de

corrente. Esse fato é exatamente o oposto que ocorre com o experimento de Popoola et al. (2012), em que a microdureza aumenta conforme cresce o potencial aplicado para o mesmo tempo de eletrodeposição. Ou seja, inicialmente não é possível extrapolar o resultado do trabalho de POPOOLA et al. para outras condições e materiais. Porém, como pode ser observado na Figura 4.10, há trincas na camada de conversão. O fato da camada de conversão não ser compacta faz com que os resultados de microdureza não sejam satisfatórios, pois ao mensurar um determinado ponto, a estrutura frágil local pode absorver a energia aplicada durante a indentação. No Apêndice G tem-se as diversas micrografias eletrônicas dos perfis transversais das amostras em que é possível visualizar trincas e poros.

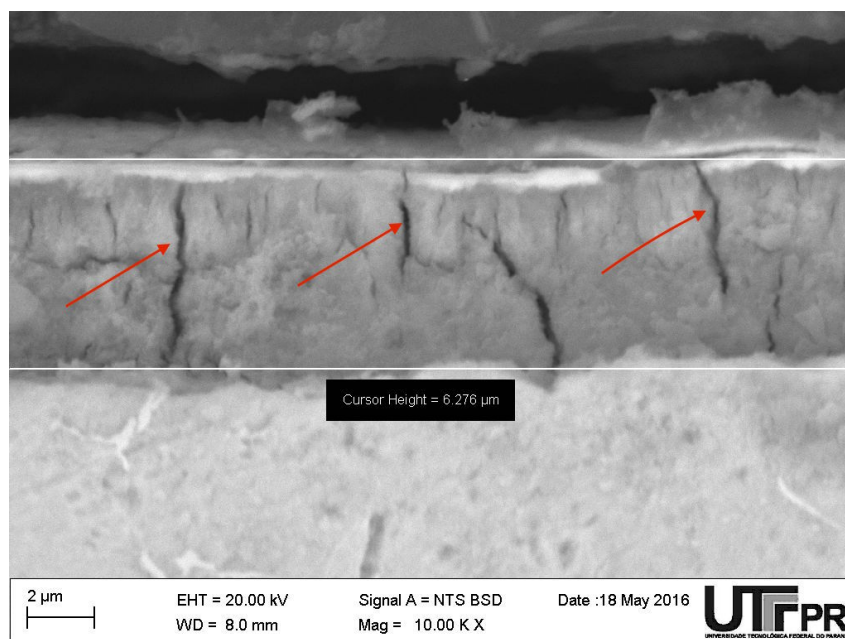


Figura 4.10 – Micrografia eletrônica da seção transversal de amostra do experimento 3 com presença de trincas.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4.8 – Microdureza nos experimento 1, 2 e 3 com densidade de corrente constante

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Tempo (min):	5	10	15
Medição 1 (HV)	174	141	158
Medição 2 (HV)	187	159	157
Medição 3 (HV)	181	139	143
Medição 4 (HV)	186	144	163
Medição 5 (HV)	171	159	157
Média	179,8	148,4	155,6

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

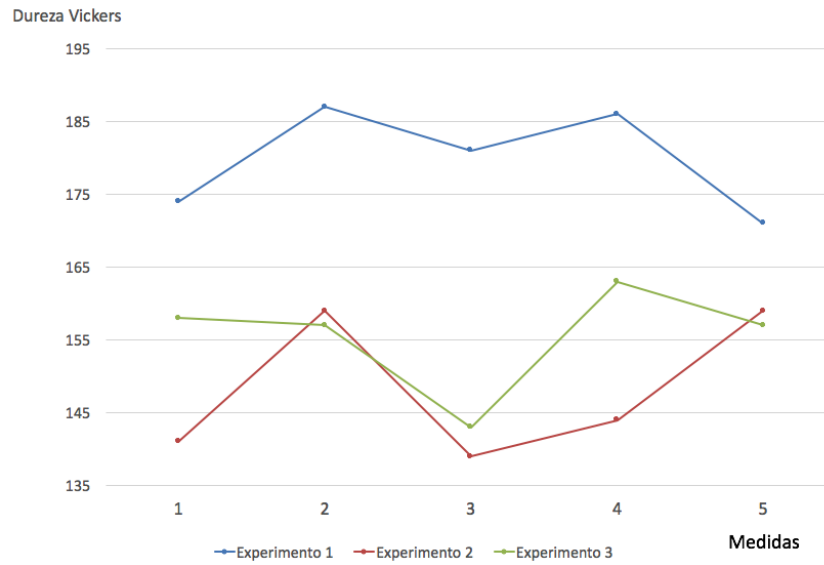


Figura 4.11 – Gráfico de pontos de dureza Vickers nos experimentos 1, 2 e 3.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4.9 – Microdureza nos experimento 4, 2 e 5 com tempo constante

	Experimento 4	Experimento 2	Experimento 5
i_c (A/dm ²):	0,8	1	1,2
Medição 1 (HV)	194	141	139
Medição 2 (HV)	184	159	147
Medição 3 (HV)	194	139	136
Medição 4 (HV)	181	144	137
Medição 5 (HV)	184	159	149
Média	187,4	148,4	141,6

Fonte: Elaborada pelo autor, 2016

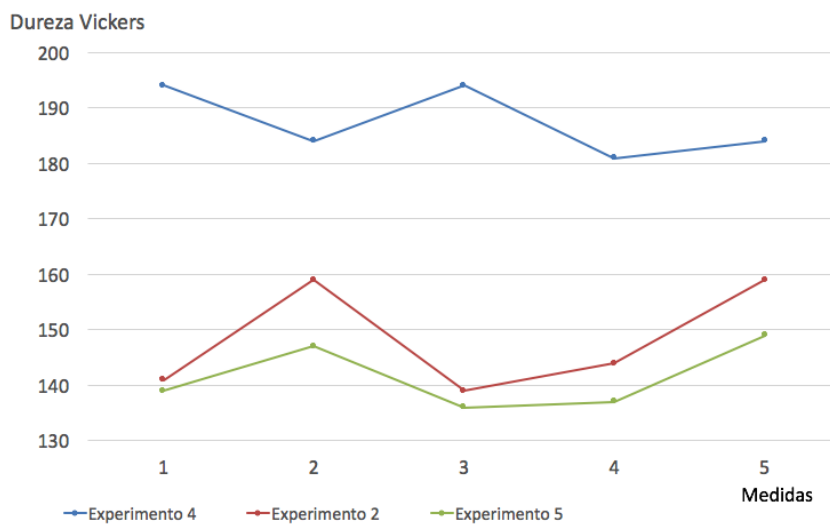


Figura 4.12 – Gráfico de pontos de dureza Vickers nos experimentos 4, 2 e 5.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.5 ENSAIO DE RISCAMENTO

O ensaio de riscamento utilizou uma carga variável de 2 a 8N o que resultou num risco muito superficial sobre a superfície, com profundidade de risco entre 1 e 2 μm , conforme as Figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

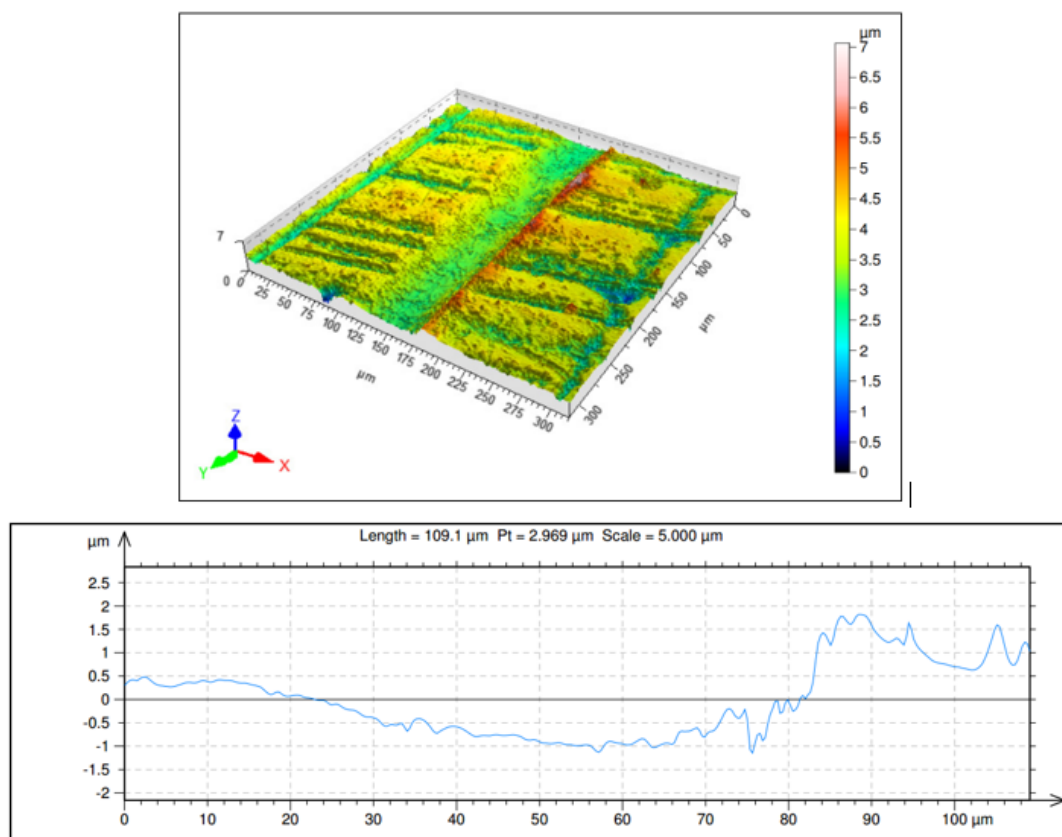


Figura 4.13 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 1
Fonte: Autoria própria, 2016.

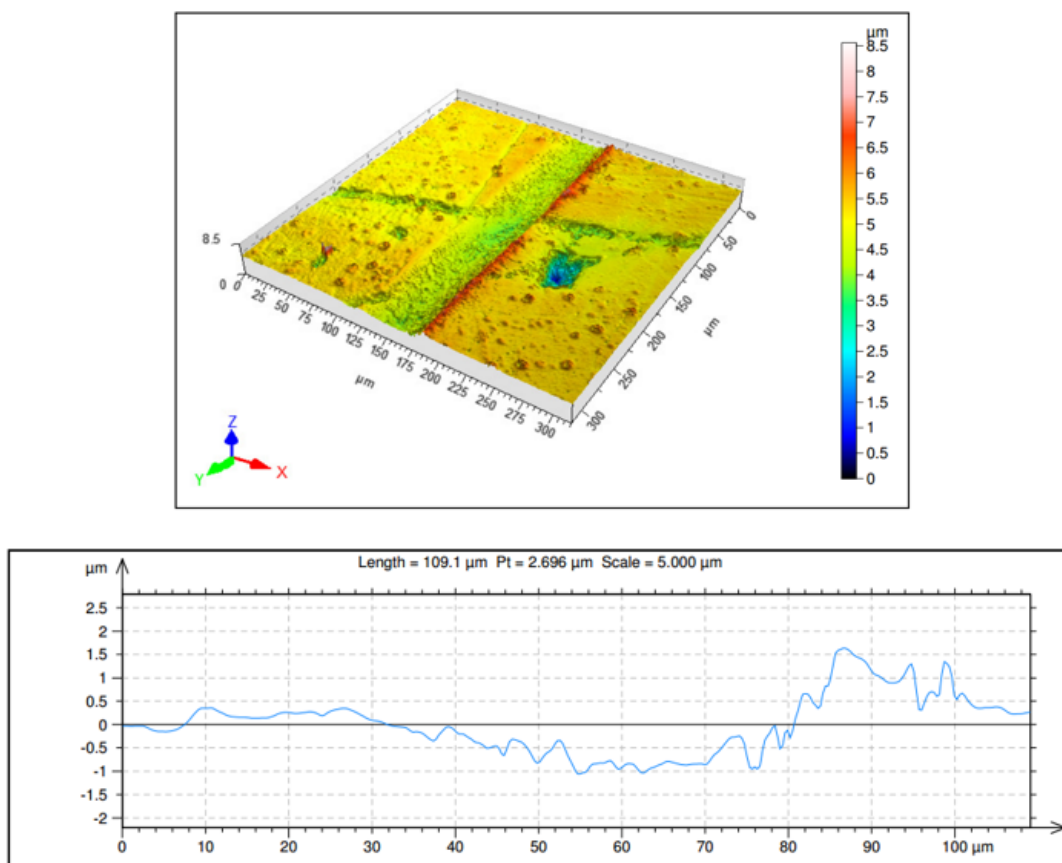


Figura 4.14 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 2
 Fonte: Autoria própria, 2016.

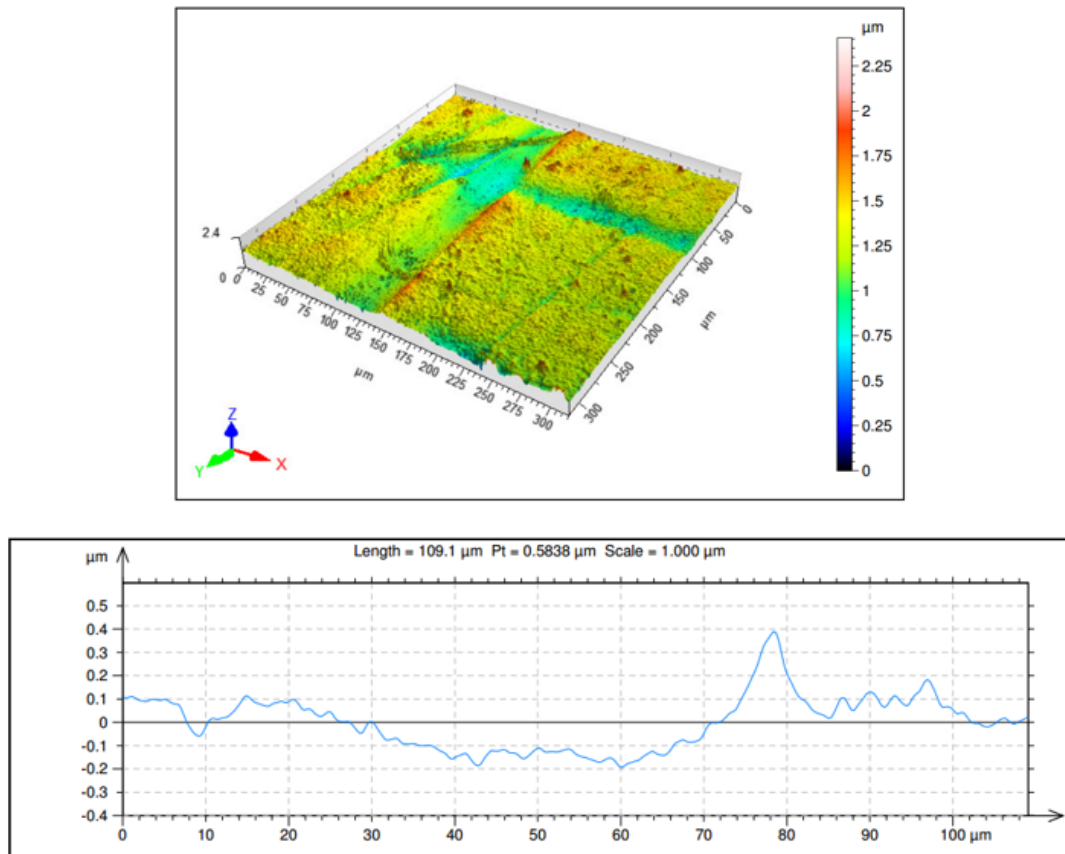


Figura 4.15 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 3

Fonte: Autoria própria, 2016.

Nas micrografias dos riscos, Figuras 4.16 e 4.17, pode-se visualizar que houve falhas de flambagem gerados pela tensão de compressão à frente do incisor. Isto ocorre quando a tensão ultrapassa o limite suportado pelo filme ou quando há pontos ou defeitos interfaciais, (SAMAR, 2004). Como as amostras não foram inicialmente polidas e a camada de conversão de zinco acompanha o perfil da superfície (Figura 4.18), o ensaio de riscamento acaba não fornecendo dados para determinar quando inicia-se a ruptura de camada, coeficiente de atrito, entre outros. As demais micrografias eletrônicas da topografia dos riscos podem ser visualizadas no Apêndice F, os perfis dos riscos feitos no interferômetro estão no Apêndice E e as micrografias das espessuras de camada mensuradas no MEV estão no Apêndice G.

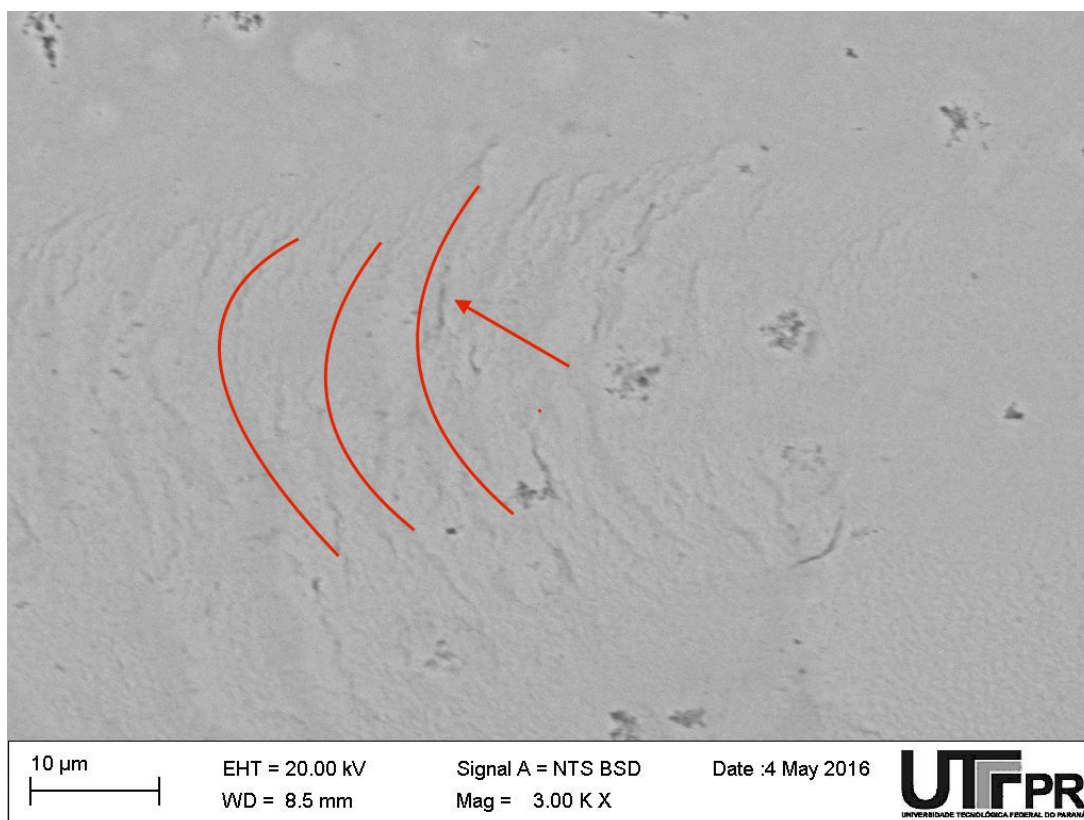


Figura 4.16 – Micrografia eletrônica sobre o risco do experimento 1 com falha do tipo flambagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

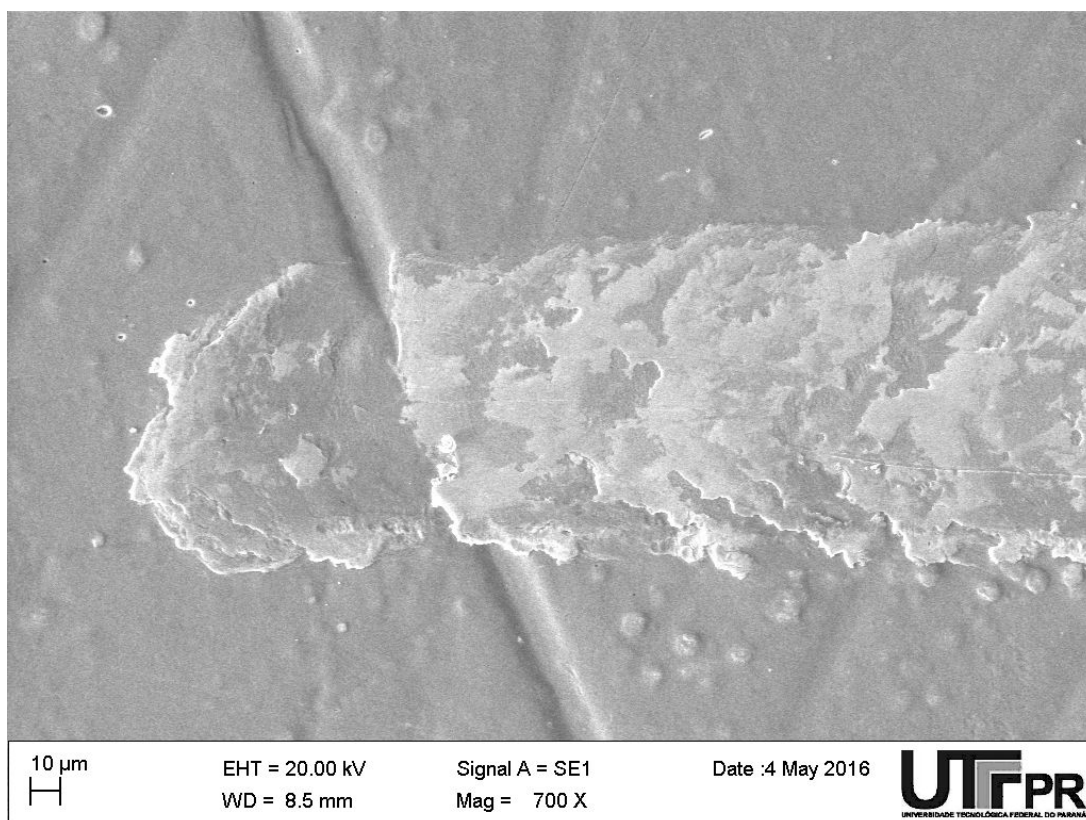


Figura 4.17 – Micrografia eletrônica sobre o risco do experimento 2 com falha do tipo flambagem.

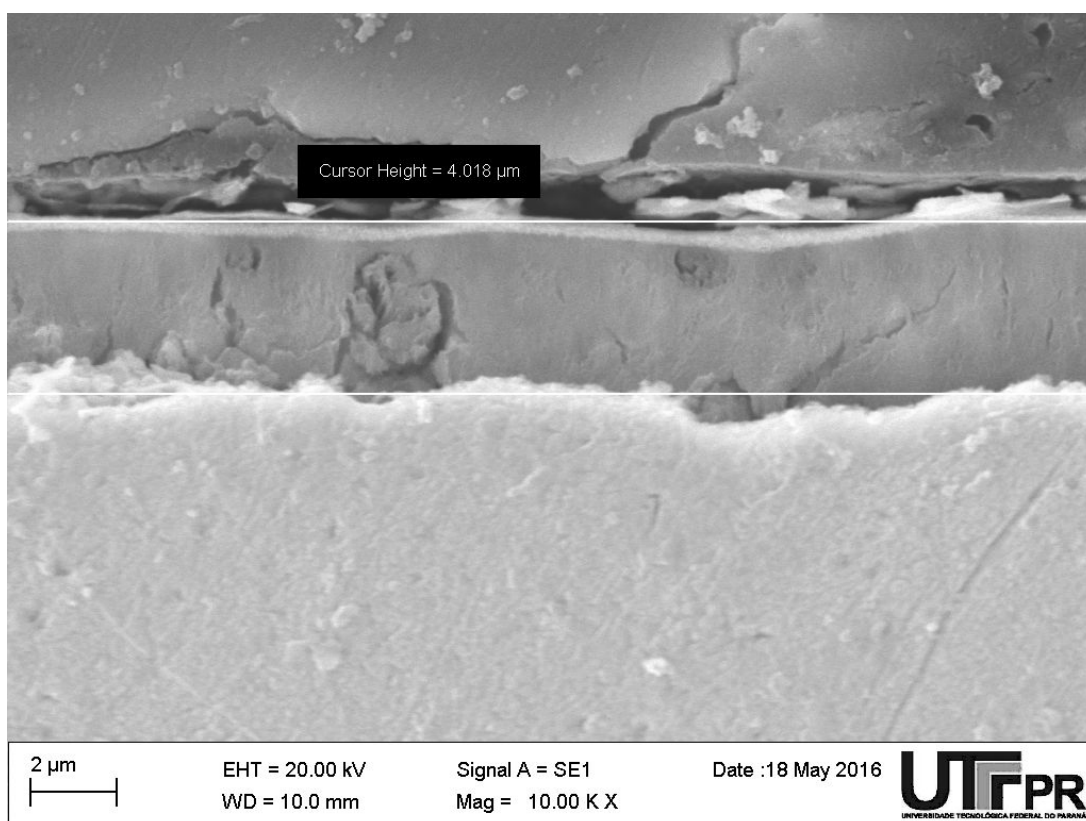


Figura 4.18 – Exemplo de espessura de camada de conversão. Amostra 1, experimento 4.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, análises e discussões pode-se concluir que, para o material e os parâmetros utilizados:

- Para as condições estudadas as espessuras de camada crescem proporcionalmente em relação ao tempo e densidade de corrente. Porém, como é sabido, há um limite de crescimento de camada que depende das condições da solução eletrolítica. Outro fator interessante é que o crescimento das camadas não está relacionado com a qualidade da camada eletrodepositada. Por exemplo, com o aumento da densidade de corrente há uma maior formação de poros e trincas na camada de conversão e isto implica diretamente da qualidade superficial do serviço;
- O ensaio de *scratch test* mostrou-se inconclusivo devido a carga aplicada, que não foi o suficiente para que houvesse ruptura ou perda de aderência da camada galvanizada, e pela qualidade rugosidade superficial elevada da amostra, vide Apêndice A. A menor espessura média dos experimentos foi de $3,3\mu\text{m}$, ou seja, para verificar a qualidade de adesão, a carga aplicada deveria provocar uma profundidade de risco superior a esse valor. Entretanto, mesmo com baixa carga, foi possível identificar o tipo de falha do tipo flambagem, causado pela tensão de compressão gerada a frente do incisora;
- A microdureza diminui conforme aumento da densidade de corrente e tempo para as condições de contorno escolhidas. Ou seja, modificando o tipo de banho, tipo de material e condições de trabalho, pode-se ter valores muito diferentes, como constatado com o trabalho de POPOOLA et al.. Contudo, como há presença de trincas e poros, os resultados de microdureza aqui apresentados podem ser inconclusivos, já que as trincas na proximidade da indentação poderiam absorver parte da energia necessária durante o processo;
- Também relacionado à microdureza, para alguns experimentos a camada de conversão de zinco sobre a peça metálica não apresentou trincas e poros, ou seja, não estava compacta. O fato de ter apresentado trincas e poros pode reduzir a vida útil da peça, pois já de início, o substrato pode estar em contato com a atmosfera, podendo iniciar o processo de corrosão precocemente.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Utilizar os valores de tempo e densidade de corrente do trabalho aqui apresentado para verificar padrão de crescimento da camada de conversão, pois com apenas três pontos não é possível estimar um padrão de crescimento da camada;
- Verificar para quais densidades de corrente e tempo é possível obter camadas eletrodepositadas mais compactas, sem presença de poros e trincas, de forma a obter uma camada com melhor resistência à corrosão;
- Utilizar as mesmas condições operacionais e utilizar amostras polidas para fazer análise do ensaio de riscamento. Verificar se o tipo de falha de adesão continua a ser do tipo flambagem;
- Estudar possibilidade de polir camada de conversão para realizar teste de riscamento e comparar com os resultados do teste em amostras sem polimento;
- Utilizar as mesmas condições operacionais e utilizar amostras em estado de fornecimento, sem abrasão mecânica, e comparar topologia;
- Fazer ensaio de *salt spray* para comprovar a eficiência da camada de conversão para diferentes densidades de corrente e espessura de camada, relacionando com a presença, ou não, de trincas e poros;
- Fazer ensaio de microdureza e verificar num microscópio óptico se há trincas próximas a região indentada de forma a reduzir a possibilidade de que trincas e poros tenham absorvido parte da energia do processo de indentação, invalidando os dados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIATION, A. G. **A Comparative Analysis of Process and Performance Characteristics**. 2011.
- ASTM, B. 633. 2013.
- CASANOVA, T.; SOTO, F.; EYRAUD, M.; CROUSIER, J. Hydrogen absorption during zinc plating on steel. **Corrosion science**, Elsevier, v. 39, n. 3, p. 529–537, 1997.
- GENTIL, V. Corrosão. **Livros Técnicos e Científicos Editora SA, Rio de Janeiro**, 2003.
- HILLIER, E.; ROBINSON, M. Permeation measurements to study hydrogen uptake by steel electroplated with zinc–cobalt alloys. **Corrosion science**, Elsevier, v. 48, n. 5, p. 1019–1035, 2006.
- IZC. **Mercado Brasileiro de Galvanização**. 2013. [Http://www.icz.org.br/portaldagalvanizacao](http://www.icz.org.br/portaldagalvanizacao). Disponível em: <<http://www.icz.org.br/>>.
- MACEDO, R. Corrosão, um problema de bilhões de dólares. **Revista Macaé Offshore, Macaé, ano**, v. 3, p. 152, 2014. Disponível em: <<http://www.macaeeoffshore.com.br/revista/internas.asp?acao=noticia3&edicao=18>>.
- MUNDIAL, B. **Produto Interno Bruto**. 2013. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD>>.
- NETO, A. C. d. N. Um estudo sobre o uso do zinco e as estratégias de marketing no segmento galvanizador geral brasileiro. 2010.
- PALMA, E.; PUENTE, J.; MORCILLO, M. The atmospheric corrosion mechanism of 55% al-zn coating on steel. **Corrosion Science**, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 61–68, 1998.
- PANASSION, Z. Corrosão e proteção contra a corrosão em equipamentos e estruturas metálicas ipt. **São Paulo**, 1993.
- POPOOLA, A.; FAYOMI, O. Effect of some process variables on zinc coated low carbon steel substrates. **Scientific research and essays**, 2011.
- POPOOLA, A.; FAYOMI, O.; POPOOLA, O. Comparative studies of microstructural, tribological and corrosion properties of plated zn and zn-alloy coatings. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 7, n. 9, p. 4860, 2012.

RAHMAN, M.; SEN, S.; MONIRUZZAMAN, M.; SHOROWORDI, K. Morphology and properties of electrodeposited zn-ni alloy coatings on mild steel. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 40, n. 1, p. 9–14, 2009.

SAMAR, F.

Técnica de teste de riscamento para investigação da adesão de filmes, 2004.

SILOS, R. M. de. **Manual Técnico Surtec: Tratamentos de superfícies**. 3 ed.. ed. [S.l.], 2009.

WIERCINSKI, A.

Galvanoplastia: Melhorias no Processo de Zincagem Eletrolítica, 2015.

WINAND, R. Electrodeposition of zinc and zinc alloys. **Modern Electroplating**, John Wiley & Sons, v. 52, p. 285, 2011.

APÊNDICE A – RUGOSIDADE DAS AMOSTRAS

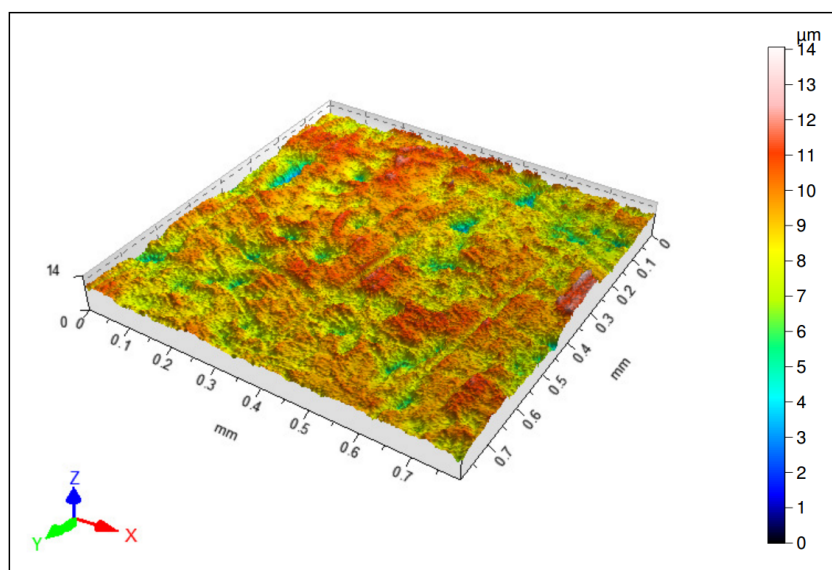


Figura A.1 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra em estado de fabricação.

Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178				
Height Parameters				
Sq	1.226	µm		<i>Root mean square height</i>
Ssk	-0.8877			<i>Skewness</i>
Sku	5.274			<i>Kurtosis</i>
Sp	5.150	µm		<i>Maximum peak height</i>
Sv	8.910	µm		<i>Maximum pit height</i>
Sz	14.06	µm		<i>Maximum height</i>
Sa	0.9225	µm		<i>Arithmetic mean height</i>
Spatial Parameters				
Str	0.6042		<i>s = 0.2</i>	<i>Texture-aspect ratio</i>
Std	83.50	°		<i>Texture direction</i>
Sal	0.04482	mm	<i>s = 0.2</i>	<i>Auto-correlation length</i>

Figura A.2 – Parâmetros de rugosidade da amostra em estado de fabricação.

Fonte: Autoria própria, 2016.

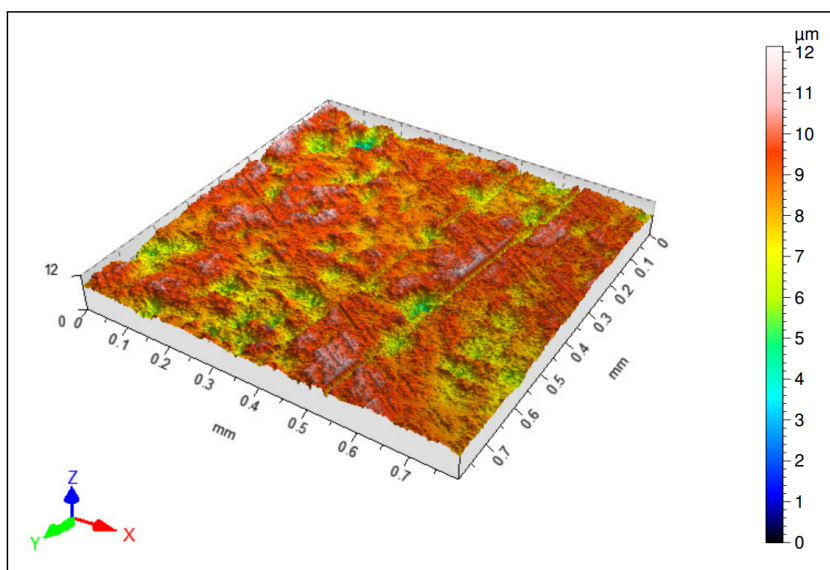


Figura A.3 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra em estado de fabricação.

Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178				
Height Parameters				
Sq	1.038	µm		<i>Root mean square height</i>
Ssk	-0.9759			<i>Skewness</i>
Sku	5.739			<i>Kurtosis</i>
Sp	3.440	µm		<i>Maximum peak height</i>
Sv	8.699	µm		<i>Maximum pit height</i>
Sz	12.14	µm		<i>Maximum height</i>
Sa	0.7839	µm		<i>Arithmetic mean height</i>
Spatial Parameters				
Str	0.5854		<i>s = 0.2</i>	<i>Texture-aspect ratio</i>
Std	83.01	°		<i>Texture direction</i>
Sal	0.04672	mm	<i>s = 0.2</i>	<i>Auto-correlation length</i>

Figura A.4 – Parâmetros de rugosidade da amostra em estado de fabricação.

Fonte: Autoria própria, 2016.

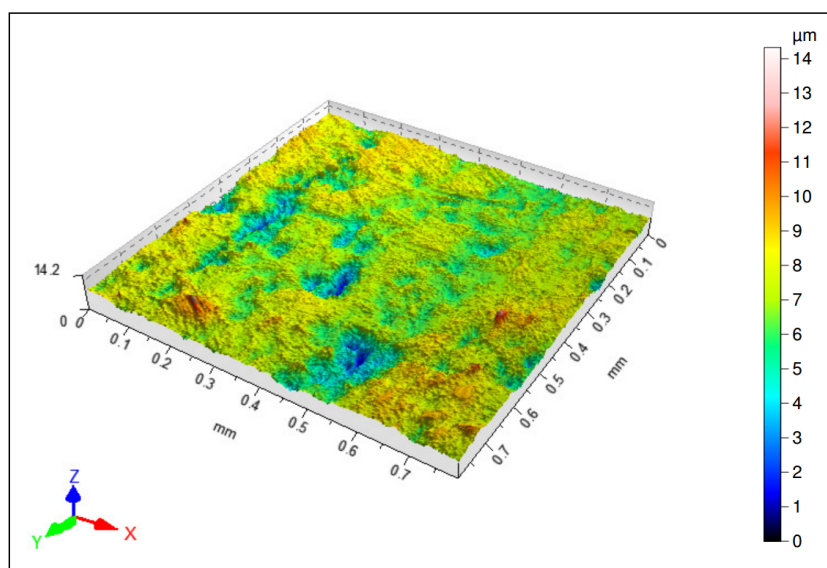


Figura A.5 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra em estado de fabricação.

Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178				
Height Parameters				
Sq	1.226	µm		<i>Root mean square height</i>
Ssk	-0.8877			<i>Skewness</i>
Sku	5.274			<i>Kurtosis</i>
Sp	5.150	µm		<i>Maximum peak height</i>
Sv	8.910	µm		<i>Maximum pit height</i>
Sz	14.06	µm		<i>Maximum height</i>
Sa	0.9225	µm		<i>Arithmetic mean height</i>
Spatial Parameters				
Str	0.6042		<i>s = 0.2</i>	<i>Texture-aspect ratio</i>
Std	83.50	°		<i>Texture direction</i>
Sal	0.04482	mm	<i>s = 0.2</i>	<i>Auto-correlation length</i>

Figura A.6 – Parâmetros de rugosidade da amostra em estado de fabricação.

Fonte: Autoria própria, 2016.

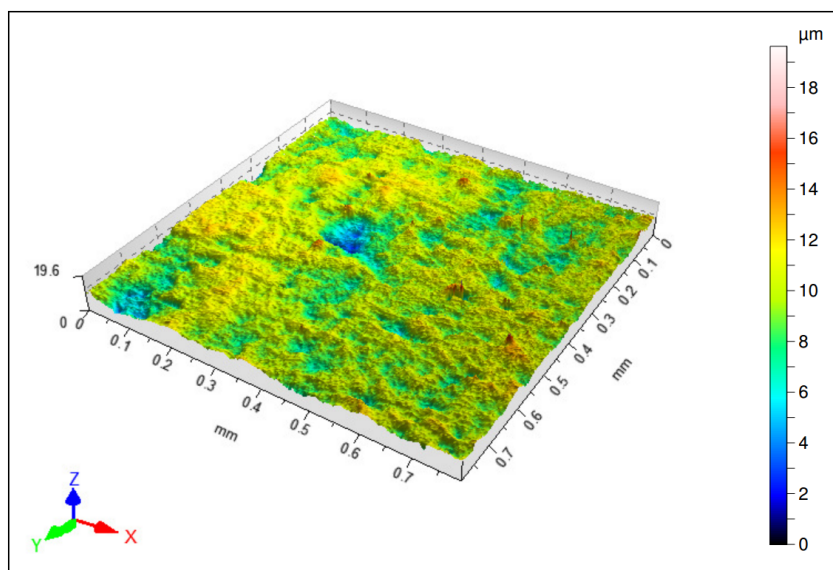


Figura A.7 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178			
Height Parameters			
Sq	1.398	µm	Root mean square height
Ssk	-0.7931		Skewness
Sku	4.898		Kurtosis
Sp	9.874	µm	Maximum peak height
Sv	9.752	µm	Maximum pit height
Sz	19.63	µm	Maximum height
Sa	1.073	µm	Arithmetic mean height
Spatial Parameters			
Str	0.6542		$s = 0.2$ Texture-aspect ratio
Std	8.497	°	Texture direction
Sal	0.0601	mm	$s = 0.2$ Auto-correlation length

Figura A.8 – Parâmetros de rugosidade da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

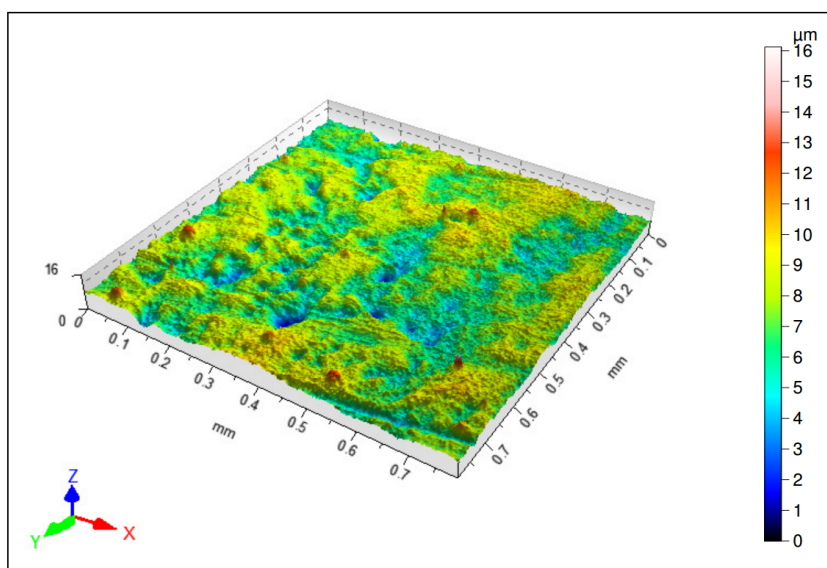


Figura A.9 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178				
Height Parameters				
Sq	1.357	µm		<i>Root mean square height</i>
Ssk	-0.3578			<i>Skewness</i>
Sku	3.573			<i>Kurtosis</i>
Sp	8.792	µm		<i>Maximum peak height</i>
Sv	7.331	µm		<i>Maximum pit height</i>
Sz	16.12	µm		<i>Maximum height</i>
Sa	1.075	µm		<i>Arithmetic mean height</i>
Spatial Parameters				
Str	0.6283		<i>s = 0.2</i>	<i>Texture-aspect ratio</i>
Std	8.495	°		<i>Texture direction</i>
Sal	0.05384	mm	<i>s = 0.2</i>	<i>Auto-correlation length</i>

Figura A.10 – Parâmetros de rugosidade da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

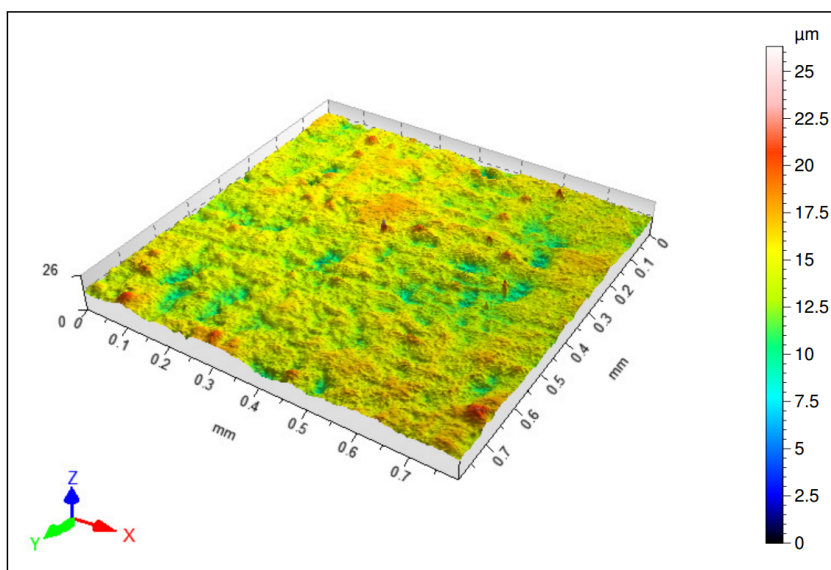


Figura A.11 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178				
Height Parameters				
Sq	1.513	µm		<i>Root mean square height</i>
Ssk	-0.4097			<i>Skewness</i>
Sku	5.076			<i>Kurtosis</i>
Sp	11.83	µm		<i>Maximum peak height</i>
Sv	14.48	µm		<i>Maximum pit height</i>
Sz	26.31	µm		<i>Maximum height</i>
Sa	1.169	µm		<i>Arithmetic mean height</i>
Spatial Parameters				
Str	0.6785		<i>s = 0.2</i>	<i>Texture-aspect ratio</i>
Std	8.754	°		<i>Texture direction</i>
Sal	0.04885	mm	<i>s = 0.2</i>	<i>Auto-correlation length</i>

Figura A.12 – Parâmetros de rugosidade da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

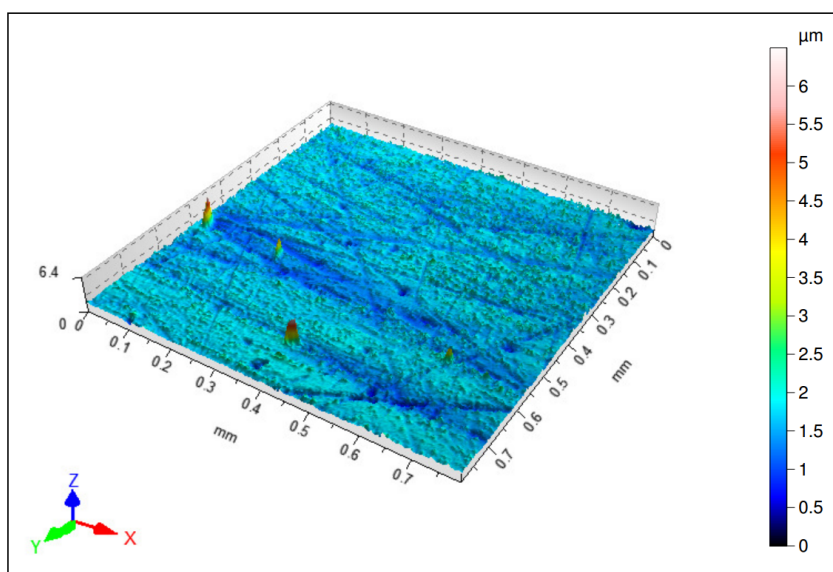


Figura A.13 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra lixada.
 Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178				
Height Parameters				
Sq	0.2528	µm		<i>Root mean square height</i>
Ssk	2.055			<i>Skewness</i>
Sku	34.08			<i>Kurtosis</i>
Sp	4.842	µm		<i>Maximum peak height</i>
Sv	1.656	µm		<i>Maximum pit height</i>
Sz	6.498	µm		<i>Maximum height</i>
Sa	0.1771	µm		<i>Arithmetic mean height</i>
Spatial Parameters				
Str	0.2781		<i>s = 0.2</i>	<i>Texture-aspect ratio</i>
Std	5.241	°		<i>Texture direction</i>
Sal	0.01971	mm	<i>s = 0.2</i>	<i>Auto-correlation length</i>

Figura A.14 – Parâmetros de rugosidade da amostra lixada.
 Fonte: Autoria própria, 2016.

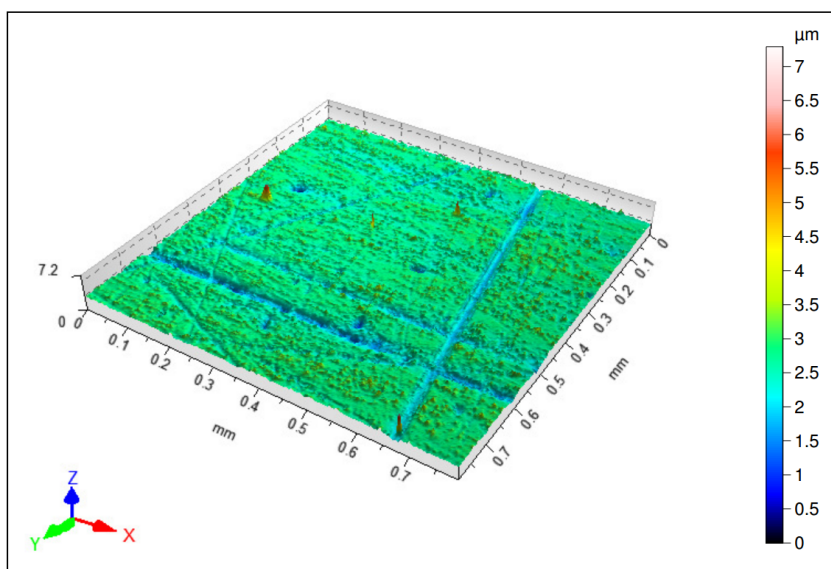


Figura A.15 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra lixada.

Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178				
Height Parameters				
Sq	0.2713	µm		<i>Root mean square height</i>
Ssk	-0.4694			<i>Skewness</i>
Sku	11.31			<i>Kurtosis</i>
Sp	4.605	µm		<i>Maximum peak height</i>
Sv	2.684	µm		<i>Maximum pit height</i>
Sz	7.290	µm		<i>Maximum height</i>
Sa	0.1880	µm		<i>Arithmetic mean height</i>
Spatial Parameters				
Str	0.06092		<i>s = 0.2</i>	<i>Texture-aspect ratio</i>
Std	99.26	°		<i>Texture direction</i>
Sal	0.02403	mm	<i>s = 0.2</i>	<i>Auto-correlation length</i>

Figura A.16 – Parâmetros de rugosidade da amostra lixada.

Fonte: Autoria própria, 2016.

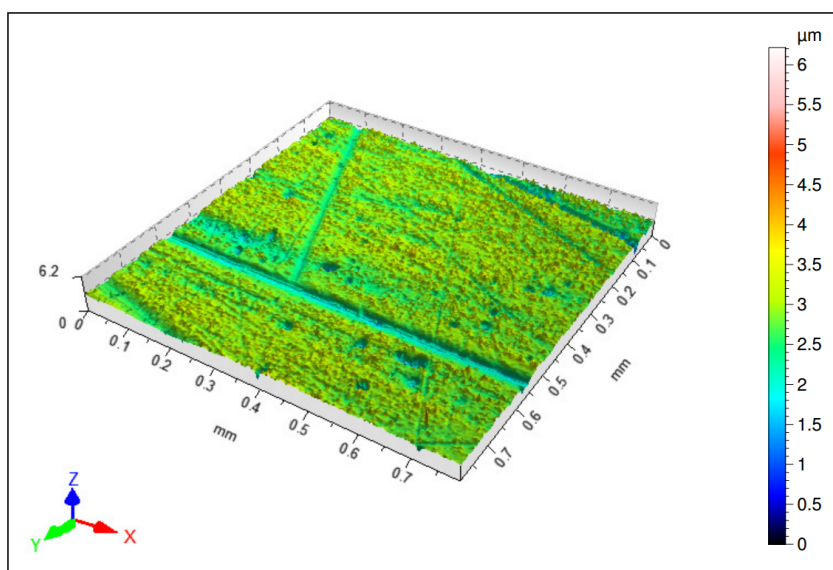


Figura A.17 – Modelagem via interferômetro da superfície da amostra lixada.
 Fonte: Autoria própria, 2016.

ISO 25178				
Height Parameters				
Sq	0.3095	µm		<i>Root mean square height</i>
Ssk	-1.246			<i>Skewness</i>
Sku	7.528			<i>Kurtosis</i>
Sp	3.378	µm		<i>Maximum peak height</i>
Sv	2.838	µm		<i>Maximum pit height</i>
Sz	6.216	µm		<i>Maximum height</i>
Sa	0.2189	µm		<i>Arithmetic mean height</i>
Spatial Parameters				
Str	0.05274		<i>s = 0.2</i>	<i>Texture-aspect ratio</i>
Std	175.2	°		<i>Texture direction</i>
Sal	0.02081	mm	<i>s = 0.2</i>	<i>Auto-correlation length</i>

Figura A.18 – Parâmetros de rugosidade da amostra lixada.
 Fonte: Autoria própria, 2016.

APÊNDICE B – MICROGRAFIAS ELETRÔNICAS DAS AMOSTRAS

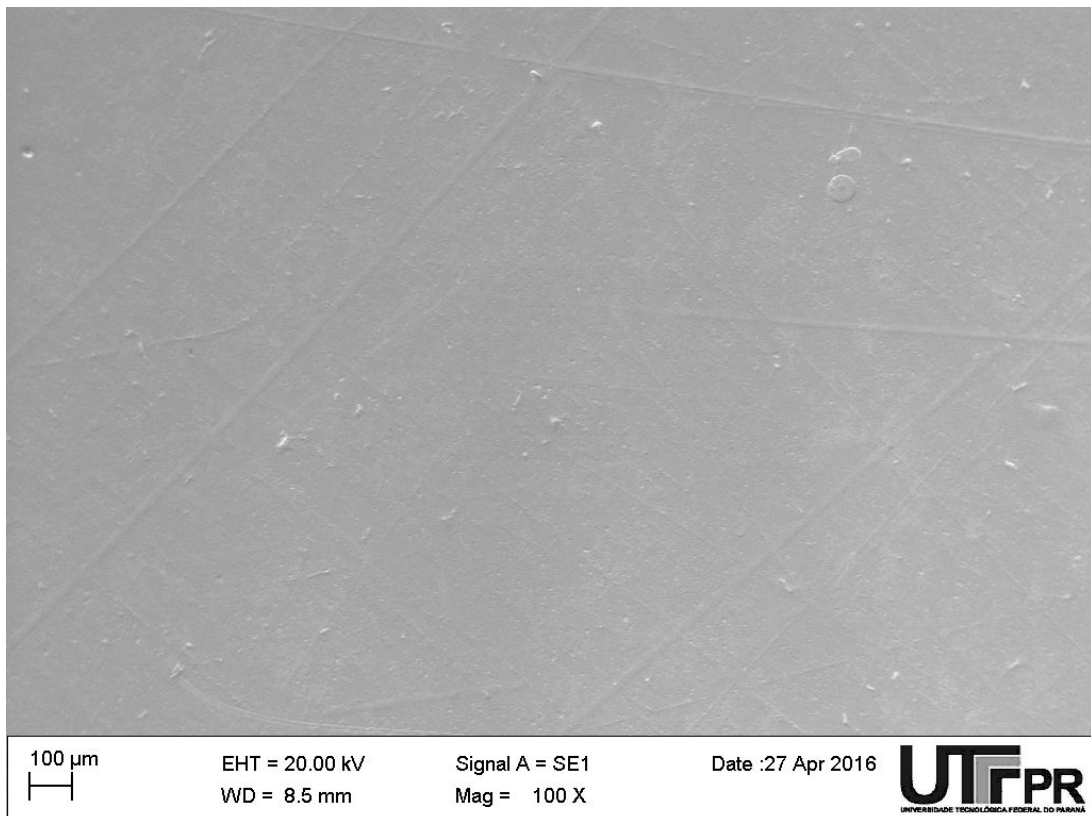


Figura B.1 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2016.

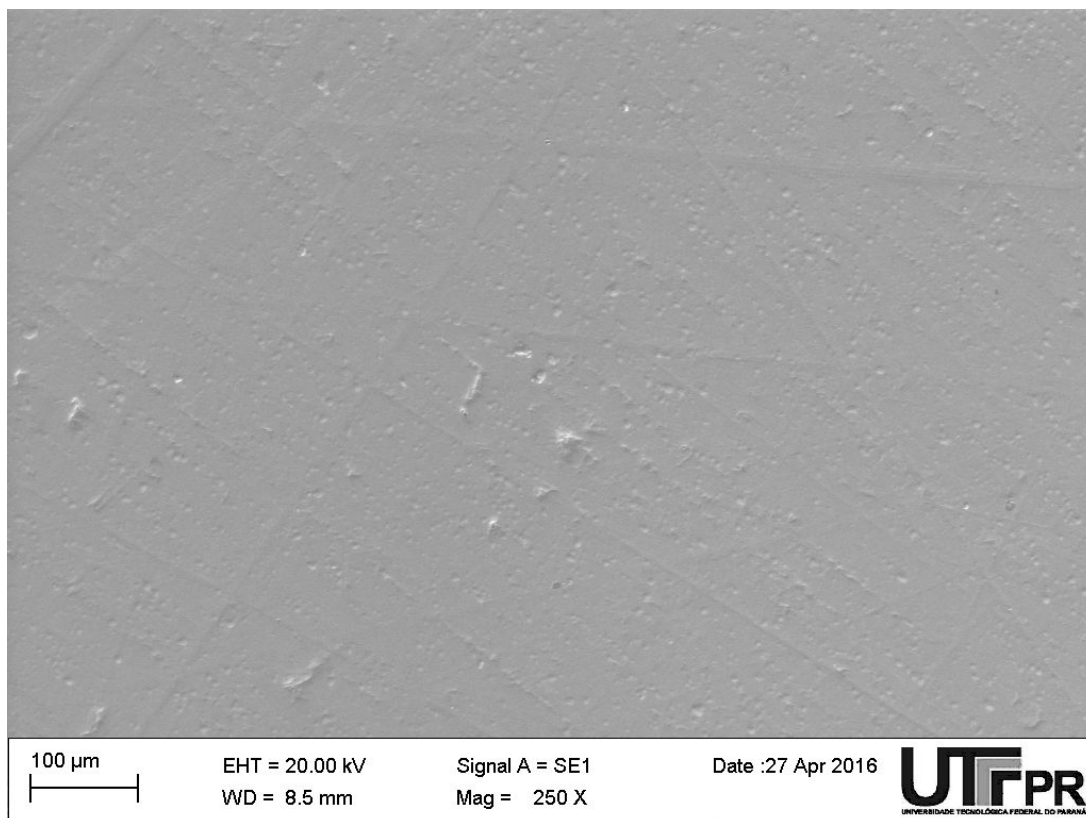


Figura B.2 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2016.

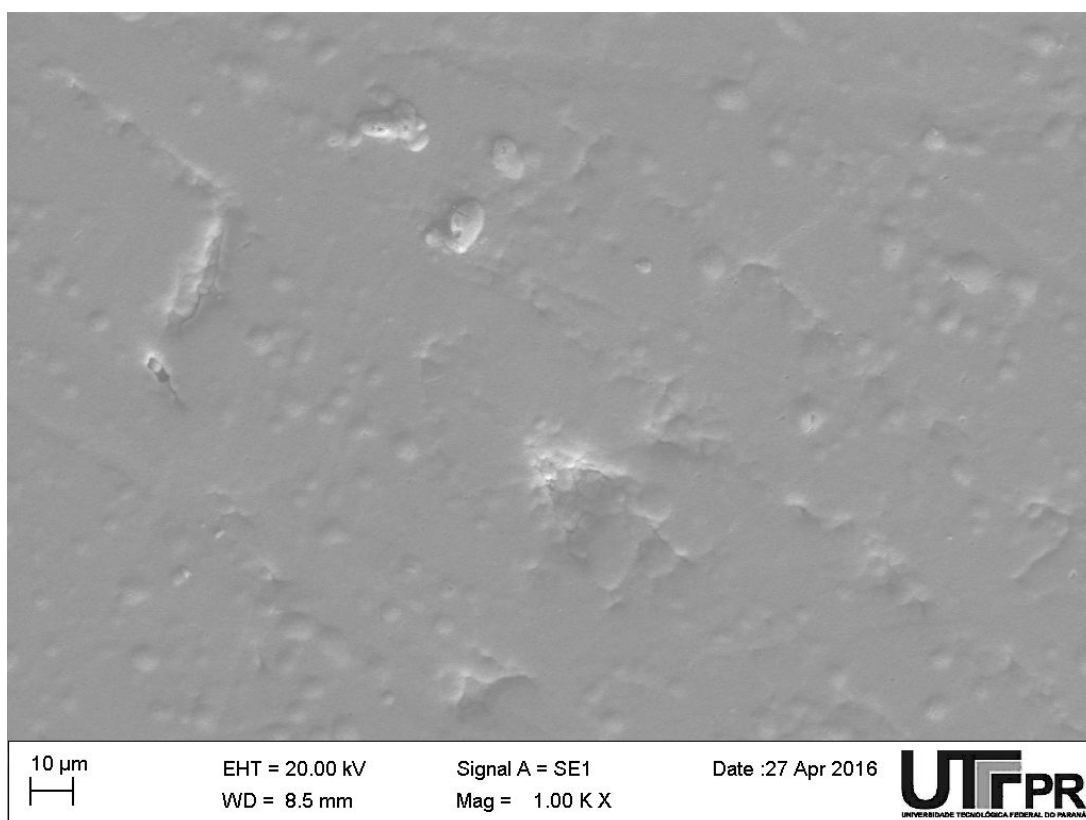


Figura B.3 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2016.

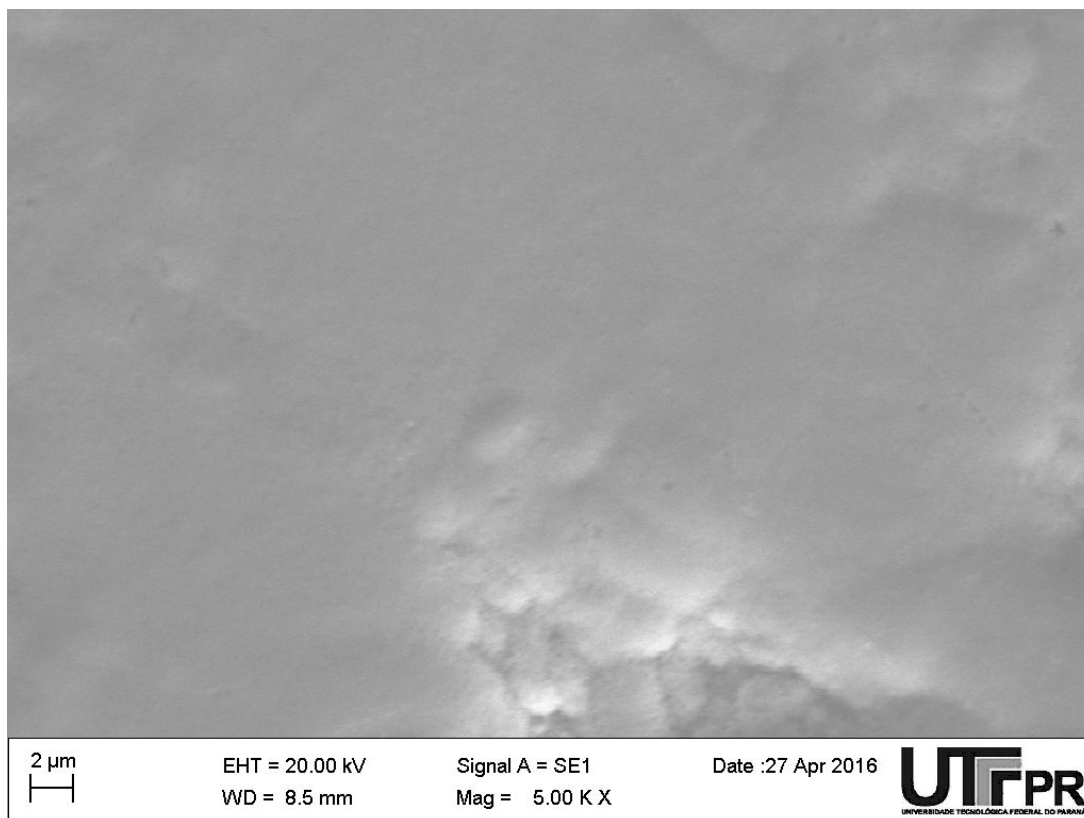


Figura B.4 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2016.

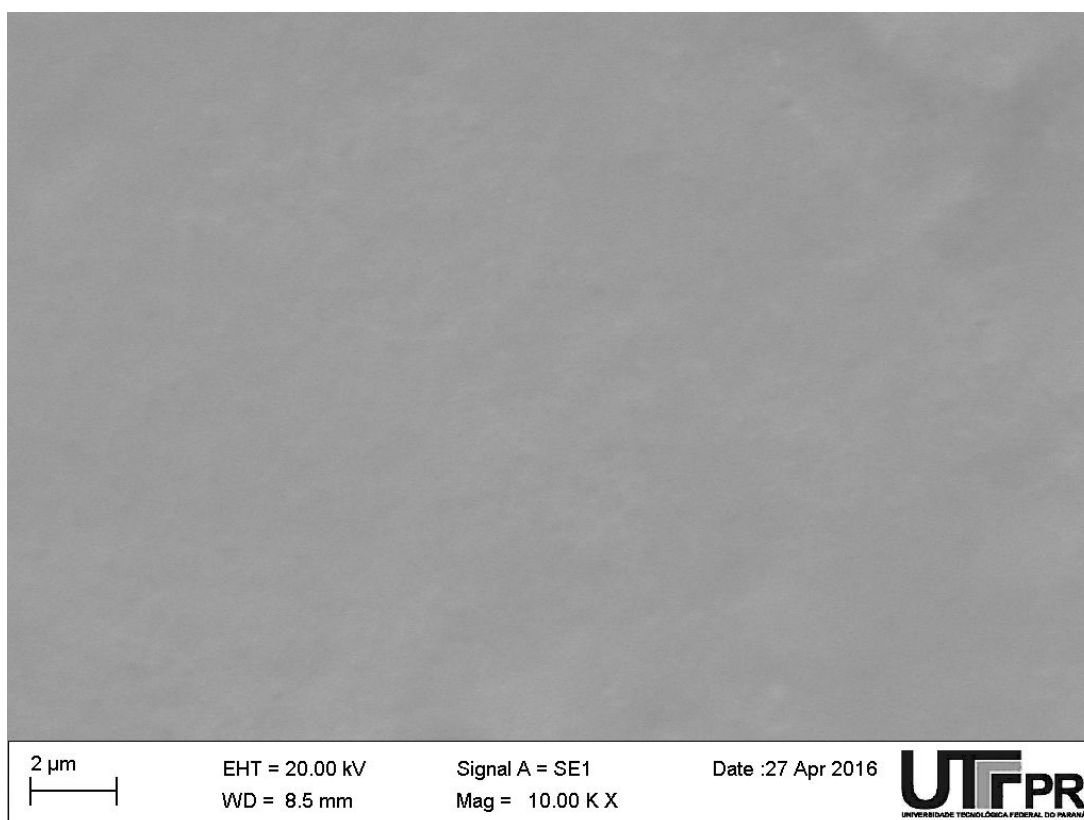


Figura B.5 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2016.

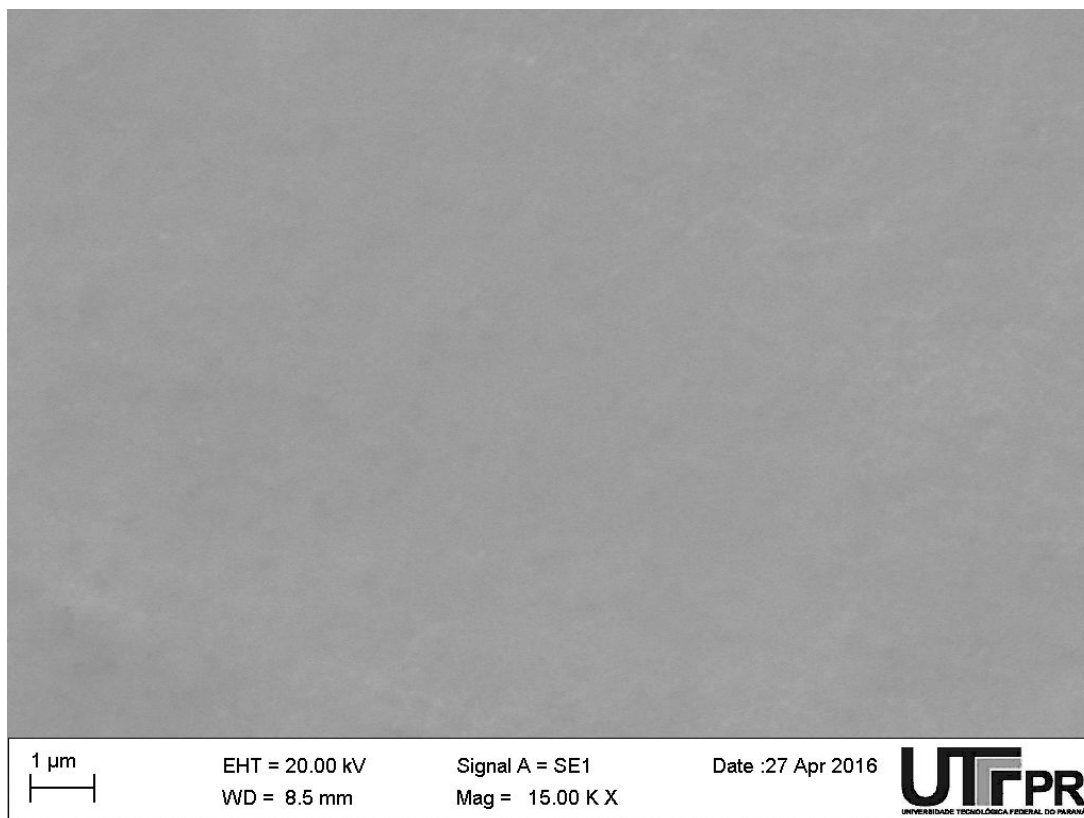


Figura B.6 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2016.

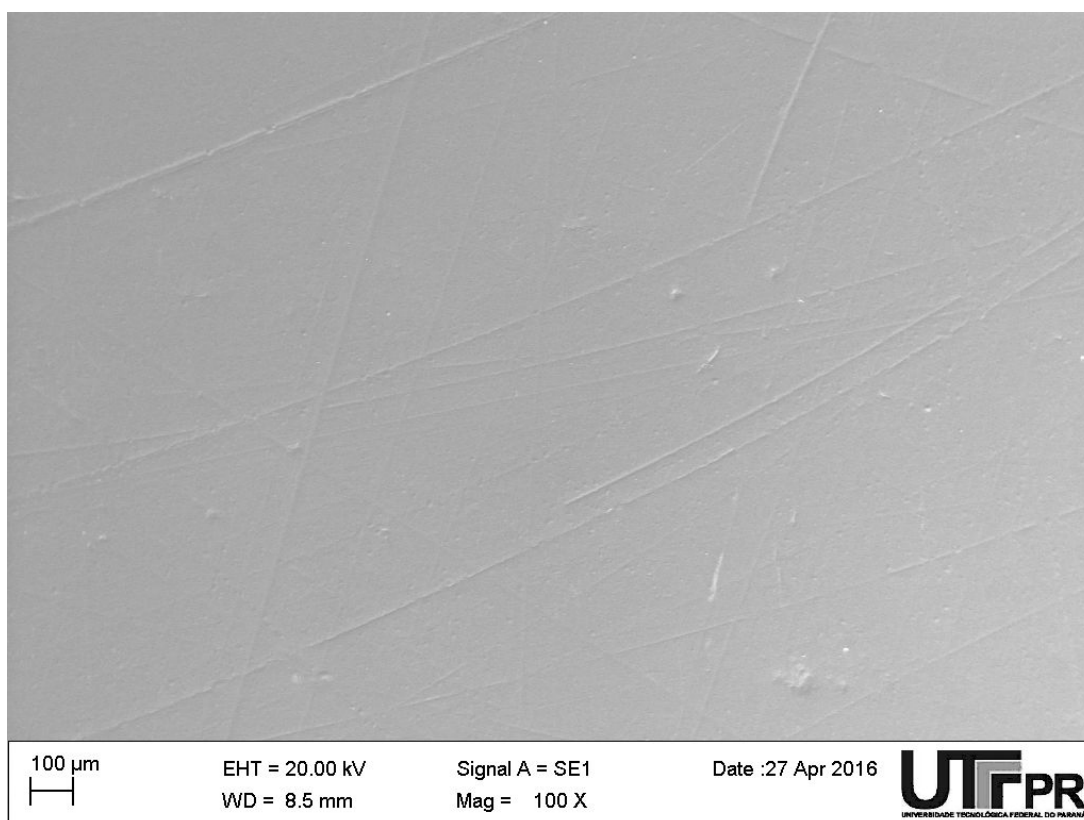


Figura B.7 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 2.

Fonte: Autoria própria, 2016.

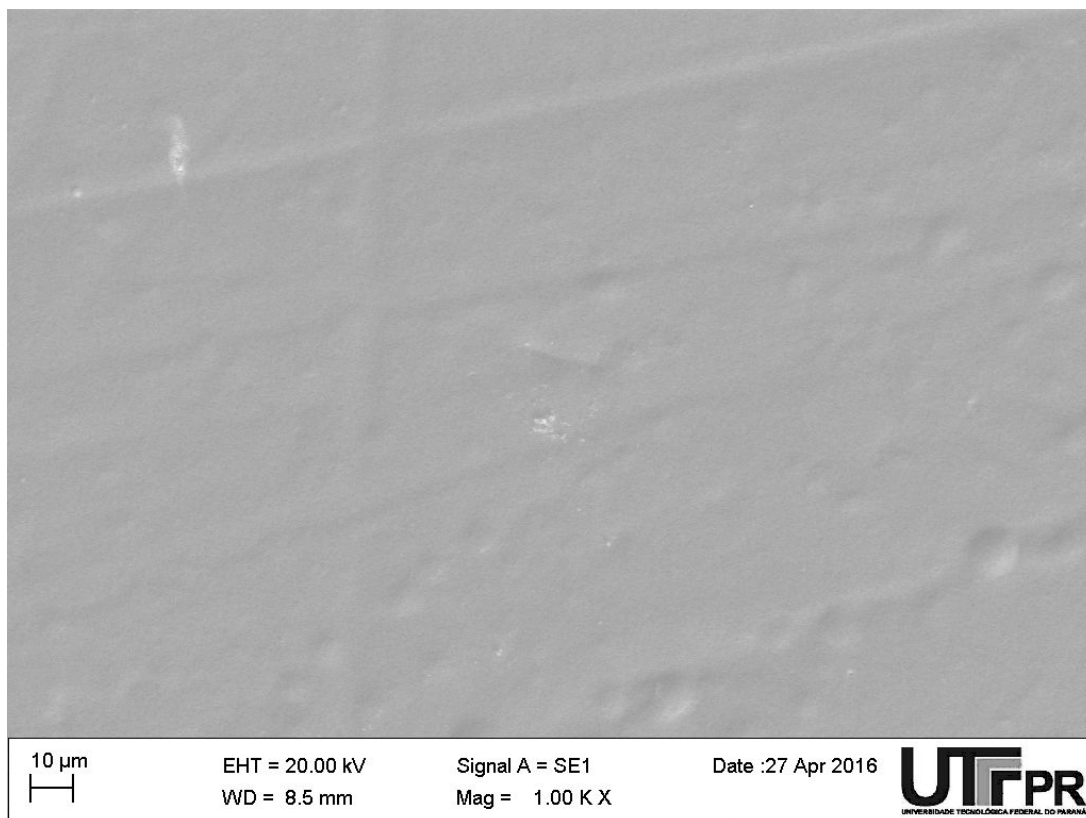


Figura B.8 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 2.

Fonte: Autoria própria, 2016.

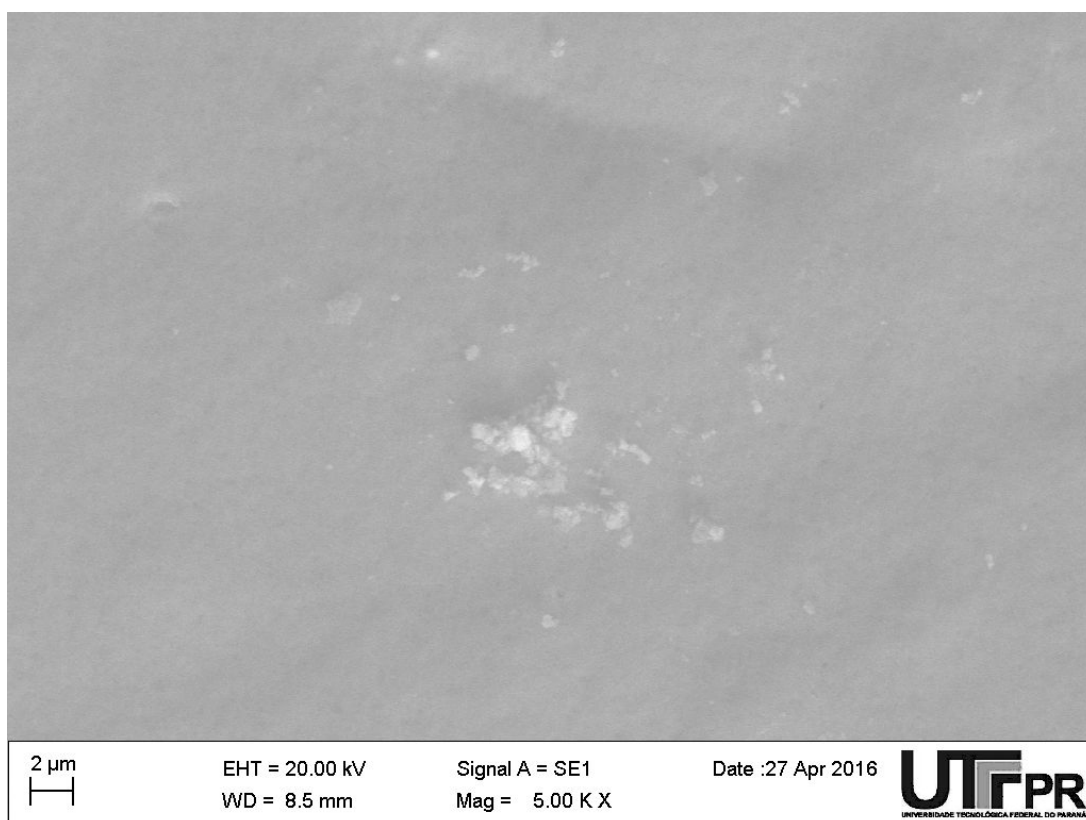


Figura B.9 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 2.

Fonte: Autoria própria, 2016.

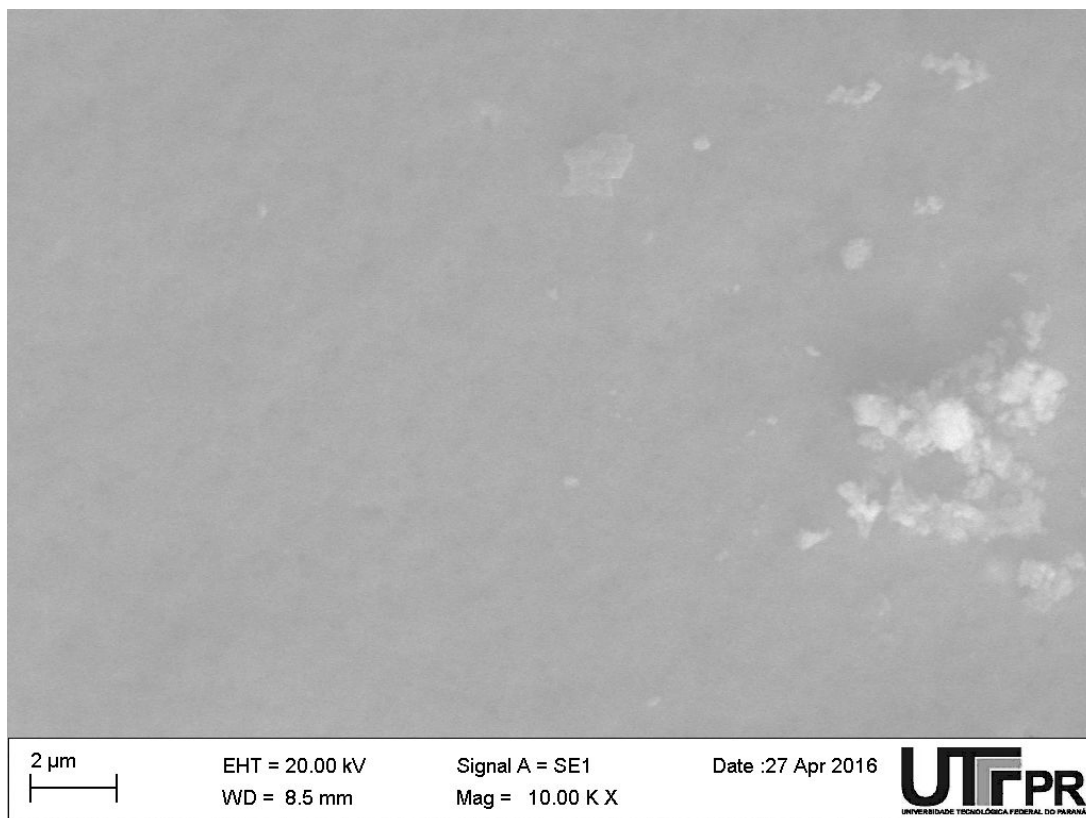


Figura B.10 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 2.

Fonte: Autoria própria, 2016.

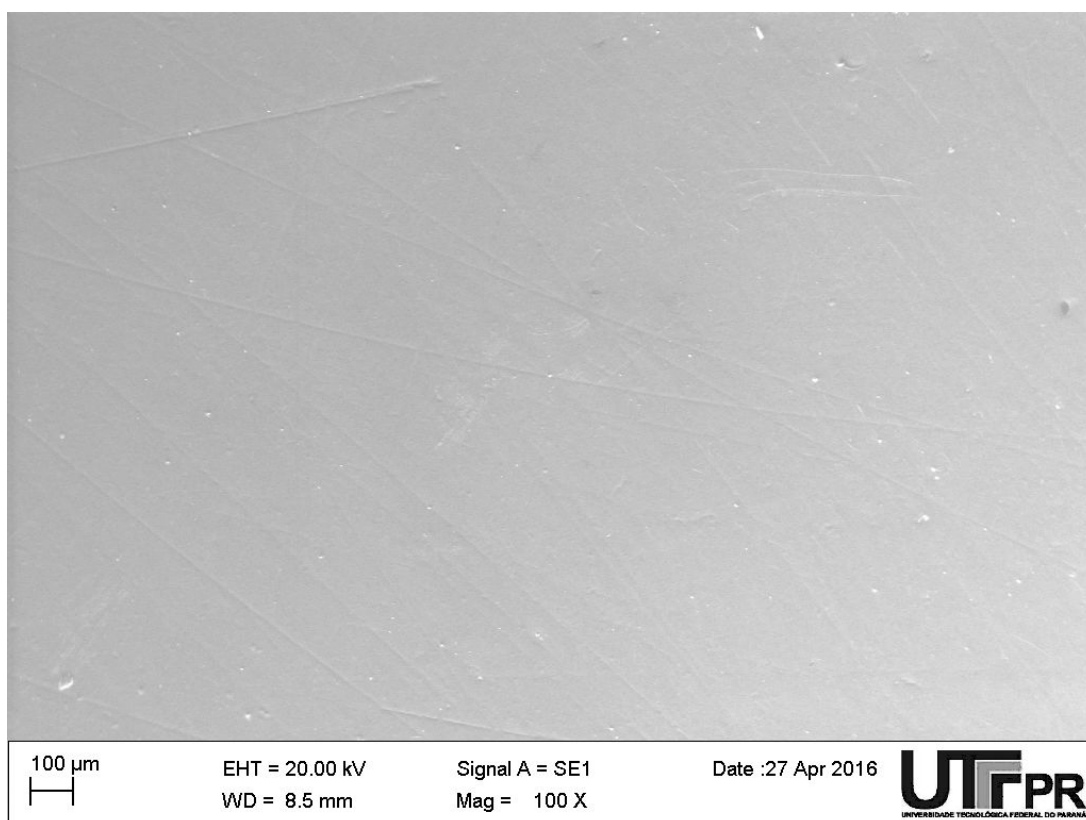


Figura B.11 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 3.

Fonte: Autoria própria, 2016.

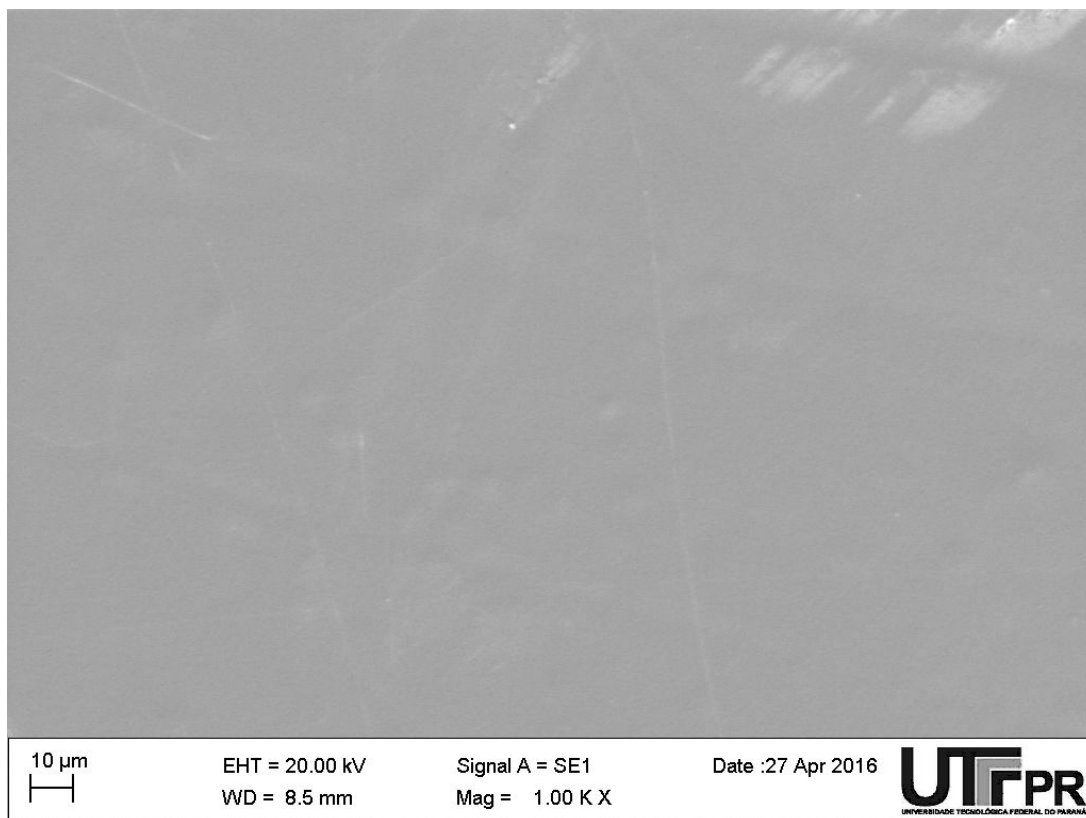


Figura B.12 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 3.

Fonte: Autoria própria, 2016.

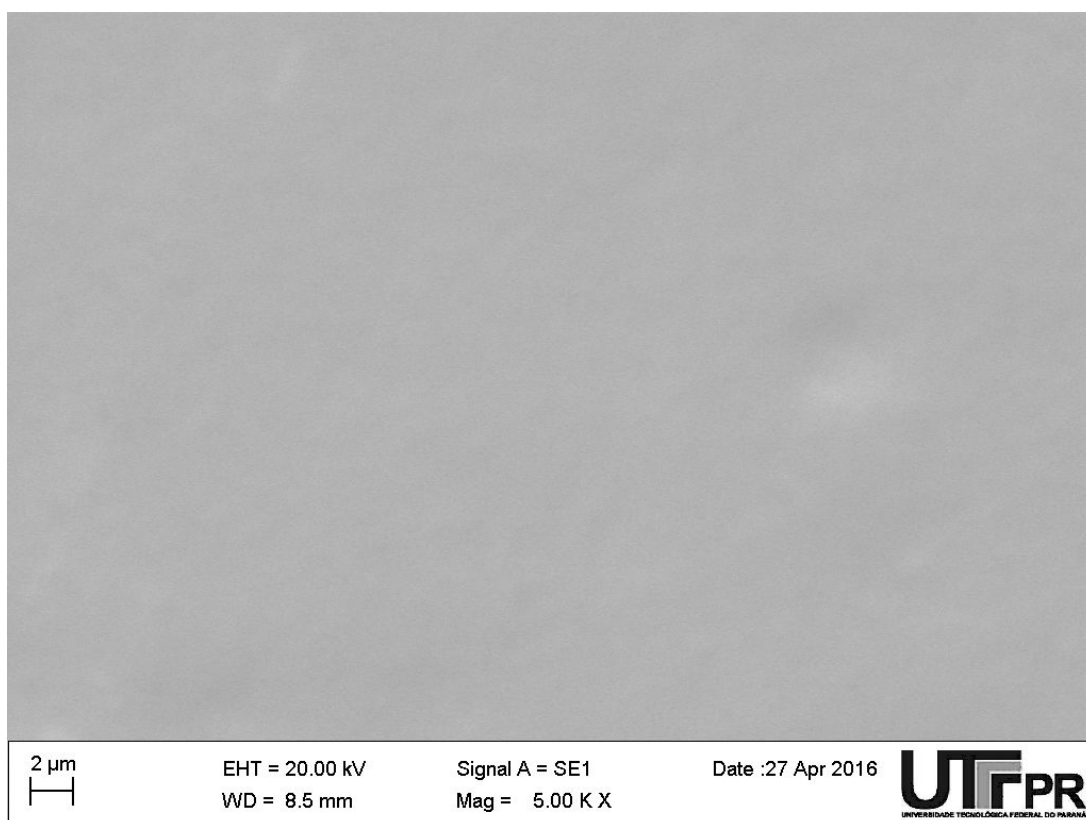


Figura B.13 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 3.

Fonte: Autoria própria, 2016.

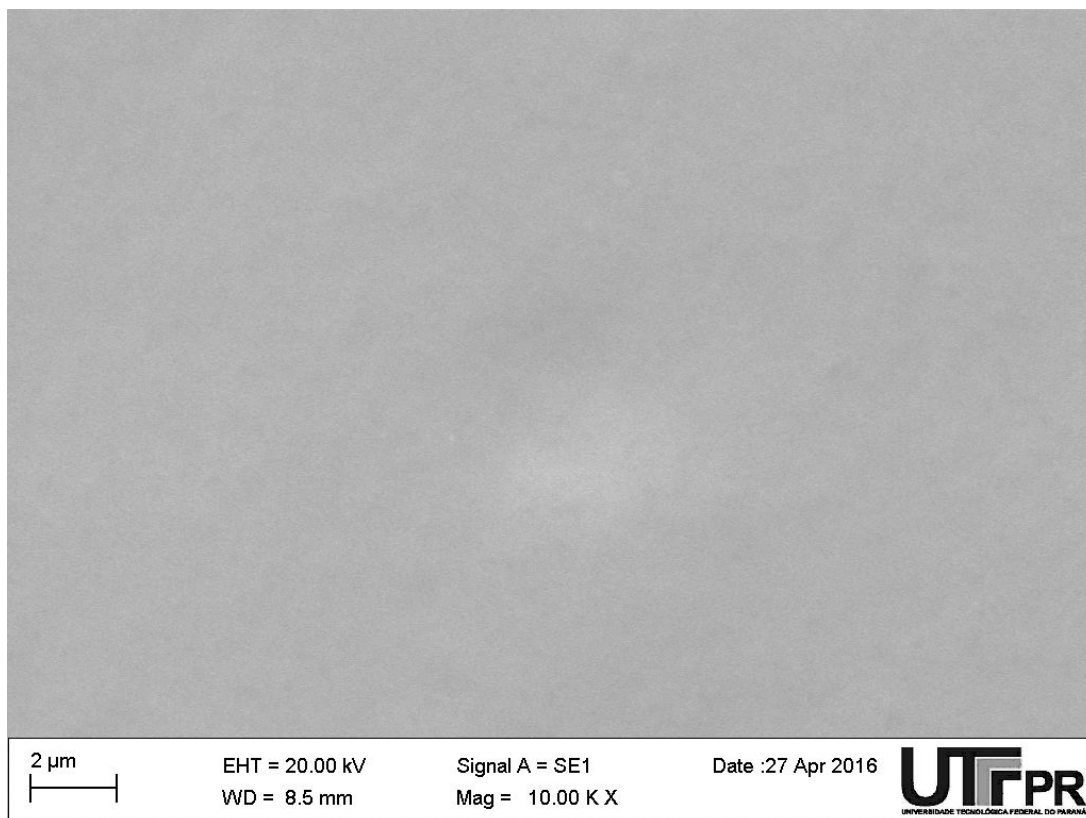


Figura B.14 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 3.

Fonte: Autoria própria, 2016.

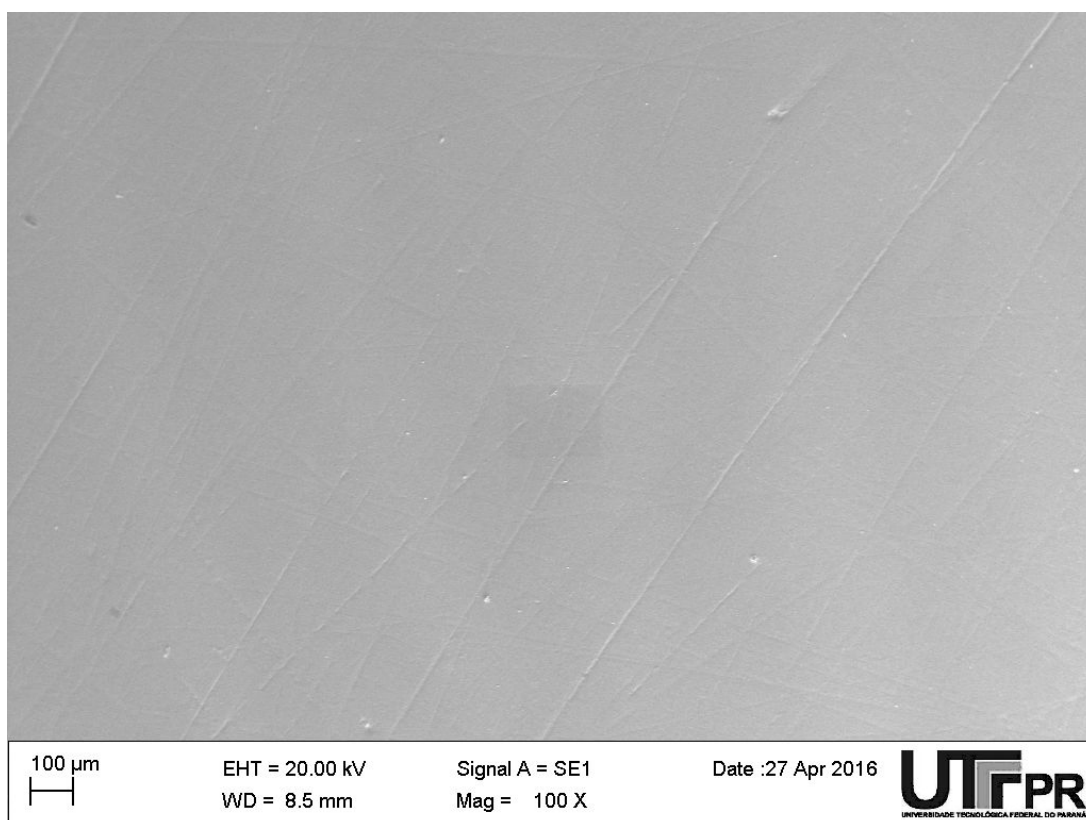


Figura B.15 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 4.

Fonte: Autoria própria, 2016.

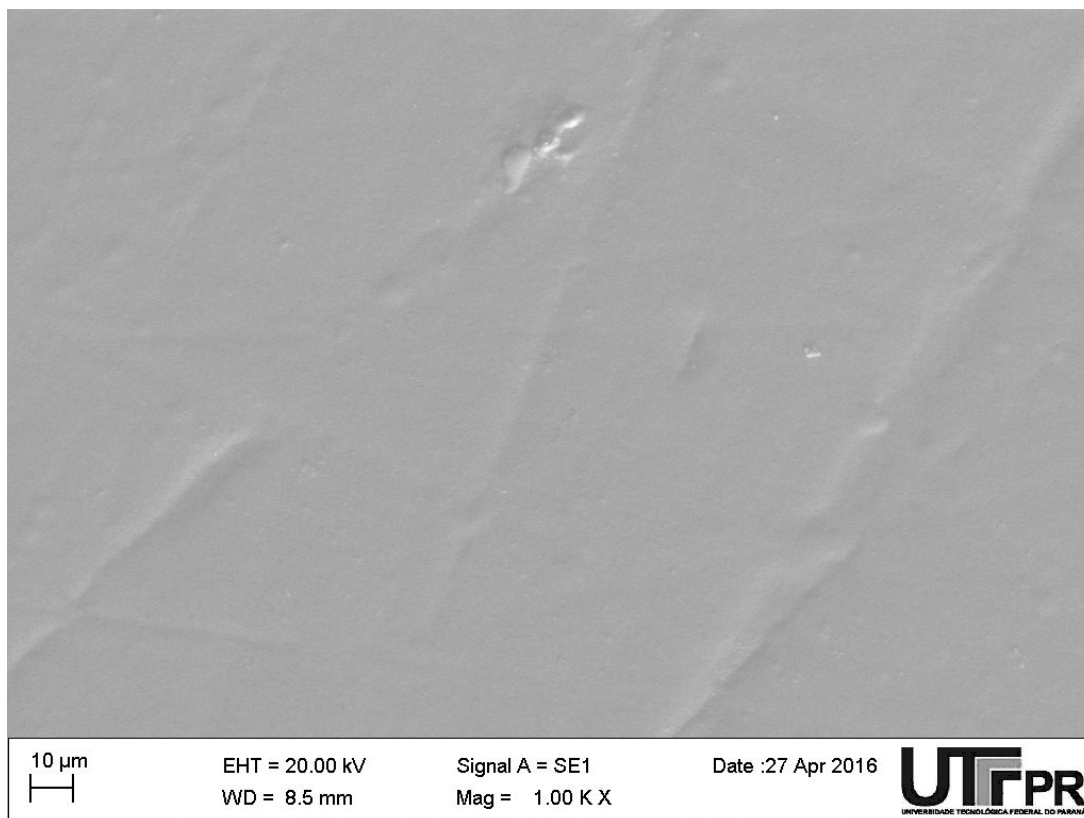


Figura B.16 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 4.

Fonte: Autoria própria, 2016.

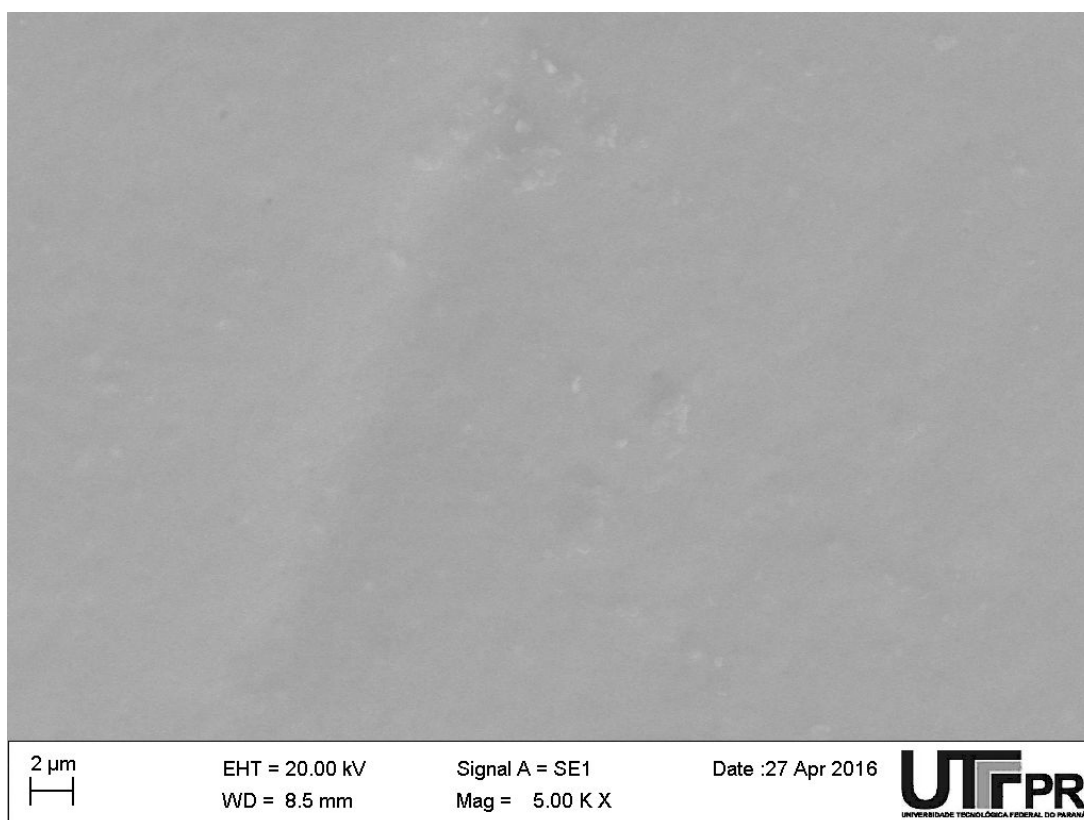


Figura B.17 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 4.

Fonte: Autoria própria, 2016.

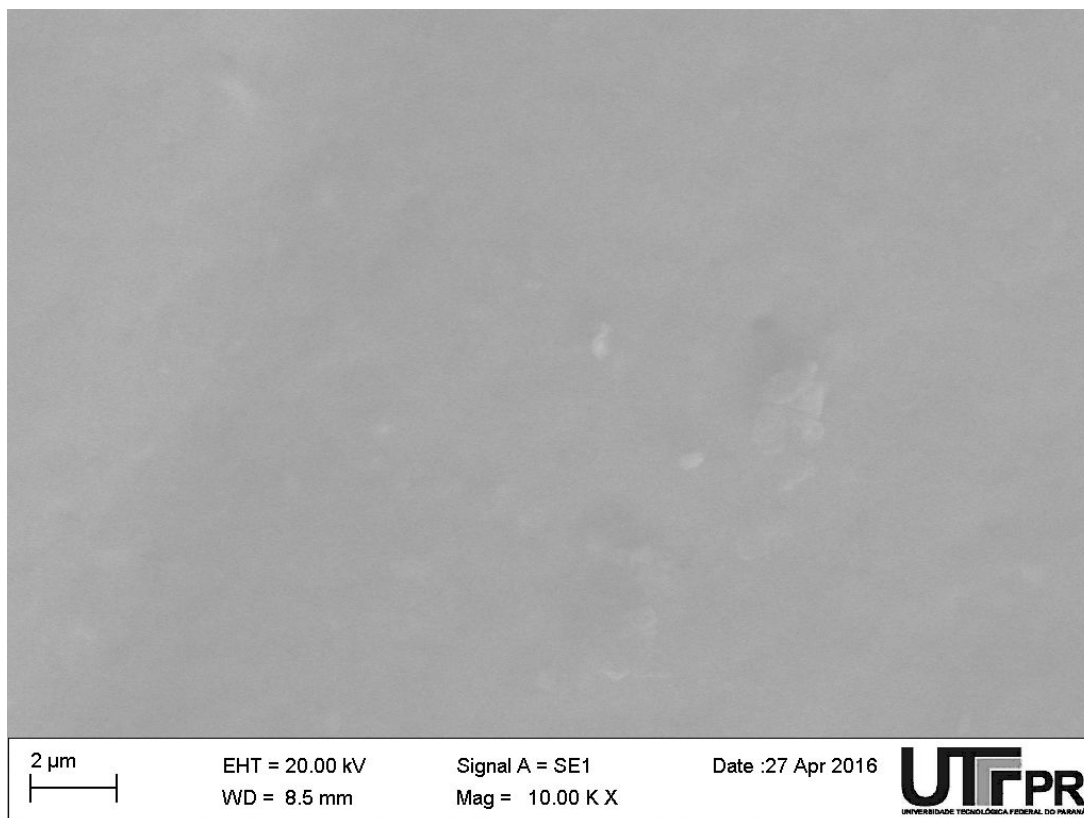


Figura B.18 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 4.

Fonte: Autoria própria, 2016.

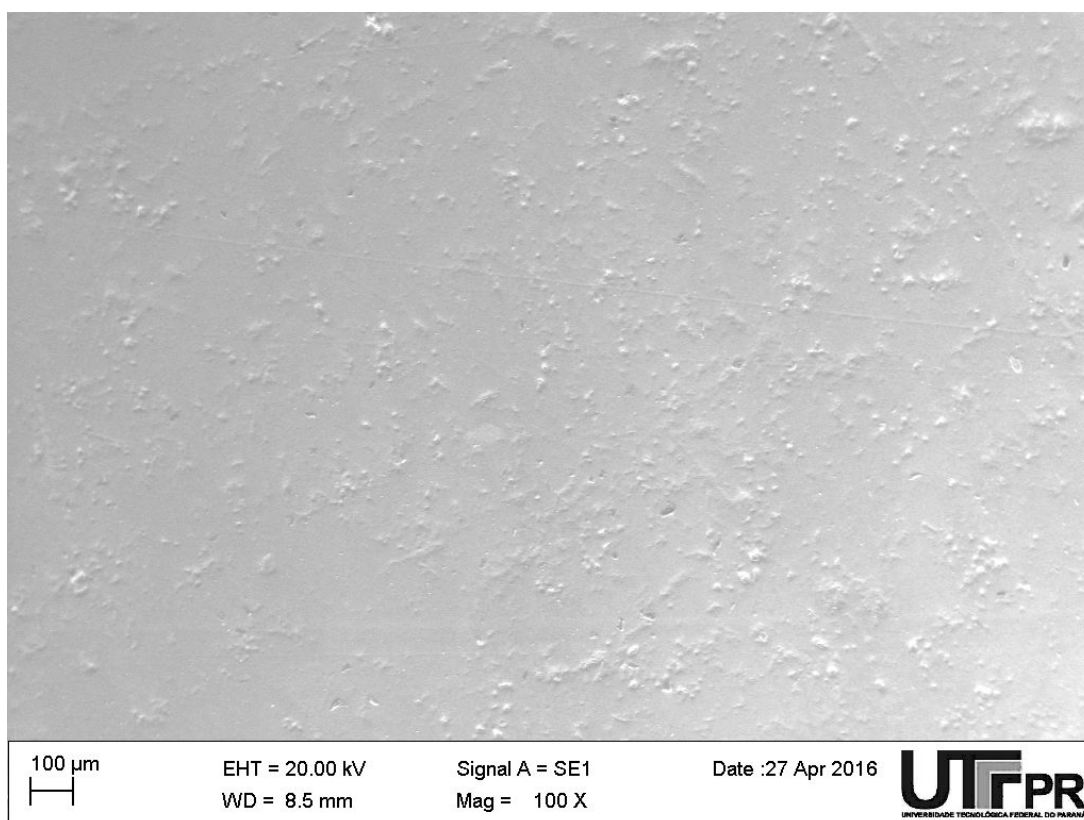


Figura B.19 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 5.

Fonte: Autoria própria, 2016.

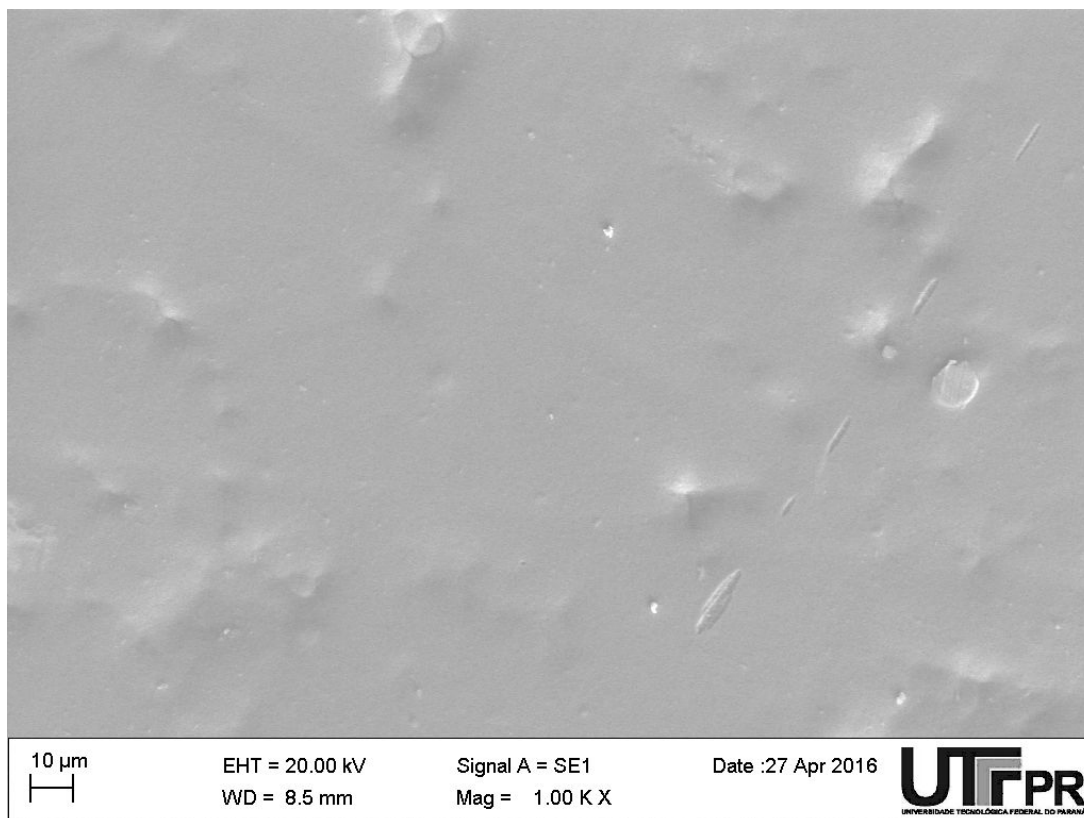


Figura B.20 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 5.

Fonte: Autoria própria, 2016.

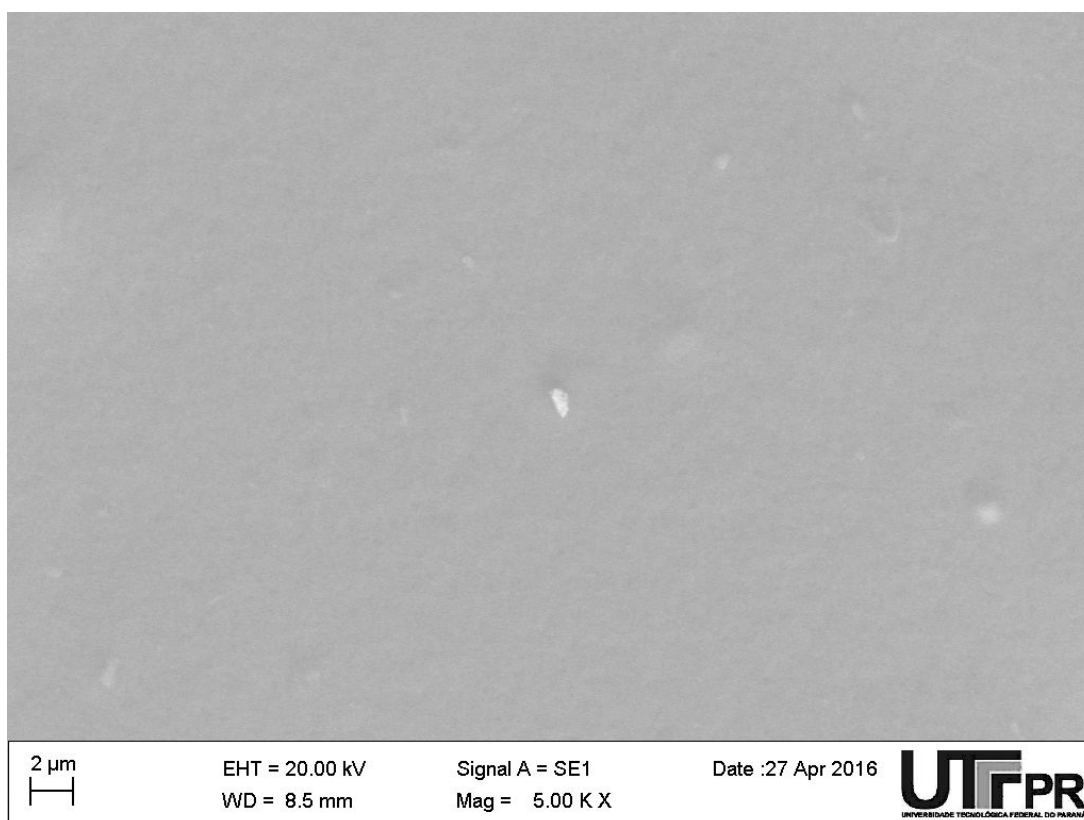


Figura B.21 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 5.

Fonte: Autoria própria, 2016.

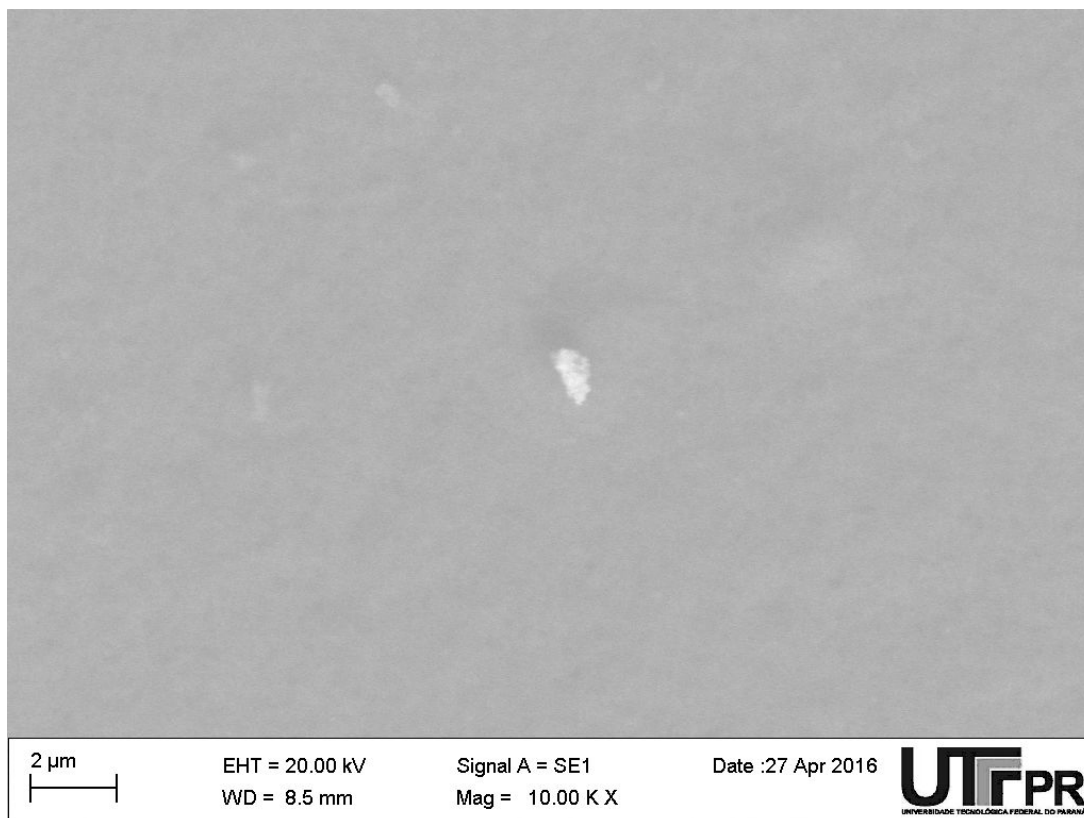


Figura B.22 – Micrografia eletrônica da Amostra 1, experimento 5.

Fonte: Autoria própria, 2016.

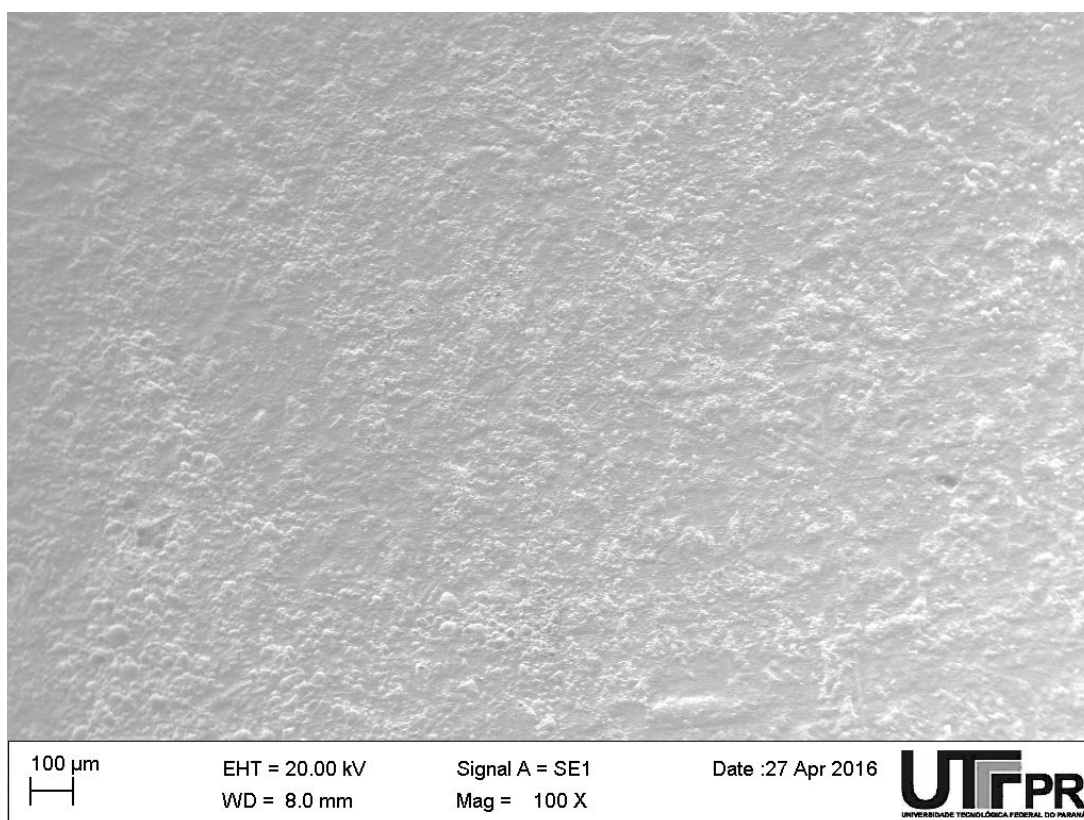


Figura B.23 – Micrografia eletrônica da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

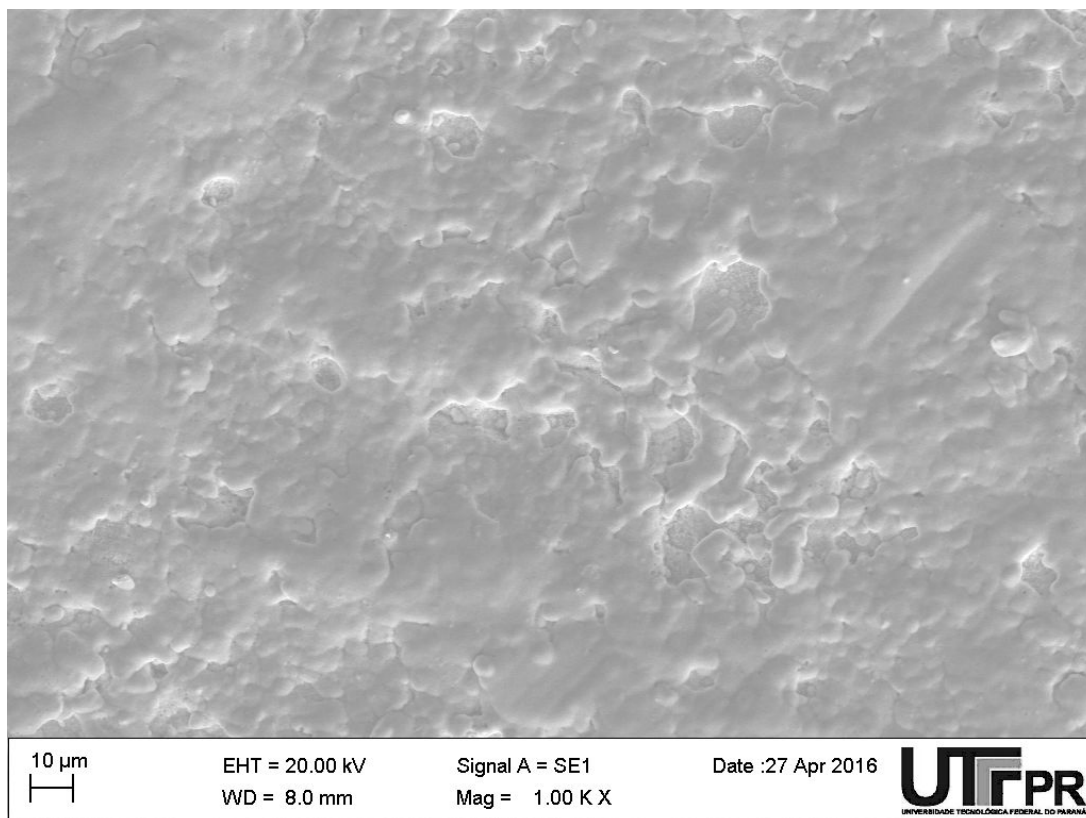


Figura B.24 – Micrografia eletrônica da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

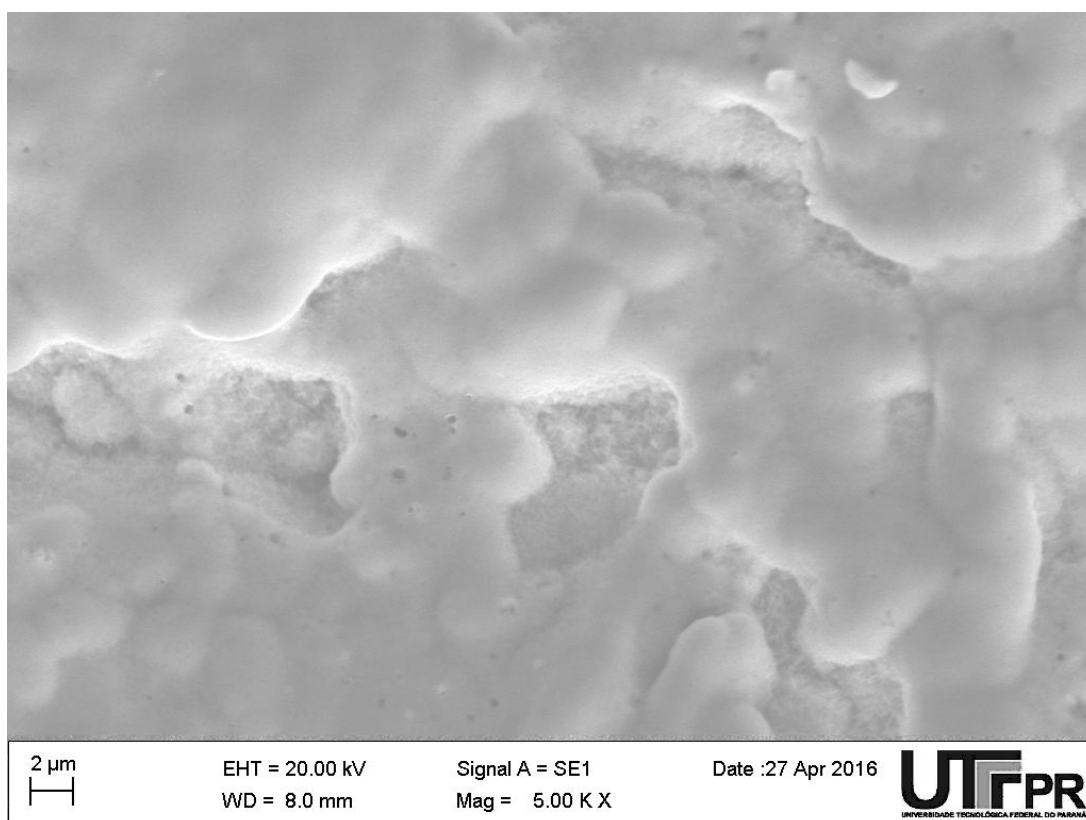


Figura B.25 – Micrografia eletrônica da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

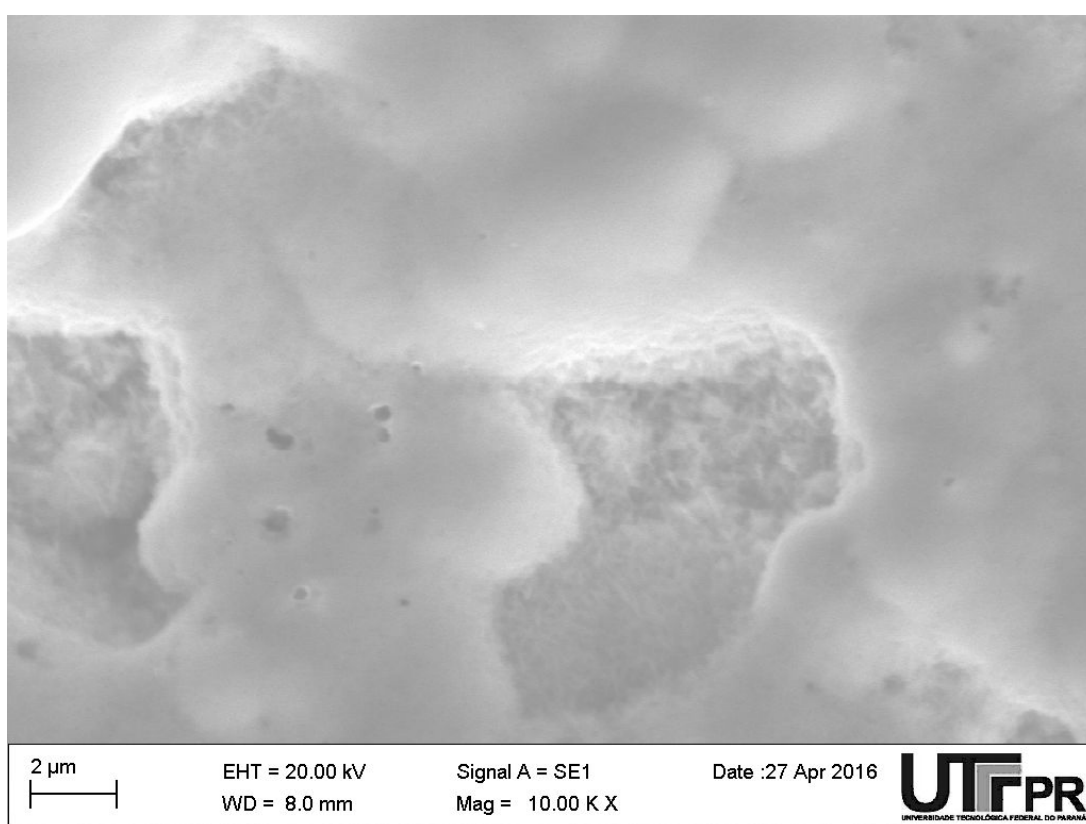


Figura B.26 – Micrografia eletrônica da amostra após decapagem.

Fonte: Autoria própria, 2016.

APÊNDICE C – MICROGRAFIAS ELETRÔNICAS DE AMOSTRAS
GALVANIZADAS SEM ABRASÃO MECÂNICA

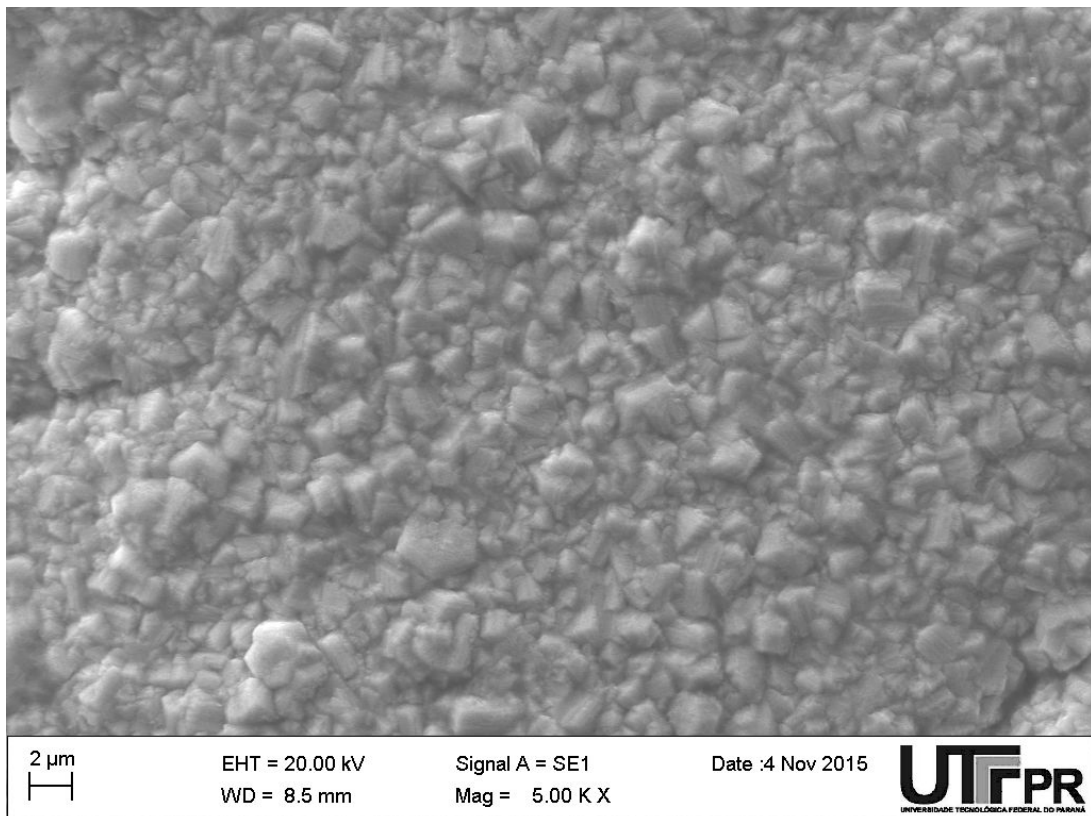


Figura C.1 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2015.

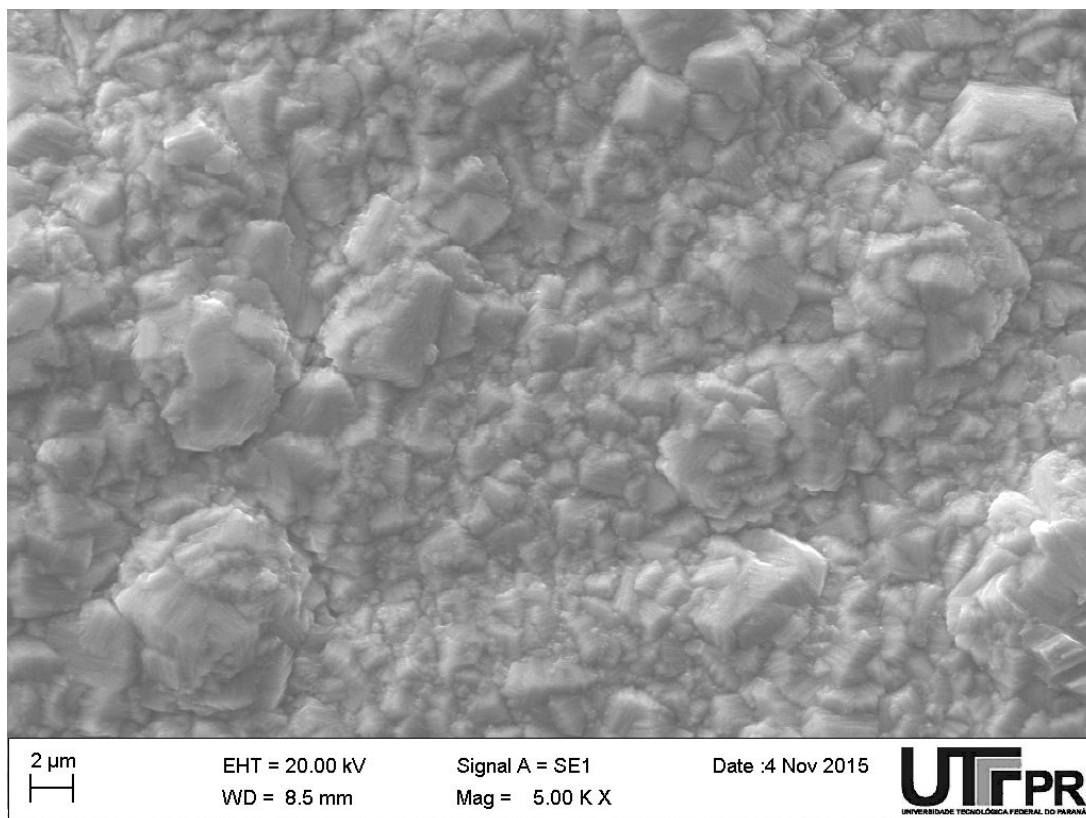


Figura C.2 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 2.

Fonte: Autoria própria, 2015.

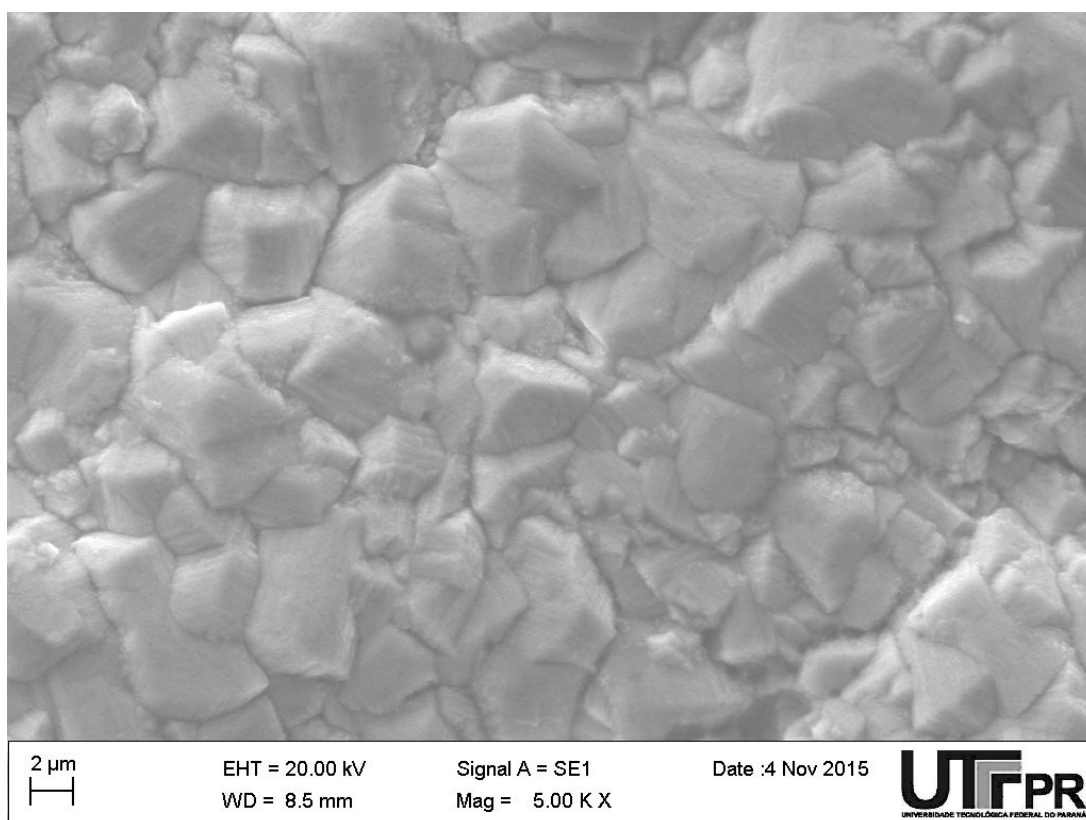


Figura C.3 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 3.

Fonte: Autoria própria, 2015.

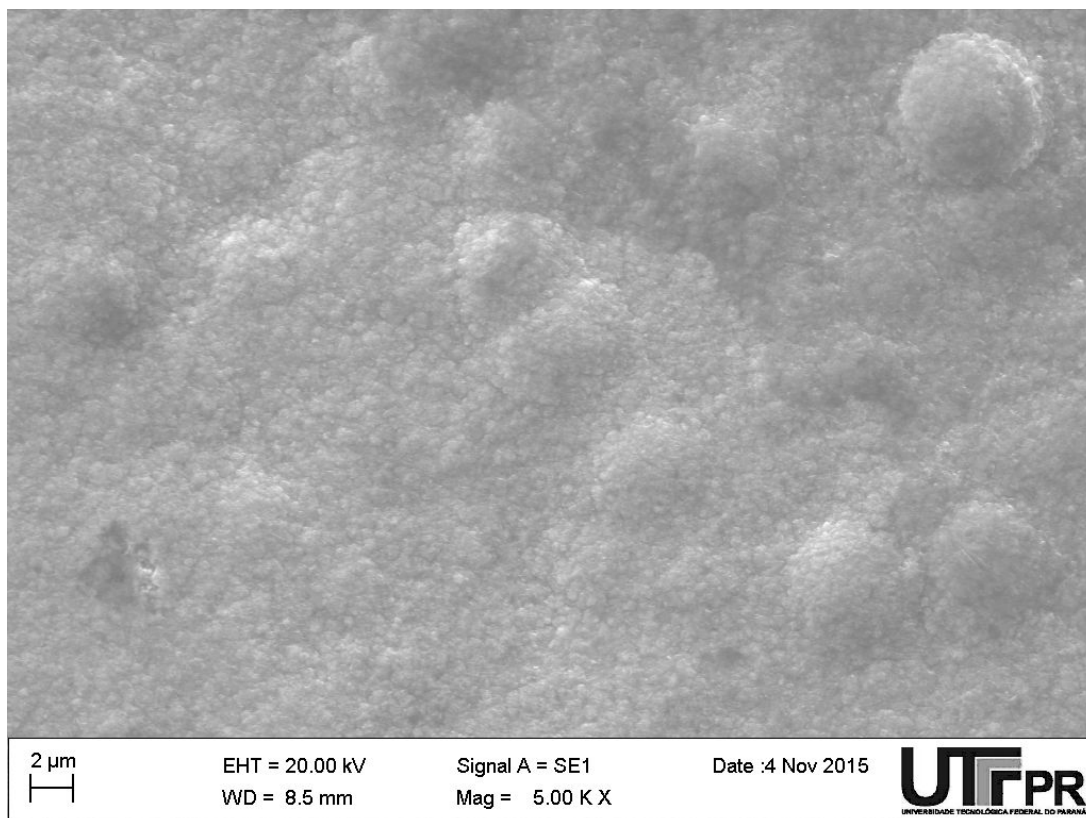


Figura C.4 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 4.

Fonte: Autoria própria, 2015.

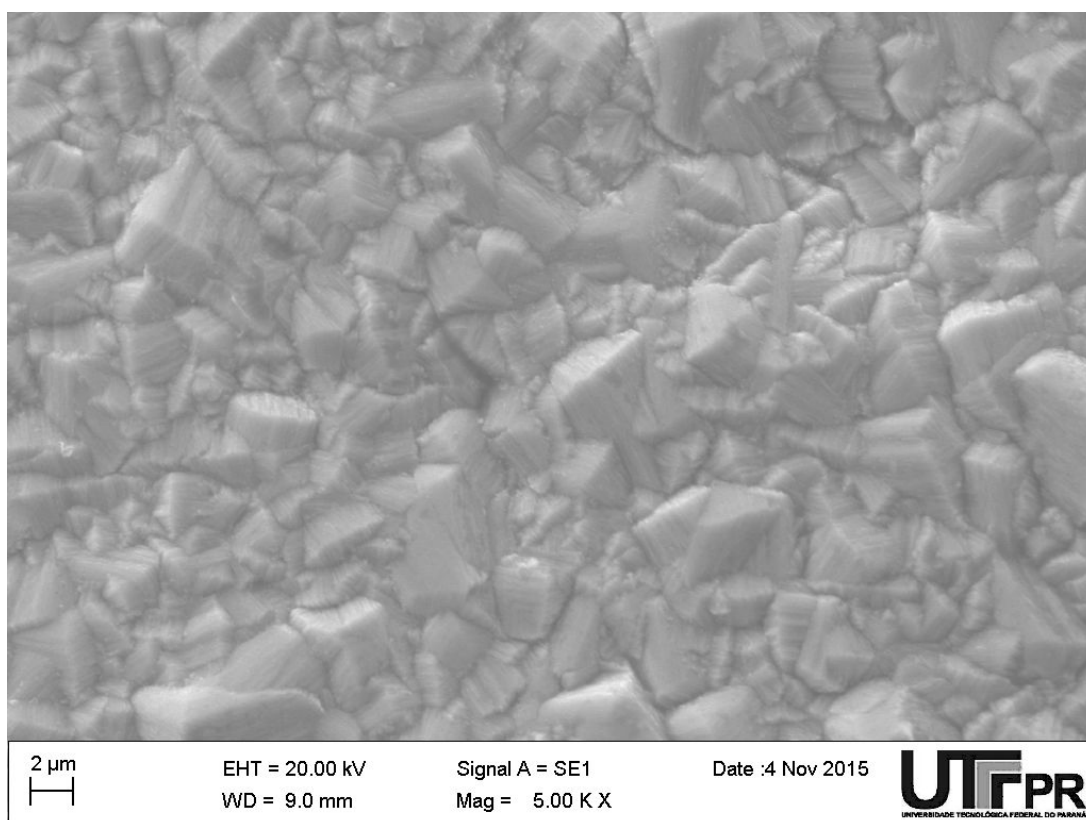


Figura C.5 – Micrografia eletrônica de amostra, experimento 5.

Fonte: Autoria própria, 2015.

**APÊNDICE D – RELATÓRIOS DE ESPECTROMETRIA PARA OS
EXPERIMENTOS**

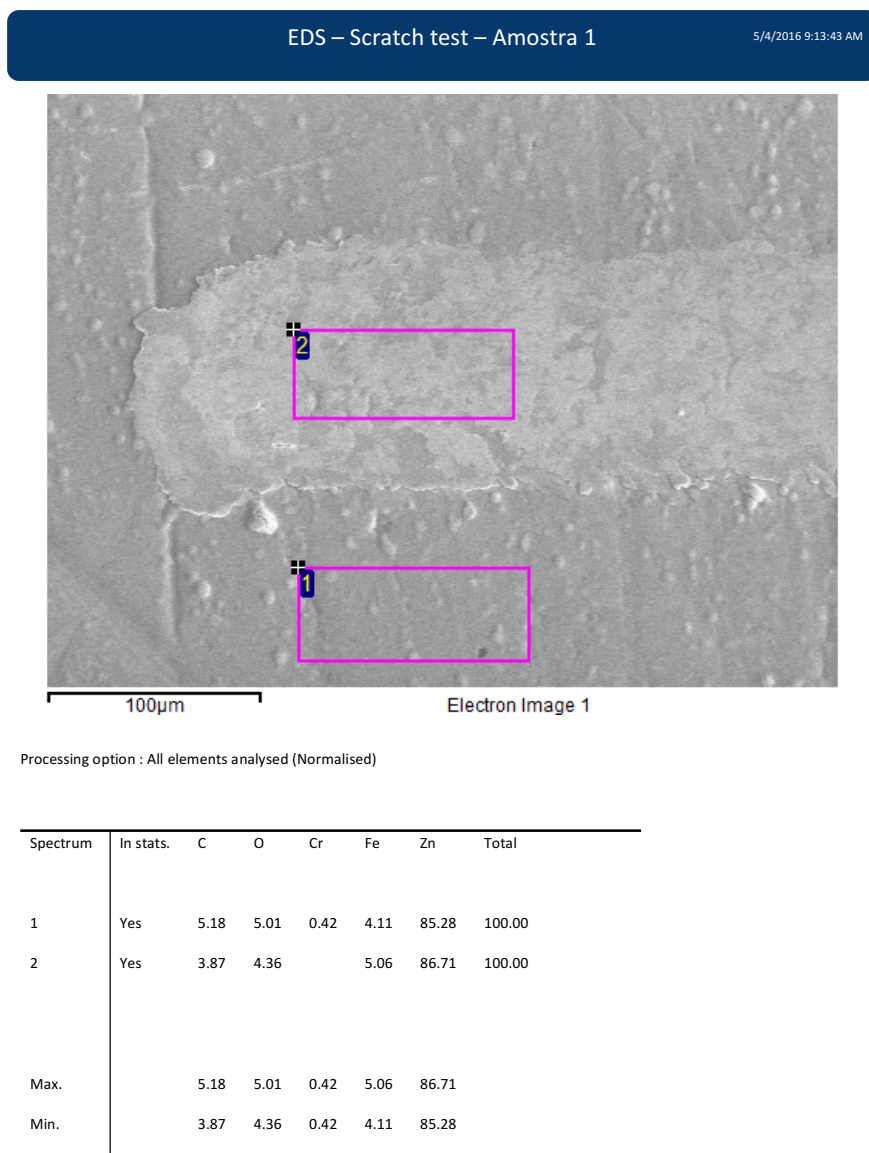


Figura D.1 – Relatório do EDS na amostra 1, experimento 1.
 Fonte: Autoria própria, 2016.

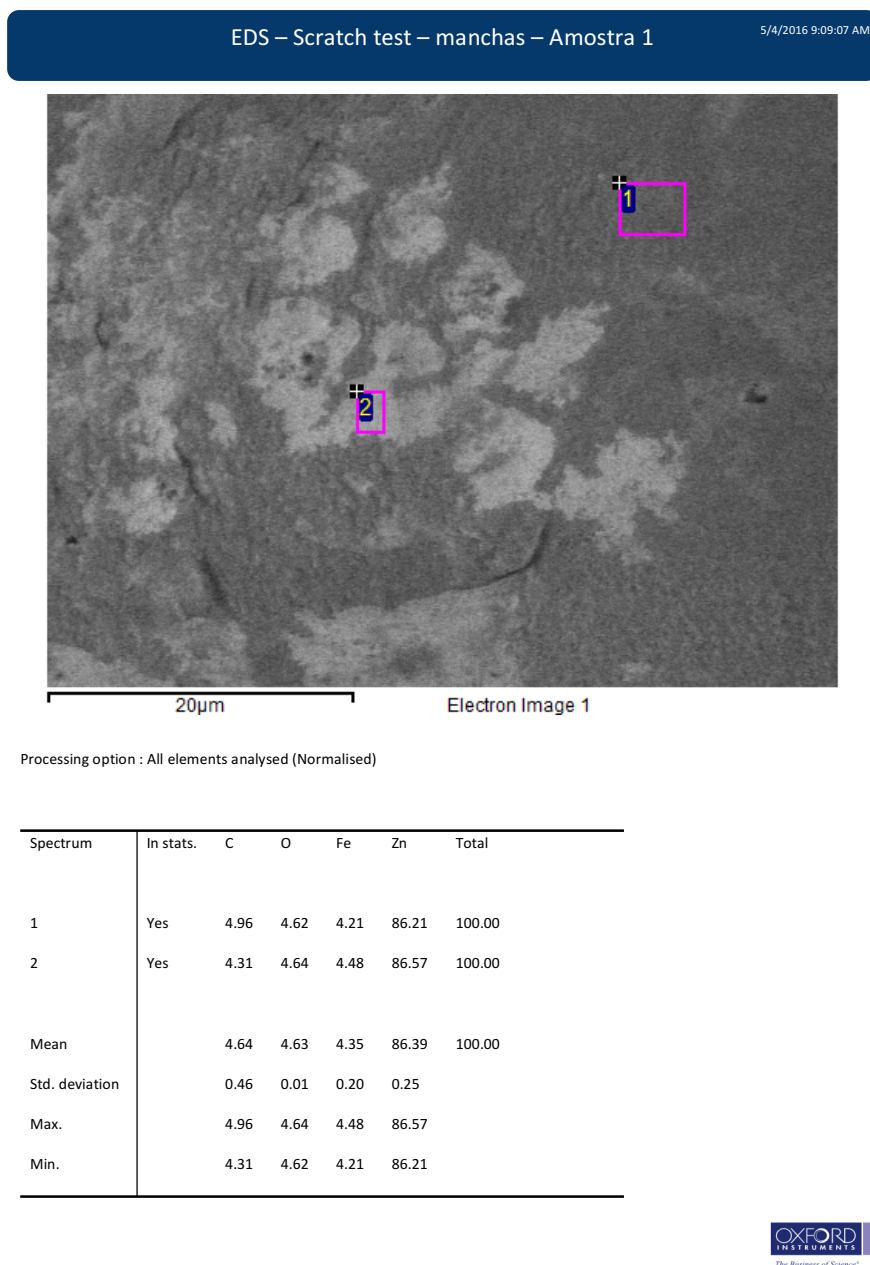
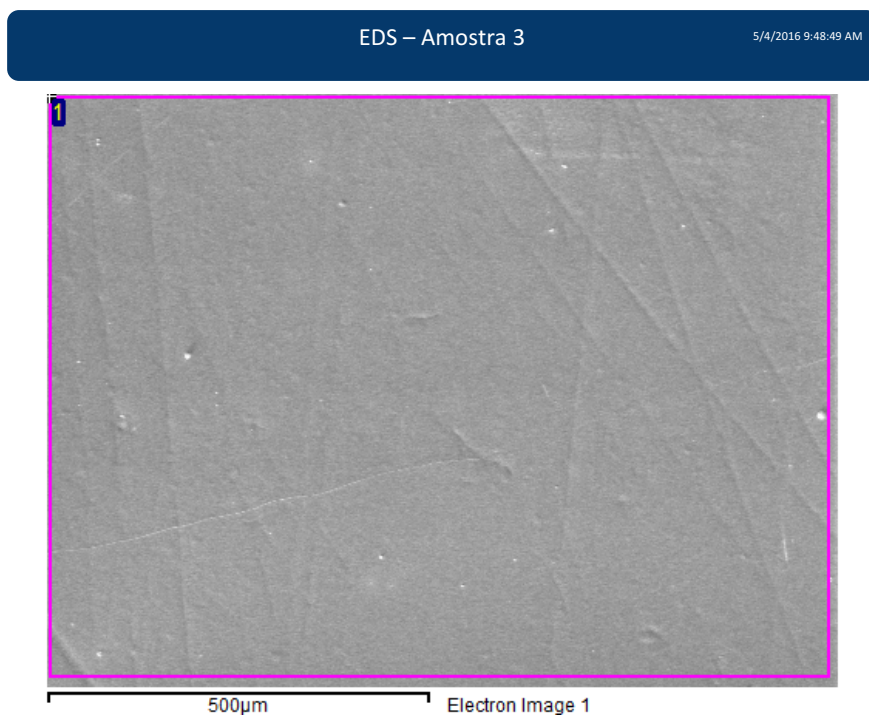


Figura D.2 – Relatório do EDS na amostra 1 sobre mancha, experimento 1.
Fonte: Autoria própria, 2016.

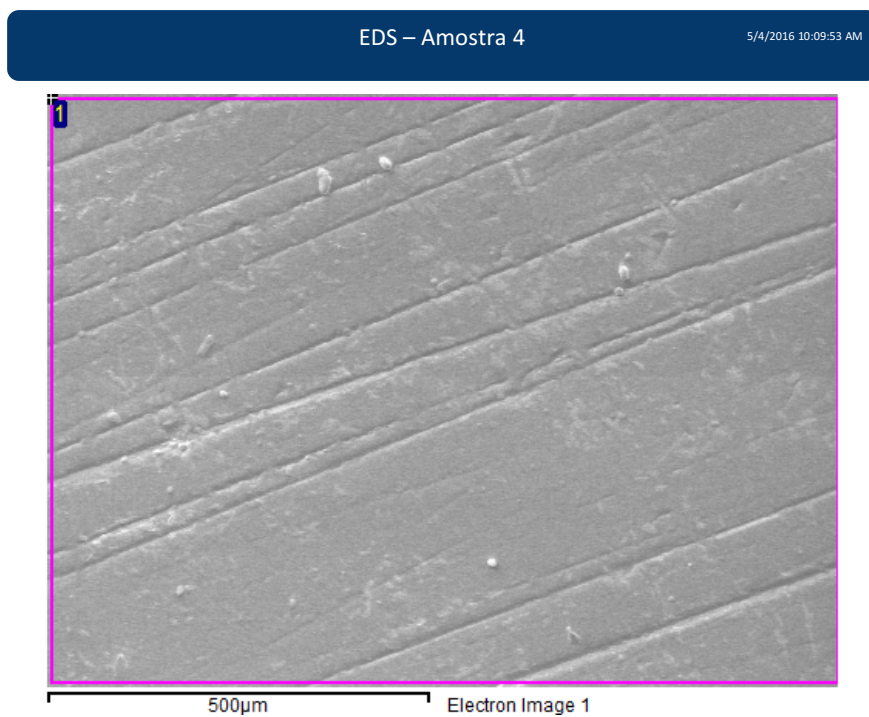


Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Cr	Fe	Zn	Total
1	Yes	5.26	6.22	0.43	1.53	86.56	100.00
Mean		5.26	6.22	0.43	1.53	86.56	100.00
Std. deviation		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Max.		5.26	6.22	0.43	1.53	86.56	
Min.		5.26	6.22	0.43	1.53	86.56	



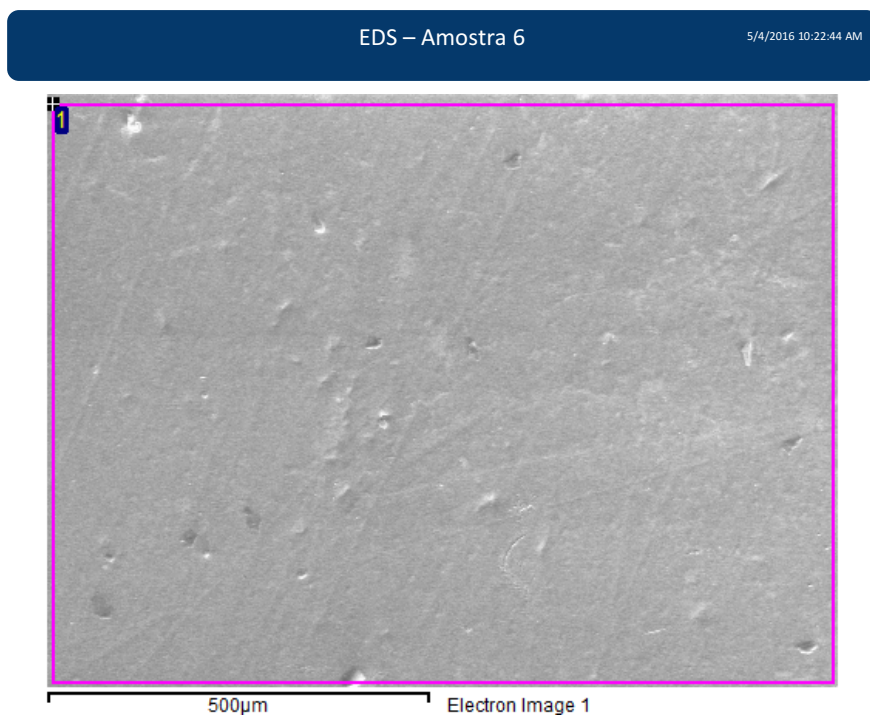
Figura D.3 – Relatório do EDS na amostra 1, experimento 3.
 Fonte: Autoria própria, 2016.



Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Cr	Fe	Zn	Total
1	Yes	6.18	7.45	0.44	2.69	83.24	100.00
Mean		6.18	7.45	0.44	2.69	83.24	100.00
Std. deviation		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Max.		6.18	7.45	0.44	2.69	83.24	
Min.		6.18	7.45	0.44	2.69	83.24	

Figura D.4 – Relatório do EDS na amostra 1, experimento 4.
Fonte: Autoria própria, 2016.



Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Cr	Fe	Zn	Total
1	Yes	5.41	5.84	0.33	1.93	86.49	100.00
Mean		5.41	5.84	0.33	1.93	86.49	100.00
Std. deviation		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Max.		5.41	5.84	0.33	1.93	86.49	
Min.		5.41	5.84	0.33	1.93	86.49	



Figura D.5 – Relatório do EDS na amostra 1, experimento 5.
 Fonte: Autoria própria, 2016.

APÊNDICE E – PERFÍS DOS RISCOS

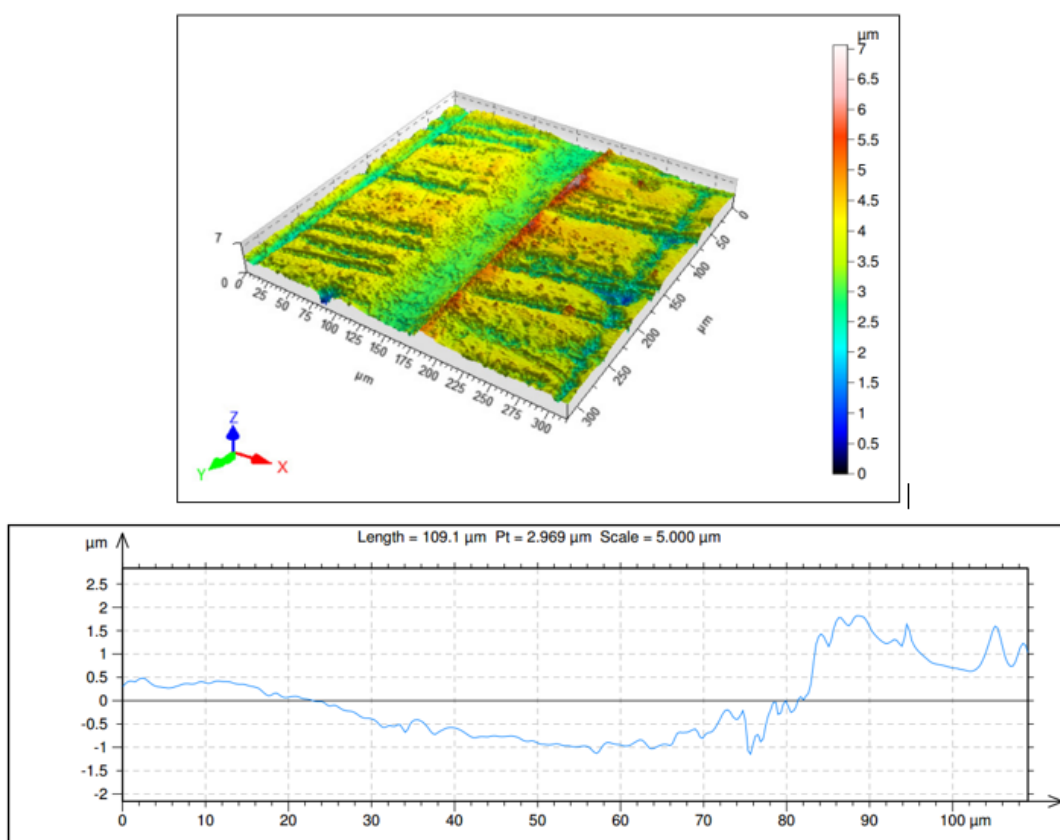


Figura E.1 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 1

Fonte: Autoria própria, 2016.

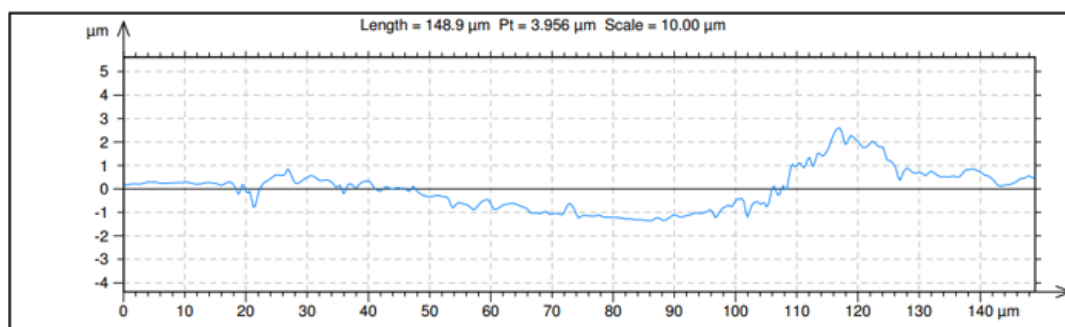
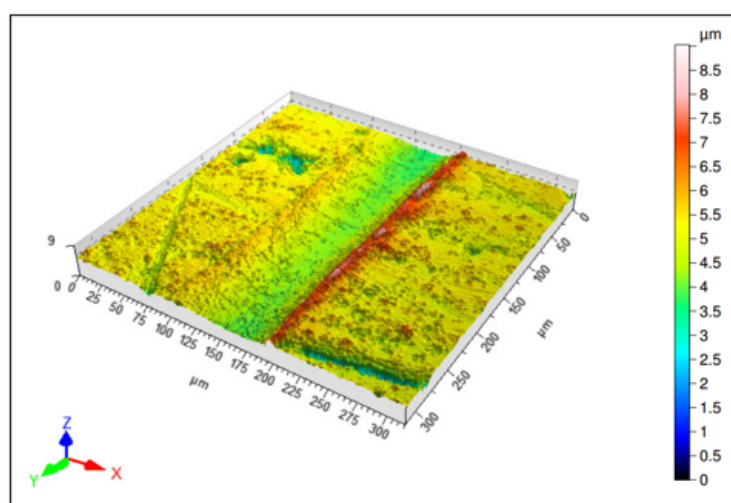


Figura E.2 – Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 1
 Fonte: Autoria própria, 2016.

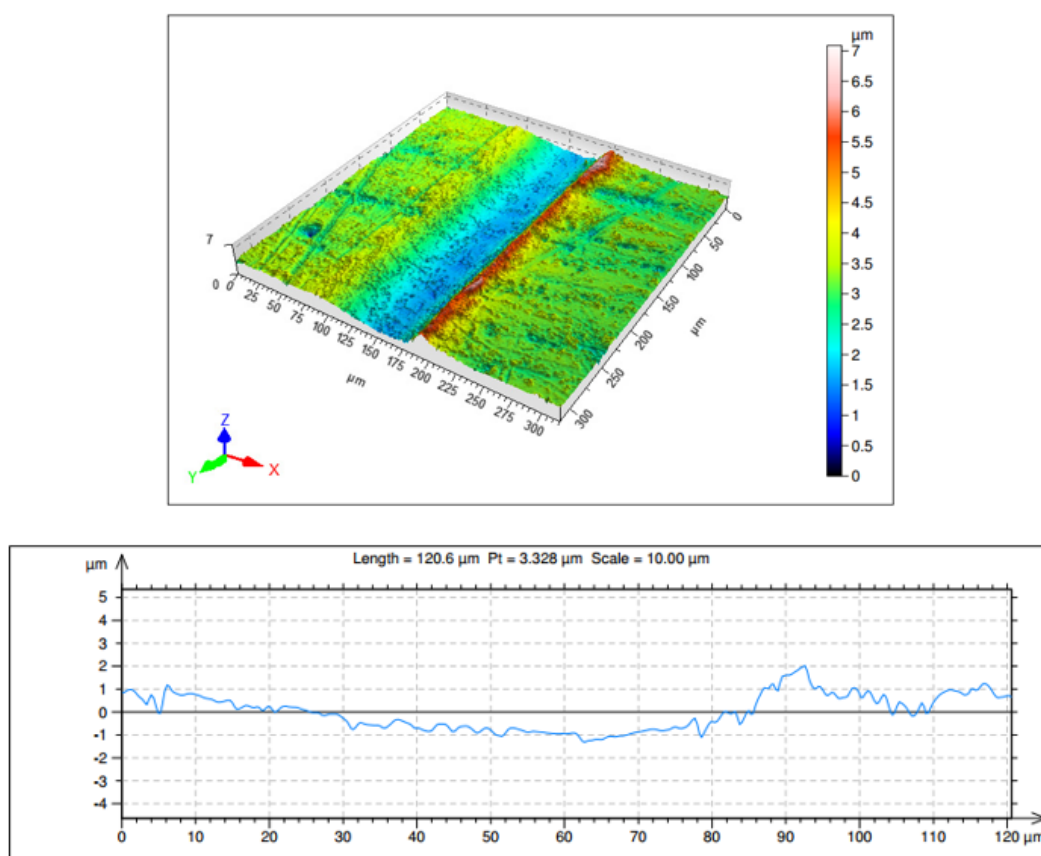


Figura E.3 – Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 1
 Fonte: Autoria própria, 2016.

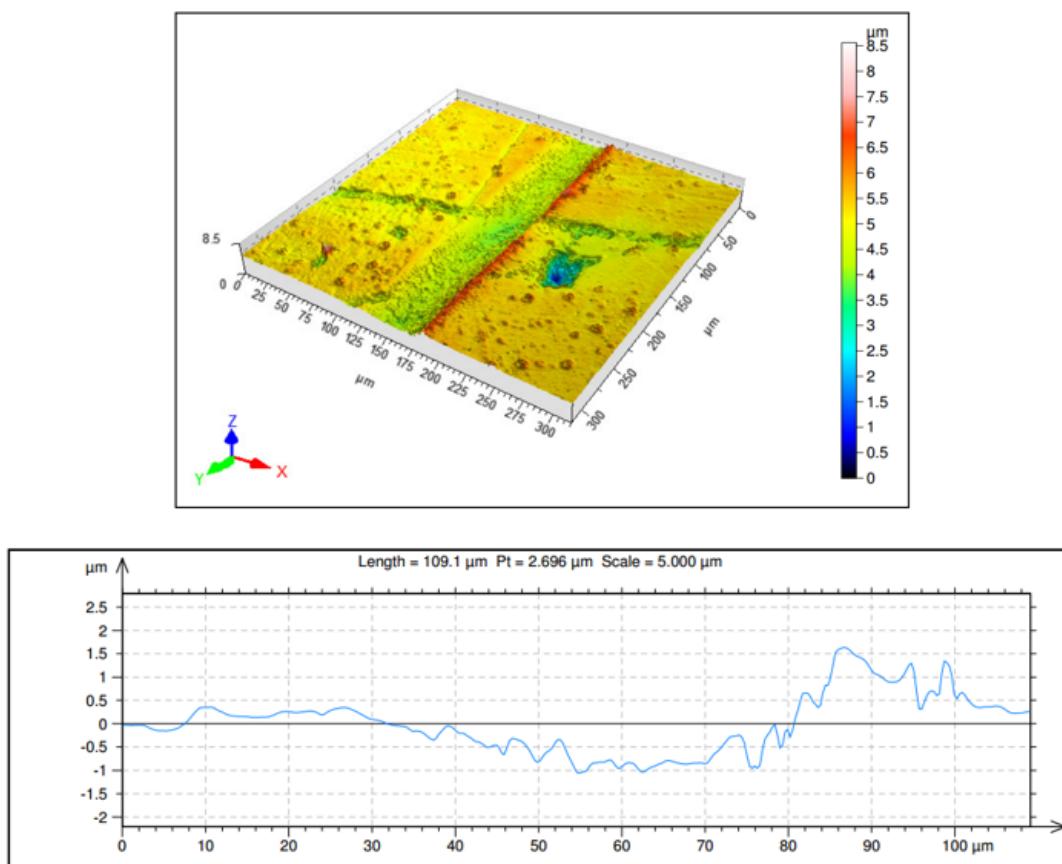


Figura E.4 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 2
 Fonte: Autoria própria, 2016.

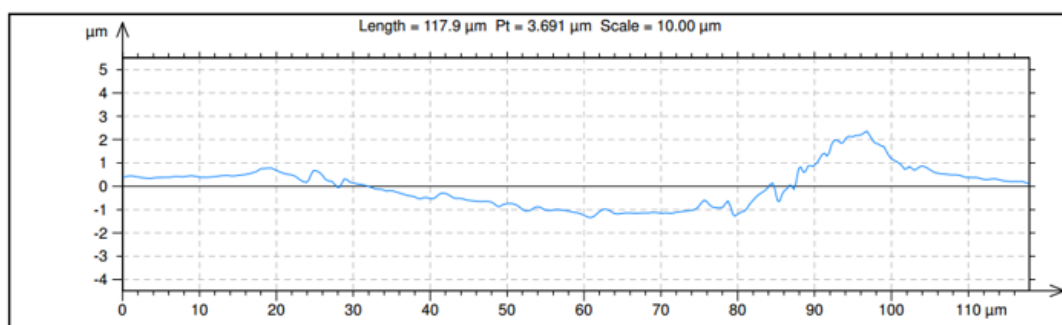
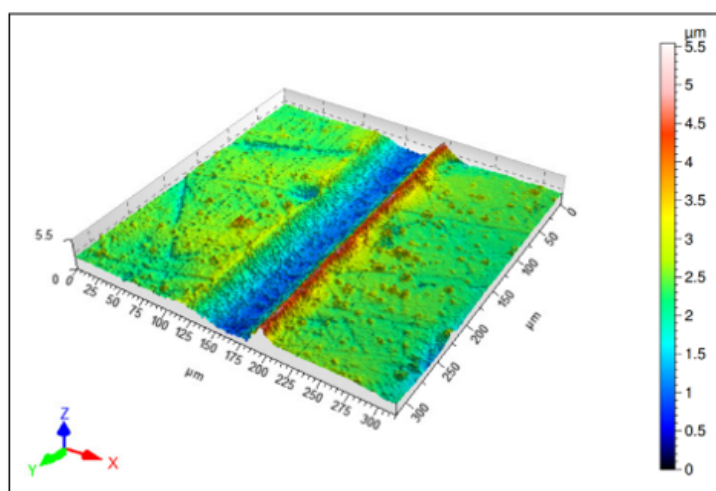


Figura E.5 – Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 2
 Fonte: Autoria própria, 2016.

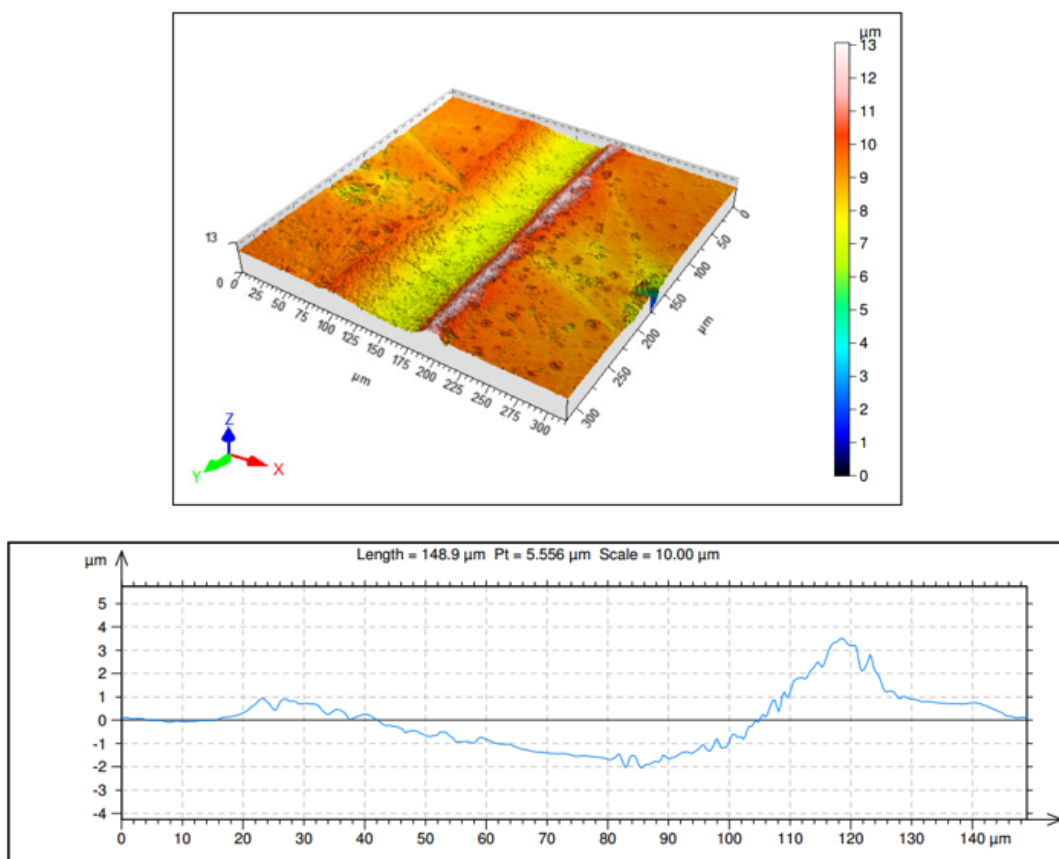


Figura E.6 – Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 2
 Fonte: Autoria própria, 2016.

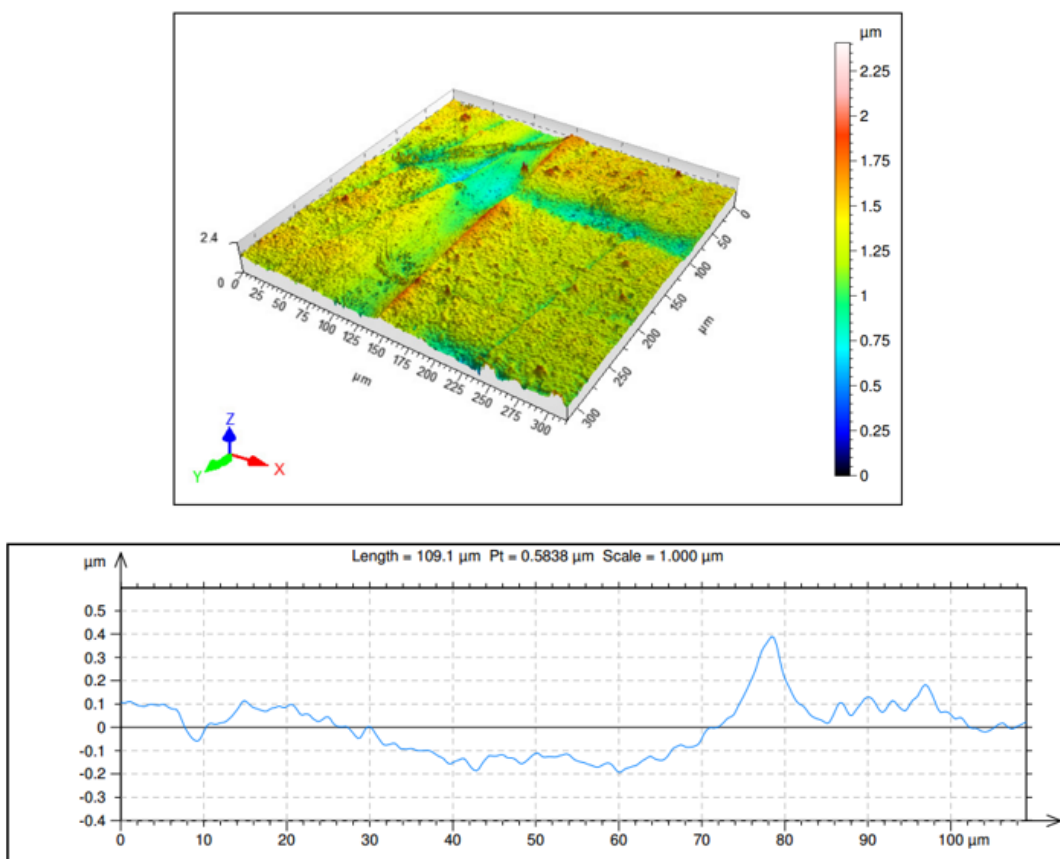


Figura E.7 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 3
 Fonte: Autoria própria, 2016.

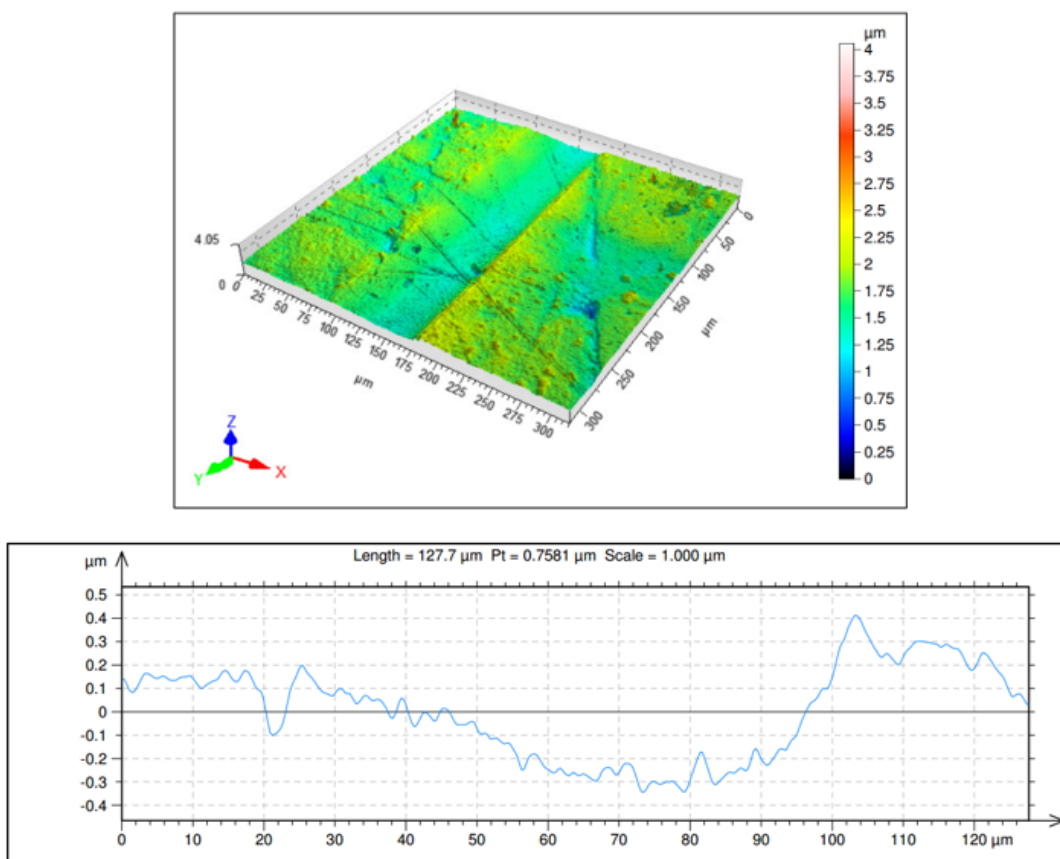


Figura E.8 – Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 3
 Fonte: Autoria própria, 2016.

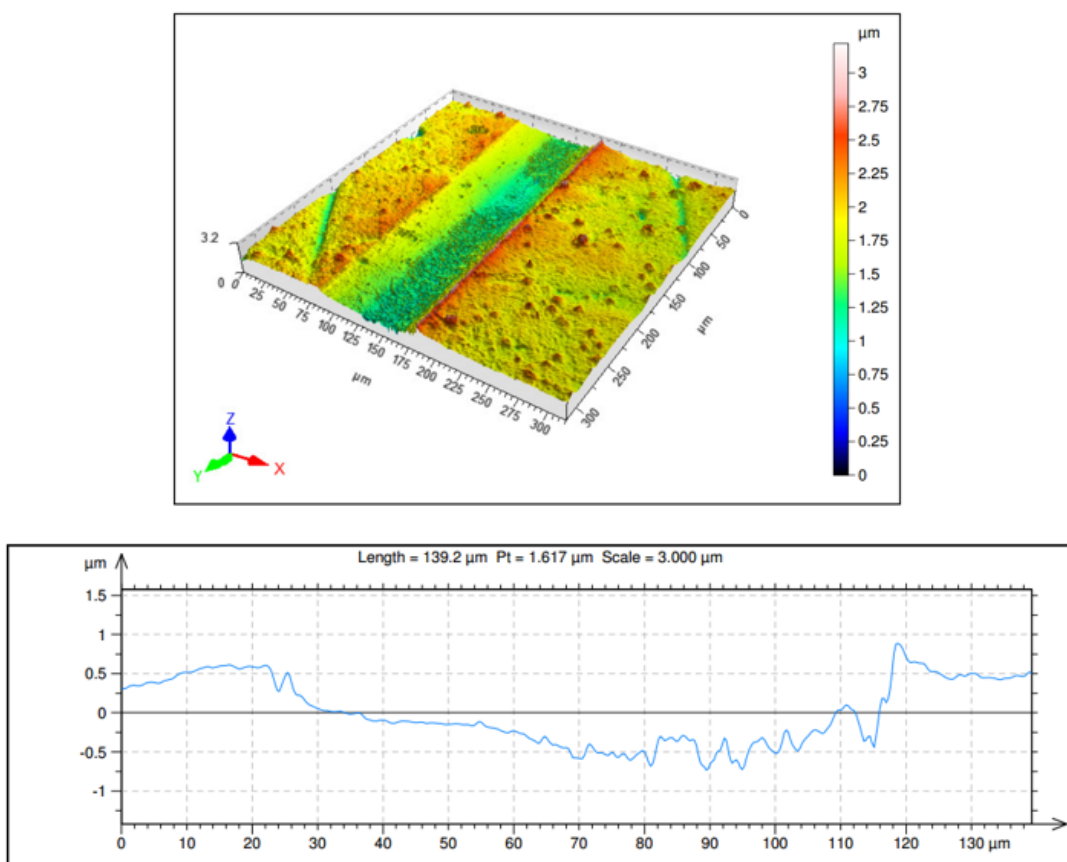


Figura E.9 – Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 3
 Fonte: Autoria própria, 2016.

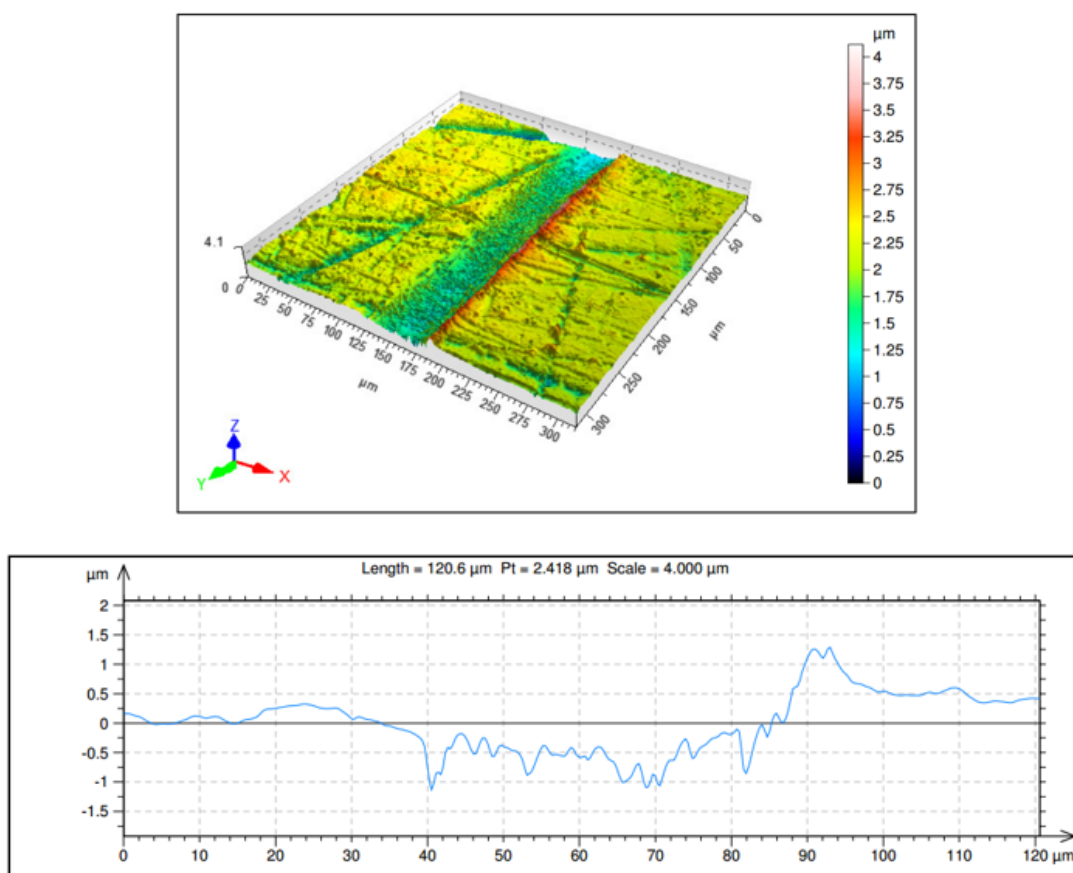


Figura E.10 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 4
 Fonte: Autoria própria, 2016.

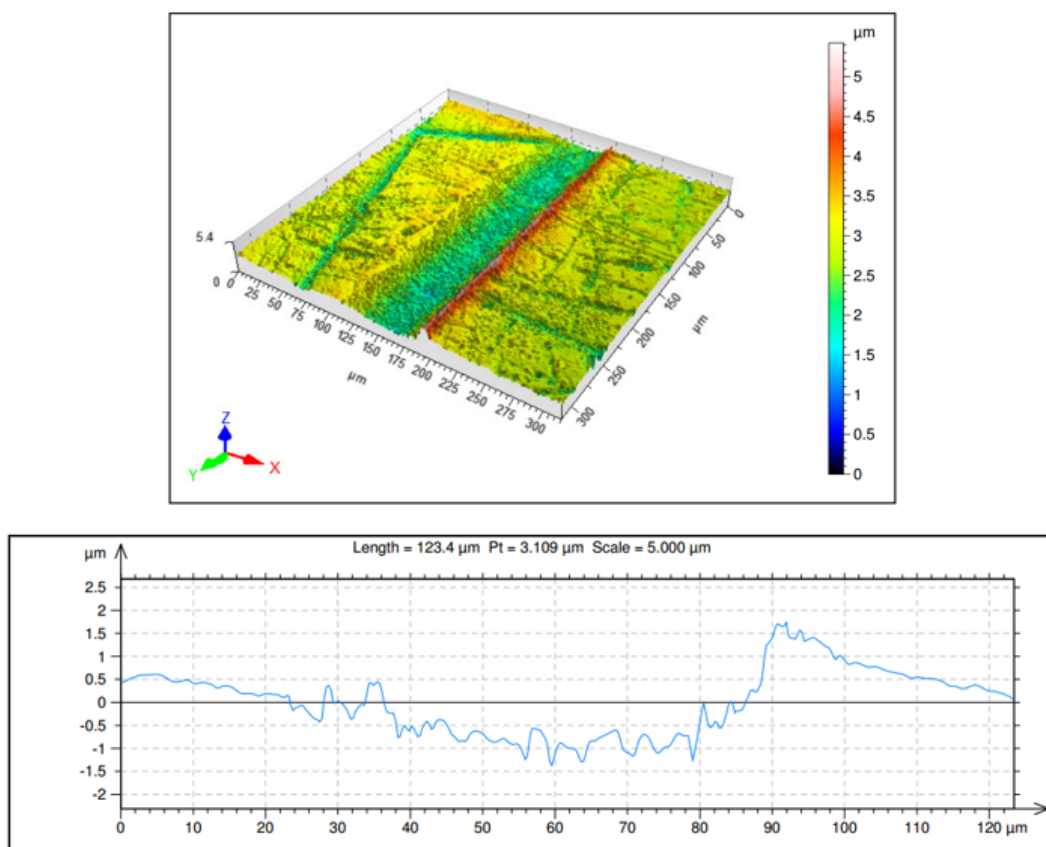


Figura E.11 – Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 4
 Fonte: Autoria própria, 2016.

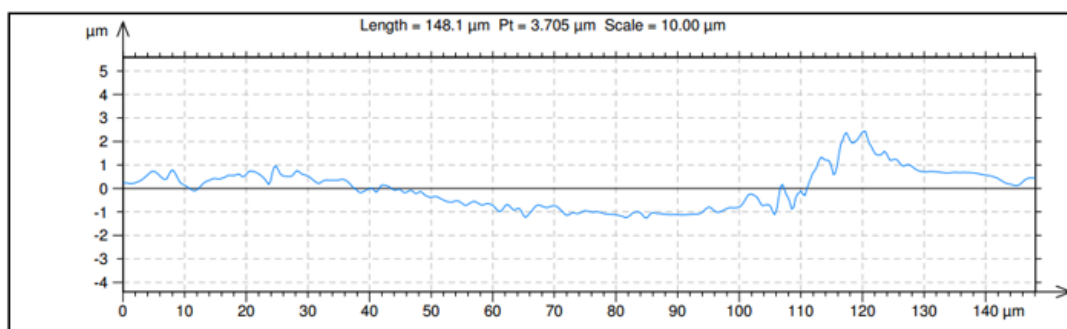
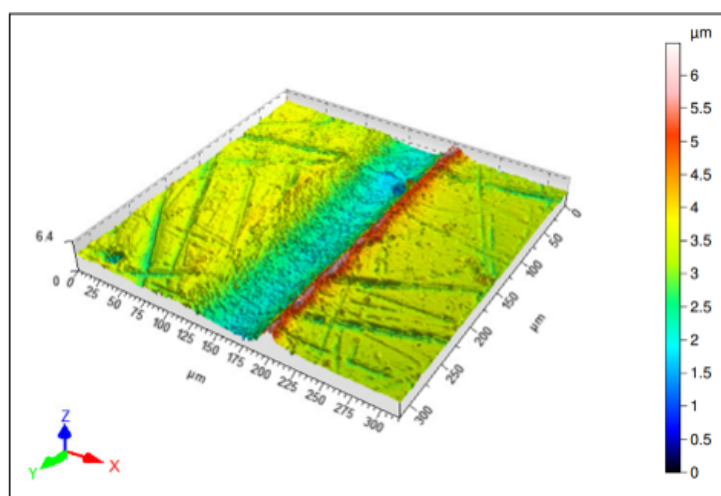


Figura E.12 – Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 4
 Fonte: Autoria própria, 2016.

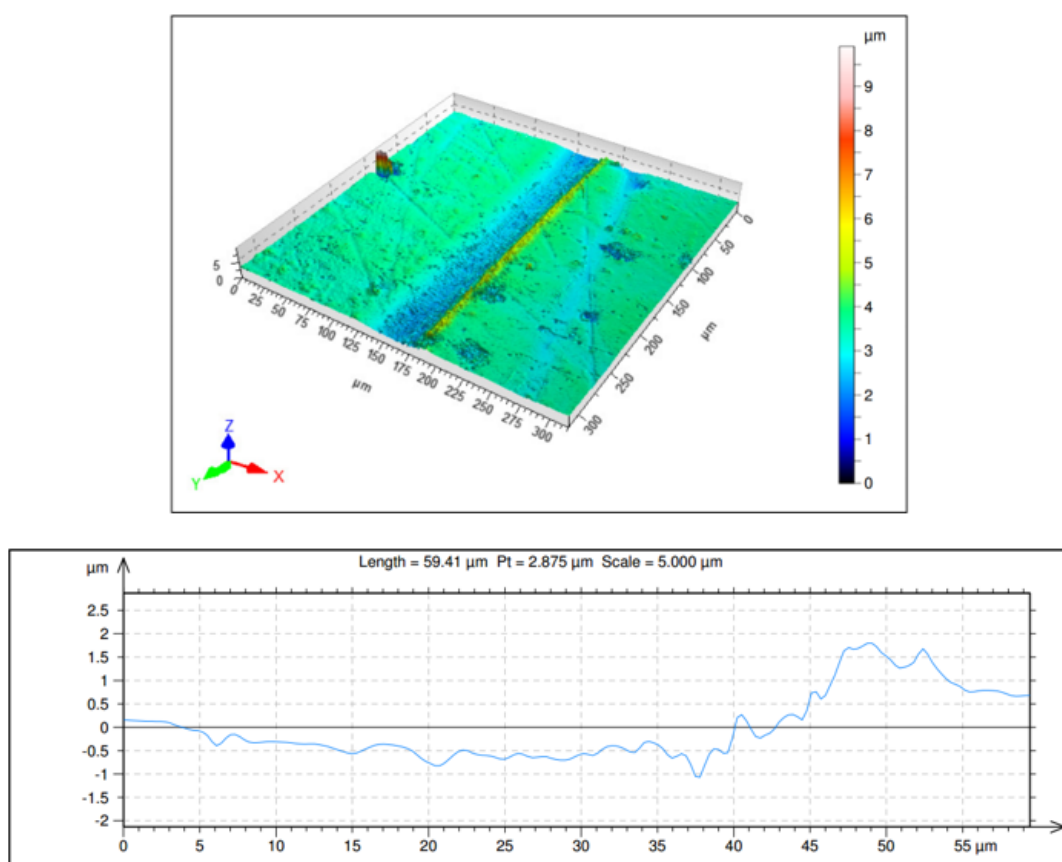


Figura E.13 – Modelagem e perfil do risco 1 da amostra 1, experimento 5
 Fonte: Autoria própria, 2016.

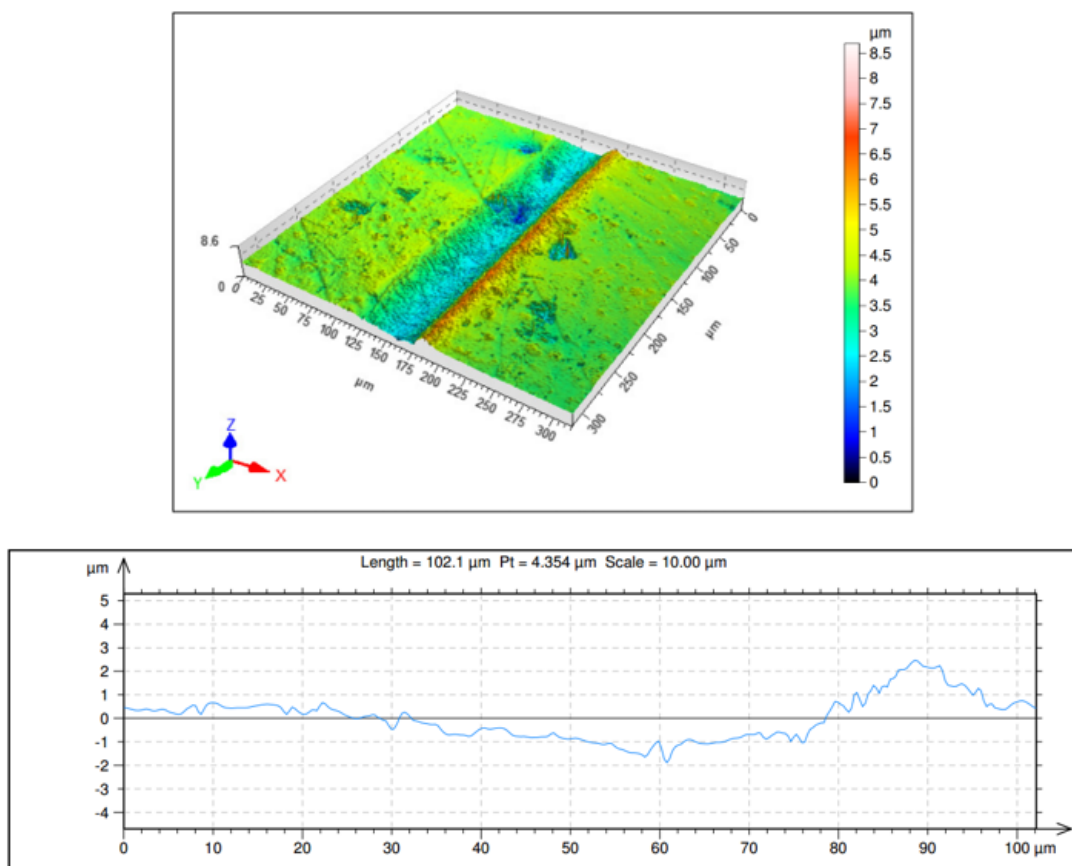


Figura E.14 – Modelagem e perfil do risco 2 da amostra 1, experimento 5

Fonte: Autoria própria, 2016.

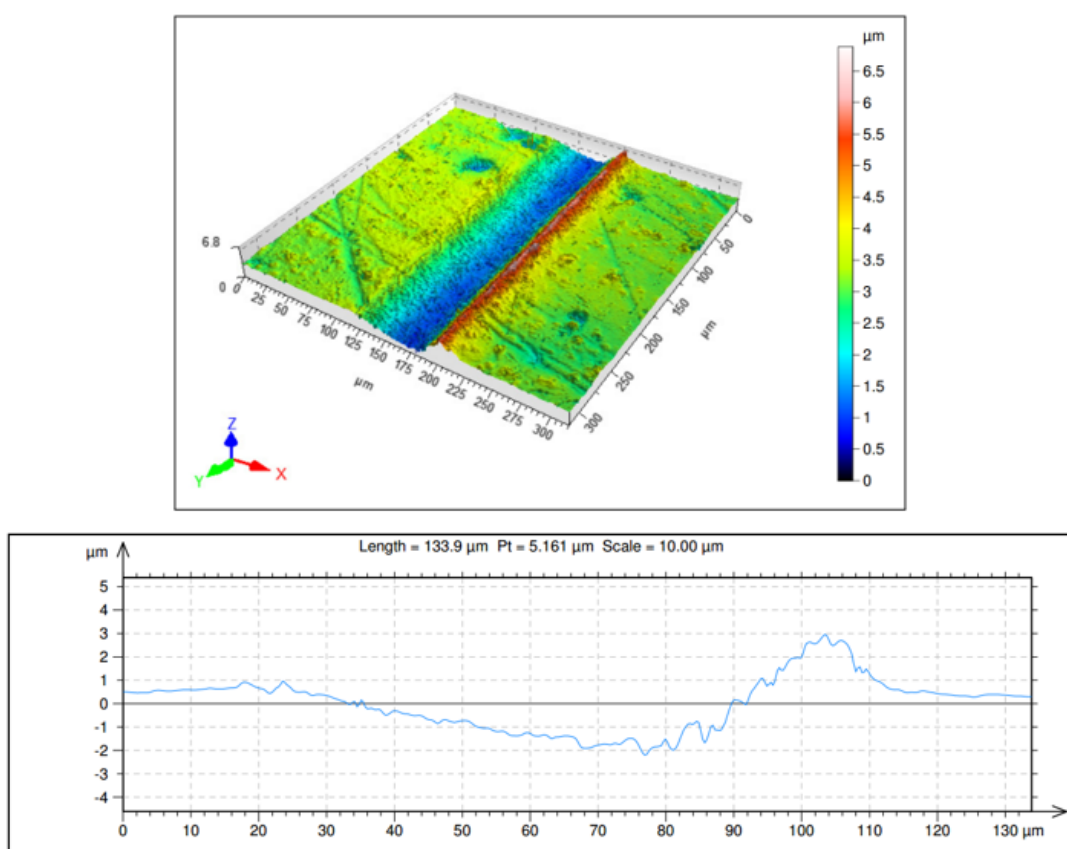


Figura E.15 – Modelagem e perfil do risco 3 da amostra 1, experimento 5
 Fonte: Autoria própria, 2016.

APÊNDICE F – IMAGENS DOS RISCOS

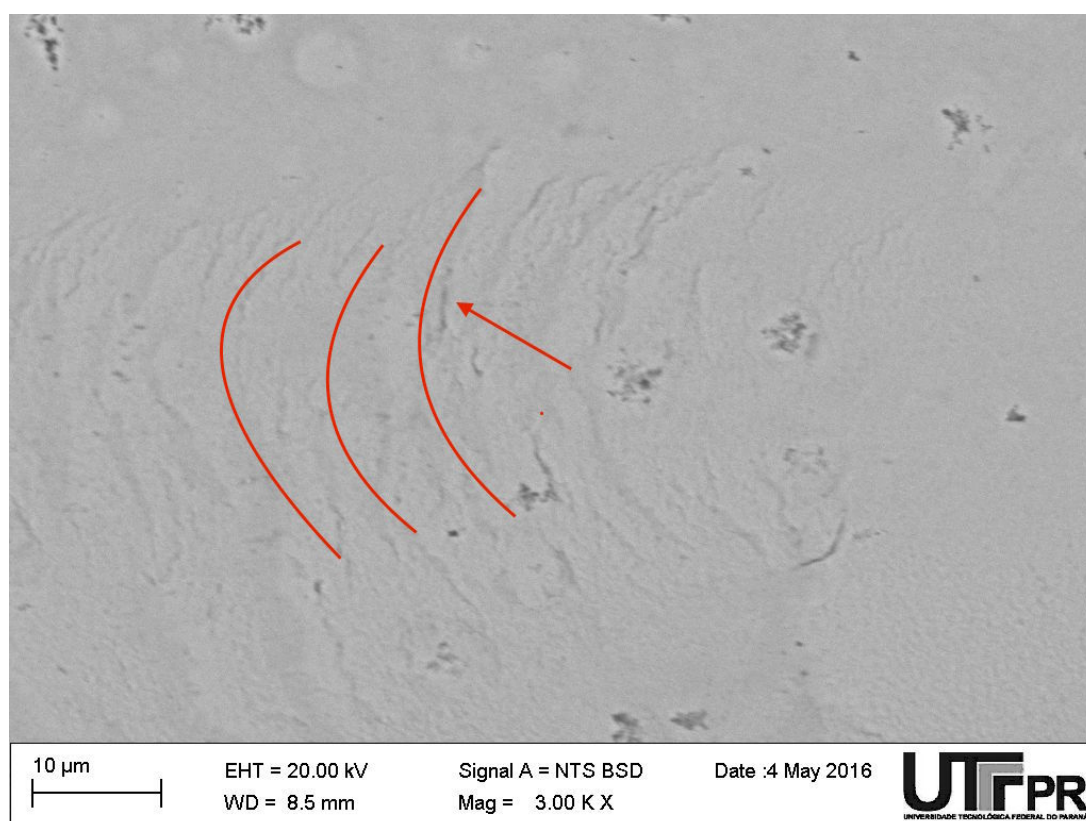


Figura F.1 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2016.

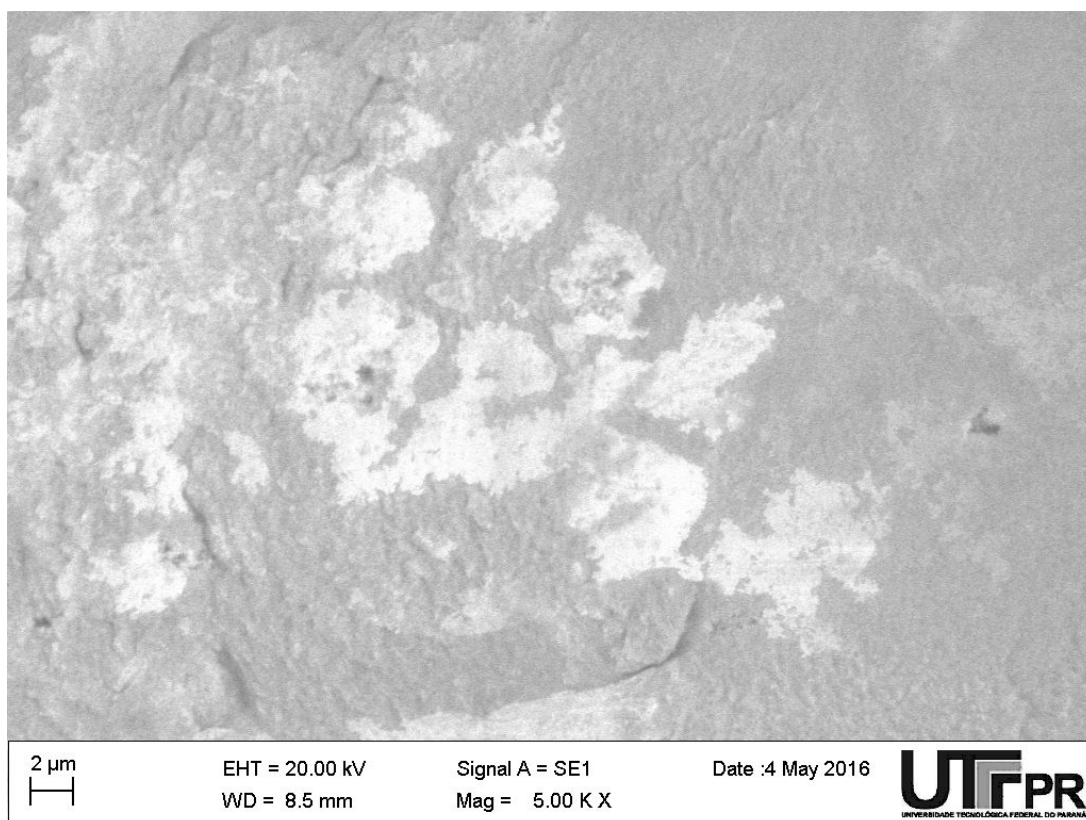


Figura F.2 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 1.

Fonte: Autoria própria, 2016.

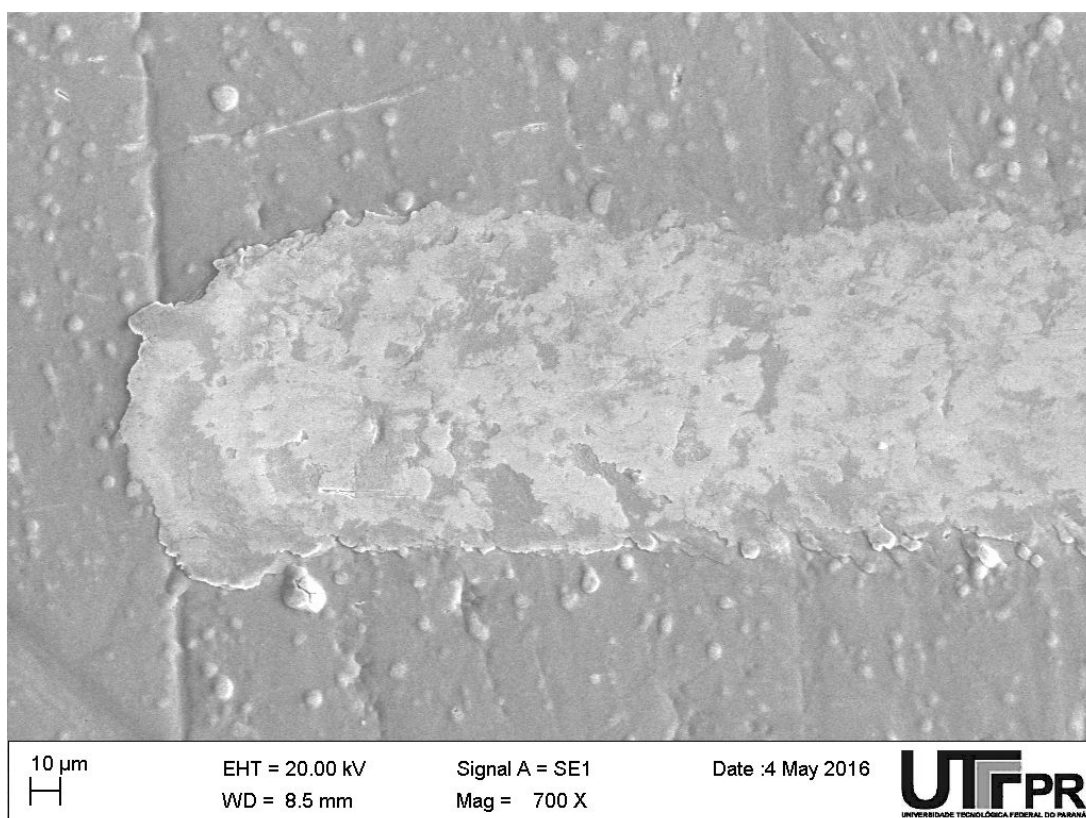


Figura F.3 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 1.

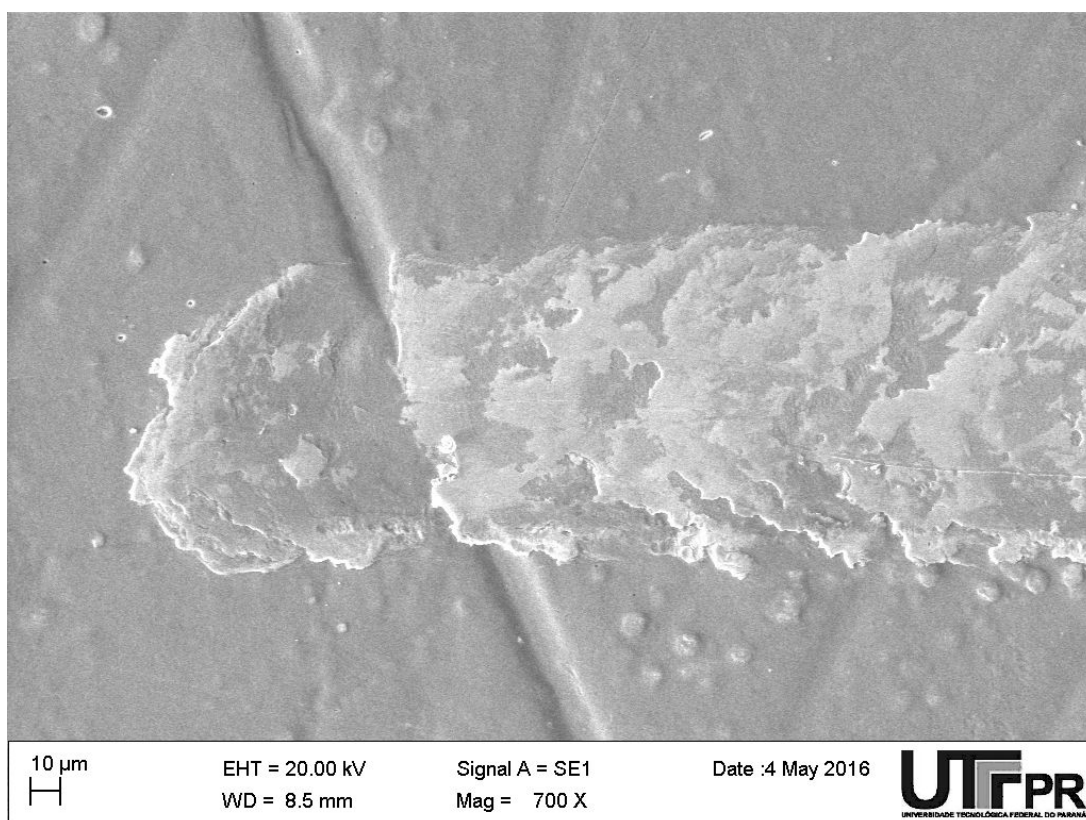


Figura F.4 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 2.

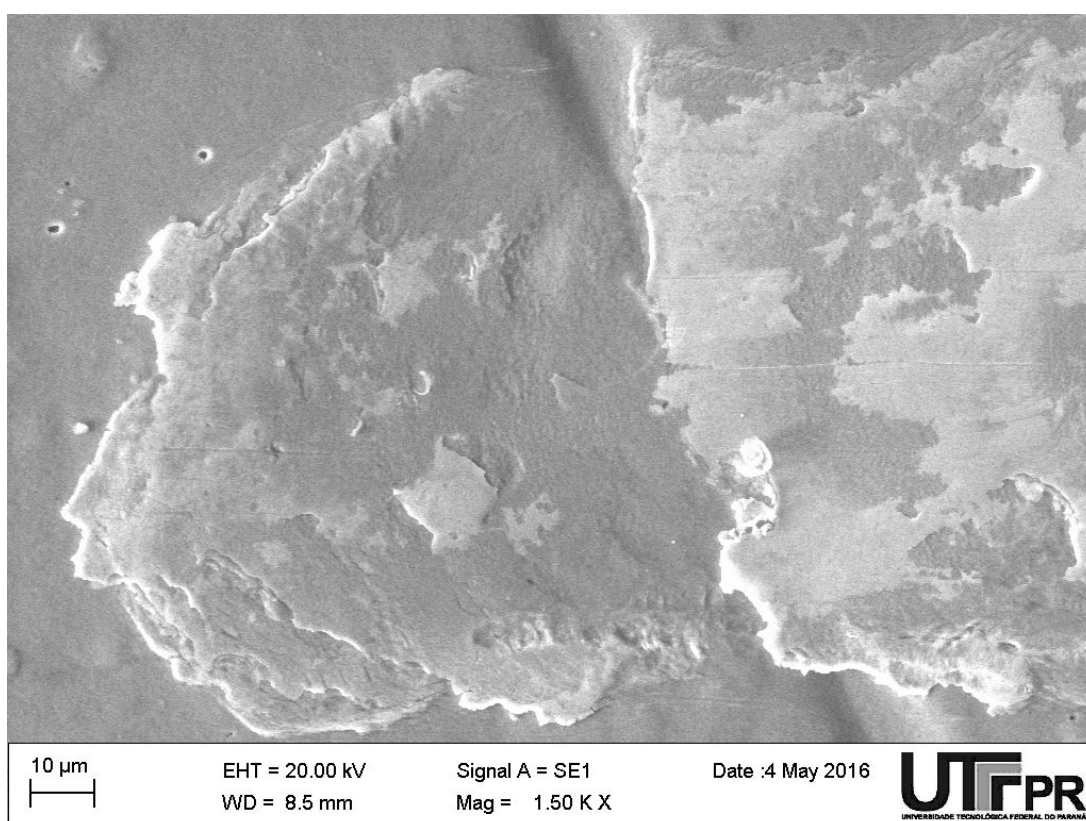


Figura F.5 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 2.

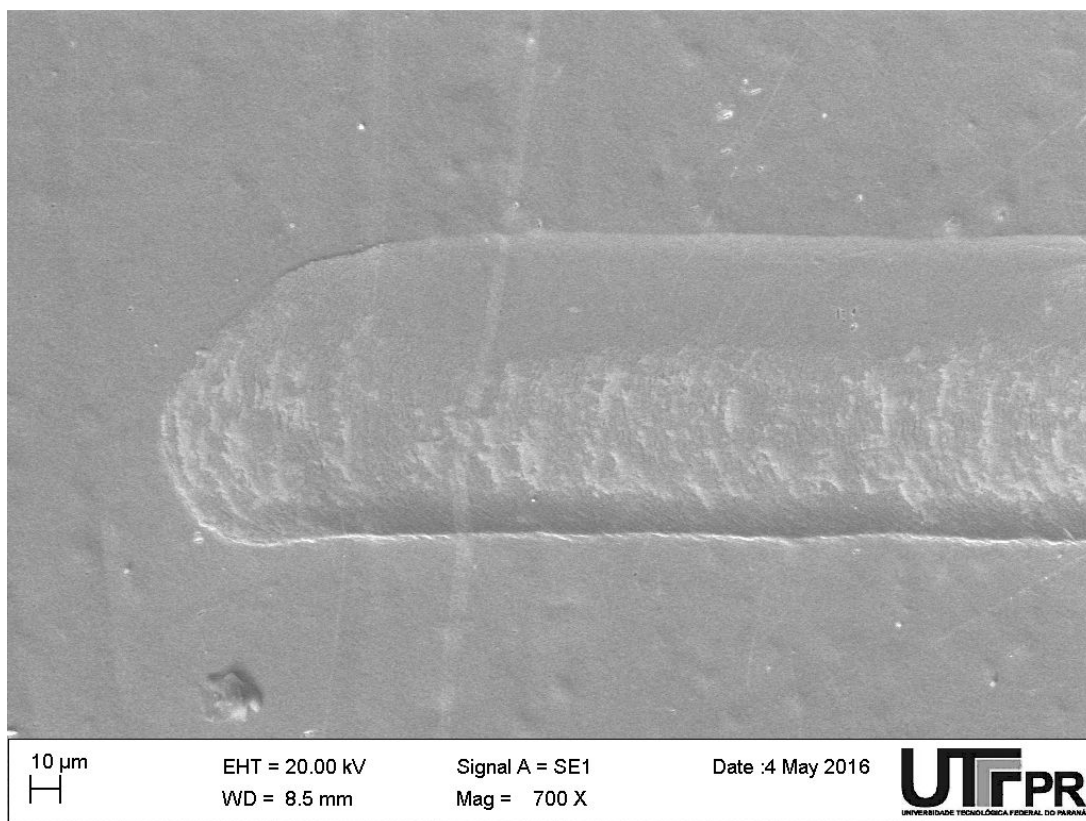


Figura F.6 – Micrografia eletrônica no final do risco da amostra 1, experimento 2.

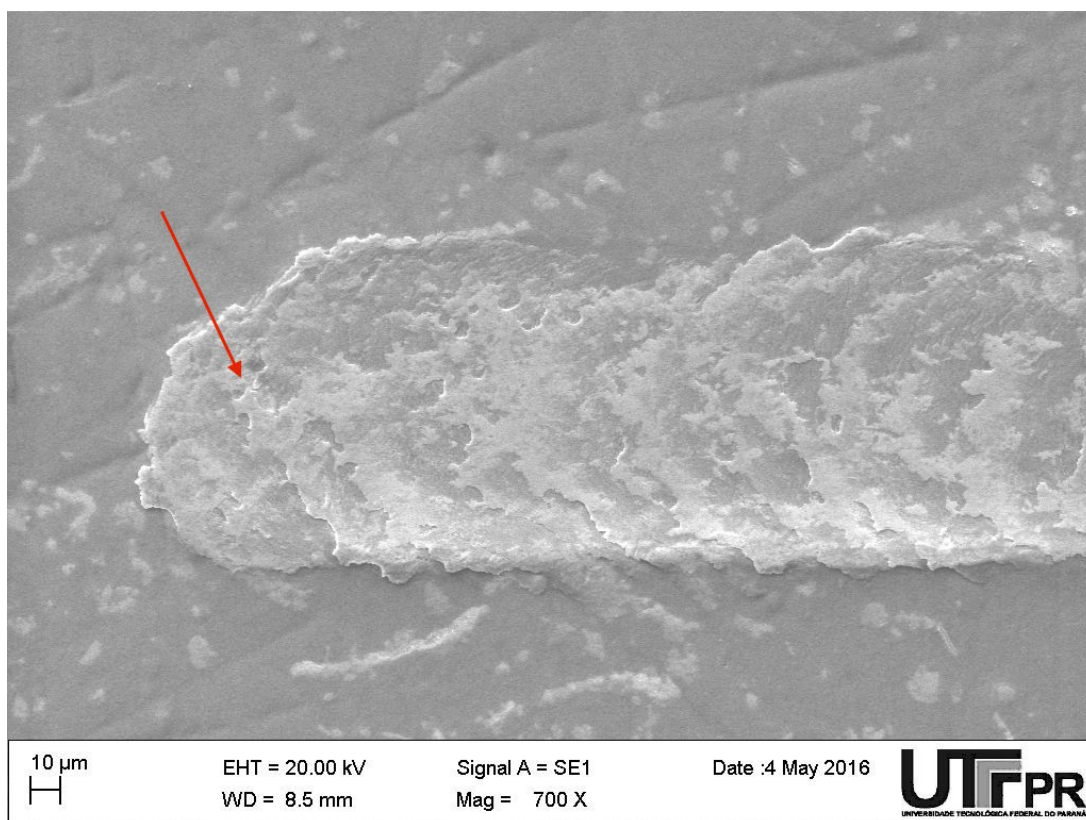


Figura F.7 – Micrografia eletrônica sobre o risco da amostra 1, experimento 4.

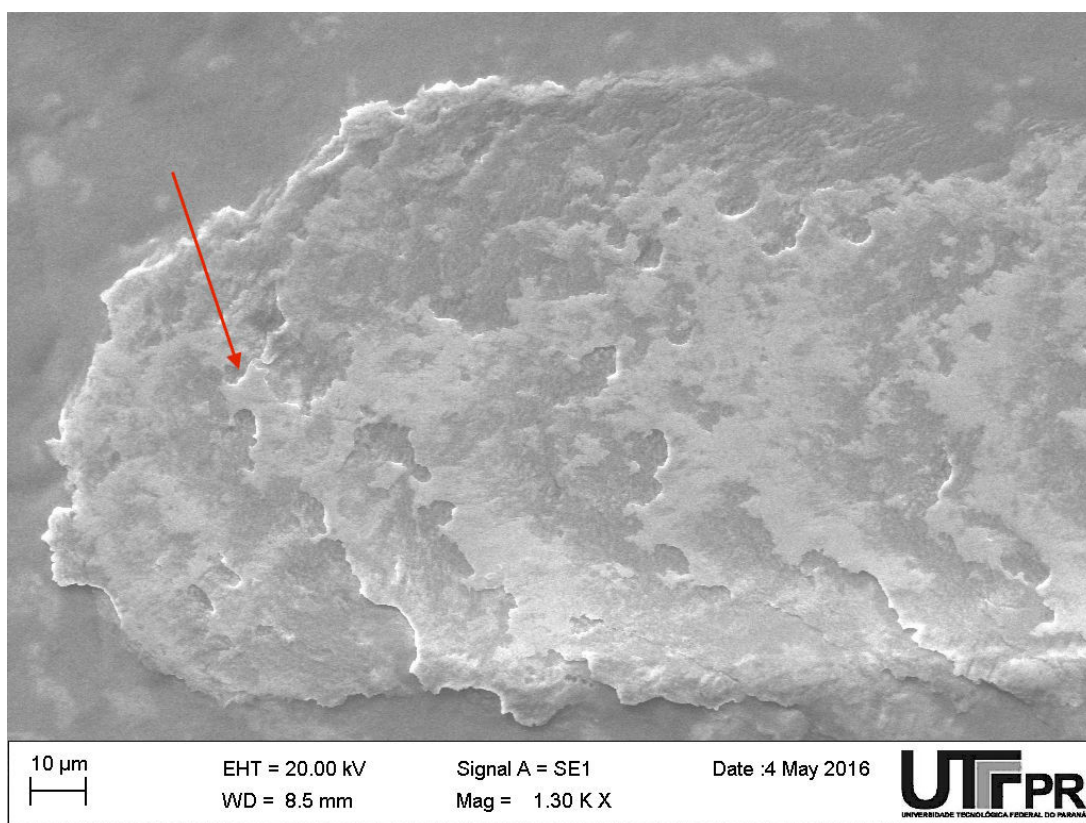


Figura F.8 – Micrografia eletrônica sobre o risco da amostra 1, experimento 4.

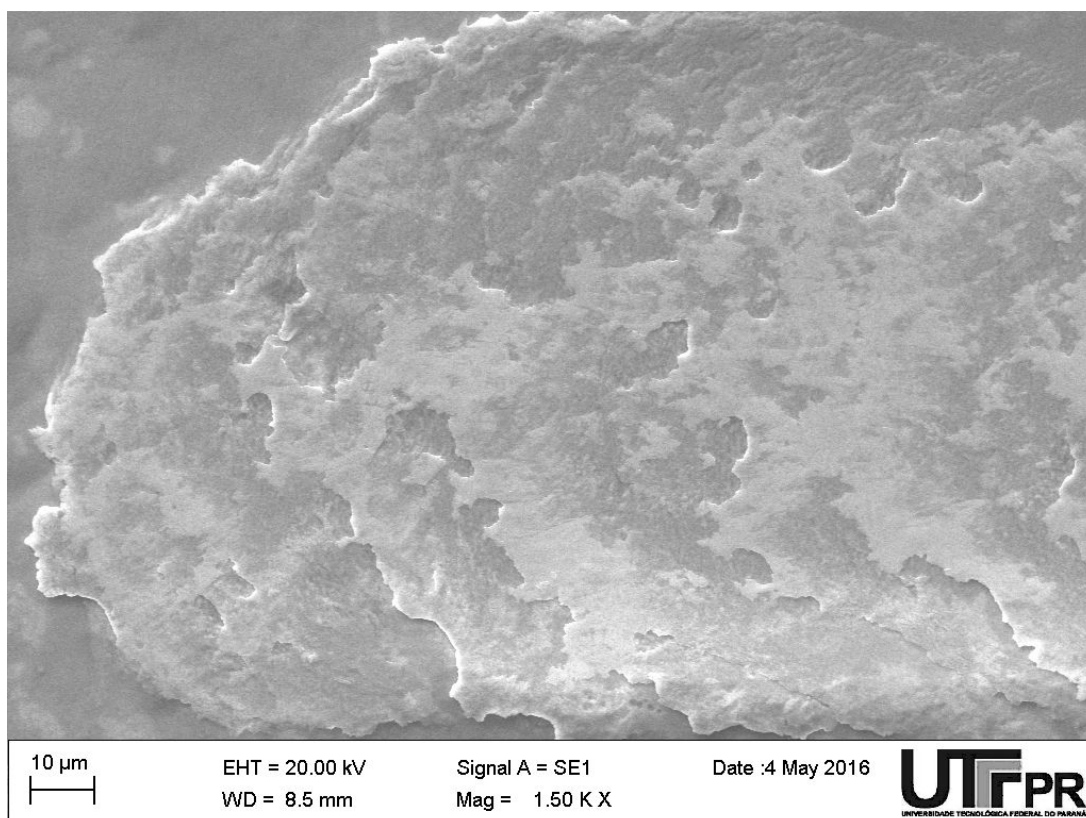


Figura F.9 – Micrografia eletrônica sobre o risco da amostra 1, experimento 4.

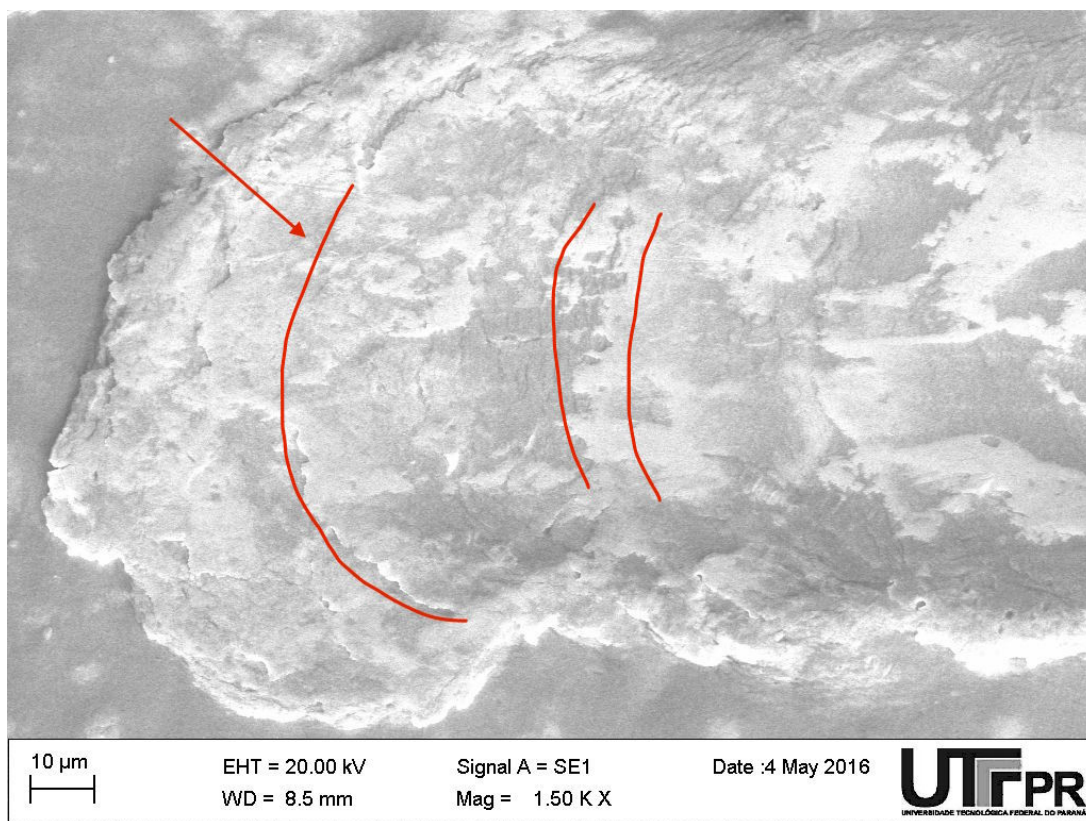


Figura F.10 – Micrografia eletrônica sobre o risco da amostra 1, experimento 5.

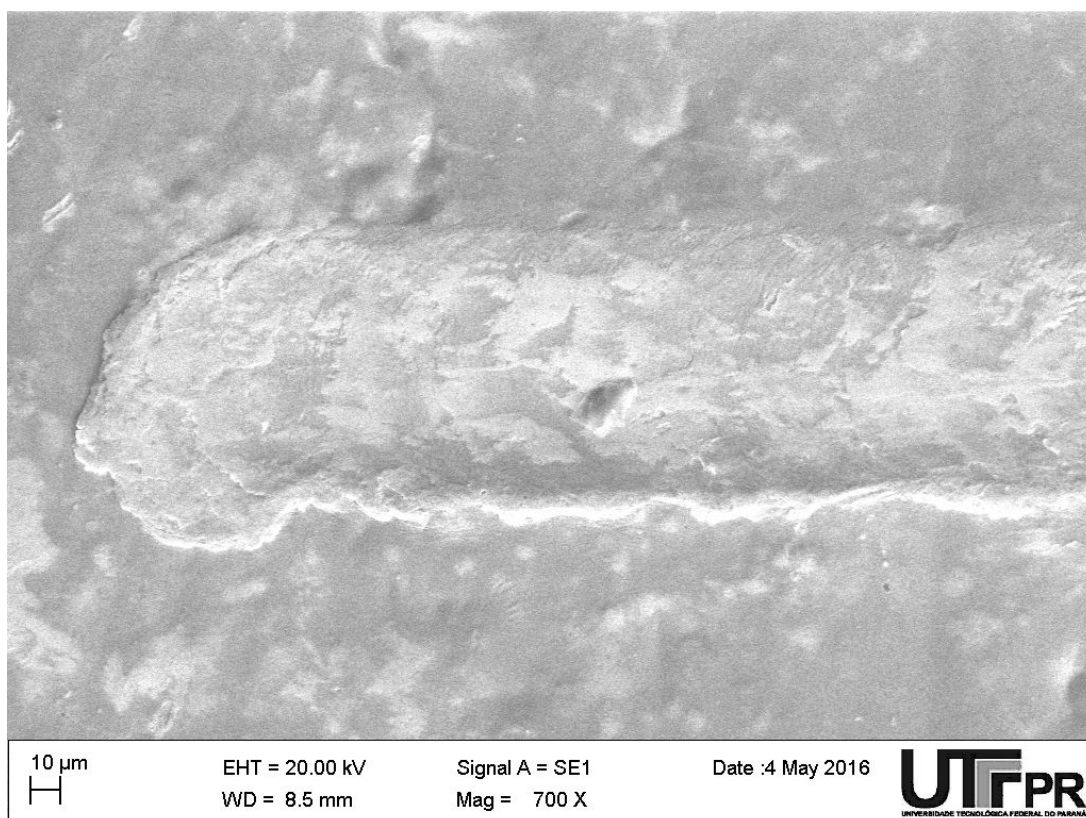


Figura F.11 – Micrografia eletrônica sobre o risco da amostra 1, experimento 5.

APÊNDICE G – MICROGRAFIAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA CAMADA ELETRODEPOSITADA

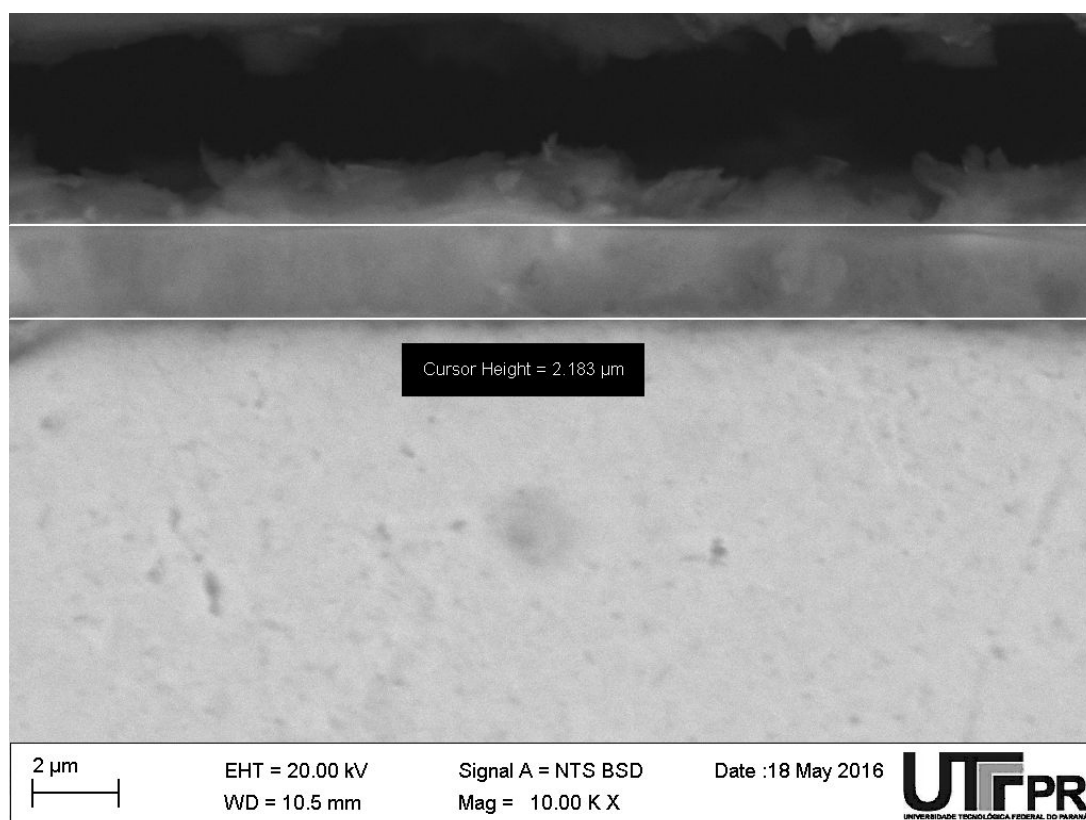


Figura G.1 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 1.

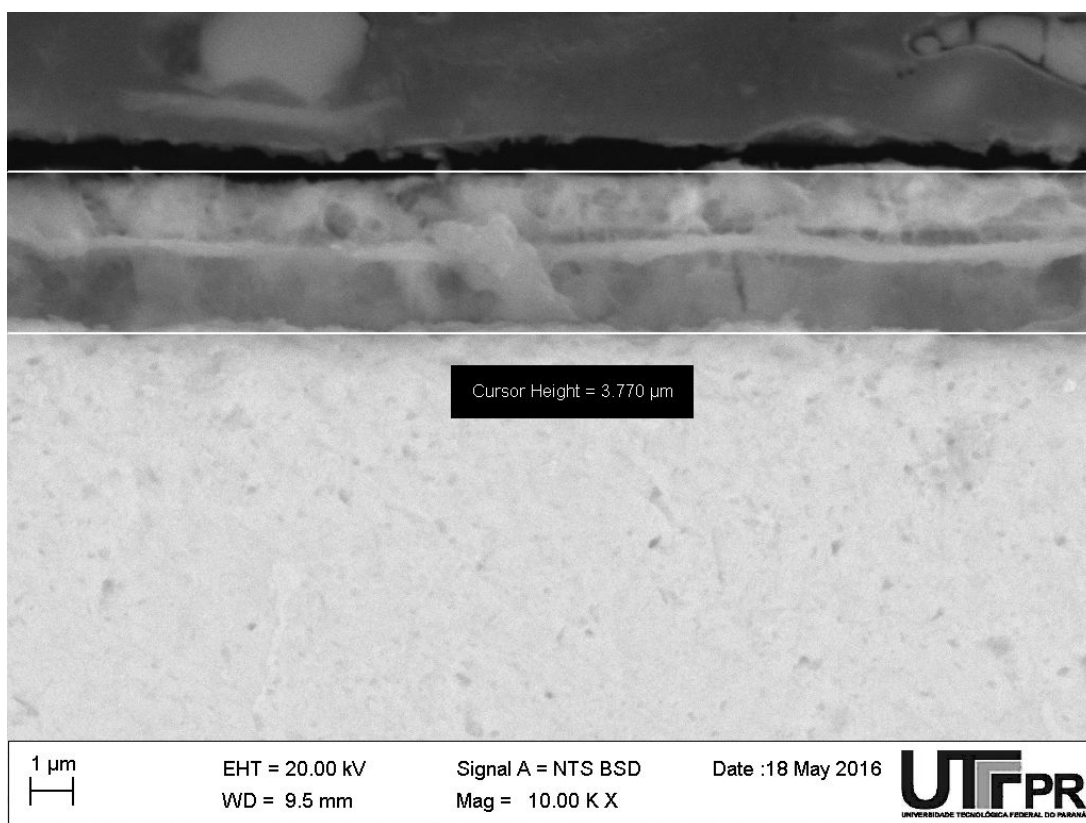


Figura G.2 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 1.

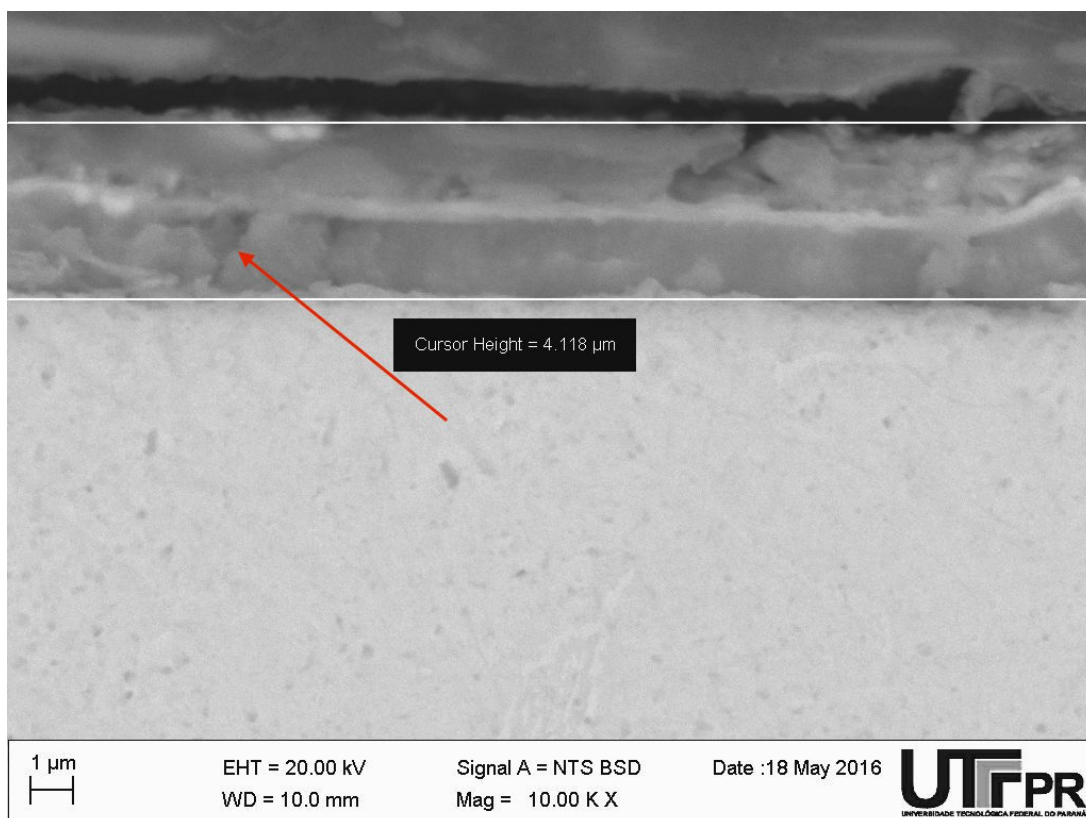


Figura G.3 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 1.

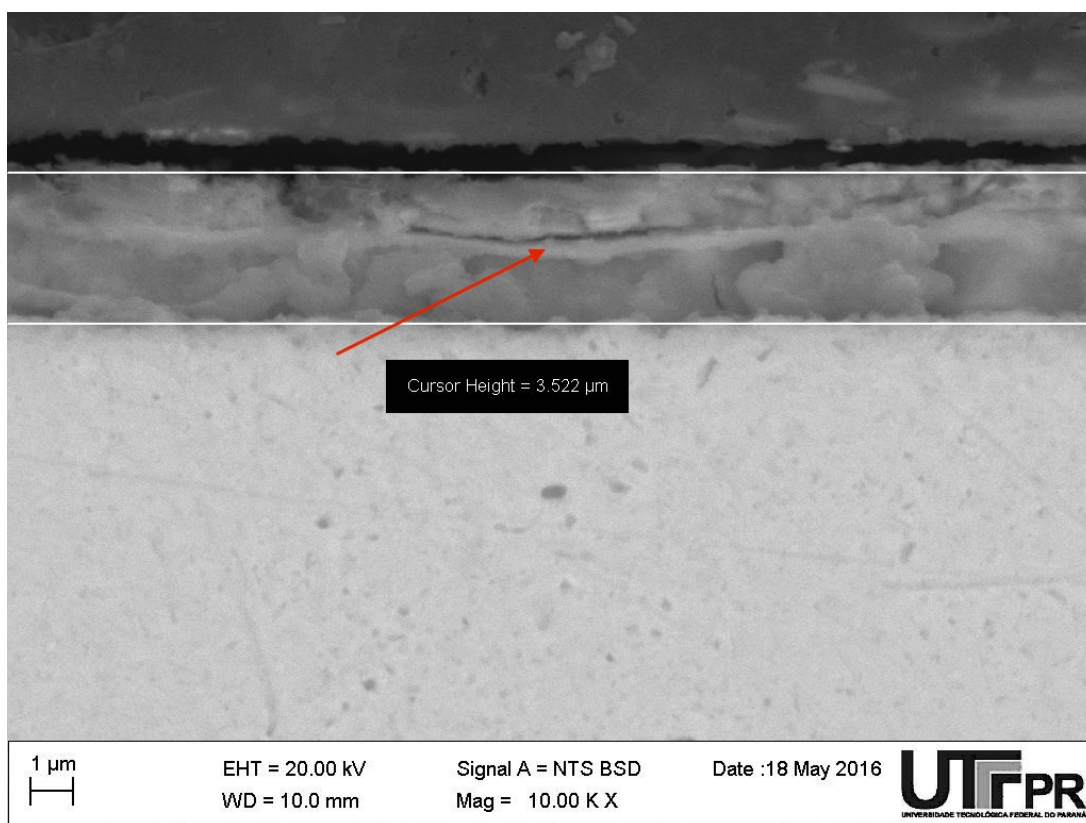


Figura G.4 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 1.

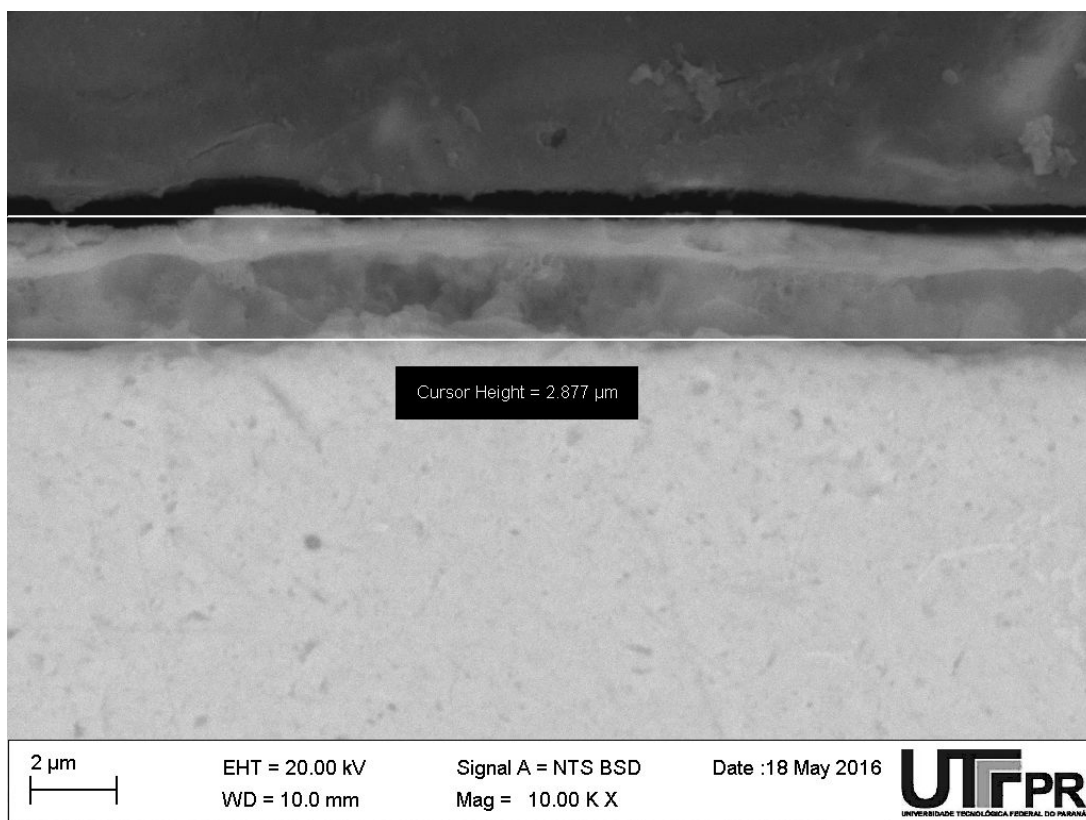


Figura G.5 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 1.

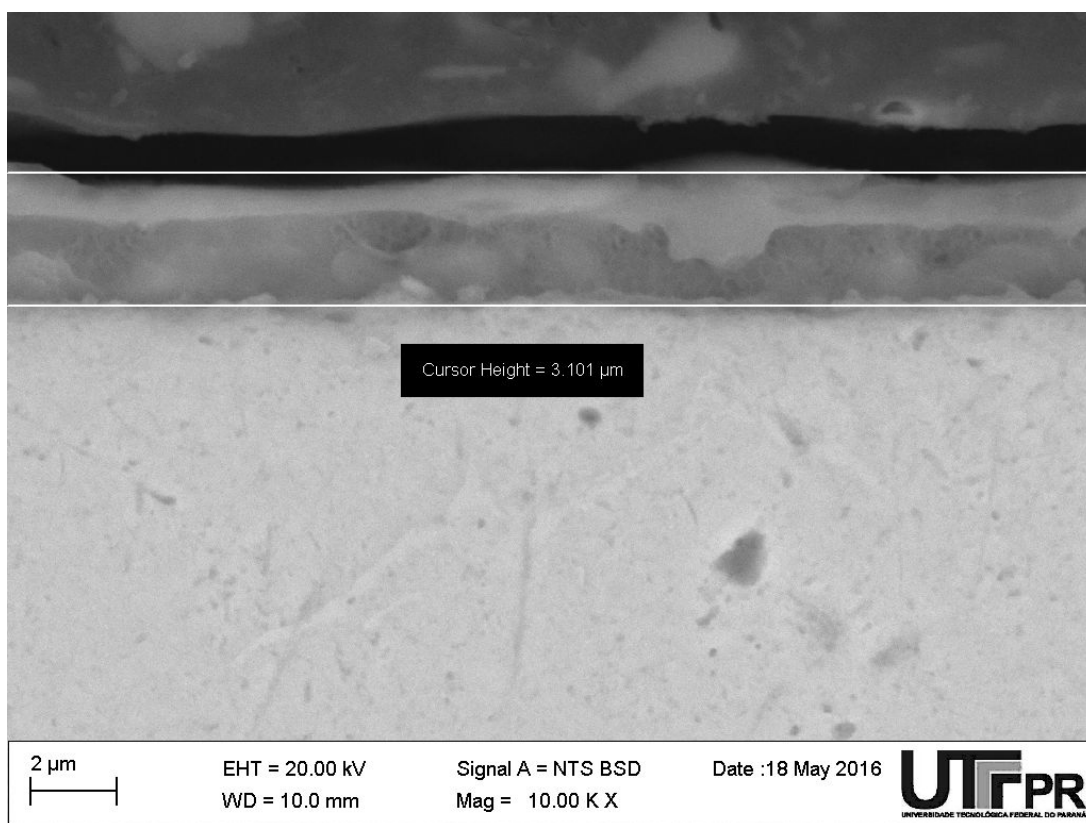


Figura G.6 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 1.

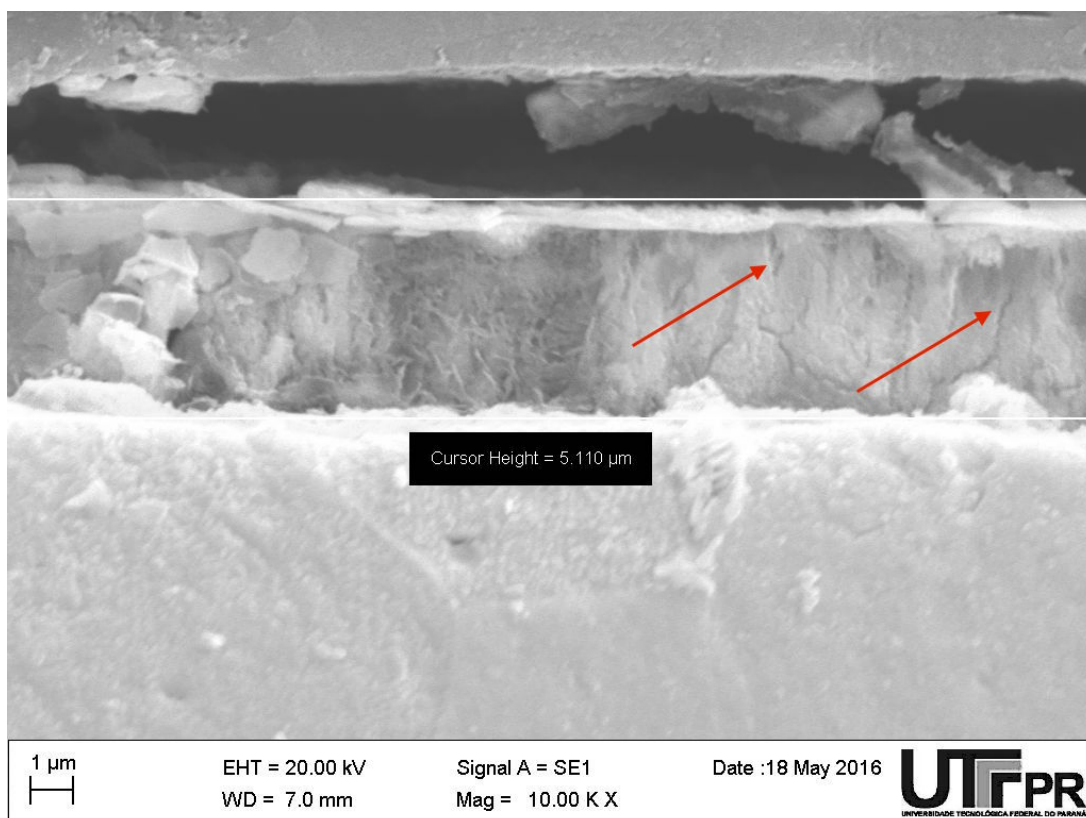


Figura G.7 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 2.

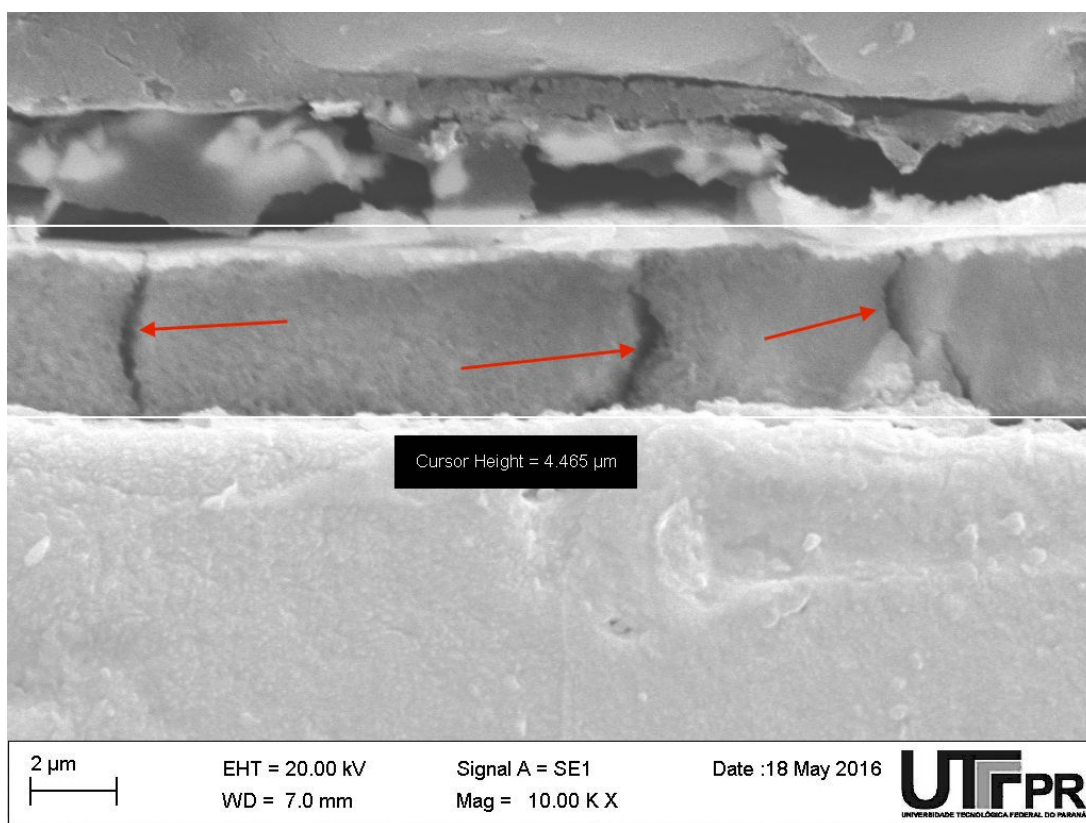


Figura G.8 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 2.

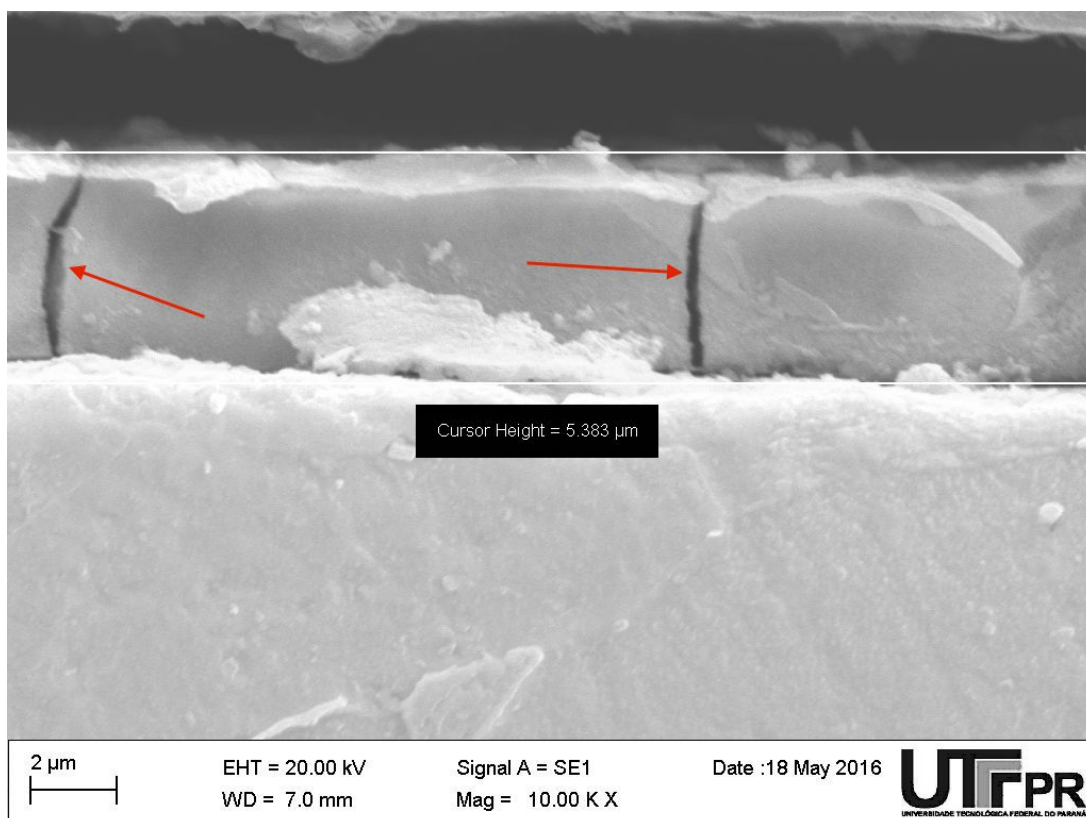


Figura G.9 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 2.

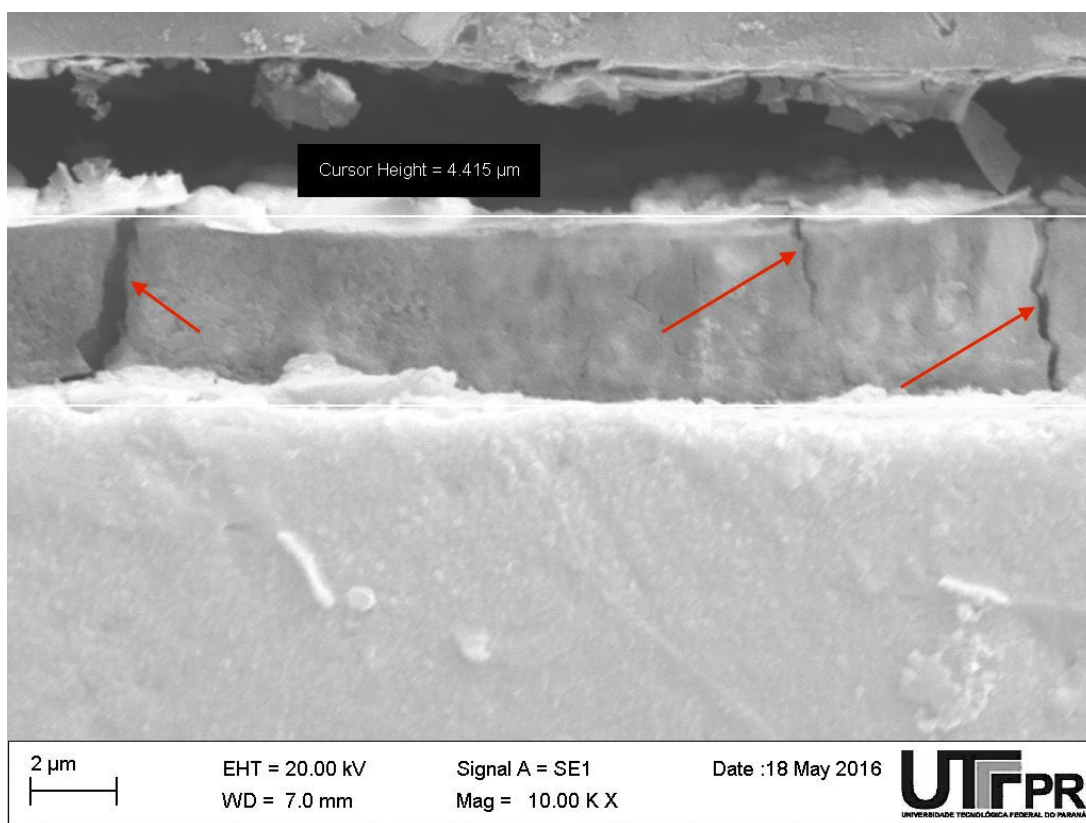


Figura G.10 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 2.

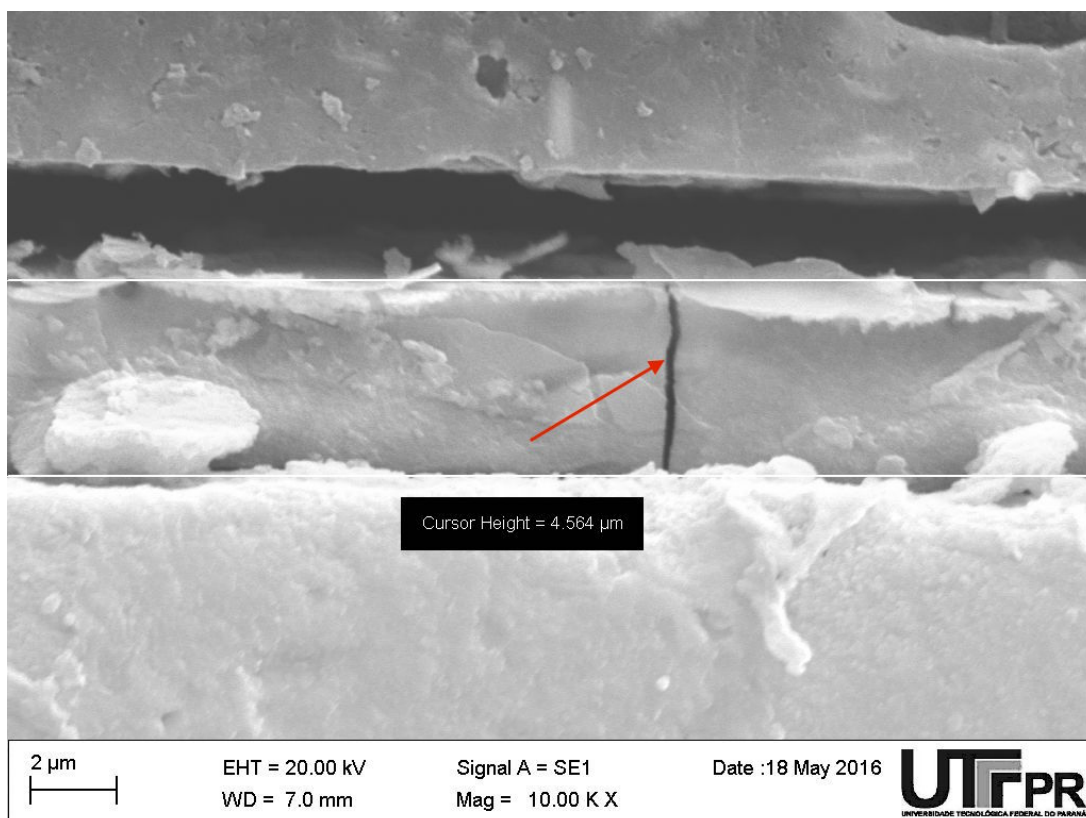


Figura G.11 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 2.

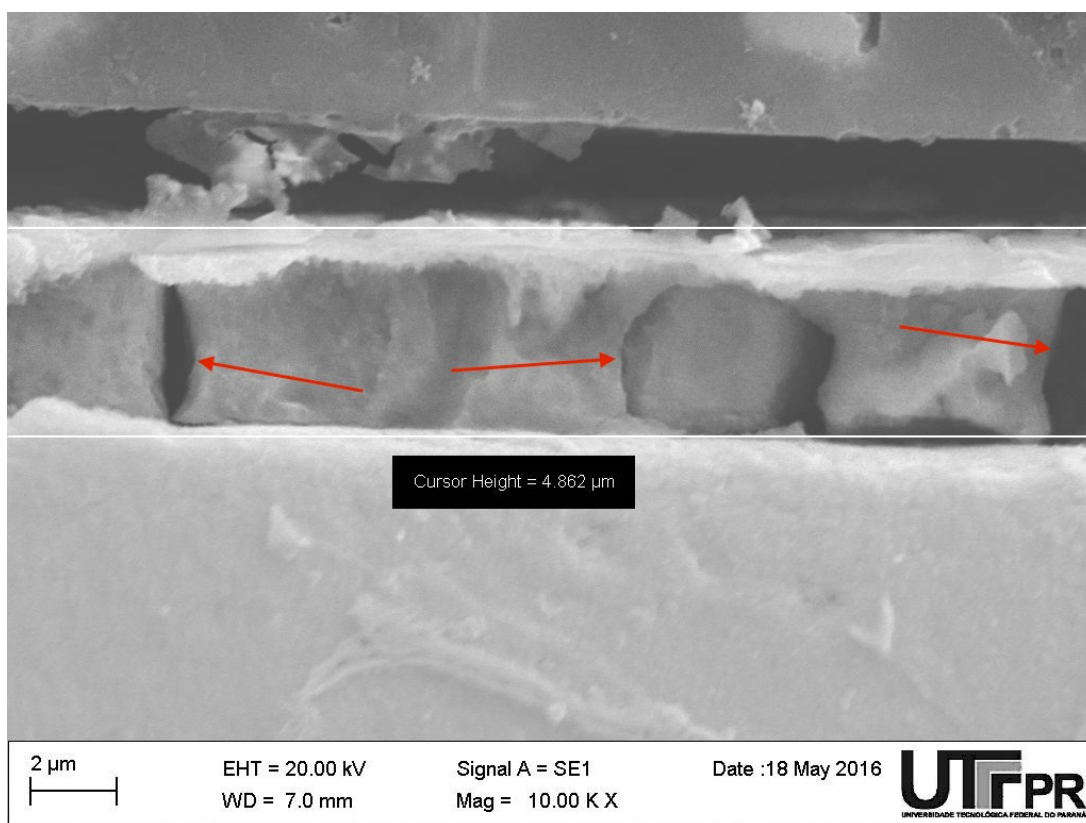


Figura G.12 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 2.

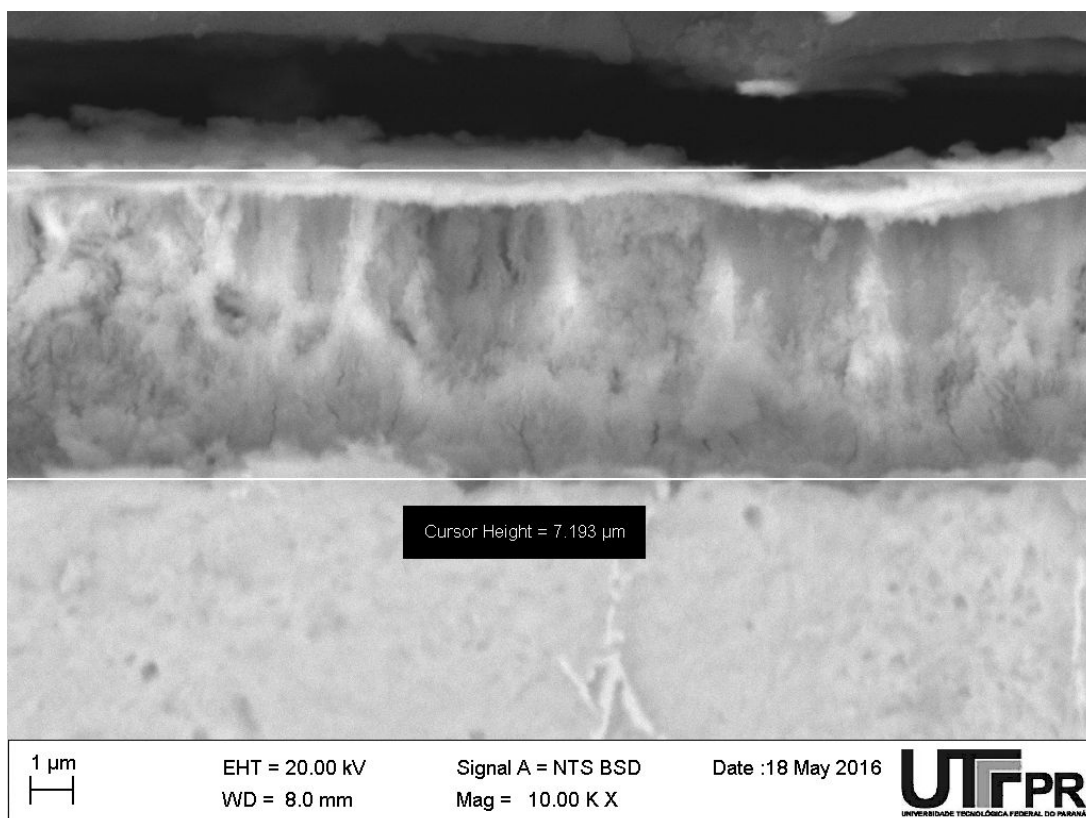


Figura G.13 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 3.

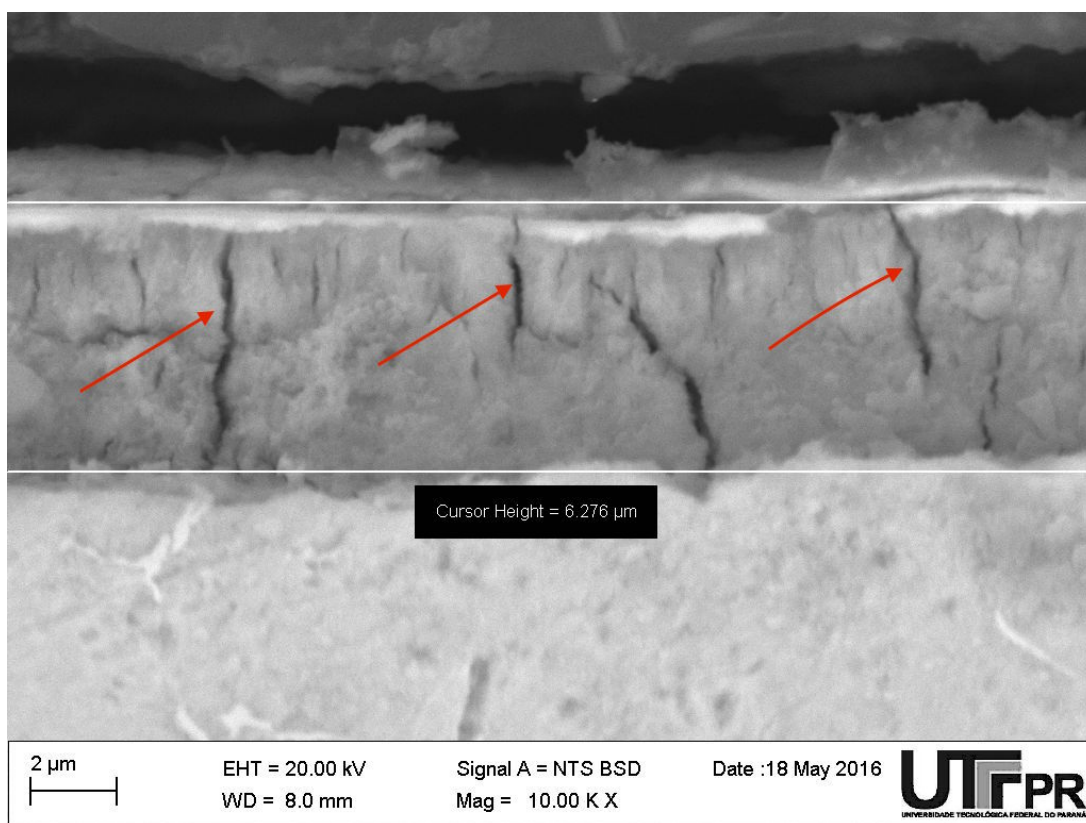


Figura G.14 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 3.

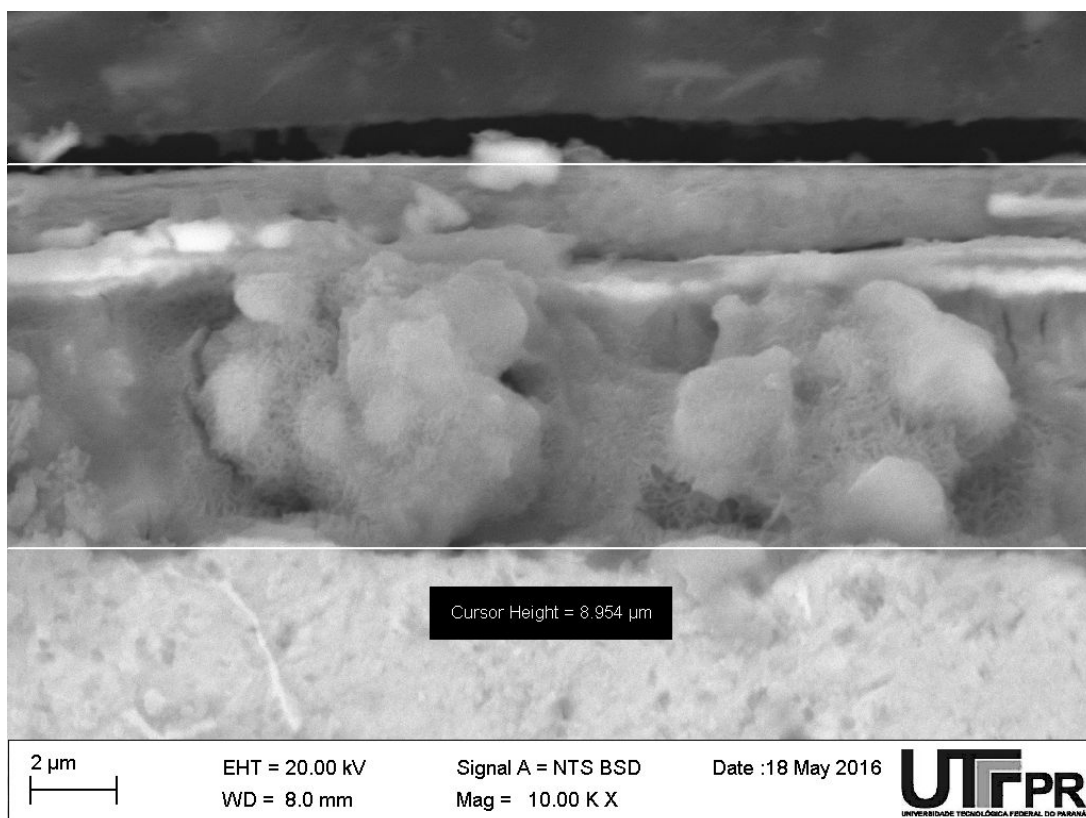


Figura G.15 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 3.

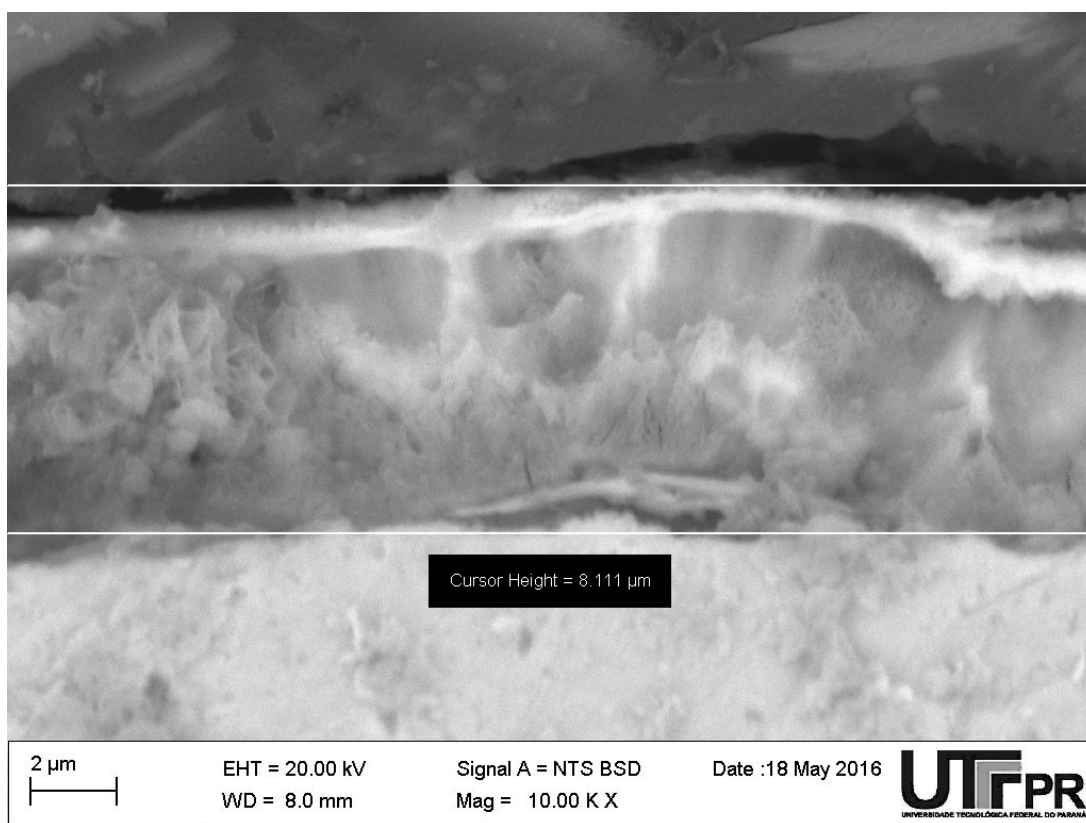


Figura G.16 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 3.

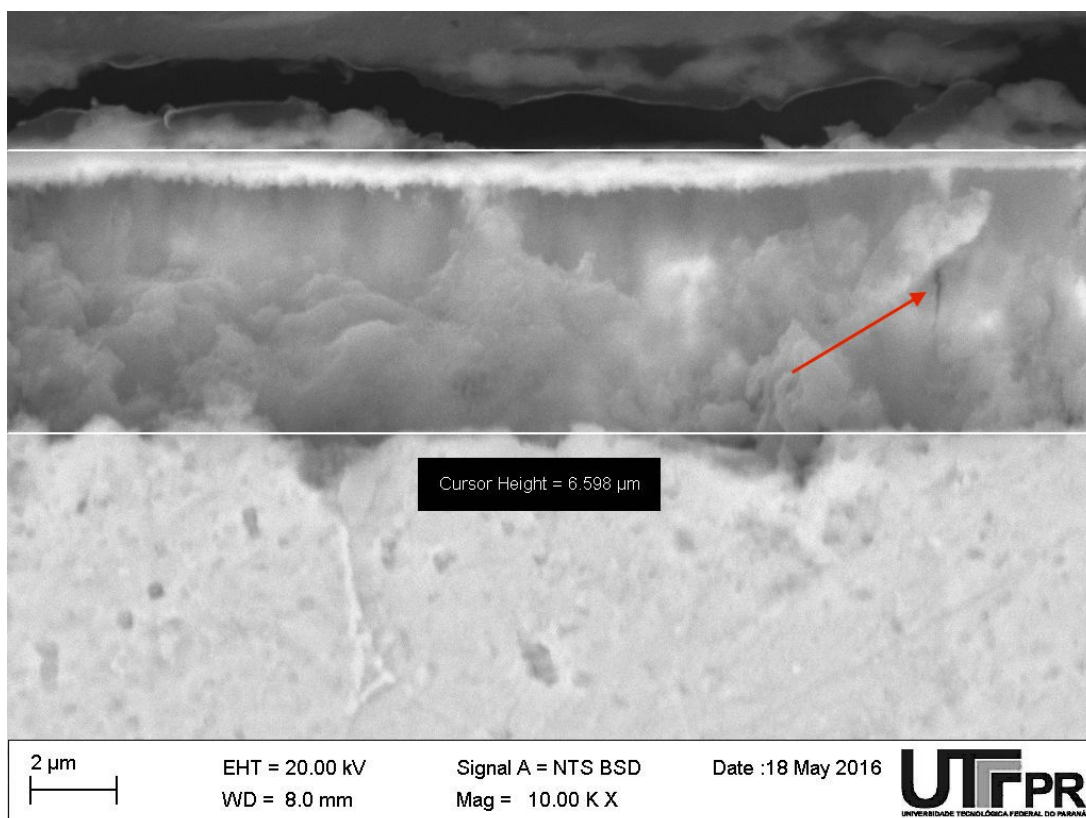


Figura G.17 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 3.

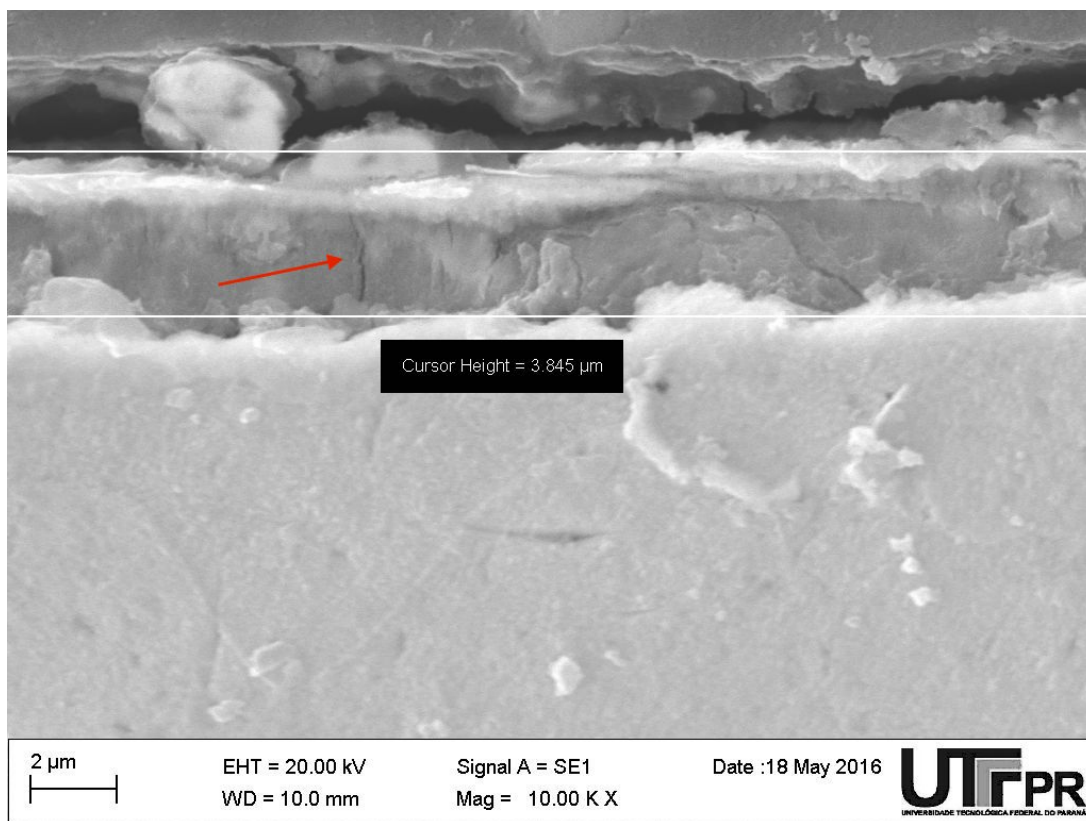


Figura G.18 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 4.

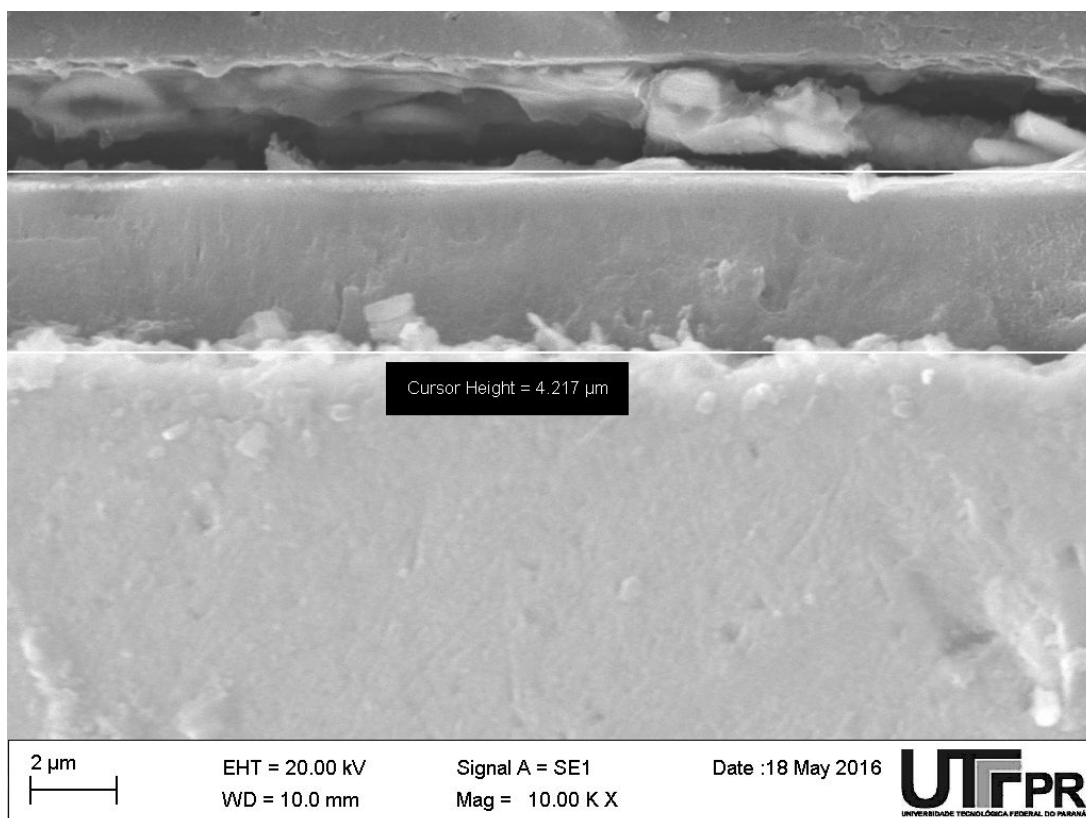


Figura G.19 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 4.

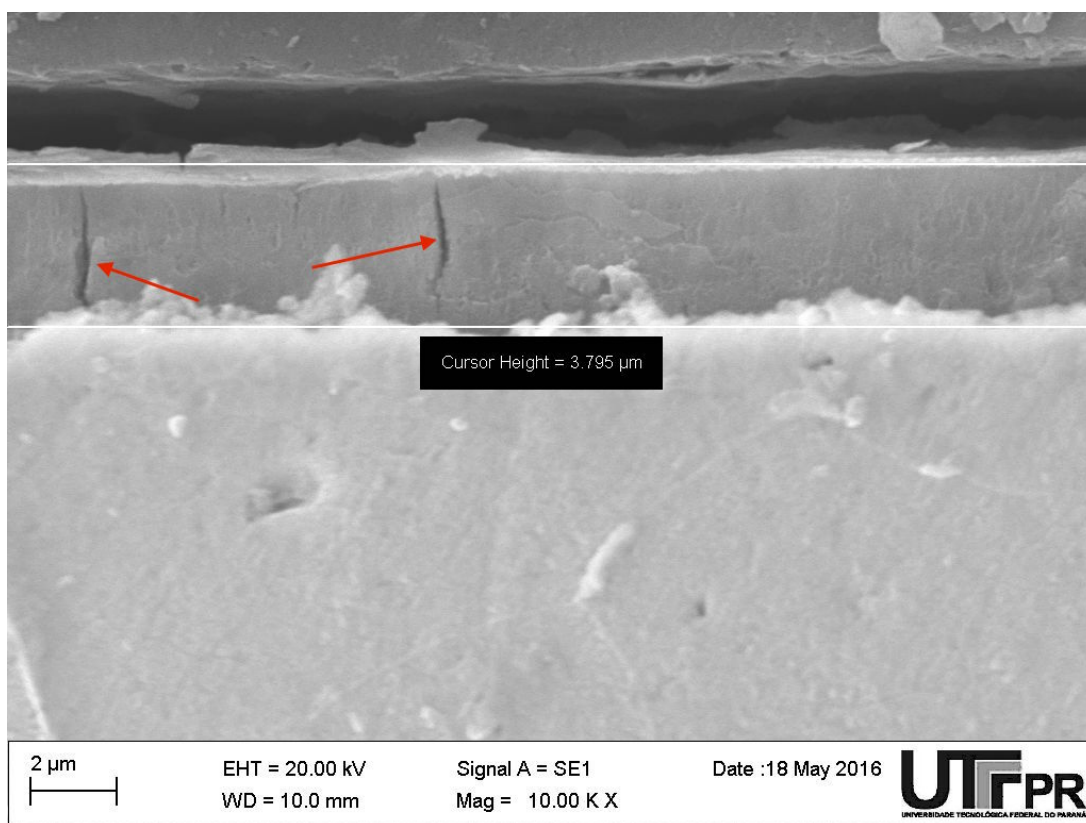


Figura G.20 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 4.

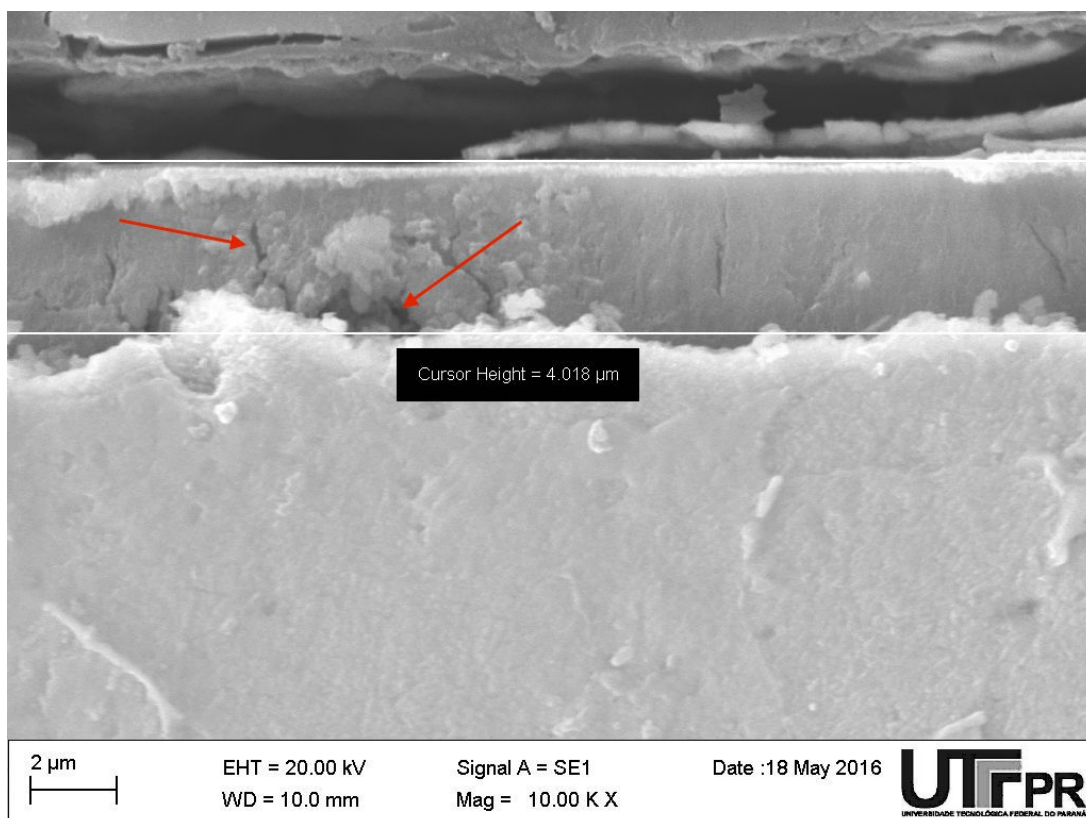


Figura G.21 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 4.

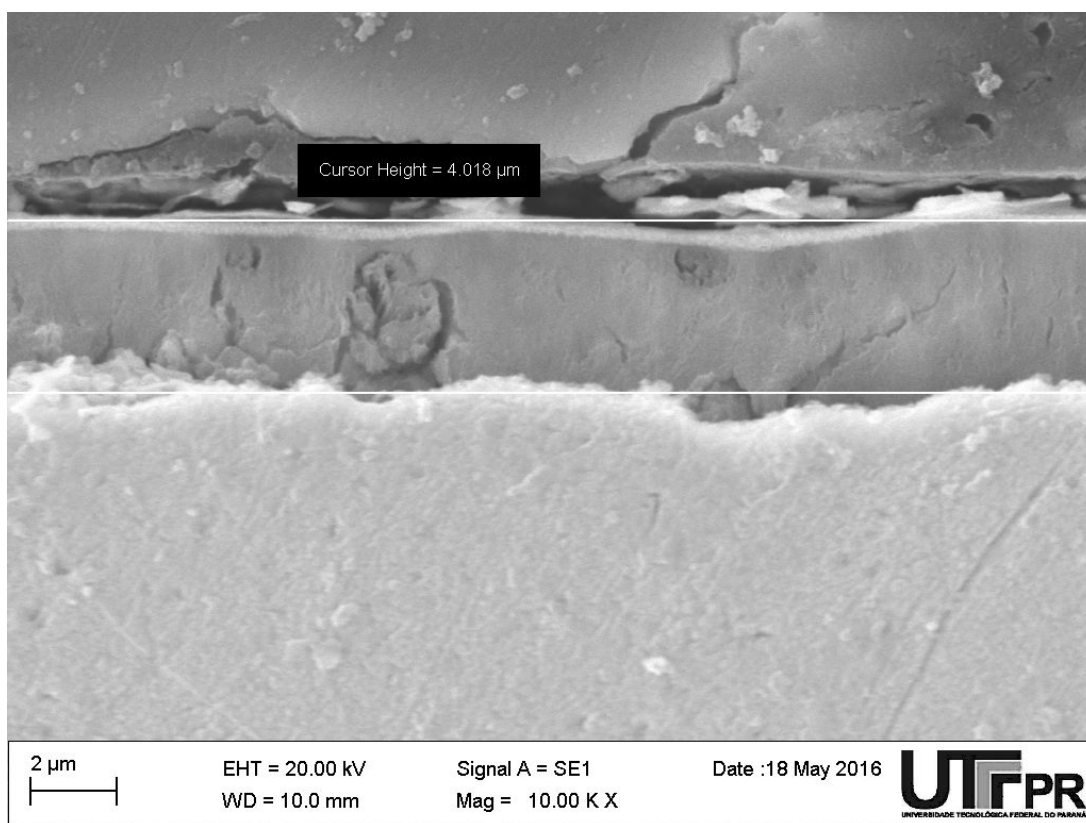


Figura G.22 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 4.

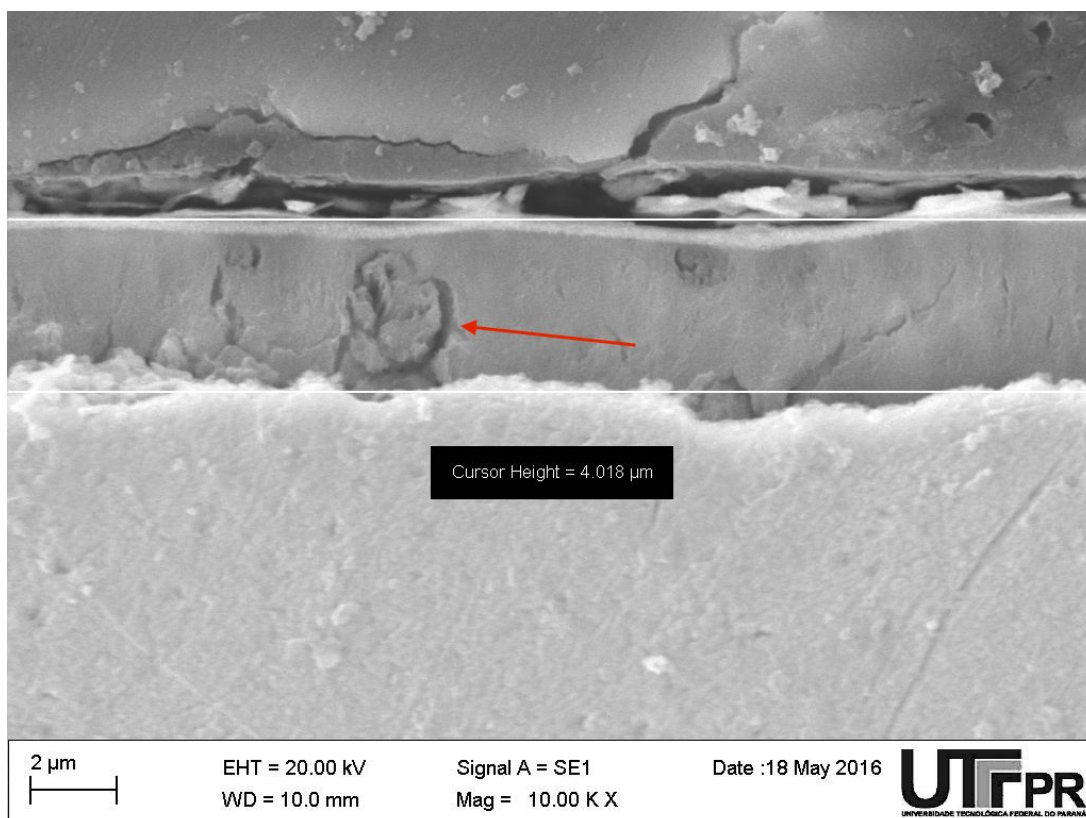


Figura G.23 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 4.

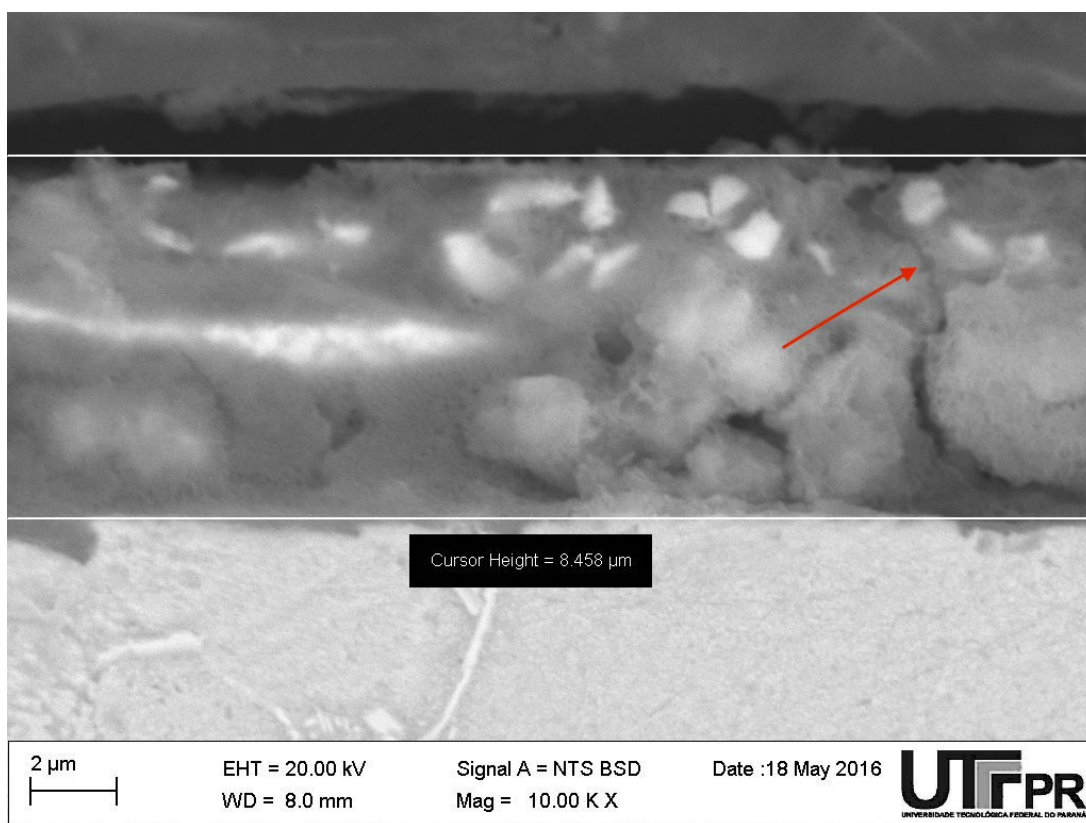


Figura G.24 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 5.

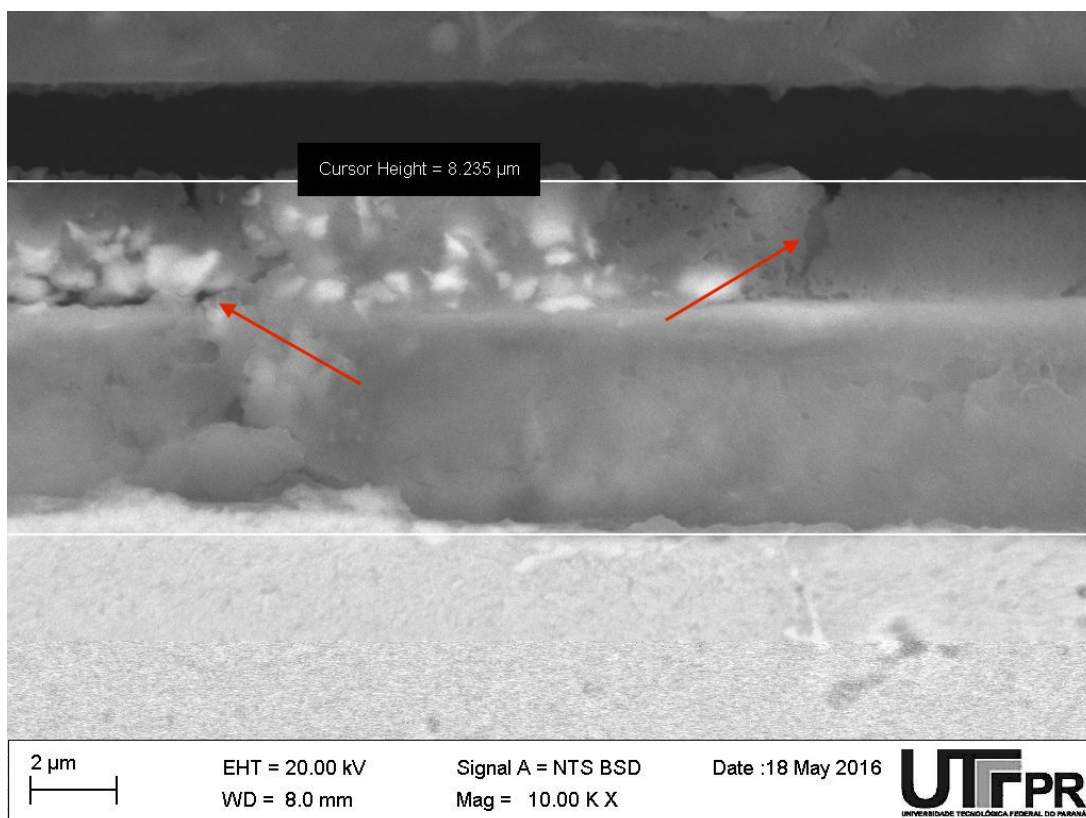


Figura G.25 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 5.

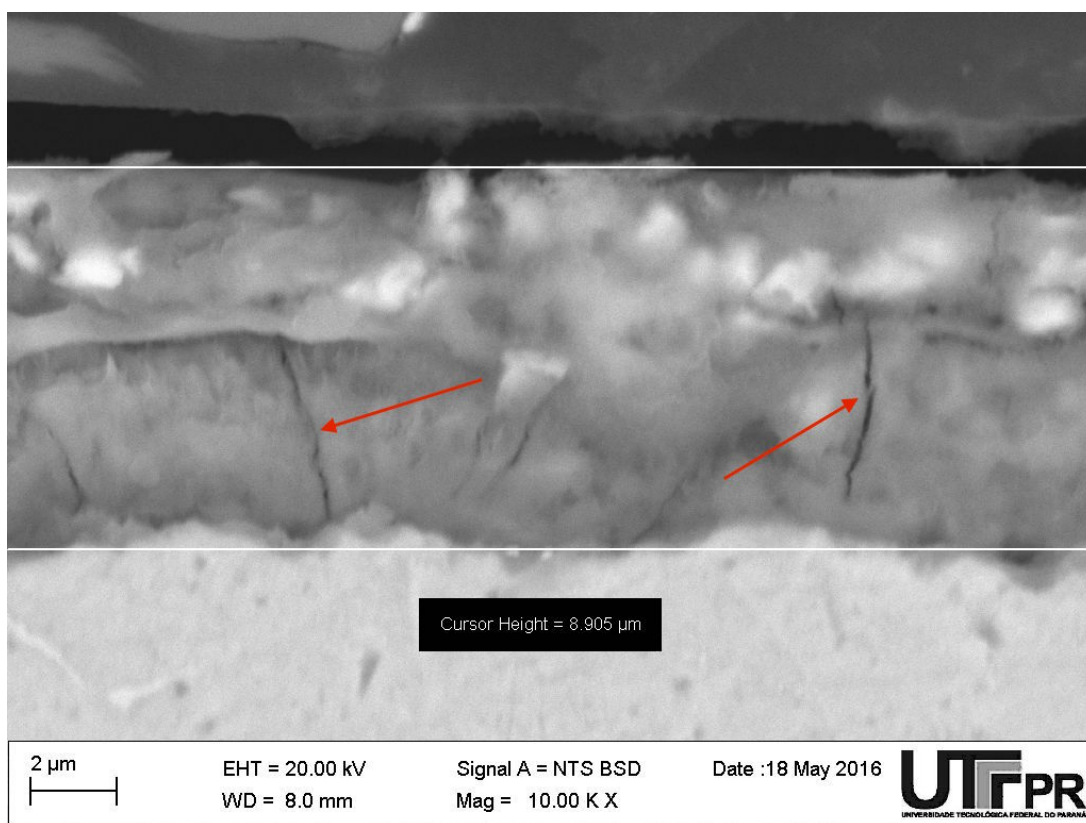


Figura G.26 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 5.

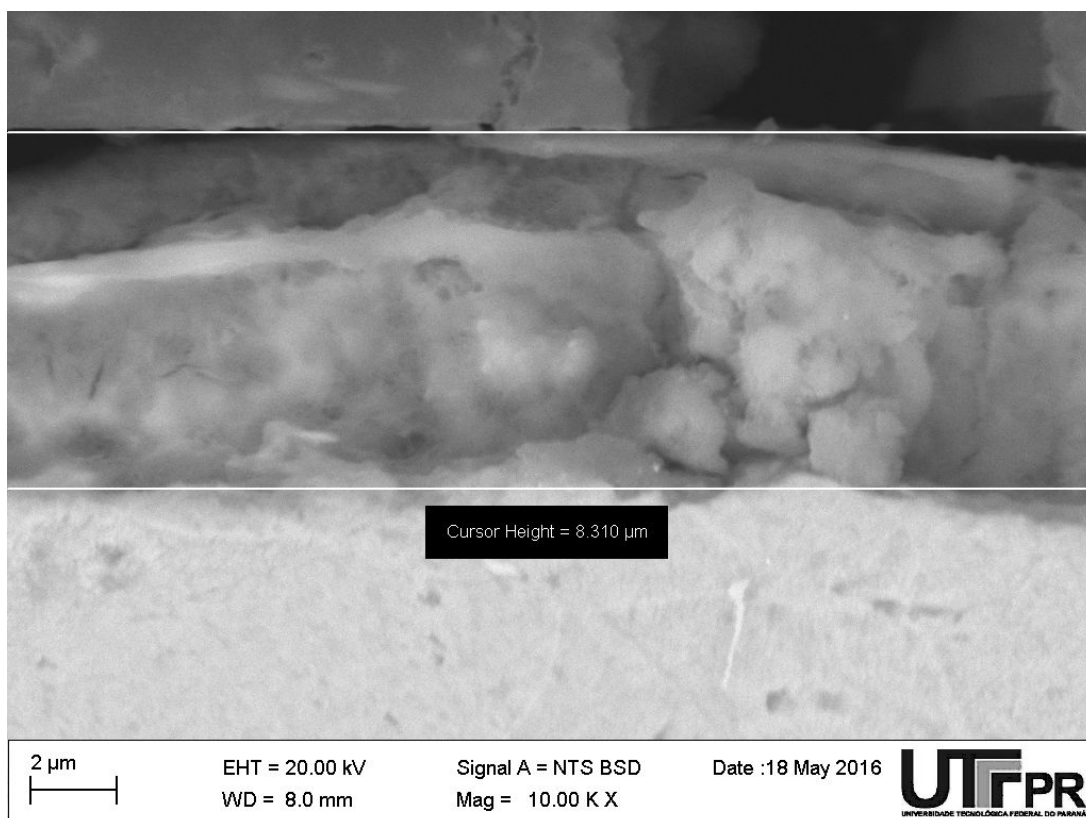


Figura G.27 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 5.

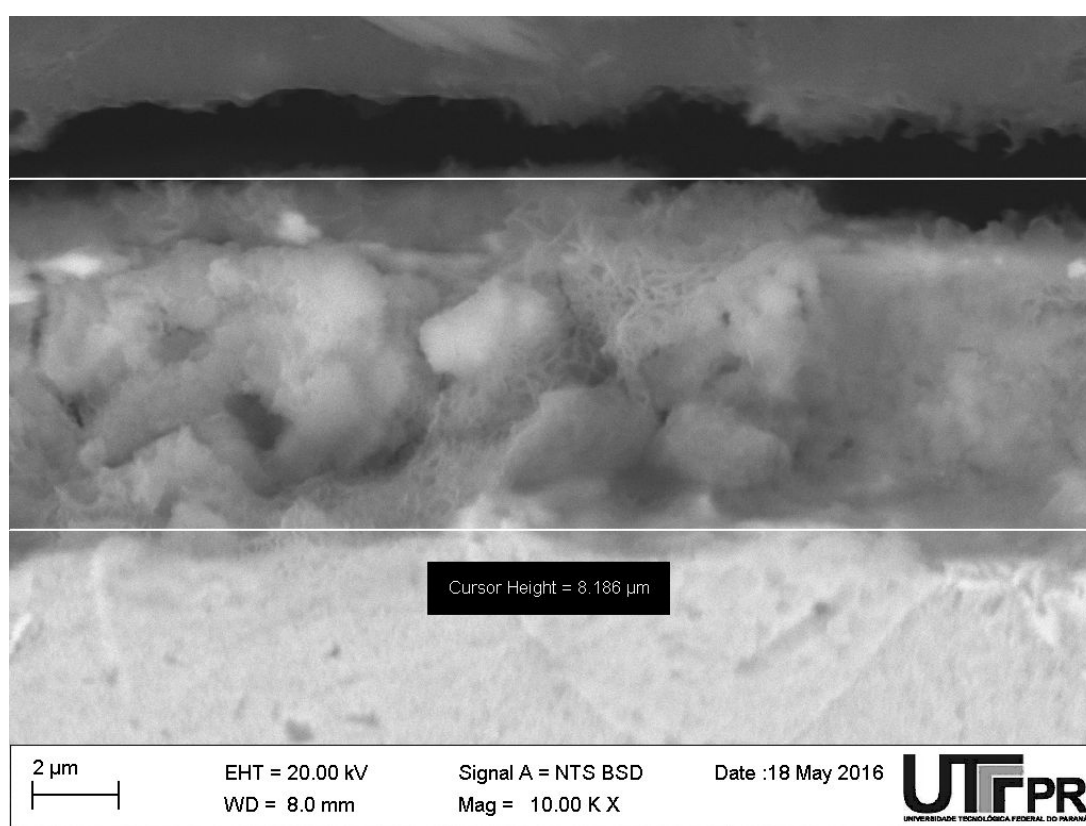


Figura G.28 – Micrografia eletrônica da seção transversal da amostra 1, experimento 5.

**ANEXO A – BOTETIM TÉCNICO DO DESENGRAXANTE
INDUSTRIAL ABS-30A**

1. FINALIDADE E APLICAÇÕES

ABS 30 A é biodegradável e possui ação desengraxante e desengordurante. Composto por substâncias não cáusticas e por solvente oxigenado que confere eficiente limpeza em chassis, peças, pisos e equipamentos estacionários.

2. COMPOSIÇÃO

Alcalinizante, emulsificante, solvente glicólico, acidificante, corante e água.

3. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Aspecto, cor:	Líquido vermelho
Densidade (20/25°C – g/mL):	1,01 a 1,03
pH (puro):	9,5 a 10,5

4. INSTRUÇÕES DE USO

Pode ser aplicado manualmente ou por pulverização.

5. PRECAUÇÕES

- ❖ Não ingerir;
- ❖ Evitar contato com os olhos;
- ❖ Em caso de ingestão acidental procurar socorro médico;
- ❖ Não reutilizar a embalagem;
- ❖ Utilizar Equipamentos de Proteção Individual (EPI's);
- ❖ Manter em local fresco e ao abrigo do sol;
- ❖ Manter fora do alcance de crianças.

Disponível em embalagens de 20, 50 e 200 litros.

LEIA ATENTAMENTE O RÓTULO ANTES DE UTILIZAR O PRODUTO. Em caso de dúvidas na utilização, solicite assistência técnica.

ALKON INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.

Av. Wilson Tavares Ribeiro, 465, Chácara Reunidas Santa Terezinha. Contagem/MG. CEP 32.183-680 Telefax: (31) 3441-8181 – CNPJ. 01.340.818/0001-16. Indústria Brasileira. Responsável técnico: Abda Florência da Silva Gomes. CRQ MG – 02.407.247 – 2ª região. Autorização de funcionamento ANVISA/MS: 3.02071-3. E-mail: alkon@alkon.com.br – Site: www.alkon.com.br

**ANEXO B – COMPOSIÇÃO DOS ELETRÓLITOS DO BANHO DE
ELETRODEPOSIÇÃO**



Sul

RELATÓRIO DE ANÁLISE

Cliente: **GALVANIZAÇÃO NEW ZINCO**

Data de entrada: 05/11/15

Data de saída: 05/11/15

Nº da solicitação: 0236

	<u>Encontrado</u>	<u>Parâmetros</u>
ZINCO ALC. SEM CIANETO ORIGINAL		
Zinco metal	12,1 g/L	14 g/L
Soda Cáustica	127,9 g/L	140 g/L

OBSERVAÇÃO: * Teste prático (Célula de Hull) = OK

ZINCO ALC. SEM CIANETO EXP 1		
Zinco metal	12,1 g/L	14 g/L
Soda Cáustica	127,5 g/L	140 g/L

OBSERVAÇÃO: * Teste prático (Célula de Hull) = Banho apresenta excesso de abrillantador

ZINCO ALC. SEM CIANETO EXP 2/5		
Zinco metal	12,4 g/L	14 g/L
Soda Cáustica	127,5 g/L	140 g/L

OBSERVAÇÃO: * Teste prático (Célula de Hull) = Banho apresenta excesso de abrillantador

ZINCO ALC. SEM CIANETO EXP 3		
Zinco metal	12,4 g/L	14 g/L
Soda Cáustica	127,9 g/L	140 g/L

OBSERVAÇÃO: * Teste prático (Célula de Hull) = Banho apresenta excesso de abrillantador

ZINCO ALC. SEM CIANETO EXP 4		
Zinco metal	11,7 g/L	14 g/L
Soda Cáustica	128,3 g/L	140 g/L

OBSERVAÇÃO: * Teste prático (Célula de Hull) = Banho apresenta excesso de abrillantador

ZINCO ALC. SEM CIANETO EXP 6		
Zinco metal	12,4 g/L	14 g/L
Soda Cáustica	127,5 g/L	140 g/L

OBSERVAÇÃO: * Teste prático (Célula de Hull) = Banho apresenta excesso de abrillantador

* Os resultados obtidos na análise são referentes à amostra enviada para o laboratório.

* Uma homogenização deficiente do banho poderá acarretar resultados errôneos.

* Amostra enviada para **ANÁLISE DE ROTINA** entregue pelo vendedor LEO.

Lucas Leocadio Battiston
Analista

Melissa Ferreira de Souza
Sup. de Laboratório
CRQ IV: 04443559

DILETA Eletroquímica Sul

Rua Doutor Bley Zornig, 531 Boqueirão - Curitiba - PR - Brasil - CEP 81730-350

Tel.: 55 41 3296-5450 - Fax: 55 41 3344-9428

site: www.dileta.com.br / e-mail: lab.curitiba@dileta.com.br

ANEXO C – PROCESSO SURTEC 704

SurTec 704

Processo de Zinco Alcalino sem Cianeto

1- DESCRIÇÃO

- Adequado para banhos parados ou rotativos.
- Excelente dispersão de camada entre alta e baixa densidade de corrente com variações na ordem de 30 % em testes de Célula de Hull.
- As camadas são dúcteis, sem bolhas e com alta receptividade a cromatos.
- Ótima penetração mesmo em peças com geometria complicada
- Adequado para o uso a altas densidades de corrente “sem queima”.
- Ideal para o uso com Gerador de Zinco Externo.

2- CONDIÇÕES GERAIS

2.1- Instruções Operacionais

	<i>Ideal</i>	<i>Faixa</i>
Zinco Metal	10 - 12 g/L	8 - 17 g/L
Óxido de Zinco (Pureza > 99,8 %)	12,5 - 15 g/L	10 - 21 g/L
Soda Cáustica (QP)	130 - 140 g/L	110 - 150 g/L
Carbonato de Sódio	50 g/L	< 80 g/L
SurTec 704 I Aditivo	10 mL/L	5 - 15 mL/L
SurTec 704 II Abrilhantador	2 mL/L	1 - 3 mL/L
SurTec 704 Condicionador	10 mL/L	5 - 15 mL/L
SurTec 701 Purificador	Se necessário	0 - 4 mL/L
Temperatura	26 - 30 °C	22 - 40 ⁰ C
Densidade de Corrente Catódica	0,5 - 6 A/dm ²	
Eficiência Catódica	50 - 75 %	
Camada depositada	0,2 µm/minuto usando 1 A/dm ²	
Agitação (Recomendada)	Catódica 3 - 5 m/minutos	

2.1.1- Nota (1)

Tem-se ótimos resultados usando na seqüência operacional, imediatamente antes do banho de zinco, uma neutralização alcalina com soda cáustica de 5 a 10 %, e **SurTec 704 Condicionador** de 5 a 10 mL/L. Esta neutralização tem aplicação por simples imersão, porém em linhas onde não é usado um desengraxante eletrolítico, esta neutralização proporciona melhores resultados se for usada eletrolítica e anódica.

2.1.2- Preparação do banho a partir de Óxido de Zinco

- 1- Fazer uma mistura com a soda cáustica e o óxido de zinco e adicionar aproximadamente 20 % do volume do tanque com água desmineralizada.
- 2- Agitar vigorosamente até dissolução dos produtos. Cuidado, neste ponto a solução fica muito quente, reação exotérmica.

