

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CEZAR AUGUSTO NIMBERG ANDERLE
FERNANDO MASSARU IIDA

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE REVENIDO NA RESISTÊNCIA À
CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

CEZAR AUGUSTO NIMBERG ANDERLE

FERNANDO MASSARU IIDA

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE REVENIDO NA RESISTÊNCIA À
CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Paulo César Borges, Dr.

Coorientador: Prof. Carlos Marcus Gomes da Silva Cruz, Dr.

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Efeito dos Parâmetros de Revenido na Resistência à Corrosão Do Aço Inoxidável AISI 420”, realizada pelos alunos Cezar Augusto Nimberg Anderle e Fernando Massaru Iida, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Paulo Cesar Borges
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Carlos Marcus Gomes da Silva Cruz
DAQBI, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. João Batista Floriano
DAQBI, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 13 de Agosto de 2013.

RESUMO

Uma melhora nas propriedades mecânicas de aços inoxidáveis martensíticos pode ser obtida através dos tratamentos de têmpera e revenido. Os aços inoxidáveis martensíticos temperados são, em geral, mais resistentes à corrosão que para outros tratamentos térmicos. O tratamento de revenimento apesar de causar uma diminuição na dureza, também causa precipitação de carbonetos ricos em cromo, o que pode diminuir a resistência à corrosão desses aços. Este trabalho consistiu na avaliação da resistência à corrosão do aço AISI 420 em condições diferentes de temperatura e tempo de revenido. Este aço tem aplicação na indústria de ferramental cirúrgico, petrolífera, petroquímica e química, em condições restritas. O conhecimento dos efeitos dos parâmetros de revenido na resistência à corrosão, para o dado material, facilita a seleção, bem como direciona o uso do mesmo, segundo seu desempenho. O meio eletrolítico selecionado foi o NaCl ($0,5 \text{ mol.dm}^{-3}$). A metodologia utilizada consistiu em avaliar amostras submetidas à condição de têmpera ao ar (1000°C ; 20 minutos) e posterior revenimento (300°C , 450°C e 600°C ; 1 hora, 2 horas e 3 horas). Os parâmetros de revenimento foram obtidos através do levantamento das curvas de revenido (temperatura versus dureza do material). Após os tratamentos térmicos, foram realizados os ensaios eletroquímicos para cada amostra. Como esses não foram suficientes para comparar as resistências à corrosão, as regiões corroídas foram quantificadas através da utilização de um rugosímetro. Os resultados mostraram que o tempo e a temperatura foram significativos para as resistências à corrosão e dureza. A maior dureza encontrada foi para a amostra temperada, porém sem grandes perdas de dureza para alguns tempos de revenimento. Quanto maiores a temperatura de revenido, maiores os percentuais de áreas corroídas, assim como sua profundidade. Em se tratando de área corroída, a amostra temperada e as amostras tratadas em baixa temperatura e baixo tempo apresentaram comportamento semelhante, com menor percentual de área corroída. Para o caso de corrosão localizada, a temperatura e tempo de revenimento que apresentaram o melhor comportamento foi de 300°C durante 3 horas, com área corroída percentualmente maior do que para baixos tempos, porém com profundidade inferior.

Palavras chave: Revenimento, precipitação de carbonetos, aços inoxidáveis martensíticos, corrosão por pites, difusão de carbonetos.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Efeito da difusão do carbono na estrutura..... | 24 |
| Figura 2 – Influência da temperatura de revenimento na corrosão dos aços inoxidáveis martensíticos para diferentes temperaturas de revenimento | 25 |
| Figura 3 – Efeito da temperatura de têmpera na dureza de aços inoxidáveis martensíticos forjados | 27 |
| Figura 4 – Efeito da temperatura de revenido (1h) nas propriedades do aço AISI 420(0,22% C), aço inoxidável martensítico. Teste de corrosão em solução 3% molar(0,5 mol.dm ⁻³) NaCl a 20°C. | 28 |
| Figura 5 – Efeito do tratamento de revenimento (tempo, temperatura) na velocidade de corrosão do aço ABNT 420 (resfriado em água, 980°C) em HNO ₃ , 10% molar, a 20°C..... | 29 |
| Figura 6 – Relação entre sensitização e o teor de carbono (efeito devido à precipitação de M ₂₃ C ₆). | 31 |
| Figura 7 – Uma curva de polarização anódica esquemática e idealizada para um metal passivável. Três diferentes regiões de potenciais são identificadas: a ativa, a passiva e a transpassiva. Quando a densidade de corrente atinge a densidade de corrente crítica para a passivação i_c , no potencial de passivação E_p , potencial acima do qual o sistema torna-se passivo e exibe uma densidade de corrente passiva muito baixa, i_p | 33 |
| Figura 8 – Mecanismo da corrosão por pite..... | 35 |
| Figura 9 – Curva de polarização da corrosão por pites | 36 |
| Figura 10 – Mecanismo da corrosão por fresta..... | 37 |
| Figura 11 – Curva de polarização anódica (i_a) e catódica (i_c) num diagrama logarítmico. E_e = potencial de equilíbrio; i_0 = densidade de corrente de troca..... | 39 |
| Figura 12 – Detalhe da região de formação do menisco, na interface entre as superfícies do eletrólito e do corpo de prova..... | 41 |
| Figura 13 – Diagrama de transformação em resfriamento contínuo para o aço inoxidável AISI 420. | 43 |
| Figura 14 – Potenciostato multicanais Iviun – n – Stat. | 46 |
| Figura 15 – Pressionadora de amostras e recipiente de vidro. Auxiliares na técnica do menisco..... | 46 |
| Figura 16 – Curvas de dureza para o aço AISI 420..... | 51 |
| Figura 17 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, temperado a 1000°C por 20 minutos. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 52 |
| Figura 18 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 300°C por 1 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 53 |
| Figura 19 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 300°C por 2 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 53 |
| Figura 20 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 300°C por 3 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 54 |
| Figura 21 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 450°C por 1 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 55 |
| Figura 22 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 450°C por 2 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 23 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 450°C por 3 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 56 |
| Figura 24 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 600°C por 1 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 56 |
| Figura 25 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 600°C por 2 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 57 |
| Figura 26 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 600°C por 3 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 57 |
| Figura 27 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 59 |
| Figura 28 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 60 |
| Figura 29 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 min, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 61 |
| Figura 30 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 62 |
| Figura 31 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 63 |
| Figura 32 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 64 |
| Figura 33 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 65 |
| Figura 34 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 66 |
| Figura 35 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 67 |
| Figura 36 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 68 |
| Figura 37 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 69 |
| Figura 38 – Metalografias de três regiões diferentes s (a), (b) e (c) da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 70 |
| Figura 39 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 71 |
| Figura 40 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 72 |
| Figura 41 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 73 |
| Figura 42 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 74 |

| | |
|---|----|
| Figura 43 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 75 |
| Figura 44 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 76 |
| Figura 45 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 77 |
| Figura 46 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 78 |
| Figura 47 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 79 |
| Figura 48 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 80 |
| Figura 49 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 81 |
| Figura 50 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 82 |
| Figura 51 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 83 |
| Figura 52 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 84 |
| Figura 53 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 85 |
| Figura 54 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 86 |
| Figura 55 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 87 |
| Figura 56 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 88 |
| Figura 57 – Gráfico comparativo dos percentuais de regiões corroídas para o aço AISI 420, ensaiado eletroquimicamente em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , em diferentes parâmetros de revenido, cuja profundidade é maior do que 0 µm. | 90 |
| Figura 58 – Gráfico comparativo dos percentuais de regiões corroídas para o aço AISI 420, ensaiado eletroquimicamente em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , em diferentes parâmetros de revenido, cuja profundidade é maior do que 5 µm. | 91 |
| Figura 59 – Gráfico comparativo dos percentuais de regiões corroídas para o aço AISI 420, ensaiado eletroquimicamente em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , em diferentes parâmetros de revenido, cuja profundidade é maior do que 10 µm. | 92 |
| Figura 60 – Gráficos comparativos das regiões corroídas com profundidades máximas e profundidades máximas médias encontradas para o aço AISI 420, ensaiado eletroquimicamente em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , em diferentes parâmetros de revenido. | 93 |

| | |
|---|-----|
| Figura 81 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 600°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 108 |
| Figura 82 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 600°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 108 |
| Figura 83 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 600°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 109 |
| Figura 84 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 600°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 109 |
| Figura 85 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 600°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 110 |
| Figura 86 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 600°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 110 |
| Figura 87 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 600°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 111 |
| Figura 88 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova Temperado após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 111 |
| Figura 89 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova Temperado após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 112 |
| Figura 90 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova Temperado após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 112 |
| Figura 91 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 113 |
| Figura 92 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 113 |
| Figura 93 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 114 |
| Figura 94 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 114 |
| Figura 95 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 115 |
| Figura 96 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 115 |
| Figura 97 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 116 |
| Figura 98 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 116 |
| Figura 99 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 117 |
| Figura 100 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 117 |

| | |
|--|-----|
| Figura 101 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 118 |
| Figura 102 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 118 |
| Figura 103 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 119 |
| Figura 104 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 119 |
| Figura 105 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 120 |
| Figura 106 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 120 |
| Figura 107 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 121 |
| Figura 108 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 121 |
| Figura 109 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 122 |
| Figura 110 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 122 |
| Figura 111 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 123 |
| Figura 112 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 123 |
| Figura 113 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 124 |
| Figura 114 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 124 |
| Figura 115 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 125 |
| Figura 116 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 125 |
| Figura 117 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 126 |
| Figura 118 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 126 |
| Figura 119 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 127 |
| Figura 120 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figura 121 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 128 |
| Figura 122 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 128 |
| Figura 123 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 129 |
| Figura 124 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 129 |
| Figura 125 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 130 |
| Figura 126 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 130 |
| Figura 127 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 131 |
| Figura 128 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 131 |
| Figura 129 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 132 |
| Figura 130 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 132 |
| Figura 131 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 133 |
| Figura 132 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 133 |
| Figura 133 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 134 |
| Figura 134 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 134 |
| Figura 135 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 135 |
| Figura 136 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 135 |
| Figura 137 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 136 |
| Figura 138 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 136 |
| Figura 139 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 137 |
| Figura 140 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 137 |

| | |
|--|-----|
| Figura 161 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 148 |
| Figura 162 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 148 |
| Figura 163 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 149 |
| Figura 164 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 149 |
| Figura 165 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 150 |
| Figura 166 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 150 |
| Figura 167 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 151 |
| Figura 168 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 151 |
| Figura 169 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 152 |
| Figura 170 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 152 |
| Figura 171 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 153 |
| Figura 172 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 153 |
| Figura 173 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 154 |
| Figura 174 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 154 |
| Figura 175 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 155 |
| Figura 176 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 155 |
| Figura 177 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 156 |
| Figura 178 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 156 |
| Figura 179 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 157 |
| Figura 180 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 157 |

| | |
|--|-----|
| Figura 181 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 158 |
| Figura 182 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 158 |
| Figura 183 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 159 |
| Figura 184 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 159 |
| Figura 185 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 160 |
| Figura 186 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 160 |
| Figura 187 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 161 |
| Figura 188 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 161 |
| Figura 189 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 162 |
| Figura 190 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ | 162 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Parâmetros de têmpera e revenido para o aço AISI 420..... | 23 |
| Tabela 2 – Parâmetros de têmpera e revenido de alguns aços inoxidáveis para cada faixa de durezas. | 26 |
| Tabela 3 – Composição química média do aço AISI 420. | 42 |
| Tabela 4 – Composição química média das amostras. | 42 |
| Tabela 5 – Ensaio sob diferentes parâmetros de revenimento para as amostras do aço AISI 420. | 44 |
| Tabela 6 – Valores de dureza para o aço AISI 420 sob diferentes parâmetros de revenimento. | 50 |
| Tabela 7 - Potenciais de corrosão (E _{corr}) obtidos nos ensaios..... | 58 |
| Tabela 8 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 min, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 61 |
| Tabela 9 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 300°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 64 |
| Tabela 10 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 300°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 67 |
| Tabela 11 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 300°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 70 |
| Tabela 12 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 450°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 73 |
| Tabela 13 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 450°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 76 |
| Tabela 14 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 450°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 79 |
| Tabela 15 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 600°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 82 |
| Tabela 16 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 600°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 85 |
| Tabela 17 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 600°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 88 |
| Tabela 18 – Compilação dos dados topográficos das amostras do aço AISI 420 para todos os parâmetros de revenimento analisados, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm ³ , obtidos pelo analisador de superfície. | 89 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASM – American Society for Metals

AISI – American Iron and Steel Institute

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 | Contexto do Tema | 19 |
| 1.2 | Caracterização do Problema | 19 |
| 1.3 | Objetivos | 20 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 20 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 20 |
| 1.4 | Justificativa | 20 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 | Tratamentos térmicos | 21 |
| 2.1.1 | Têmpera | 21 |
| 2.1.2 | Revenido | 22 |
| 2.2 | Aços Inoxidáveis | 23 |
| 2.2.1 | Aços inoxidáveis martensíticos | 23 |
| 2.2.2 | Efeito da têmpera nos aços inoxidáveis martensíticos | 25 |
| 2.2.3 | Efeito do revenimento nos aços inoxidáveis martensíticos | 27 |
| 2.2.4 | Efeitos da solidificação nos aços inoxidáveis martensíticos | 29 |
| 2.3 | Corrosão | 32 |
| 2.3.1 | Corrosão por pites | 34 |
| 2.3.2 | Corrosão por frestas | 36 |
| 2.4 | Cinética das reações eletroquímicas | 37 |
| 2.4.1 | Polarização por ativação | 37 |
| 2.4.2 | Polarização por concentração e de resistência | 39 |
| 2.4.3 | Potencial e velocidade de corrosão devido à polarização | 40 |
| 2.4.4 | Técnica do menisco | 40 |
| 3 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 42 |
| 3.1 | Material Estudado | 42 |
| 3.2 | Tratamento térmico | 43 |
| 3.3 | Curvas de dureza | 45 |
| 3.4 | Preparação das amostras | 45 |
| 3.4.1 | Ensaio Eletroquímico | 45 |
| 3.4.2 | Análise superficial | 47 |
| 3.5 | Justificativa dos Procedimentos Metodológicos | 47 |
| 3.5.1 | Tratamento térmico | 47 |
| 3.5.2 | Ensaio eletroquímico | 47 |
| 3.5.3 | Análises superficiais | 47 |
| 4 | RESULTADOS | 49 |
| 4.1 | Medições de dureza | 49 |
| 4.2 | Análises eletroquímicas | 51 |
| 4.3 | Análises superficiais | 58 |
| 5 | CONCLUSÕES | 94 |
| 5.1 | Efeito do revenimento na dureza | 94 |
| 5.2 | Efeito do revenimento na resistência à corrosão | 94 |
| 5.3 | Efeito da temperatura de revenimento na dureza | 94 |
| 5.4 | Efeito da temperatura de revenimento na resistência à corrosão | 94 |
| 5.5 | Efeito do tempo de revenimento na dureza | 94 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| 5.6 | Efeito do tempo de revenimento na resistência à corrosão | 95 |
| 5.7 | Sugestões para trabalhos futuros | 95 |
| REFERÊNCIAS | | 96 |
| ANEXOS | | 98 |
| | METALOGRAFIAS | 98 |
| | IMAGENS OBTIDAS NO RUGOSÍMETRO | 113 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

Os aços inoxidáveis martensíticos possuem, atualmente, uma vasta gama de aplicações, principalmente devido as suas duas mais importantes características: razoável resistência à corrosão e elevada resistência mecânica. Mais especificamente, o aço AISI 420, o qual tem grande aplicação em instrumentos cirúrgicos, peças de bombas, válvulas e uma aplicação restrita, segundo NACE (2006), nas áreas petrolíferas e petroquímicas. Esses aços têm um bom comportamento em meios pouco agressivos.

Um ponto negativo desses aços é que, mesmo sendo resistentes à corrosão generalizada, são susceptíveis à corrosão localizada, como por pites. Esse ponto negativo pode ser criticamente aumentado quando sujeitos a certos tratamentos térmicos, ocorrendo precipitação de carbonetos de cromo, o que determina maior susceptibilidade à corrosão localizada. No caso dos aços inoxidáveis martensíticos, este cuidado deve ser maior para evitar essa precipitação, pois possuem menores teores de cromo.

1.2 Caracterização do Problema

O aço inoxidável martensítico a ser estudado, AISI 420, quando sujeito ao tratamento de revenido, possui uma faixa de temperatura, dentro da qual, espera-se que ocorra uma brusca queda da resistência à corrosão (ASM HANDBOOK, 2008)

Conhecendo o ganho em dureza obtido para cada parâmetro do tratamento analisado e os efeitos causados na resistência à corrosão por pites dos mesmos parâmetros facilita-se a seleção do material e do tratamento, de acordo com o meio a ser empregado.

O estudo dos efeitos provocados em meios aquosos com cloreto é de importante conhecimento, visto facilitarem a corrosão localizada, ocorrendo comumente em meios marítimos.

Conhecendo os efeitos corrosivos de cada meio eletrolítico contendo cloretos sobre o metal, é possível prever formas, mecanismos de corrosão e o tempo de vida

útil do material no meio. Assim, mais parâmetros são obtidos para a seleção do material a ser empregado, visando o melhor desempenho dos mesmos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos dos parâmetros de revenido na resistência à corrosão em meio NaCl ($0,5 \text{ mol.dm}^{-3}$) no do aço inoxidável AISI 420.

1.3.2 Objetivos Específicos

De modo a atingir o objetivo principal, têm-se como objetivos específicos avaliar o efeito da temperatura e do tempo de revenido:

- a) Na dureza;
- b) Na resistência à corrosão por pites.

1.4 Justificativa

Segundo ASM HANDBOOK (2008), a têmpera e o revenido, devidamente aplicados aos aços inoxidáveis martensíticos, trazem diversas melhorias nas propriedades mecânicas dos mesmos. No entanto, para os mesmos aços, pode ocorrer, para determinada faixa de temperaturas do revenimento, além de fragilização do material, uma perda considerável na resistência à corrosão. Para tanto, faz-se necessário estudar os efeitos de certas faixas de temperatura para determinadas aplicações.

Além disso, ao conhecer a ação de um meio corrosivo sobre um determinado material, é possível prever formas, mecanismos de corrosão e o tempo de vida útil do mesmo.

Estudar os tratamentos térmicos, bem como os meios em que serão empregados esses materiais é de grande importância, visto seu vasto emprego tecnológico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tratamentos térmicos

Segundo CHIAVERINI (1988), tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, em condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas.

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são remoção de tensões internas, aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhora da ductilidade, melhora da usinabilidade, melhora da resistência ao desgaste, melhora da resistência à corrosão, melhora da resistência ao calor e melhora das propriedades elétricas e magnéticas (CHIAVERINI, 1988).

Segundo ASM HANDBOOK (2008), os tratamentos térmicos usuais utilizados nos aços e ligas metálicas são o recozimento, a normalização, a têmpera e o revenido, o coalescimento, a austêmpera e a martêmpera.

Para os aços inoxidáveis é comum utilizar os tratamentos térmicos para melhorar a resistência à corrosão e suas propriedades mecânicas, por vezes obtidas no mesmo tratamento, ou minimizadas em detrimento de outras características.

Para o presente trabalho, serão enfocados os tratamentos de têmpera e revenido.

2.1.1 Têmpera

A têmpera consiste no resfriamento rápido de um aço, de uma temperatura superior à sua crítica, em um meio como óleo, água, salmoura ou ar (CHIAVERINI, 1988).

Assim, como objetivo final da têmpera, espera-se a obtenção da estrutura martensítica, a qual promove uma maior resistência à tração do aço e de sua dureza, pois a martensita é o constituinte mais duro e frágil dos aços (CHIAVERINI, 1988).

Os aços inoxidáveis martensíticos geralmente são austenitizados entre 950°C à 1200°C, acima da temperatura inicial da transformação austenítica.

2.1.2 Revenido

O tratamento de revenido é realizado após a obtenção da estrutura martensítica, oriunda da têmpera, e tem por objetivo aumentar a tenacidade e ductilidade do aço. A transformação martensítica ocorre para determinadas temperaturas, estas atreladas a composição do material.

Segundo ASM HANDBOOK (2008), os tratamentos térmicos dos aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente os mesmos que para os aços-carbono simples ou de baixa liga, em que a máxima resistência e dureza dependem principalmente do teor de carbono. Os aços inoxidáveis martensíticos são mais sensíveis aos tratamentos térmicos do que os aços carbono e de baixa liga e as taxas de rejeição devido a falhas no tratamento térmico são correspondentemente elevadas.

Temperaturas de revenimento entre 450 e 600°C podem prejudicar tanto a resistência ao impacto como a resistência à corrosão. Esse fato pode ser atribuído à precipitação de carbonetos após o resfriamento à temperatura ambiente e o mecanismo envolvido é semelhante ao da sensitização, que ocorre nos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos (MARIANO e MUROLO, 2006).

Em se tratando da resistência à corrosão, um revenimento à temperatura entre 370°C e 650°C deve ser evitado, pois resulta na precipitação de carbonetos ricos em cromo, diminuindo aquela, como mostrado na Figura 2. Abaixo de 370°C não há um decréscimo significativo na resistência à corrosão, pois os carbonetos precipitados são essencialmente de ferro. Acima da temperatura de 650°C também não há um significativo decréscimo na resistência à corrosão, pois, apesar de ocorrer à precipitação de carbonetos ricos em cromo, a difusão de cromo ocorre em uma velocidade suficientemente rápida homogeneizando o teor de cromo na liga, eliminando precipitados e zonas de depleção de cromo adjacentes aos precipitados. O efeito da temperatura de revenido é mais significativo em ligas com maiores teores de carbono e menores teores de cromo e o tempo também é outra variante do processo (PANOSSIAN, 1993).

Em STEEL HEAT TREATMENT HANDBOOK (2007), o autor recomenda evitar, em geral, uma temperatura de revenido entre 420 e 600°C devido à fragilização do material. Especificamente para os aços estudados, a GERDAU recomenda evitar a faixa entre 425 e 525°C para a liga estudada.

Em “Aços e Ferros Fundidos” (CHIAVERINI, 1988), o autor recomenda uma temperatura de têmpera entre 975 e 1050°C por 15 a 30 minutos e temperatura de revenido entre 150 e 375°C por 1 a 3 horas, para o aço AISI 420. Estes parâmetros recomendados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de têmpera e revenido para o aço AISI 420

| Tipo AISI | Têmpera | | | Revenido | | Dureza [Brinell] |
|-----------|------------------|--------------|----------------------|------------------|-----------|------------------|
| | Temperatura [°C] | Tempo [min.] | Meio de Resfriamento | Temperatura [°C] | Tempo [h] | |
| 420 | 975 | 15 | Ar | 150 | 1 | 470 |
| | 1050 | 30 | Óleo Quente | 375 | 2 | 530 |

Fonte: Adaptado CHIAVERINI, 1988, p.383.

2.2 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis se diferenciam dos aços comuns pelo seu desempenho superior na grande maioria dos meios corrosivos. Tal capacidade deve-se ao fato de que, na presença de oxidantes, normalmente o oxigênio, ocorre a formação de uma fina camada protetora na sua superfície, fenômeno conhecido por passivação (PANOSSIAN, 1993). O cromo é o principal elemento de liga nesses aços, pois quanto maior o seu teor, maior a estabilidade da camada passiva. Essa camada somente age como passivante quando o teor de cromo é igual ou superior a 12%.

2.2.1 Aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos se diferenciam dos demais aços inoxidáveis por possuírem teores de cromo mais baixos e teores de carbono mais elevados. Segundo PANOSSIAN (1993), dentre os aços inoxidáveis, os martensíticos são aqueles que apresentam menor resistência à corrosão. Isto se deve ao fato de que os altos teores de carbono são prejudiciais à corrosão intergranular e os relativamente baixos teores de cromo fazem com que as camadas de passivação sejam menos estáveis. Segundo UHLIG (2000), por esses motivos, nos tratamentos térmicos, os ganhos nas propriedades mecânicas desses aços em detrimento da resistência à corrosão dos mesmos são mais relevantes.

De fato, estes aços, devido ao seu teor de carbono elevado, são os mais susceptíveis ao endurecimento por tratamento térmico. No entanto, essa melhora nas propriedades mecânicas pode piorar sensivelmente sua resistência à corrosão.

Uma vez que a probabilidade do teor de cromo atingir valores abaixo de 12% nas vizinhanças dos precipitados ricos em cromo é muito elevada, tornam-se necessários cuidados especiais nos tratamentos térmicos, visto a possibilidade de precipitação de carbonetos (PANOSSIAN, 1993). Essa situação se verifica na Figura 1, a qual compara os percentuais de cromo distribuídos na liga em condição de homogeneização, na liga criticamente sensibilizada, e na liga em condição de sensibilização. A última é uma condição aliviada pelos longos tempos de tratamento, difundindo o cromo para as regiões empobrecidas do mesmo, amenizando situações que favorecem a corrosão localizada.

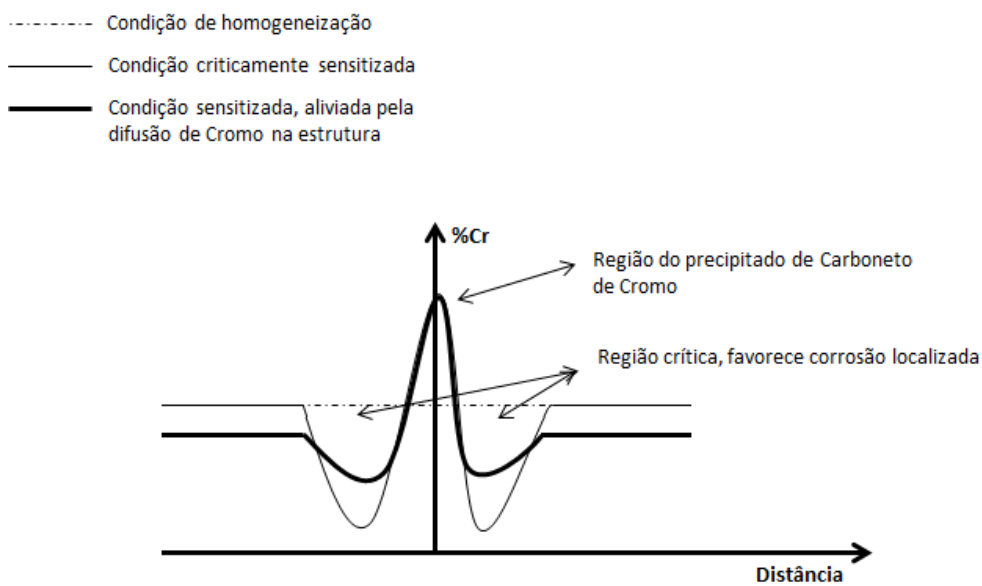


Figura 1 – Efeito da difusão do carbono na estrutura.

A Figura 2 mostra a influência da temperatura do tratamento térmico selecionada na corrosão generalizada dos mesmos aços inoxidáveis martensíticos. Para um revenimento a 370°C, por exemplo, obtêm-se boas melhoras nas propriedades mecânicas, sem perder sensivelmente sua resistência à corrosão.

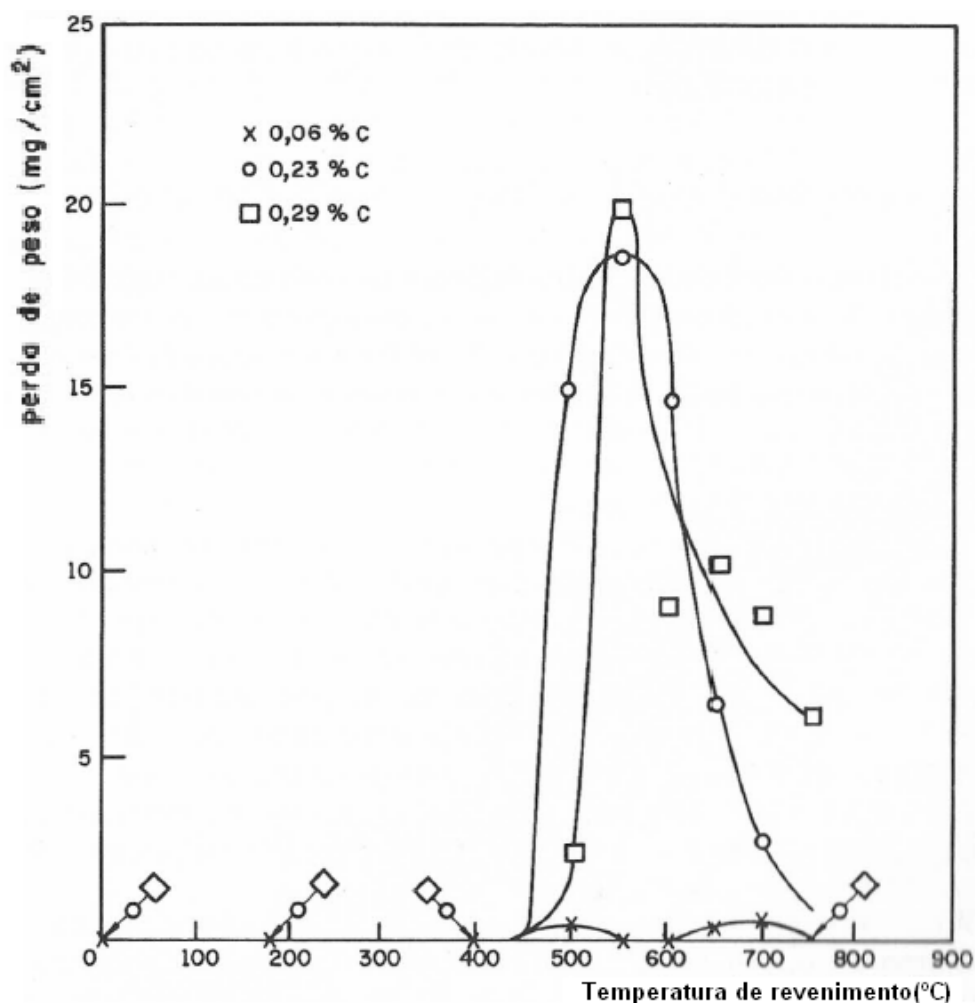


Figura 2 – Influência da temperatura de revenimento na corrosão dos aços inoxidáveis martensíticos para diferentes temperaturas de revenimento

Fonte: PANOSSIAN, 1993, p.402

O aço martensítico estudado, AISI 420, é comumente usado em válvulas, bombas, tubos de aquecimento, cutelaria, eixos de acionamento, maquinaria de mineração, componentes construtivos de hidrelétricas, instalações de craqueamento, instrumentações cirúrgicas e dentárias, engrenagens, válvulas, palhetas de turbina, entre outros. De acordo com a norma ISO 15156-3, esse aço, em condições restritas, pode ser aplicado na exploração petrolífera (NACE, 2006).

2.2.2 Efeito da têmpera nos aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos, tratados termicamente, que apresentam maior resistência à corrosão são os temperados. Isto, pois, segundo PANOSSIAN

(1993), os carbonetos que precipitam, na grande maioria, são os de ferro, Fe_3C , e não os de cromo, $Cr_{23}C_6$, assim permanecendo o cromo na estrutura.

As temperaturas recomendadas para têmpera estão na faixa de 980°C a 1065°C para o aço AISI 420, conforme Tabela 2. Nesta faixa de temperaturas obtêm-se os maiores ganhos de dureza, conforme a Figura 3.

Mesmo para as elevadas temperaturas de têmpera, ocorre precipitação de carbonetos ricos em cromo. No entanto, a velocidade de difusão do cromo é bastante elevada nesta faixa de temperaturas. Se, por um lado ocorre um ganho em algumas propriedades mecânicas do material, por outro ocorre uma perda na resistência à corrosão, porém não a compromete significativamente. A rápida difusão do cromo o redistribui e homogeneíza seu teor por toda a liga, assim evitando que as vizinhanças dos contornos dos precipitados fiquem empobrecidas de cromo, situação identificada na Figura 1.

Vale lembrar que essa perda de resistência à corrosão ocorre devido ao abaixamento do teor efetivo de cromo na liga e quanto maior o teor de carbono e menor o de cromo, mais significativa ela será.

Tabela 2 – Parâmetros de têmpera e revenido de alguns aços inoxidáveis para cada faixa de durezas.

| Tipo | Têmpera | | Meio | Temperatura de Revenido | | | | Limite de Resistência a Tração | | Dureza HRC |
|------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------|------------|------------|------------|--------------------------------|----------------|--------------|
| | Temperatura | | | °C | | F | | MPa | ksi | |
| | °C | °F | | min. | máx. | min. | máx. | | | |
| 403, 410 | 925-1010 | 1700-1850 | Ar ou óleo | 565 | 605 | 1050 | 1125 | 760-965 | 110-140 | 25-31 |
| | | | | 205 | 370 | 400 | 700 | 1105-1515 | 160-220 | 38-47 |
| 414 | 925-1050 | 1700-1925 | Ar ou óleo | 595 | 650 | 1100 | 1200 | 760-965 | 110-140 | 25-31 |
| | | | | 230 | 370 | 450 | 700 | 1105-1515 | 160-220 | 38-49 |
| 416, 416Se | 925-1010 | 1700-1850 | Óleo | 565 | 605 | 1050 | 1125 | 760-965 | 110-140 | 25-31 |
| | | | | 230 | 370 | 450 | 700 | 1105-1515 | 160-220 | 35-45 |
| 420 | 980-1065 | 1800-1950 | Ar ou óleo | 205 | 370 | 400 | 700 | 1550-1930 | 225-280 | 48-56 |

Fonte: Adaptado ASM HANDBOOK, 2008, pag.1724.

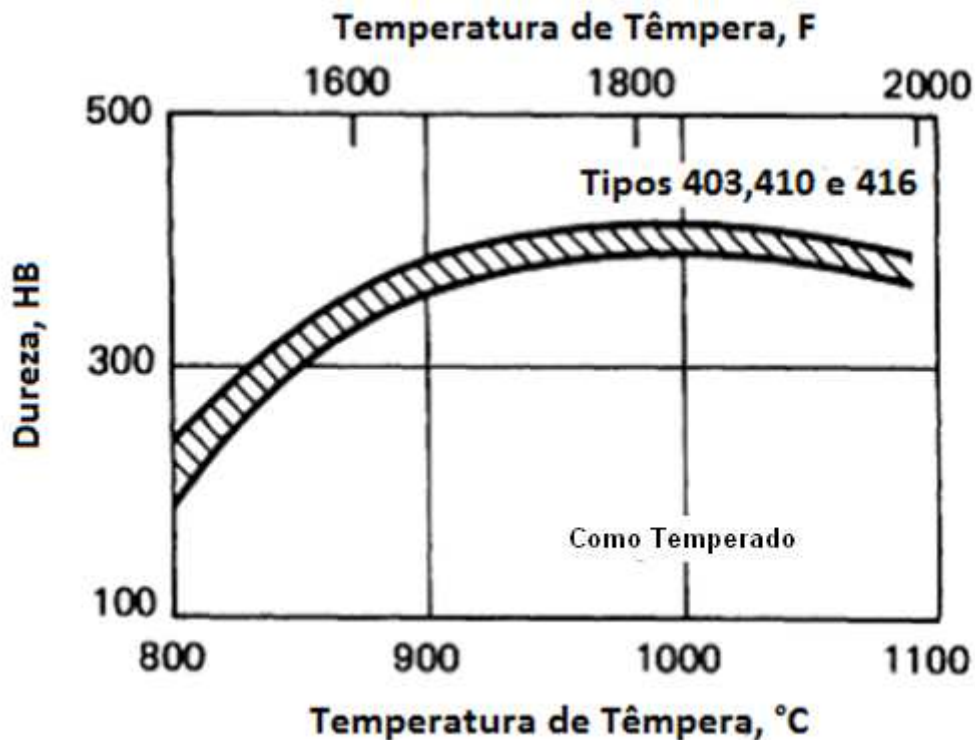


Figura 3 – Efeito da temperatura de têmpera na dureza de aços inoxidáveis martensíticos forjados
 Fonte: ASM HANDBOOK, 2008, p.1714.

2.2.3 Efeito do revenimento nos aços inoxidáveis martensíticos

De todos os tratamentos térmicos para os aços inoxidáveis martensíticos o revenimento é o que deve ser dada maior atenção quanto à perda da resistência à corrosão. Sua faixa de temperatura engloba temperaturas críticas, as quais, em tempos determinados, precipitam carbonetos ricos em cromo, aumentando a probabilidade de corrosão intergranular. Em geral, conforme a Figura 4, abaixo de 370°C o revenimento pode ser executado sem uma perda sensível na resistência à corrosão, pois, como as temperaturas são baixas, a grande maioria dos carbonetos precipitados é de ferro, cementita (Fe_3C).

Por outro lado, para uma faixa em torno de 370°C até 650°C, os carbonetos que precipitam são de cromo, empobrecendo desse elemento algumas regiões do contorno dos precipitados. Conforme a Figura 4, o revenimento nessa faixa de temperaturas deve ser evitado, pois há um decréscimo sensível na resistência à corrosão, principalmente quanto maior o teor de carbono, Figura 2.

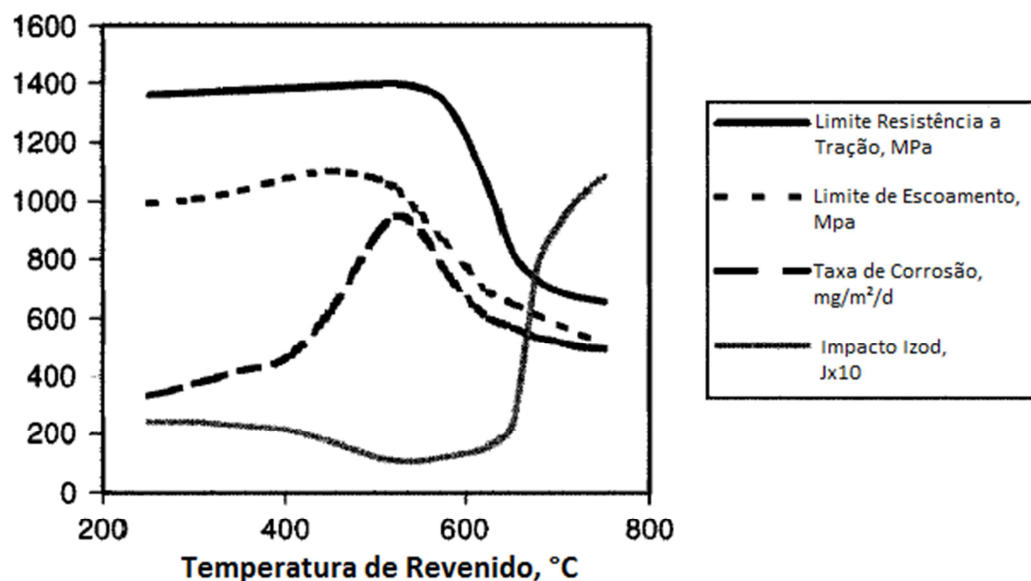


Figura 4 – Efeito da temperatura de revenido (1h) nas propriedades do aço AISI 420(0,22% C), aço inoxidável martensítico. Teste de corrosão em solução 3% molar(0,5 mol.dm⁻³) NaCl a 20°C.
 Fonte: UHLIG, 2000,pag.670

A fim de minimizar essa diminuição considerável na resistência à corrosão para o revenimento realizado dentro da faixa de temperaturas críticas, o tempo do tratamento deve ser considerado. Segundo PANOSSIAN (1993), para uma dada temperatura de tratamento térmico, existe uma faixa de tempo na qual a taxa de precipitação de carbonetos de cromo aumenta com o aumento do tempo até um valor crítico. Após, existe uma faixa de tempo na qual ocorre o mecanismo de difusão do cromo adjacente às regiões de depleção de cromo, localizadas ao redor dos precipitados de carboneto de cromo. Esse mecanismo difunde o cromo em direção às regiões empobrecidas do mesmo, próximas aos carbonetos de cromo precipitados, homogeneizando a concentração de cromo na estrutura, assim minimizando os efeitos da corrosão localizada. Para tanto, é necessário controlar esse tempo para esse mecanismo ocorrer, conforme a Figura 5, na qual, para o meio HNO₃, existe uma faixa crítica de tempo para cada temperatura. Nessa Figura verifica-se que as taxas de corrosão se elevam rapidamente ao se aproximarem de um tempo crítico e, ao passar por ele, decrescem.

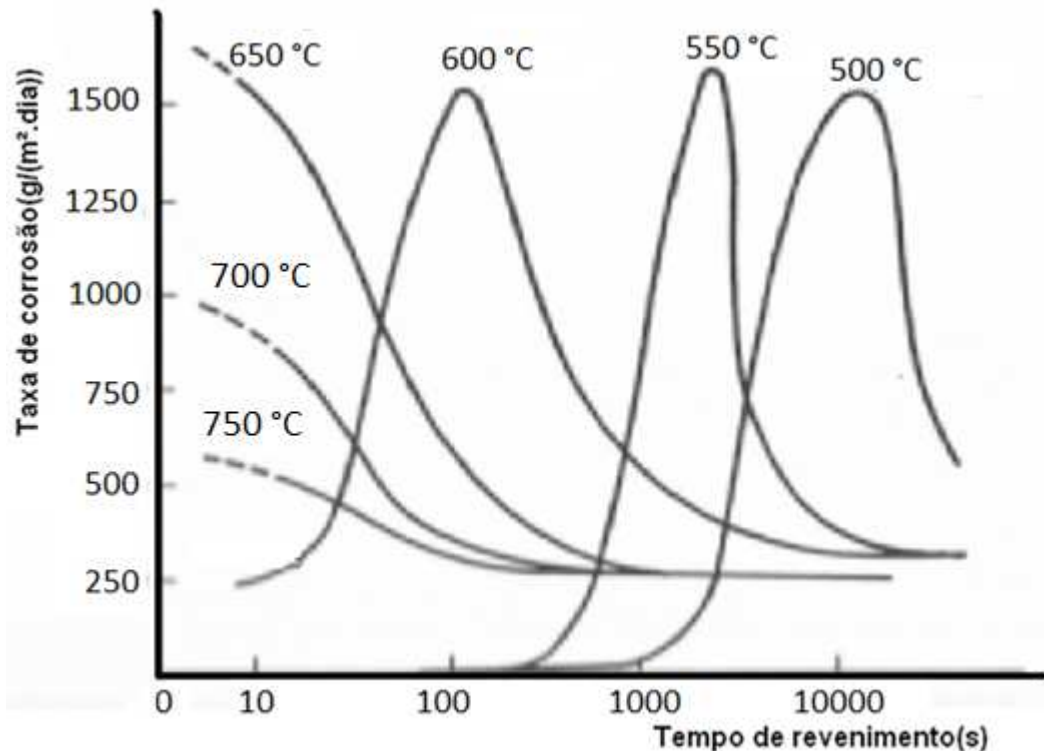


Figura 5 – Efeito do tratamento de revenimento (tempo, temperatura) na velocidade de corrosão do aço ABNT 420 (resfriado em água, 980°C) em HNO₃, 10% molar, a 20°C.
 Fonte: PANOSSIAN, 1993, pag. 403

2.2.4 Efeitos da solidificação nos aços inoxidáveis martensíticos

Segundo PADILHA (1994), o efeito do carbono nos aços tipo Fe-Cr-Ni, quando em solução sólida, seria de contribuir fortemente para a estabilidade da estrutura austenítica, de forma semelhante ao nitrogênio. Entretanto, teores crescentes de carbono irão saturar a austenita em carbono e, para valores superiores ao da solubilidade da austenita, irão provocar a retirada de cromo, assim precipitando carbonetos. Em ligas que apresentam teores de carbono mais elevados, ou que são submetidas a baixas velocidades de resfriamento durante a solidificação, pode ocorrer a formação de redes de carbonetos.

Para o caso do aço AISI 420, no estado recozido, este aço apresenta microestrutura ferrítica, não possuindo boa resistência à corrosão atmosférica. Isso se deve ao processo de recozimento que é realizado a uma temperatura próxima aos 760°C, temperatura na qual o carbono e o cromo, presentes no aço, se combinam para formar carboneto de cromo, Cr₂₃C₆, que precipita. Esse composto químico precipitado (Cr₂₃C₆) possui aproximadamente 95% de cromo em peso.

Como o aço AISI 420 apresenta teor elevado de carbono e baixo teor de cromo, quando comparado aos outros aços inoxidáveis, praticamente a metade do conteúdo de cromo do aço acaba sendo precipitado, e retirado da solução sólida. Nesta condição, o material não resiste à corrosão atmosférica, pois não há um mínimo de 10,5% de Cr em solução sólida. Dessa forma, o aço inoxidável AISI 420 – e todos os martensíticos – tem que sofrer a operação da têmpera, que transforma a Ferrita em austenita, solubilizando os carbonetos, e essa última, durante o resfriamento rápido, se transforma em martensita. No estado temperado, o carbono está dissolvido na martensita. Assim, somente depois de austenitizados esses materiais passam a ser resistentes à corrosão, apresentando, também, elevada resistência mecânica (LIPPOLD, 2005, *apud* SCHEUER, 2011).

Dentre os carbonetos que precipitam na solidificação, estão os do tipo MC, $M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C ($M = Fe, Cr, Zr, Ti, Nb$ e V). As fases mais comuns, a serem enfocadas, são MC e $M_{23}C_6$, a primeira uma fase estável, a segunda, uma fase metaestável. A formação dos carbonetos do tipo MC é mais lenta. Segundo PADILHA (1994), elementos estabilizadores de carbonetos (Cr, Zr, Ti, Nb e V) auxiliam na proteção da concentração de cromo na estrutura. Porém, alguns elementos apresentam difusividades baixas, mostrando aspectos positivos e negativos, ao mesmo tempo. Se por um lado, contribuem para um coalescimento mais lento dos precipitados, por outro lado deve-se lembrar de que quanto menor a difusividade do estabilizador, mais favorecida fica a precipitação da fase metaestável $M_{23}C_6$, cineticamente favorecida, praticamente inevitável. Essa fase, metaestável, para longos tempos de envelhecimento, situação oriunda de altas temperaturas, dá lugar à fase estável MC. Abaixo de 900°C, precipita-se inicialmente, pelas razões cinéticas, o carboneto $M_{23}C_6$, fase indesejável por favorecer a corrosão intergranular.

O mecanismo de precipitação da fase metaestável, explicado por PADILHA (1994), ocorre em paralelo à formação das fases intermetálicas, comuns aos sistemas Fe-Ni-Cr-Mo, mais estáveis, χ , Laves e σ . O carbono é praticamente insolúvel nessas fases, principalmente em σ . Segundo MARTINS e BONAVINA (2003), a fase σ é a fase intermetálica mais investigada nos aços inoxidáveis e aços de alta liga, isto porque compromete a resistência à corrosão devido à retirada de cromo e molibdênio da matriz metálica. Por ser uma fase muito dura e frágil, compromete a tenacidade ao impacto. Essa fase possui uma estrutura cristalina

hexagonal, composta pela associação, $(Cr,Mo)_x(Ni,Fe)_y$ e com parâmetro de rede $a_0=8,828 \text{ \AA}$. A fase sigma é formada preferencialmente em temperaturas na faixa de 400°C a 600°C , e esse fenômeno é conhecido também como endurecimento a 475°C . Por isso, sua presença pode ser detectada e medida através do ensaio de dureza do material, onde quanto maior for a dureza, maior será a quantidade de fase sigma. Em princípio, as fases χ e Laves poderiam precipitar-se simultaneamente com o carboneto $M_{23}C_6$, mas, devido à difusão mais lenta dos seus elementos constituintes, elas precipitam-se após a precipitação do carboneto. Somente após o empobrecimento quase que completo do carbono da matriz é que ocorre a fase σ . A precipitação das fases intermetálicas mencionadas causa considerável empobrecimento de Cr e Mo na matriz. Como se sabe, a solubilidade do carbono na austenita aumenta com a diminuição dos teores de Mo e Cr, causando a dissolução do $M_{23}C_6$. O efeito da concentração de carbono da microestrutura na sensitização é demonstrado na Figura 6.

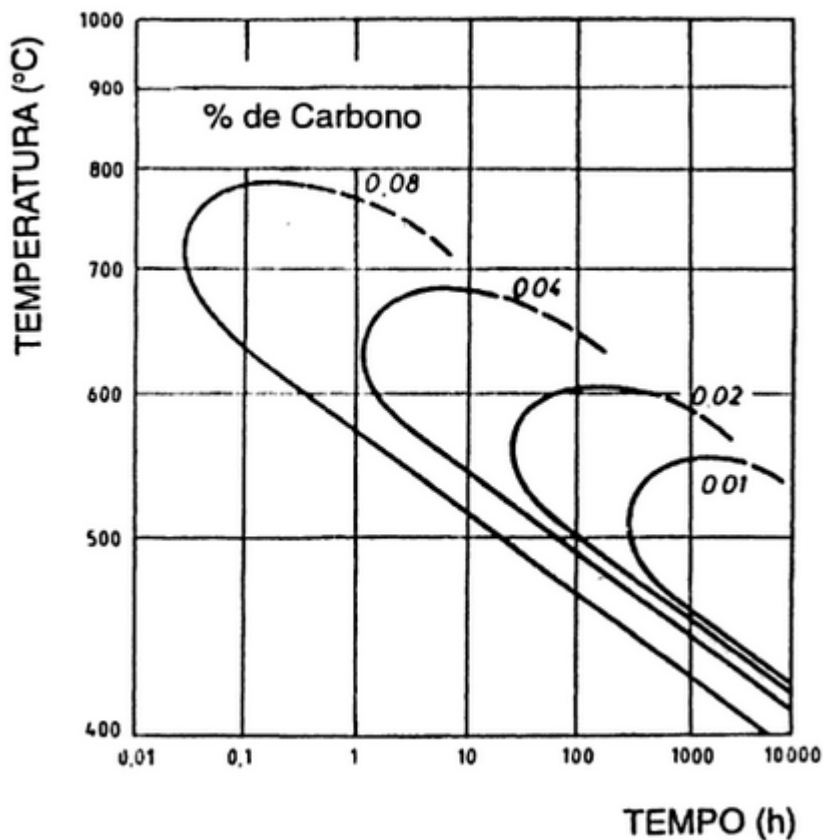


Figura 6 – Relação entre sensitização e o teor de carbono (efeito devido à precipitação de $M_{23}C_6$).

Fonte: ROCHA (1962, *apudi* PADILHA, 1994).

2.3 Corrosão

Em geral os materiais estão expostos à agressividade de um ambiente e, por isso, sujeitos à deterioração oriunda da corrosão. Segundo PANOSSIAN (1993), corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associado a esforços mecânicos. A corrosão pode incidir sobre diversos tipos de materiais, sejam metálicos como os aços e ligas de cobre, ou não metálicos, como plásticos, cerâmicos ou concreto. Ao se considerar o emprego de materiais na construção de equipamentos ou instalações é necessário que estes resistam à ação dos diferentes meios corrosivos, além de apresentarem propriedades mecânicas suficientemente boas e características de fabricação adequadas.

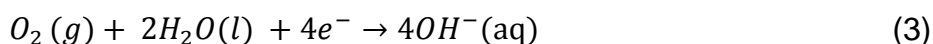
Dependendo do tipo de ação do meio corrosivo sobre o material, os processos corrosivos podem ser classificados em eletroquímicos e/ou químicos, abrangendo todos os casos de deterioração por corrosão.

Para o caso dos metais, o processo de corrosão normalmente é eletroquímico, isto é, uma reação química em que ocorre a transferência de elétrons de um material para outro. Neste processo existem as reações de oxidação, na qual o material cede elétrons, reação anódica, e a reação de redução, na qual outro material recebe esses elétrons, reação catódica (SHIH, 2012).

Para o caso dos metais, a reação de oxidação é a que ocorre, conforme a equação (1) uma reação anódica típica.



No caso da reação de redução, sua forma depende do ambiente em que o metal está exposto. Alguns exemplos de reações catódicas são as equações (2) e (3).



Em geral o processo corrosivo é nocivo ao material, porém essa afirmativa nem sempre é válida. Como exemplo, o alumínio, se polido e em contato com um meio oxidante (e.g. atmosfera) sofre uma reação, se transformando em óxido de alumínio, Al_2O_3 . Este óxido, também conhecido como alumina, é o responsável pela

interrupção do avanço corrosivo para o interior do metal, garantindo uma excelente durabilidade (PANOSSIAN, 1993).

No caso dos aços inoxidáveis o mecanismo é semelhante, formando uma fina camada de óxido de cromo, Cr_2O_3 . Essa camada de óxido de cromo adere à superfície do metal e age como passivante, reduzindo a liberação de íons para níveis muito baixos, portanto diminuindo consideravelmente a velocidade de corrosão. Uma curva de polarização potenciodinâmica típica para um metal passivável é representada pela Figura 7. Na região passiva, há uma alta resistividade elétrica, de modo que não há passagem de elétrons, assim a corrente não varia com o aumento de potencial. No entanto, caso o potencial atinja o valor do potencial de equilíbrio do oxigênio, a água é oxidada com formação de gás oxigênio (PANOSSIAN, 1993). Essa instabilidade na camada de óxido é representada pela região de transpassivação.

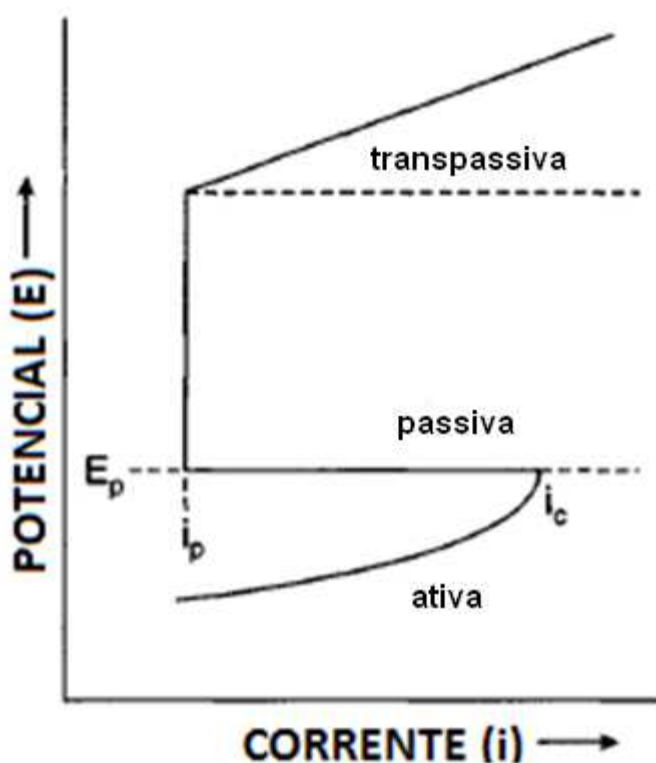


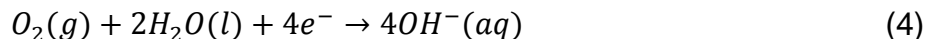
Figura 7 – Uma curva de polarização anódica esquemática e idealizada para um metal passivável. Três diferentes regiões de potenciais são identificadas: a ativa, a passiva e a transpassiva. Quando a densidade de corrente atinge a densidade de corrente crítica para a passivação i_c , no potencial de passivação E_p , potencial acima do qual o sistema torna-se passivo e exibe uma densidade de corrente passiva muito baixa, i_p .

Fonte: UHLIG, 2000, pag.312

2.3.1 Corrosão por pites

A corrosão por pites é um tipo de corrosão localizada e provoca cavidades na superfície do metal. As cavidades podem ser pequenas em diâmetro em relação à sua profundidade, levando equipamentos à falha sem ter uma perda significativa em massa. As corrosões por pite “são difíceis de ser mensuradas quantitativamente e de comparar a extensão do pite por causa das diversas profundidades e das diversas quantidades de pites que podem ocasionar em condições idênticas” (FONTANA, 1987).

A corrosão por pite ocorre quando a película passiva é dissolvida localmente na presença de agentes agressivos, geralmente o cloreto. No pite há a escassez de agentes catódicos o que resulta na reação catódica, como na equação (4), ocorrendo nas regiões fora dos pites. Com a reação de oxidação, como na equação (1), os pites ficam enriquecidos com cátion do metal e, conseqüentemente, com cloretos a fim de obter neutralidade. O mecanismo de corrosão por pite é mostrado esquematicamente na Figura 8.



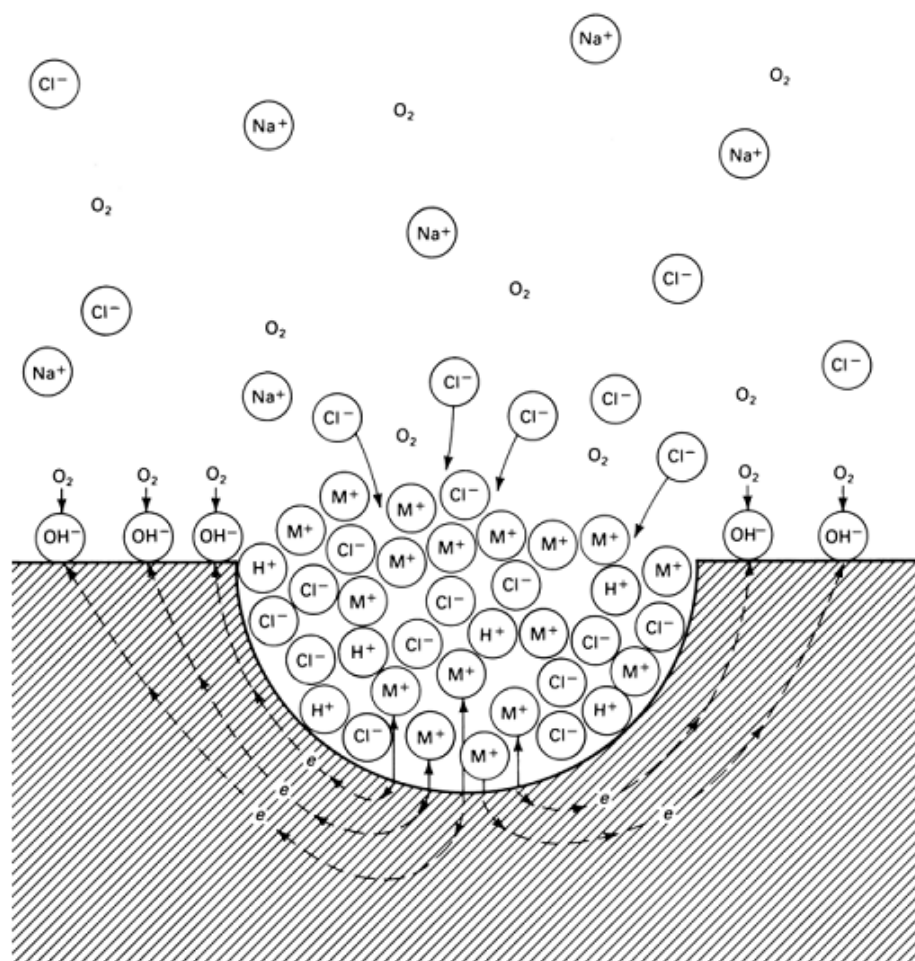


Figura 8 – Mecanismo da corrosão por pite

Fonte: ASM HANDBOOK, 2008, vol. 13, pag.592.

Esse processo resulta no aumento local do pH, aumentando a agressividade do meio e impedindo a repassivação do metal, permitindo que a corrosão por pite continue se propagando, assim se tornando um processo autocatalítico. Quando a concentração de íons dentro do pite alcança a saturação, a velocidade de corrosão é limitada pela velocidade da difusão dos íons para fora do pite.

A curva de polarização esquemática mostrada na Figura 9 apresenta o potencial crítico E_p , o potencial de repassivação E_r e o potencial de corrosão E_{corr} .

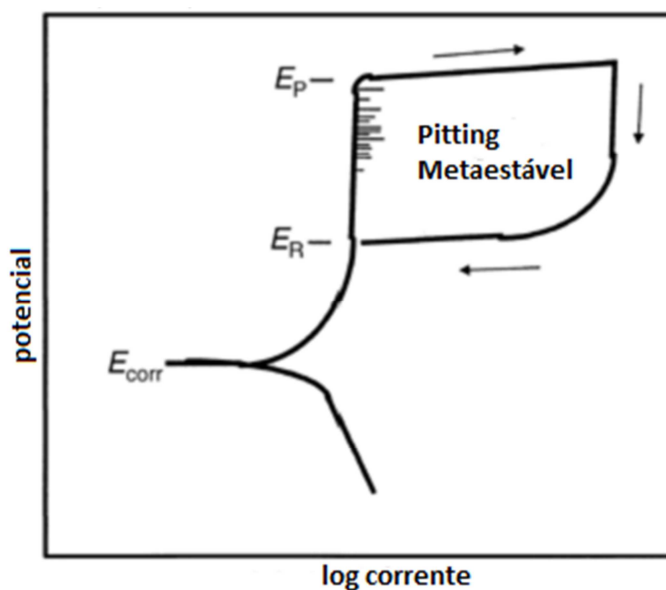


Figura 9 – Curva de polarização da corrosão por pites

Fonte: ASM HANDBOOK, 2008, vol.13, pag.593.

No potencial de corrosão, E_{corr} , o filme passivo está presente na superfície do metal. A partir do potencial crítico, E_p , há um intenso aumento da densidade de corrente, ocasionando os pites. O material irá se repassar somente com um potencial de repassivação, E_r . Quanto maior for a diferença entre E_p e E_{corr} menos susceptível será o material à corrosão por pites. Como parâmetro mais conservativo, a suscetibilidade pode ser medida com a diferença entre E_r e E_{corr} . Apesar de esses parâmetros serem simplistas e insuficientes para o entendimento do mecanismo da corrosão por pites, eles podem ser usados para comparação de vários materiais em certo meio ou da agressividade de vários meios em certo material. (ASM HANDBOOK, 2008).

2.3.2 Corrosão por frestas

A corrosão por frestas ocorre quando uma face úmida metálica está distante o suficiente de outra superfície para que o líquido entre e próximo o suficiente para manter uma zona estagnada. A separação da fresta pode ter entre 0,1 e 100 μ m (ASM HANDBOOK, 2008).

Inicialmente, reações de oxidação e de redução ocorrem uniformemente dentro e fora da fresta. Quando o oxigênio dentro da fresta é consumido pela redução do oxigênio, a reação redutora cessa, ocorrendo apenas a oxidação do metal. Resulta-se, então, em um aumento na concentração de íons metal e de cloretos dentro da

fresta. O aumento da redução do oxigênio nas superfícies adjacentes à fresta resulta em uma proteção catódica nessa região, concentrando a oxidação dentro da fresta. Esse mecanismo é mostrado esquematicamente na Figura 10.

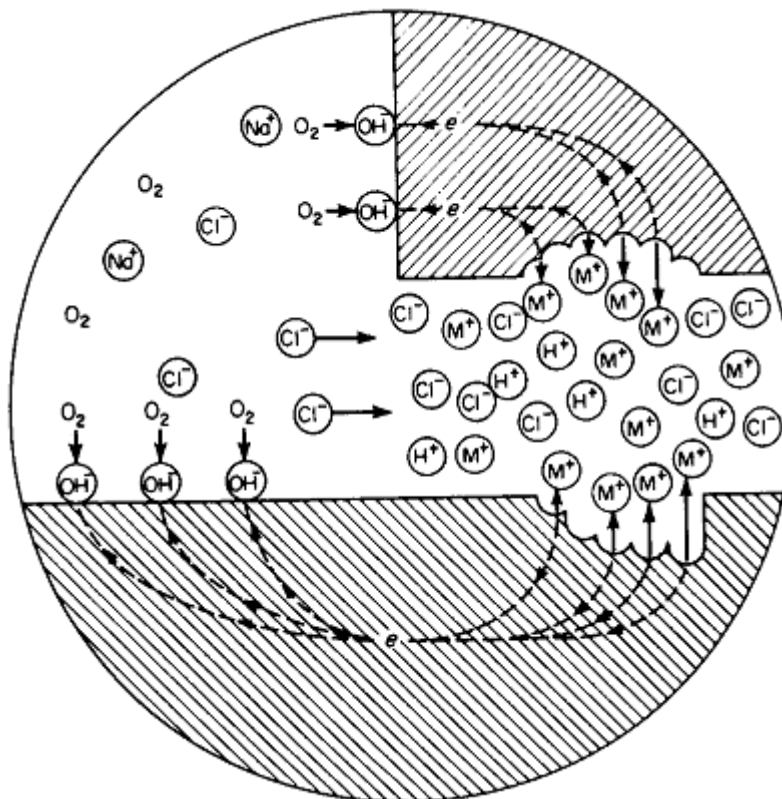


Figura 10 – Mecanismo da corrosão por fresta

Fonte: FONTANA, 1987, p.55

2.4 Cinética das reações eletroquímicas

Diversas formas de avaliar se uma reação poderá ocorrer estão atreladas aos estudos da termodinâmica. Porém, esses estudos apenas avaliam a ocorrência ou não da reação, desconsiderando os mecanismos e a velocidade com que ocorre a reação. No caso das reações de corrosão, como exemplo, uma em questão pode ser avaliada como possível de ocorrer, porém, caso a velocidade seja muito baixa, ela pode ser considerada nula, considerando que a reação não ocorre. Portanto, conhecer a cinética de uma reação é importante, assim se justificando ou não a implicação de dispêndios no controle de uma reação.

2.4.1 Polarização por ativação

No equilíbrio de uma reação de corrosão a velocidade de oxidação é igual à velocidade de redução. Nas condições de equilíbrio se estabelece um potencial de

equilíbrio que caracteriza as reações que ocorrem na interface. No entanto, caso ocorra um estímulo provocado por um potencial externo, por exemplo, mudando assim a diferença de potencial através da dupla camada, pode-se dizer que o eletrodo sofreu polarização (PANOSSIAN, 1993).

Essa diferença em relação ao potencial de equilíbrio é chamada de sobretensão, η . Conforme a equação (5) avalia-se como polarização anódica, caso η seja positiva. Do contrário, caso seja negativa, a polarização é dita catódica.

$$\eta = E_x - E_e \quad (5)$$

As equações (6) e (7) correlacionam a densidade de corrente resultante i (i_a e i_c) com a sobretensão aplicada η (η_a ou η_c), ou anódica e catódica, respectivamente, generalizadas pela equação (8). Nas equações de Tafel os coeficientes b_a e b_c são chamados de coeficientes de Tafel (PANOSSIAN, 1993). Esses parâmetros podem ser obtidos experimentalmente, sendo de grande importância no entendimento do mecanismo da corrosão.

$$\eta_a = b_a \log \left(\frac{i_a}{i_0} \right) \quad (6)$$

$$\eta_c = b_c \log \left(\frac{i_c}{i_0} \right) \quad (7)$$

$$\eta = b \log \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (8)$$

As equações de Tafel podem ser utilizadas para avaliar a influência da polarização sobre a densidade de corrente, conforme a Figura 11. Essa é uma curva de polarização. Ela mostra que à medida que a densidade de corrente i tende para zero, os potenciais de eletrodo tendem para o potencial de equilíbrio E_e .

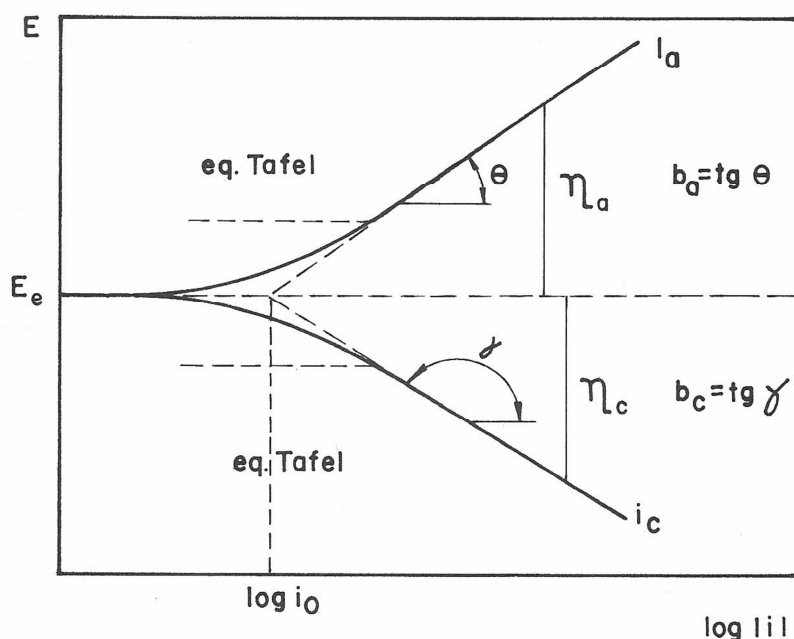


Figura 11 – Curva de polarização anódica (i_a) e catódica (i_c) num diagrama logarítmico. E_e = potencial de equilíbrio; i_0 = densidade de corrente de troca
 Fonte: PANOSSIAN, 1993, pag.128

A técnica potenciodinâmica é frequentemente estendida para a técnica de polarização potenciodinâmica cíclica, pela qual, além do potencial de pite, pode também ser determinado o potencial de repassivação, E_R . Os procedimentos dessa técnica estão especificados na norma ASTM G61 (1993).

2.4.2 Polarização por concentração e de resistência

Para o caso de uma reação em que o número de moléculas de água, a partir de certo momento, passa a ser insuficiente para solvatar todos os íons metálicos que saem do metal, começa a ocorrer o transporte dos ligantes do seio da solução para a interface metal/eletrólito. Esse caso é comum em reações muito rápidas de dissolução anódica. Quando o sistema passa a ser controlado apenas pelo transporte de espécies e não pela barreira energética, ele provoca um desvio na relação linear de Tafel. Esse desvio é a sobretensão de concentração, η_c . Por fim esse fenômeno chama-se polarização por concentração.

No caso de uma superfície metálica possuir uma película condutora de uma espécie qualquer e o eletrodo estar polarizado, possuindo uma corrente resultante

catódica ou anódica, inevitavelmente haverá uma queda de potencial através da película. Neste caso a sobretensão total aumentará de um valor, denominado sobretensão de resistência η_R . Essa sobretensão também provocará um desvio nas curvas de polarização.

De modo geral, nenhum desvio pode ser atribuído à sobretensão de resistência ou de concentração sem um estudo com mais critérios. Além disso, outro fator que contribui para a não responsabilização imediata pelos desvios, o fato de haverem outros tipos de polarização, como a polarização por cristalização.

2.4.3 Potencial e velocidade de corrosão devido à polarização

Segundo PANOSSIAN (1993), quando uma reação ocorre na interface metal/eletrólito, contudo ela é de natureza diferente da reação de oxidação, o potencial de eletrodo recebe o nome de potencial misto. Este potencial pode ser descrito como potencial de corrosão, E_{corr} , responsável pela ocorrência da corrosão.

Em termos de polarização, o que ocorre é que uma reação polariza a outra, ou seja: a reação com menor potencial de equilíbrio polariza catodicamente a reação com maior potencial do mesmo e a com maior potencial de equilíbrio polariza anodicamente a reação com menor (PANOSSIAN, 1993).

As magnitudes das sobretensões geradas nas reações anódica e catódica possuem mesmas velocidades, as quais são designadas pelo valor de i_{corr} , ou corrente de corrosão. A taxa ou velocidade de corrosão pode ser obtida através da razão da corrente de corrosão em relação à área do eletrodo. A velocidade pode ser chamada de densidade de corrente de corrosão.

No entanto, quando verificada a corrente no metal, não são encontrados valores, sendo considerada nula. Isso se deve ao fato de que as correntes catódicas e anódicas são de igual valor e se anulam. Para tanto existe a técnica da extrapolação de Tafel. Essa técnica consiste em obter i_{corr} através da intersecção da continuação das linhas b_a e b_c , descrita na Figura 11.

2.4.4 Técnica do menisco

A técnica do menisco consiste em movimentar a amostra a se avaliar de maneira que a sua superfície permaneça paralela ao meio eletrolítico, sendo movimentada em direção ao mesmo. Ao tocar a superfície, em total condição de paralelismo entre a superfície da amostra lixada e o meio, garante-se o menisco do

meio eletrolítico para com a superfície, conforme a Figura 12. Entretanto, segundo MORONA (2007), por não ser uma técnica consagrada, a sua utilização pode gerar questionamentos, como por exemplo, a questão da aeração diferencial e também a garantia do paralelismo entre as superfícies do corpo-de-prova e do eletrólito.

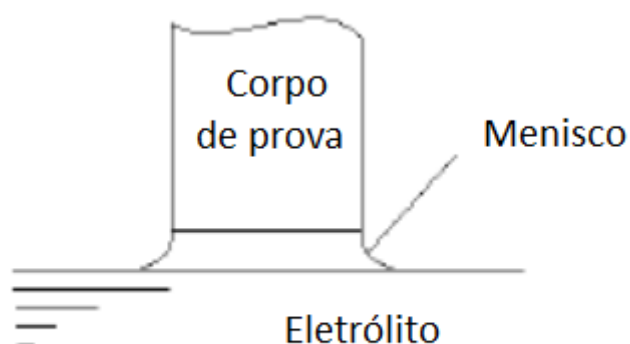


Figura 12 – Detalhe da região de formação do menisco, na interface entre as superfícies do eletrólito e do corpo de prova.

Fonte: MORONA, 2007.

Essa técnica pode ser utilizada para evitar condições que favoreçam a corrosão por frestas em ensaios eletroquímicos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste item serão apresentados o material de estudo, os procedimentos do tratamento térmico e as técnicas experimentais a serem usadas no projeto.

3.1 Material Estudado

O material estudado foi o aço inoxidável martensítico AISI 420. O aço foi adquirido com diâmetro de ½ pol. (12,7 mm) em barras de 6 metros de comprimento. A composição química média esperada deste aço é mostrada na Tabela 3. A composição obtida para três amostras, através de um microscópio óptico de varredura, está identificada na Tabela 4. Comparando a composição esperada com a obtida, nota-se que o material estudado apresenta composição diferente para algumas faixas. Apesar de o percentual de cromo ser menor do que o esperado e o de níquel maior, a composição química do aço avaliado apresenta-se próxima da composição química média esperada.

Tabela 3 – Composição química média do aço AISI 420.

| Designação | Composição, % peso | | | | | | |
|------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|----|--------------|--------------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | P | S |
| 420 | 0,15 min. | 1,00 max. | 1,00 max. | 12,0 14,0 | - | 0,04 max. | 0,03 max. |

Fonte: Adaptado ASM HANDBOOK DESK EDITION, 2008, pag. 856.

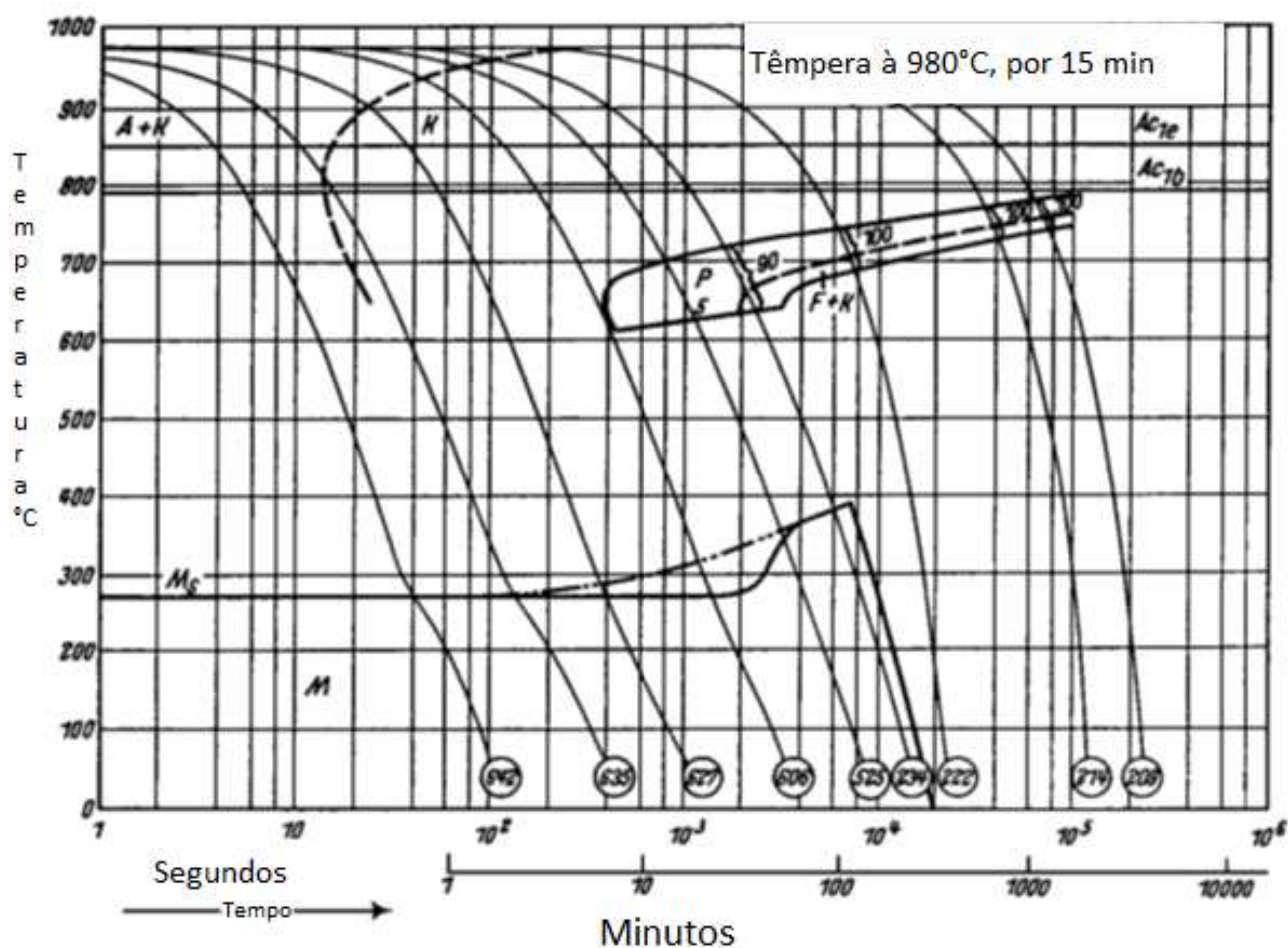
Tabela 4 – Composição química média das amostras.

| Composição das amostras, %massa | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Co | Al |
| Amostra 1 | 0,44708 | 0,18372 | 0,36370 | 0,01320 | 0,00495 | 0,11849 | 0,48427 | 0,00000 | 0,00310 |
| Amostra 2 | 0,47800 | 0,18719 | 0,37876 | 0,01409 | 0,00281 | 0,12252 | 0,50630 | 0,00000 | 0,00247 |
| Amostra 3 | 0,46332 | 0,17055 | 0,36510 | 0,01586 | 0,02396 | 0,06065 | 0,40704 | 0,01866 | 0,01218 |
| Média | 0,46280 | 0,18049 | 0,36919 | 0,01438 | 0,01057 | 0,10055 | 0,46587 | 0,00622 | 0,00592 |
| Desvio padrão | 0,01547 | 0,00878 | 0,00832 | 0,00135 | 0,01164 | 0,03462 | 0,05213 | 0,01077 | 0,00543 |
| | Cr | Nb | Sn | Ti | V | Mo | W | Fe | |
| Amostra 1 | 11,21500 | 0,00002 | 0,00542 | 0,00205 | 0,00000 | 0,06449 | 0,03308 | 87,06100 | |
| Amostra 2 | 11,46900 | 0,00000 | 0,00584 | 0,00085 | 0,00000 | 0,06562 | 0,03346 | 86,73300 | |
| Amostra 3 | 11,24200 | 0,10153 | 0,00469 | 0,01589 | 0,01820 | 0,06304 | 0,03244 | 86,98500 | |
| Média | 11,30867 | 0,03385 | 0,00532 | 0,00626 | 0,00607 | 0,06438 | 0,03299 | 86,92633 | |
| Desvio padrão | 0,13951 | 0,05861 | 0,00058 | 0,00836 | 0,01051 | 0,00129 | 0,00052 | 0,17169 | |

3.2 Tratamento térmico

As barras fornecidas foram cortadas transversalmente em relação ao diâmetro com aproximadamente 100 mm de comprimento, a fim de serem temperadas e posteriormente revenidas.

As barras foram temperadas a uma temperatura de 1000°C por 20 min e foram resfriadas ao ar. Assim foi obtida uma microestrutura martensítica, como mostrado na Figura 13.



A + K - Austenita e carbonetos
 K - Carbonetos
 P - Perlita
 O - Dureza em HV
 Zw - Bainita
 M - Martensita

RA - Austenita Residual
 F - Ferrita
 F + C- Área de eutetóides não lamelares
 Z - Cementita
 10Z - 10% Cementita
 1;2 - Números de curvas

AC_{1b} = 790°C
 AC_{1e} = 850°C

Ms após austenitização a 980°C: 280°C
 Ms após austenitização a 1050°C: 145°C

Figura 13 – Diagrama de transformação em resfriamento contínuo para o aço inoxidável AISI 420.

Fonte: ATLAS ZUR WÄRMEBEHANDLUNG DER TÄHLE, 1954, p. 128.

Depois de temperadas as barras foram revenidas em três temperaturas, de 300°C, 450°C e 600°C, para posteriores ensaios de dureza e eletroquímicos. Para posterior comparação, uma amostra sem revenimento foi avaliada nos ensaios eletroquímicos e de dureza. Com a finalidade de obter curvas de dureza mais completas para o material estudado, além das temperaturas de revenido de 300°C, 450°C e 600°C, inclusive, outras barras foram revenidas às temperaturas de 350°C, 400°C, 500°C e 550°C. Os tempos de revenimento foram de 1, 2 e 3 horas em cada temperatura de revenido. Os parâmetros de revenido e as ações sobre as amostras estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaios sob diferentes parâmetros de revenimento para as amostras do aço AISI 420.

| Temperatura de revenido | Tempo | Ensaio |
|--------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Sem revenimento | - | Dureza Eletroquímico |
| 300°C | 1h | Dureza Eletroquímico |
| | 2h | |
| | 3h | |
| 350°C | 1h | Dureza |
| | 2h | |
| | 3h | |
| 400°C | 1h | Dureza |
| | 2h | |
| | 3h | |
| 450°C | 1h | Dureza Eletroquímico |
| | 2h | |
| | 3h | |
| 500°C | 1h | Dureza |
| | 2h | |
| | 3h | |
| 550°C | 1h | Dureza |
| | 2h | |
| | 3h | |
| 600°C | 1h | Dureza Eletroquímico |
| | 2h | |
| | 3h | |

3.3 Curvas de dureza

Com a finalidade de obtenção das curvas de dureza do material estudado, foram realizadas três medições para cada parâmetro de temperatura e tempo de revenido e foi feita a média aritmética das três medições, tomada como valor final.

3.4 Preparação das amostras

As barras que passaram pelo processo de revenido a 300°C, 450°C e 600°C, além da amostra somente temperada, foram cortadas com aproximadamente 20 mm a fim de obter amostras para o ensaio eletroquímico. Cada amostra foi preparada nas lixas com granulação 220, 320, 400 e 600 grana, respectivamente. Depois essas amostras foram polidas.

3.4.1 Ensaio Eletroquímico

Para montagem dos ensaios eletroquímicos foram necessários três eletrodos, um de trabalho, um eletrodo de referência e um contraeletrodo. Além dos eletrodos, foi utilizado um potenciostato multicanais Iviun – n - Sat, conforme a Figura 14.

O eletrodo de trabalho correspondeu ao material avaliado. Nesse eletrodo a amostra de aço foi circundada por um material condutor, no caso um fio de cobre, o qual foi responsável pelo contato elétrico. A amostra foi pressionada por uma massa de modelar simples a uma pressionadora de amostras, conforme Figura 15. A massa de modelar, auxiliada pela pressão oriunda da pressionadora, acomodou e afixou as amostras ao apoio superior da pressionadora. Dessa maneira a superfície da amostra se tornou paralela ao apoio inferior da pressionadora. Assim, ao inserir o recipiente de vidro, apoiado no apoio inferior, a superfície da amostra se torna paralela ao filme da solução eletrolítica NaCl ($0,5 \text{ mol.dm}^{-3}$), de acordo com a técnica do menisco.



Figura 14 – Potenciostato multicanais Iviun – n – Stat.
Fonte: <http://www.idm-instrumentos.es>



Figura 15 – Pressionadora de amostras e recipiente de vidro. Auxiliares na técnica do menisco.

O eletrodo de referência é um eletrodo de prata-cloreto de prata e o contraeletrodo é de grafite.

Foi aplicada uma variação de potencial, de $-0,1\text{ V}$ a $0,6\text{ V}$, com uma velocidade de varredura de 1 mV/s . Essa faixa de potenciais foi selecionada experimentalmente. O potenciostato foi conectado a um computador, o qual

gerou as curvas de densidade de corrente x potencial, através do software de análise instalado.

3.4.2 Análise superficial

Para análise superficial foi utilizado o equipamento Talysurf CCI Lite, uma ferramenta de metrologia tridimensional avançada óptica, sem contato, usado para caracterização avançada de superfícies. Esse instrumento ofereceu uma representação topográfica da superfície através de 10 medições obtidas na região central, aleatórias, com dimensões de 0,85 mm de comprimento e 0,85 mm de largura. Essas medições foram realizadas com resolução de 0,01 nm mais uma resolução lateral de 0,4 μm , com mais de 1.000.000 de pontos. O programa que transcreveu os dados obtidos pelo equipamento topográfico foi o Taly Map Platinum.

3.5 Justificativa dos Procedimentos Metodológicos

3.5.1 Tratamento térmico

Para traçar as curvas de dureza do aço estudado foram selecionadas sete temperaturas de revenimento nas condições de tempo de tratamento de 1, 2 e 3 horas, além da amostra sem revenimento. Dessa maneira, as deflexões nas curvas obtidas foram mais bem notadas.

3.5.2 Ensaio eletroquímico

Os ensaios consistiram em obter as curvas de densidade de corrente x potencial através de um ensaio de polarização potenciodinâmica para as amostras tratadas em três das sete temperaturas de revenimento, cuja dureza foi analisada, além da amostra sem revenimento. Com esses parâmetros foi possível avaliar o efeito na resistência à corrosão do revenimento, da variação da temperatura e da variação do tempo de tratamento.

3.5.3 Análises superficiais

Como os ensaios eletroquímicos não apresentaram dados suficientes para comparação das resistências à corrosão foi necessária a utilização de outra técnica.

A análise superficial foi a técnica selecionada para a comparação das resistências à corrosão. O equipamento foi selecionado devido a sua precisão na medição e por apresentar dados suficientes para tal. Além disso, foram

realizadas metalografias para cada amostra ensaiada eletroquimicamente para auxiliar no estudo da superfície. Dessa maneira foi possível analisar o comportamento à corrosão das amostras após os ensaios eletroquímicos.

4 RESULTADOS

4.1 Medições de dureza

No presente trabalho foram traçadas as curvas de dureza para o material estudado a fim de comparar o ganho em dureza com a sua resistência à corrosão para cada parâmetro de revenimento, conforme proposto. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6 e as curvas de dureza na Figura 16.

Tabela 6 – Valores de dureza para o aço AISI 420 sob diferentes parâmetros de revenimento.

| Amostras temperadas a 1000°C por 20 min | | | | | | |
|---|-----------|-------------|------------|------------|--------------|---------------|
| Temperatura de revenido | Tempo | Dureza (HV) | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | Média | Desvio padrão |
| Sem revenimento | - | 597 | 611 | 589 | 599,0 | 11,1 |
| 300°C | 1h | 538 | 533 | 551 | 540,7 | 9,3 |
| | 2h | 537 | 539 | 535 | 537,0 | 2,0 |
| | 3h | 563 | 571 | 555 | 563,0 | 8,0 |
| 350°C | 1h | 512 | 518 | 515 | 515,0 | 3,0 |
| | 2h | 522 | 519 | 518 | 519,7 | 2,1 |
| | 3h | 509 | 512 | 521 | 514,0 | 6,2 |
| 400°C | 1h | 501 | 502 | 502 | 501,7 | 0,6 |
| | 2h | 501 | 502 | 502 | 501,7 | 0,6 |
| | 3h | 493 | 493 | 493 | 493,0 | 0,0 |
| 450°C | 1h | 512 | 517 | 511 | 513,3 | 3,2 |
| | 2h | 544 | 544 | 545 | 544,3 | 0,6 |
| | 3h | 561 | 568 | 559 | 562,7 | 4,7 |
| 500°C | 1h | 524 | 522 | 524 | 523,3 | 1,2 |
| | 2h | 557 | 561 | 559 | 559,0 | 2,0 |
| | 3h | 539 | 541 | 541 | 540,3 | 1,2 |
| 550°C | 1h | 419 | 428 | 426 | 424,3 | 4,7 |
| | 2h | 425 | 420 | 422 | 422,3 | 2,5 |
| | 3h | 414 | 413 | 412 | 413,0 | 1,0 |
| 600°C | 1h | 344 | 343 | 343 | 343,3 | 0,6 |
| | 2h | 319 | 318 | 318 | 318,3 | 0,6 |
| | 3h | 308 | 307 | 308 | 307,7 | 0,6 |

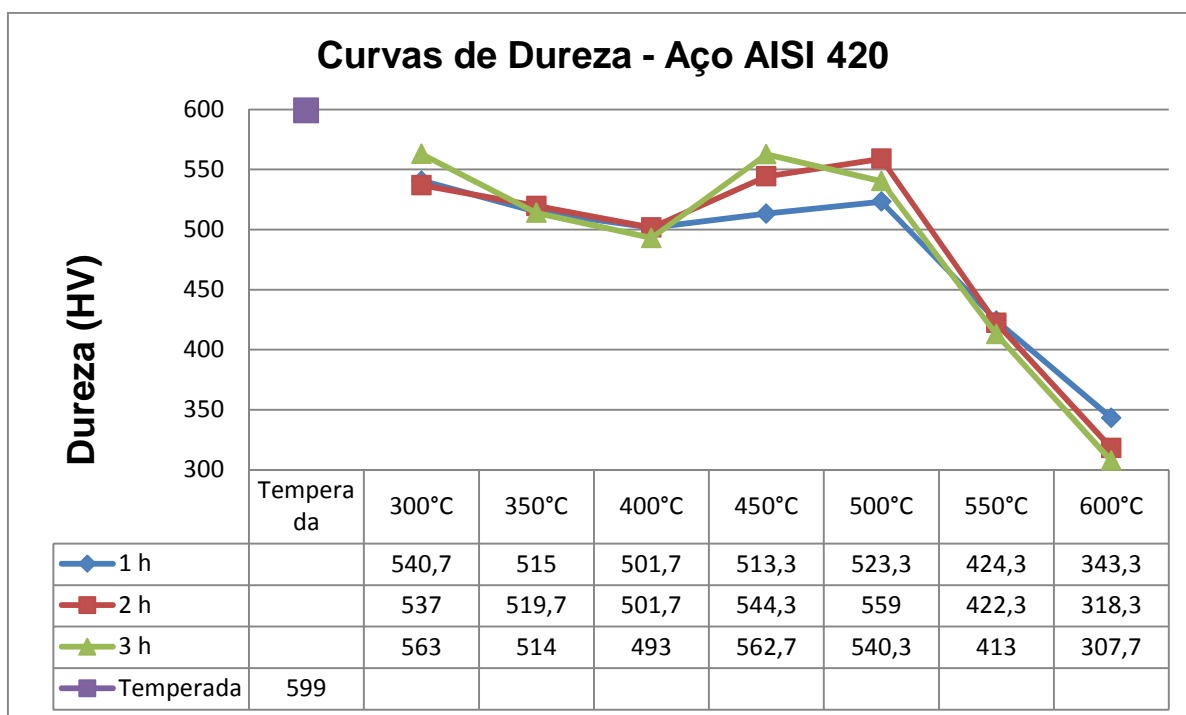


Figura 16 – Curvas de dureza para o aço AISI 420.

As medições de dureza da amostra somente temperada foram superiores às encontradas para as amostras revenidas. Apesar de ocorrer certa variação para as medições, essas ainda se mostraram maiores. Dentre as amostras revenidas, aquela que apresentou maior dureza foi a amostra revenida a 300°C durante 3 horas com razoável variação entre as medições. Para todas as amostras revenidas ocorreram quedas nos valores medidos a partir de 350°C até 400°C, cujos valores de dureza diminuíram razoavelmente. Para o caso das amostras revenidas a 450°C, os valores de dureza apresentaram-se mais elevados, aumentando para as amostras de 1 e 2 horas e decrescendo para a amostra de 3 horas, todas a 500°C. O comportamento a partir de 550°C é de queda considerável da dureza. No caso das amostras revenidas a 600°C os valores foram os mais baixos encontrados, todos bastante uniformes.

4.2 Análises eletroquímicas

Com o objetivo de comparar a resistência à corrosão dos diferentes parâmetros de tratamento térmico, foram realizados ensaios potenciodinâmicos cíclicos a fim de obter três curvas de densidade de corrente x potencial para cada parâmetro de revenido estudado e para a amostra apenas temperada.

A Figura 17 mostra as curvas dos 3 ensaios da amostra somente temperada. Apesar de apresentar uma deflexão, nota-se que o potencial de

formação de pites não pode ser extraído com precisão. A faixa de potencial selecionada, de -0,1 V a 0,6 V, foi padronizada visto o material apresentar uma grande área corroída com esses parâmetros. O potencial de transpassivação não foi notado em todos os ensaios.

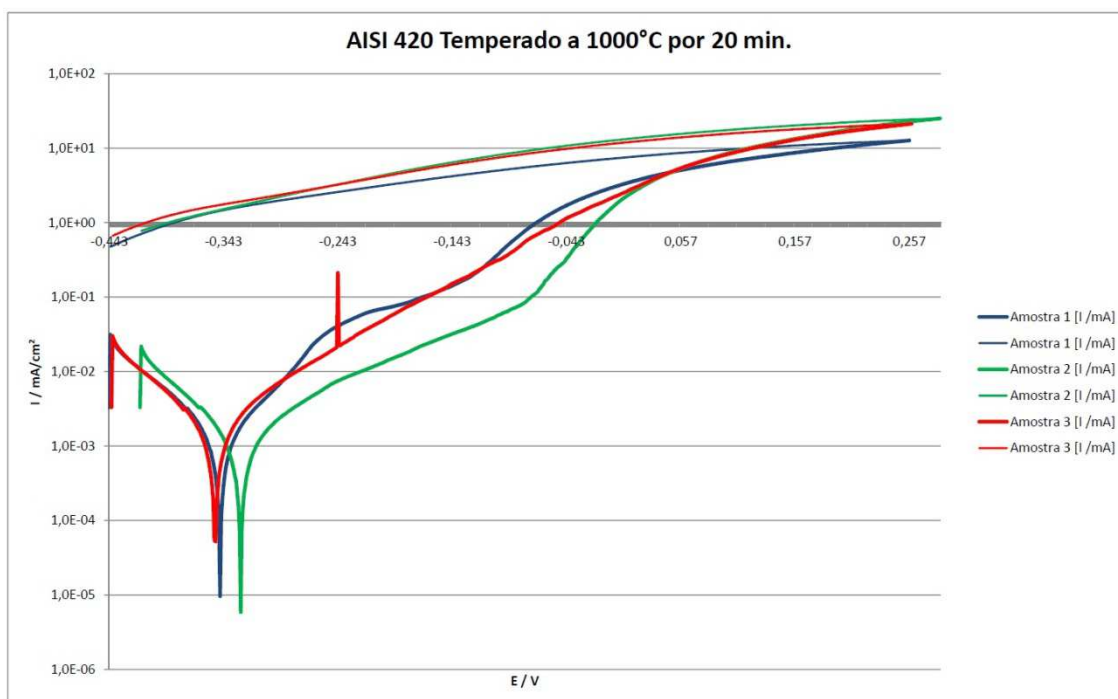


Figura 17 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, temperado a 1000°C por 20 minutos. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

As Figuras 18, 19 e 20 mostram as curvas dos 3 ensaios para cada amostra revenida a 300°C por 1, 2 e 3 horas, respectivamente. O potencial de formação de pites não é evidente em todas as curvas, assim como para o caso da amostra temperada.

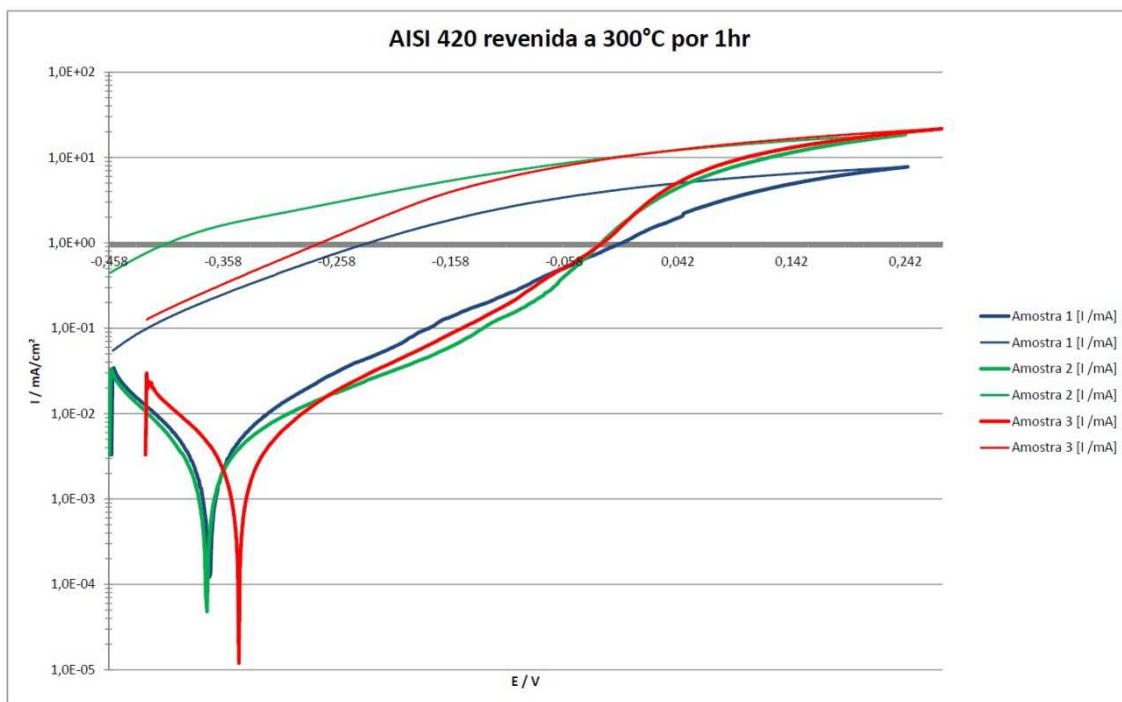


Figura 18 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 300°C por 1 h. Ensaio 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

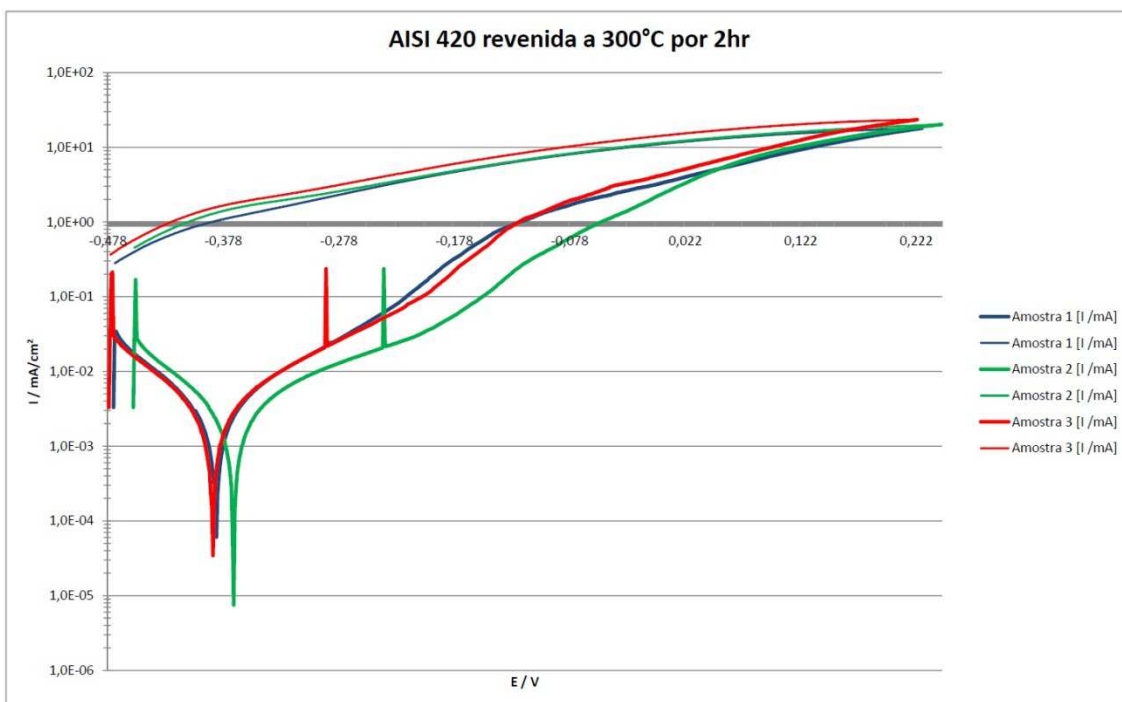


Figura 19 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 300°C por 2 h. Ensaio 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

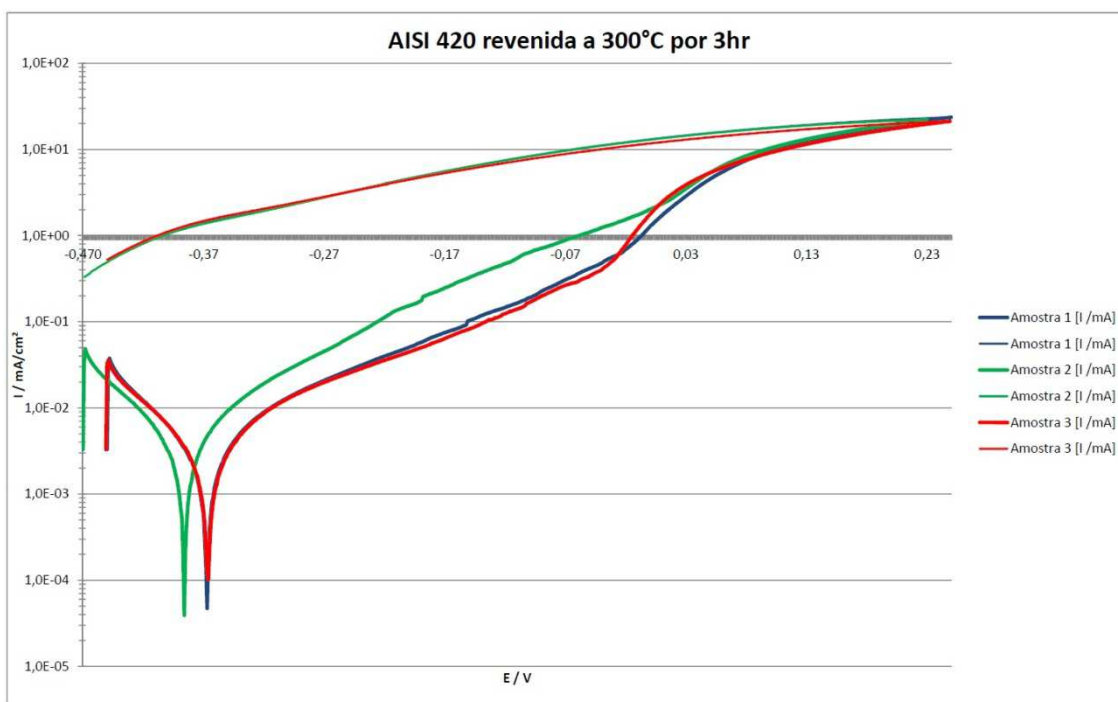


Figura 20 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 300°C por 3 h. Ensaio 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

As Figuras 21, 22 e 23 mostram as curvas dos 3 ensaios para cada amostra revenida a 450°C por 1, 2 e 3 horas, respectivamente. O potencial de formação de pites não é evidente em todas elas. Na amostra revenida a 450°C por 1 hora nota-se algumas deflexões.

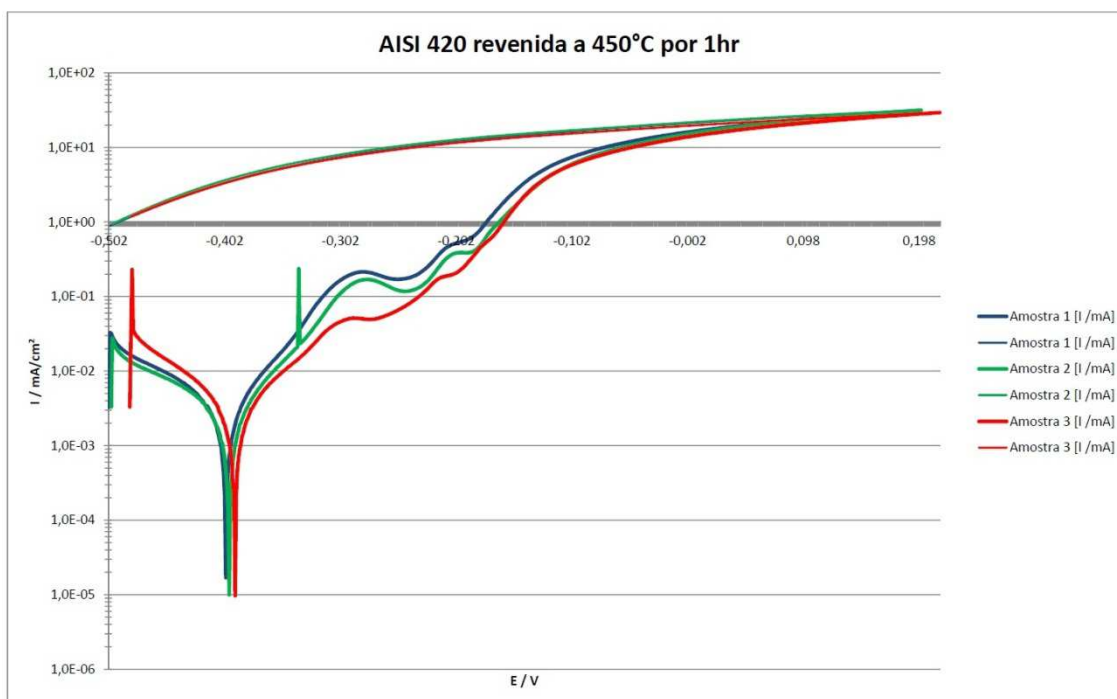


Figura 21 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 450°C por 1 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

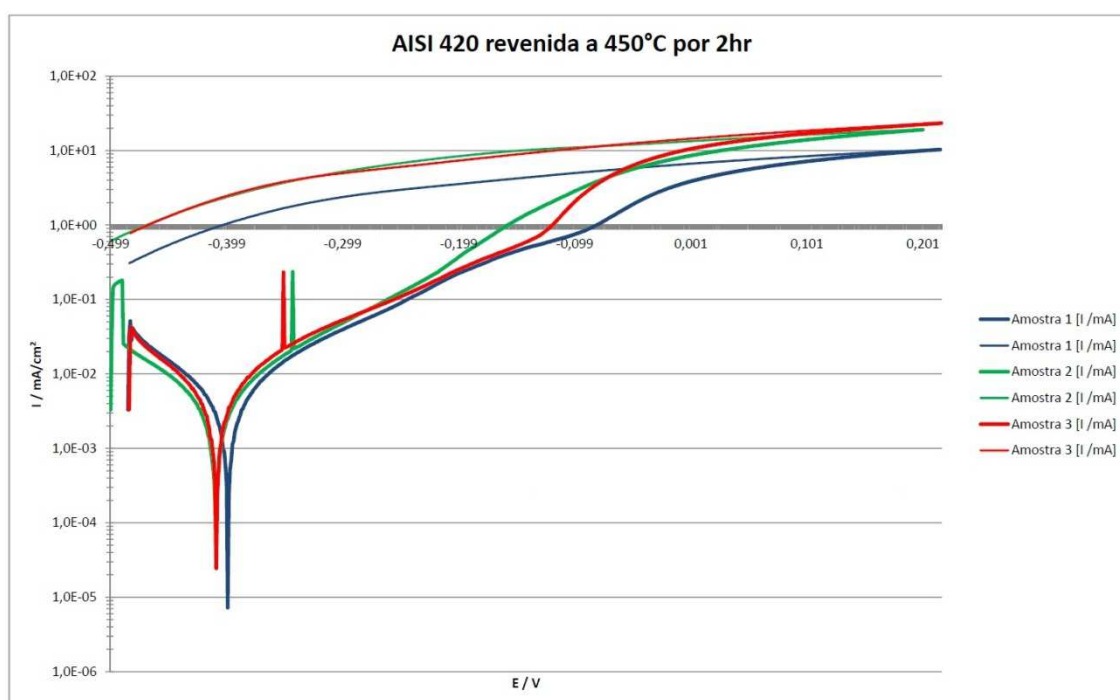


Figura 22 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 450°C por 2 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

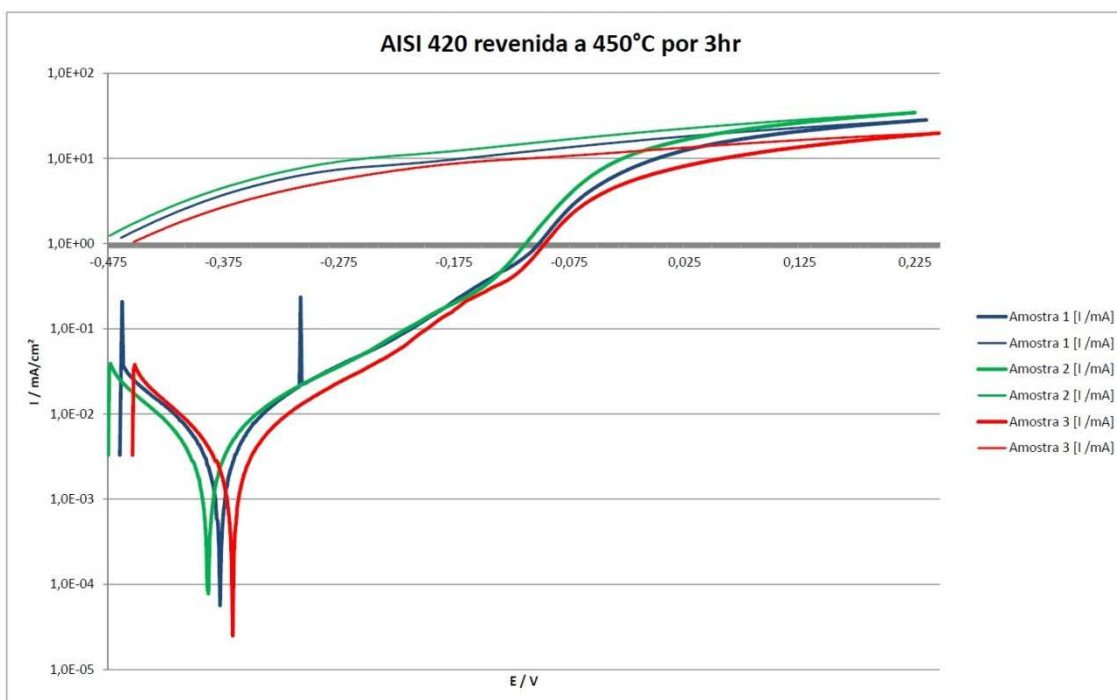


Figura 23 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 450°C por 3 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

As Figuras 24, 25 e 26 mostram as curvas dos 3 ensaios para cada amostra revenida a 600°C por 1, 2 e 3 horas, respectivamente. O potencial de formação de pites não é evidente em todas elas. As curvas das amostras revenidas por 2 e 3 horas mostraram-se com características semelhantes.

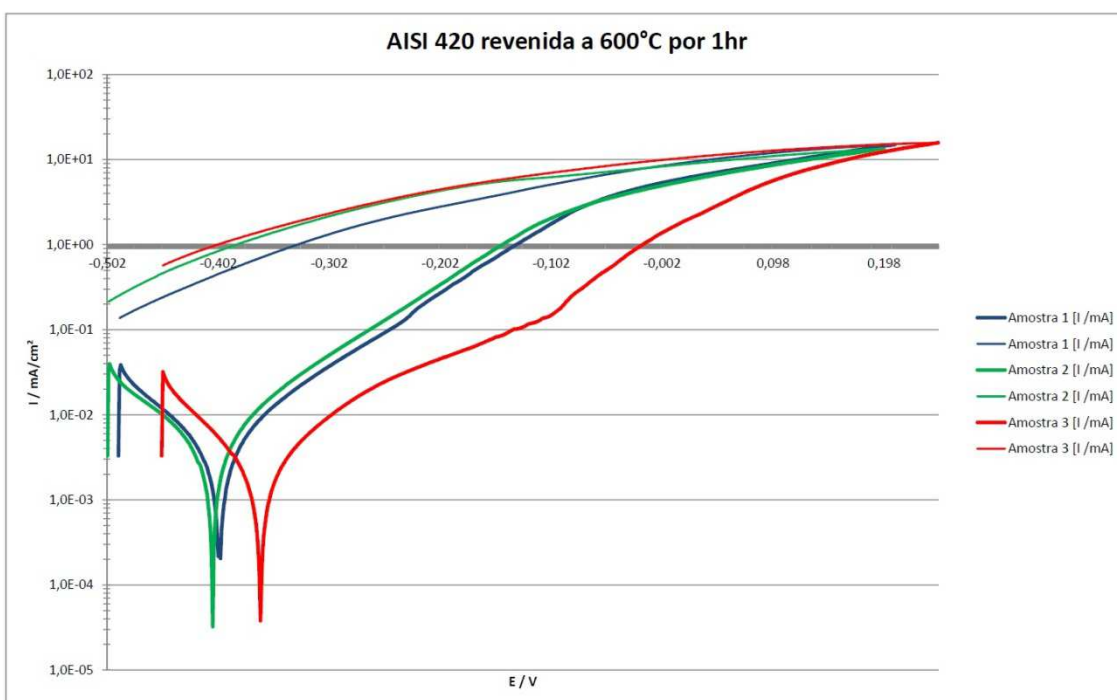


Figura 24 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 600°C por 1 h. Ensaios 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

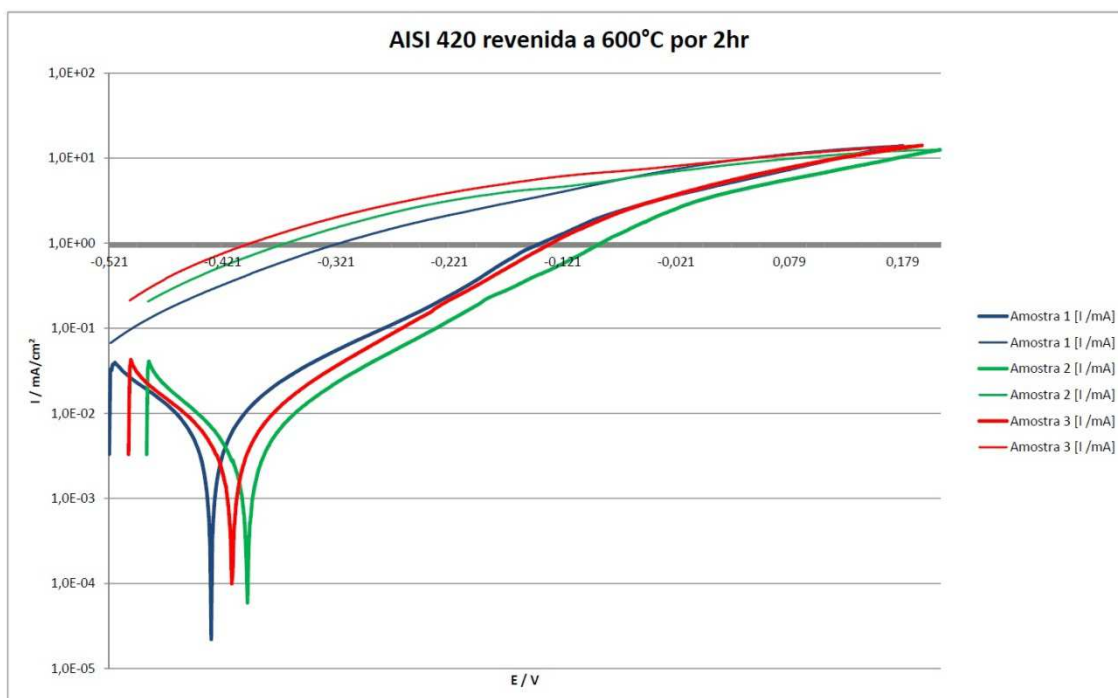


Figura 25 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 600°C por 2 h. Ensaio 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

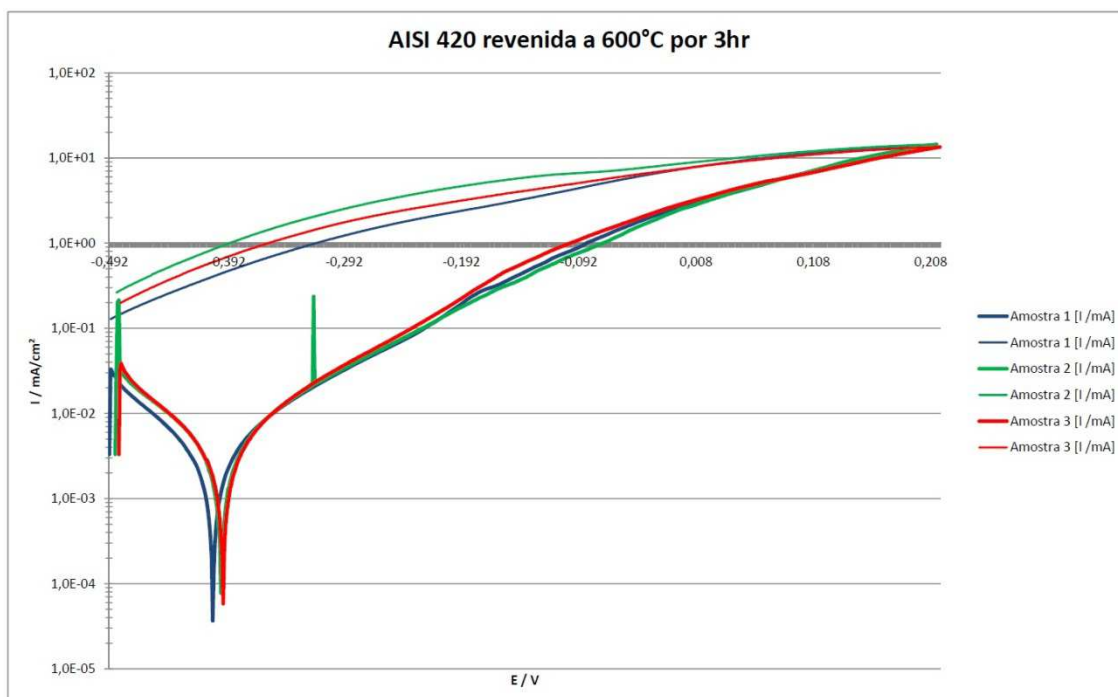


Figura 26 – Curvas potenciodinâmicas do aço AISI 420, revenido a 600°C por 3 h. Ensaio 1, 2 e 3, em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Após a análise das curvas obtidas não foi possível identificar com clareza os potenciais de formação de pites, apenas os potenciais de corrosão, E_{corr} , vide Tabela 7. Os potenciais de corrosão apresentaram-se próximos. Assim supõe-se que essa característica foi pouco afetada pelos parâmetros de revenido.

Tabela 7 - Potenciais de corrosão (E_{corr}) obtidos nos ensaios.

| Temperatura | Tempo | E_{corr1} [V] | E_{corr2} [V] | E_{corr3} [V] | E_{corrM} [V] | σ (desvio padrão) E_{corr} |
|-----------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|
| Temperado (sem revenimento) | 20 min | -0,346 | -0,328 | -0,35 | -0,341 | 0,010 |
| 300°C | 1h | -0,370 | -0,372 | -0,344 | -0,362 | 0,013 |
| | 2h | -0,384 | -0,369 | -0,387 | -0,380 | 0,008 |
| | 3h | -0,367 | -0,386 | -0,366 | -0,373 | 0,009 |
| 450°C | 1h | -0,401 | -0,398 | -0,393 | -0,397 | 0,003 |
| | 2h | -0,388 | -0,408 | -0,408 | -0,401 | 0,009 |
| | 3h | -0,378 | -0,388 | -0,408 | -0,391 | 0,012 |
| 600°C | 1h | -0,401 | -0,407 | -0,364 | -0,391 | 0,019 |
| | 2h | -0,431 | -0,399 | -0,413 | -0,414 | 0,013 |
| | 3h | -0,404 | -0,397 | -0,395 | -0,399 | 0,004 |

Apesar de a expectativa inicial fosse obter os potenciais de nucleação de pites, de corrosão e os de transpassivação, somente os potenciais de corrosão foram possíveis de serem extraídos de maneira exata. Devido às características das curvas, não foi possível obter com precisão os potenciais de nucleação de pites. Além disso, os potenciais de transpassivação não foram obtidos por não ocorrer a mesma devido às características da reação do material com o meio em questão.

4.3 Análises superficiais

A fim de comparar a resistência à corrosão entre os diferentes parâmetros de revenimento e, também, o efeito apenas da temperatura, foram realizadas as análises superficiais. Para os dados obtidos foram considerados os seguintes parâmetros relativos à profundidade (P):

- Profundidade (P) maior 0 μm , para identificar percentualmente todas as regiões corroídas;
- Profundidade (P) maior 5 μm , para identificar percentualmente as regiões com profundidade de corrosão maior do que 5 μm ;

- Profundidade (P) maior 10 μm , para identificar percentualmente as regiões com profundidade de corrosão maior que 10 μm ;
- Profundidade máxima (Pmax), para identificar a região com maior profundidade de corrosão dentre as medições;
- Profundidade máxima média (Pmm), para identificar a média das máximas profundidades de corrosão encontradas nas 10 medições.

As imagens para cada amostra encontram-se na seção Anexos. Para cada parâmetro foram selecionadas duas imagens, a que apresentou a profundidade máxima e outra que apresentou a corrosão característica mais comum. Na legenda das figuras a região mais profunda encontra-se no ponto 0 e o plano médio no valor máximo. Assim, a região com maior profundidade na área analisada caracteriza-se pelo valor máximo da legenda.

As Figuras 27 e 28 mostram as Imagens da amostra temperada, após o ensaio eletroquímico. A Figura 27 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 36,42 μm . Nessa imagem notam-se regiões que sofreram corrosão localizada.

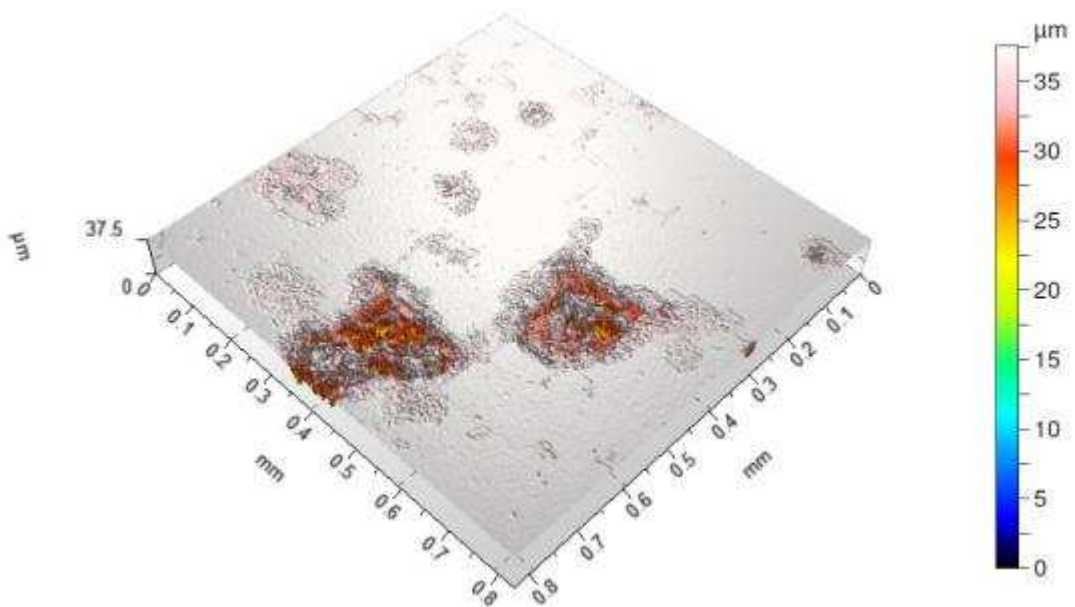


Figura 27 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 28 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída pequena, 17,69%, e uma pequena região com profundidade considerável, 23,17 μm .

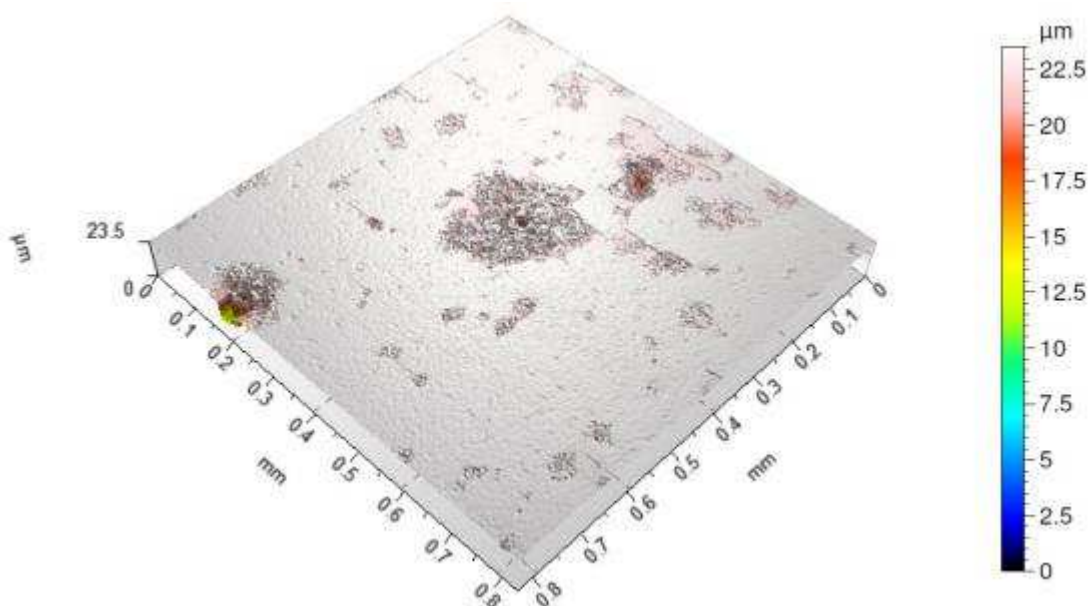


Figura 28 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 29 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra somente temperada. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens pode-se notar que o percentual de área corroída foi pequeno. A Tabela 8 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de poucas regiões corroídas, média de 22,303%, porém, em média, 0,209% da área total apresentou profundidade considerável. A região com máxima profundidade encontrada foi de 36,42 μm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 17,550 μm .

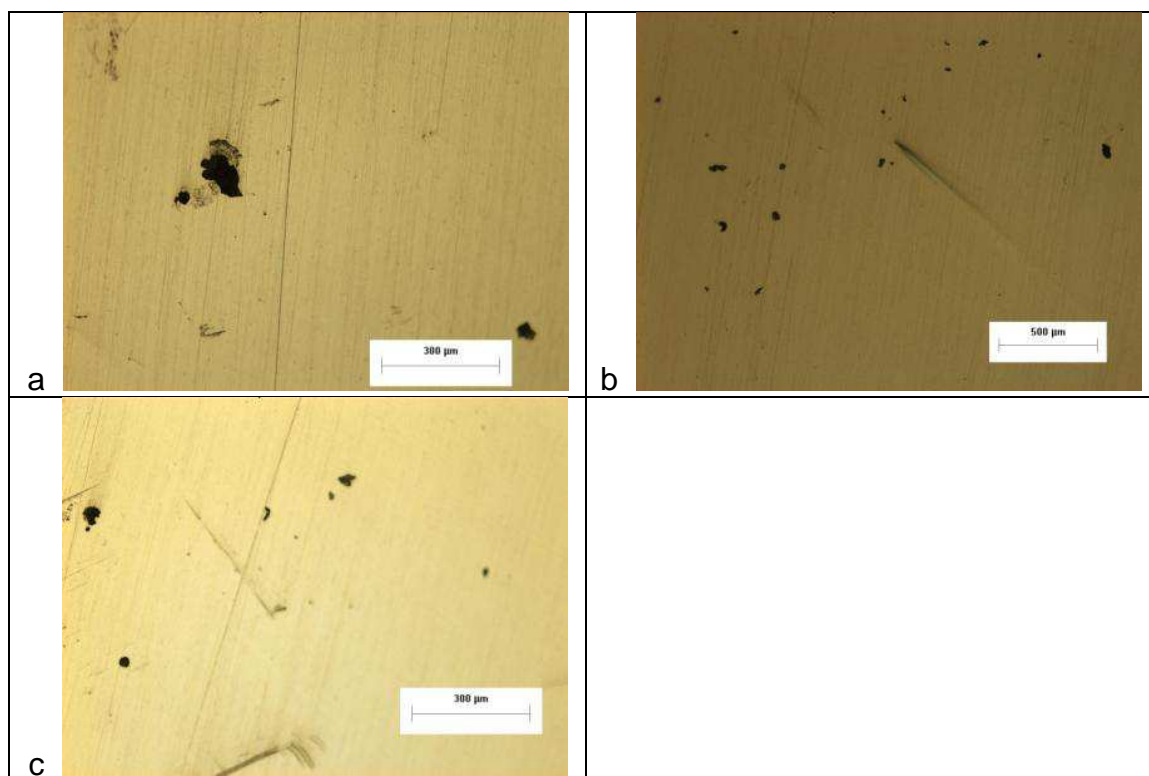


Figura 29 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 min, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 8 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 min, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| Temperado | Valor percentual de regiões negativas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 21,51 | 0,3342 | 0,02403 | 16,050 |
| 2 | 27,32 | 0 | 0 | 4,033 |
| 3 | 23,31 | 0,09537 | 0,01755 | 13,52 |
| 4 | 17,69 | 3,334 | 0,7038 | 36,42 |
| 5 | 23,46 | 2,092 | 1,048 | 27,26 |
| 6 | 22,07 | 0,14 | 0,01144 | 17,1 |
| 7 | 38,7 | 0 | 0 | 4,107 |
| 8 | 19,03 | 0,3101 | 0,09422 | 23,17 |
| 9 | 16,65 | 0,04539 | 0,0001 | 12,72 |
| 10 | 13,29 | 1,745 | 0,1949 | 21,12 |
| Média | 22,303 | 0,810 | 0,209 | 17,550 |
| Desvio padrão | 7,010 | 1,165 | 0,366 | 10,001 |
| Maior | 38,700 | 3,334 | 1,048 | 36,420 |

As Figuras 30 e 31 mostram as Imagens da amostra revenida a 300°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico. A Figura 30 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 37,84 μm .

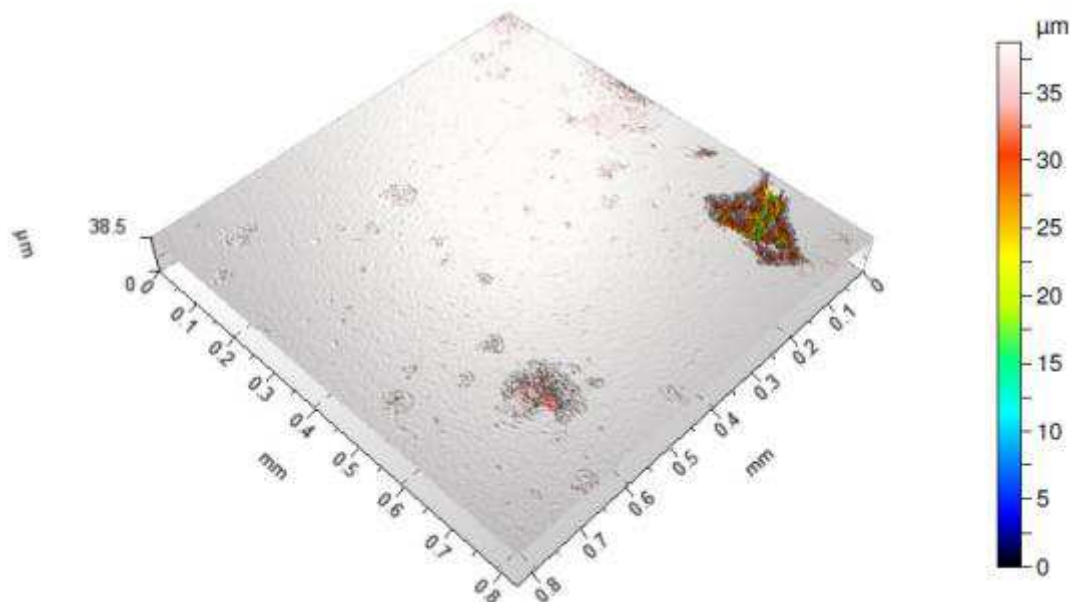


Figura 30 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 31 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída pequena, 16,42%, e uma pequena região com profundidade considerável, 16,76 μm . A corrosão característica se apresentou semelhante a da amostra somente temperada.

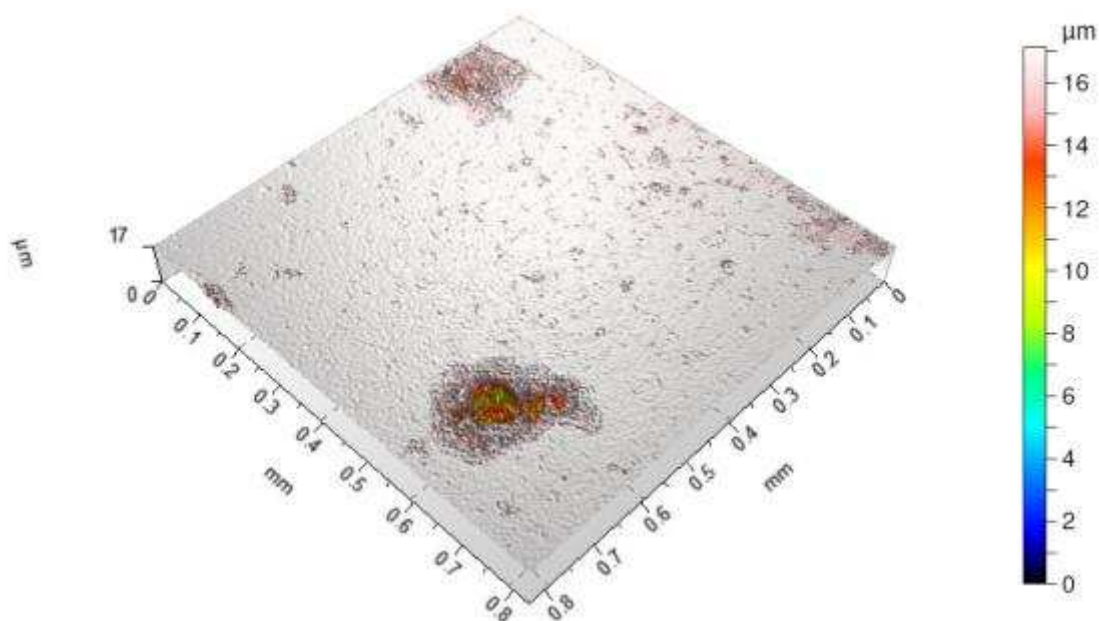


Figura 31 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 32 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 300° por 1 hora. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens pode-se notar que o percentual de área corroída foi considerável, porém, ao considerar outros pontos analisados pelo equipamento topográfico nota-se que, percentualmente, a área corroída foi pequena. A Tabela 9 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de poucas regiões corroídas, média de 18,049%, porém, em média, 0,279% da área total apresentou profundidade considerável. A região com máxima profundidade encontrada foi de 37,84 µm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 17,271 µm.

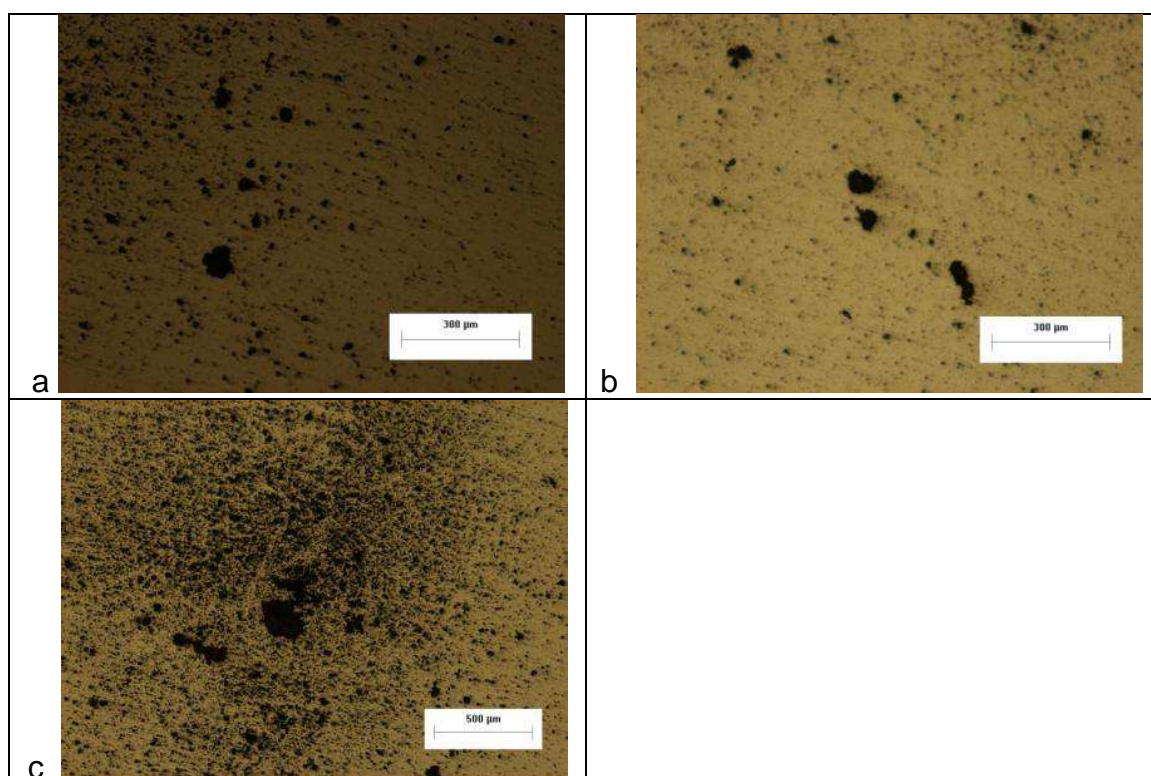


Figura 32 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 9 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 300°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 300°C 1h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 16,58 | 0,0515 | 0 | 8,480 |
| 2 | 33,45 | 0 | 0 | 4,868 |
| 3 | 8,011 | 1,985 | 1,595 | 37,84 |
| 4 | 16,42 | 0,4856 | 0,0843 | 16,76 |
| 5 | 19,7 | 0,00004 | 0 | 5,179 |
| 6 | 10,11 | 2,659 | 0,6847 | 34,72 |
| 7 | 16,85 | 1,931 | 0,4089 | 30,73 |
| 8 | 23,25 | 0,04692 | 0 | 9,328 |
| 9 | 23,61 | 0 | 0 | 4,32 |
| 10 | 12,51 | 0,5718 | 0,02174 | 20,48 |
| Média | 18,049 | 0,773 | 0,279 | 17,271 |
| Desvio padrão | 7,443 | 1,018 | 0,517 | 13,027 |
| Maior | 33,450 | 2,659 | 1,595 | 37,840 |

As Figuras 33 e 34 mostram as Imagens da amostra revenida a 300°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico. A Figura 33 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 28,36 μm .

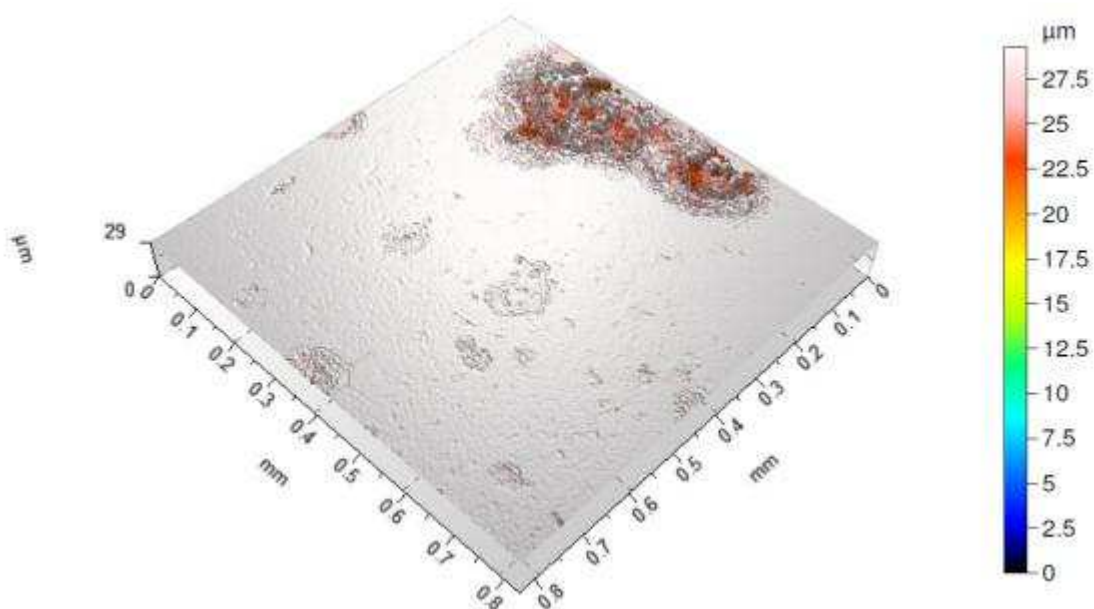


Figura 33 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 34 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída pequena, 26,12%, e uma pequena região com profundidade considerável, 11,19 μm . A corrosão característica se apresentou semelhante a das amostras somente temperada e revenida a 300° por 1 hora.

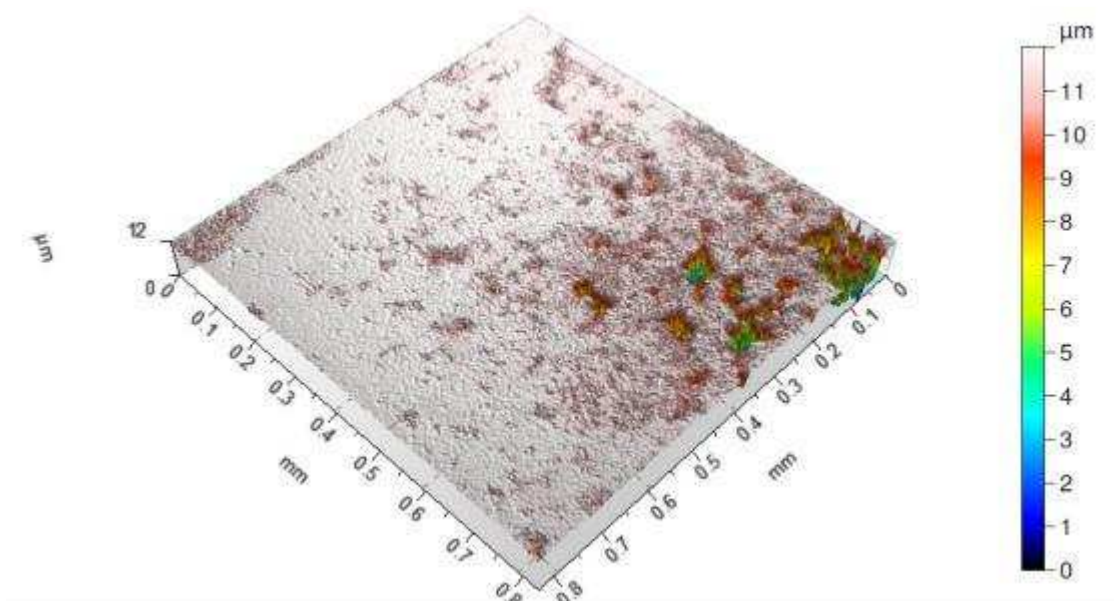


Figura 34 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 35 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 300° por 2 horas. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens pode-se notar que o percentual de área corroída foi considerável, porém, ao considerar outros pontos analisados pelo equipamento topográfico nota-se que, percentualmente, a área corroída foi pequena, assim como para a amostra revenida a 1 hora. A Tabela 10 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de poucas regiões corroídas, média de 21,389%, porém, em média, 0,114% da área total apresentou profundidade considerável. A região com máxima profundidade encontrada foi de 28,36 μm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 12,171 μm .

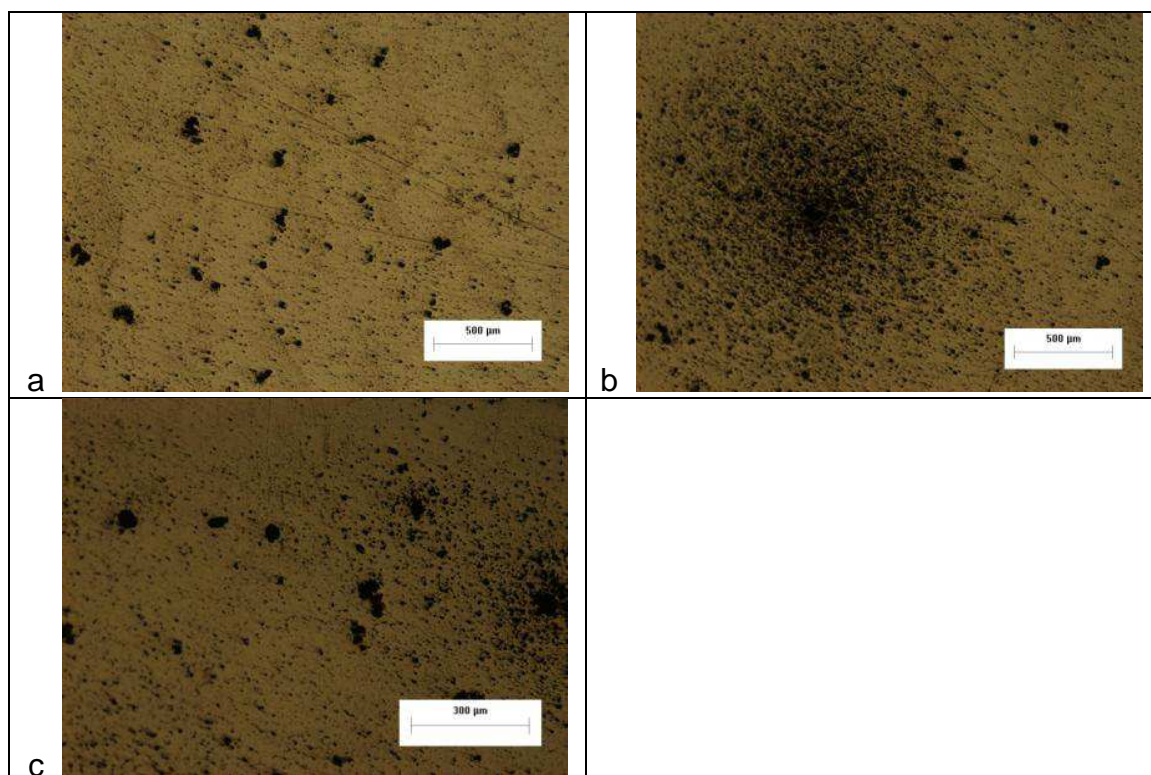


Figura 35 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 10 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 300°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 300°C 2h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 26,49 | 0,1259 | 0 | 9,906 |
| 2 | 14,41 | 2,356 | 0,5566 | 28,36 |
| 3 | 15,06 | 0,499 | 0,03586 | 13,32 |
| 4 | 29,21 | 0,00003 | 0 | 2,633 |
| 5 | 27,65 | 0 | 0 | 3,55 |
| 6 | 12,15 | 0,1884 | 0,02441 | 14,04 |
| 7 | 30,73 | 0 | 0 | 0,8483 |
| 8 | 12,1 | 0,9518 | 0,2476 | 16,75 |
| 9 | 19,97 | 0,8022 | 0,246 | 21,11 |
| 10 | 26,12 | 1,549 | 0,02823 | 11,19 |
| Média | 21,389 | 0,647 | 0,114 | 12,171 |
| Desvio padrão | 7,442 | 0,790 | 0,184 | 8,611 |
| Maior | 30,730 | 2,356 | 0,557 | 28,360 |

As Figuras 36 e 37 mostram as Imagens da amostra revenida a 300°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico. A Figura 36 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 9,053 μm .

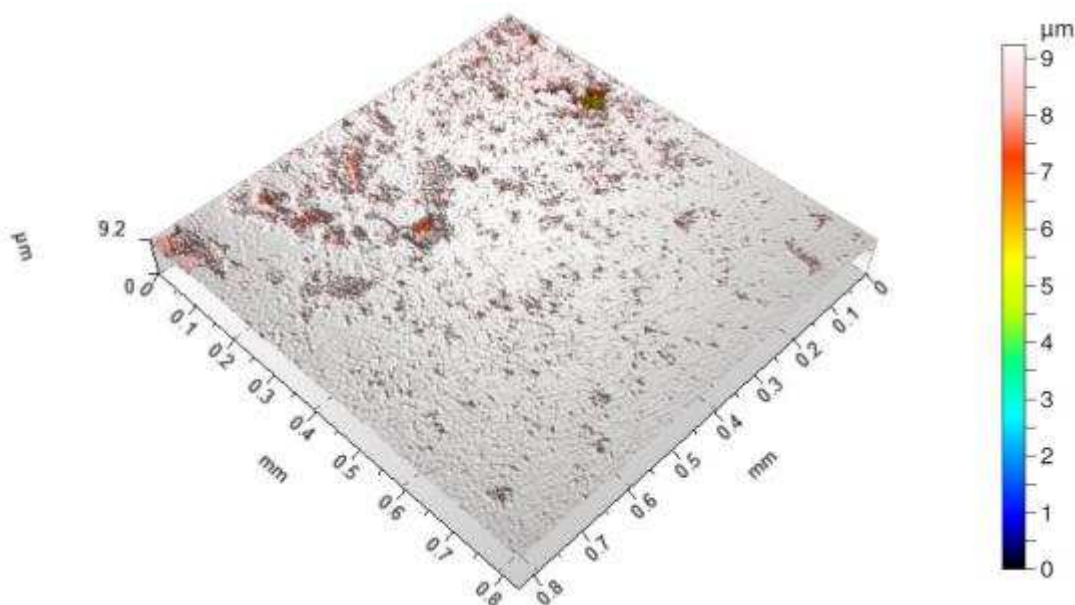


Figura 36 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 37 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída maior em relação às amostras revenidas em outros tempos de tratamento, 28,11%, e uma região com profundidade máxima de 4,602 μm . A corrosão característica se apresentou diferente das amostras somente temperada e revenidas a 300°C por 1 e 2 horas. Para o caso da amostra revenida a 300°C por 3 horas, a amostra se apresentou com um percentual de regiões corroídas mais alto, porém a profundidade média se apresentou menor.

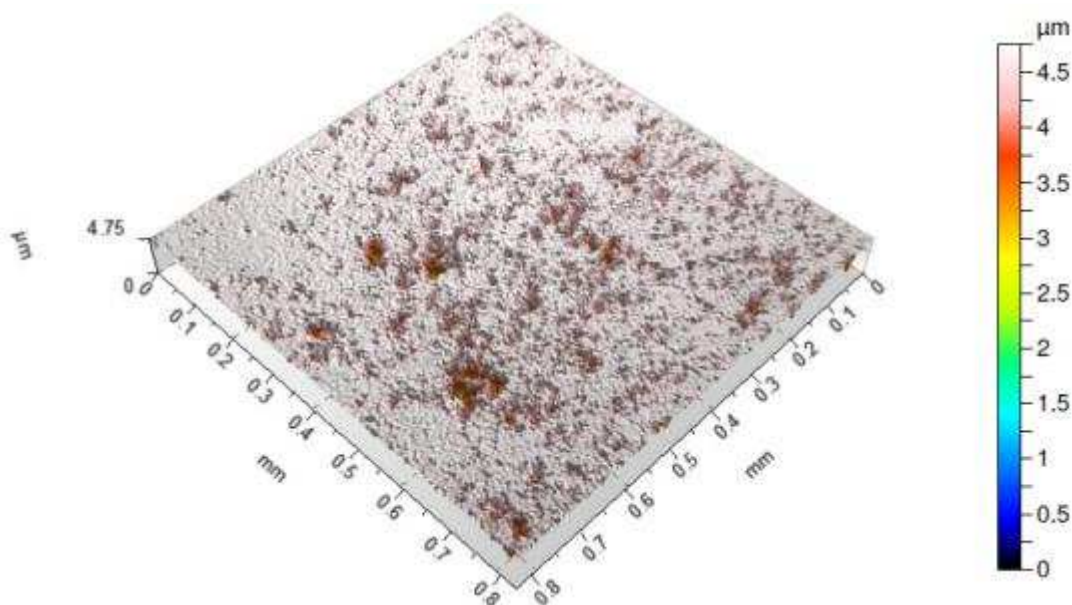


Figura 37 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 38 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 300° por 3 horas. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens pode-se notar que o percentual de área corroída foi considerável, característica também notada nas análises superficiais. A Tabela 11 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de muitas regiões corroídas, média de 27,954%, porém, em média, 0,032% da área total apresentou profundidade mediana, maior que 5 µm. A região com máxima profundidade encontrada foi de 9,053 µm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 4,055 µm.

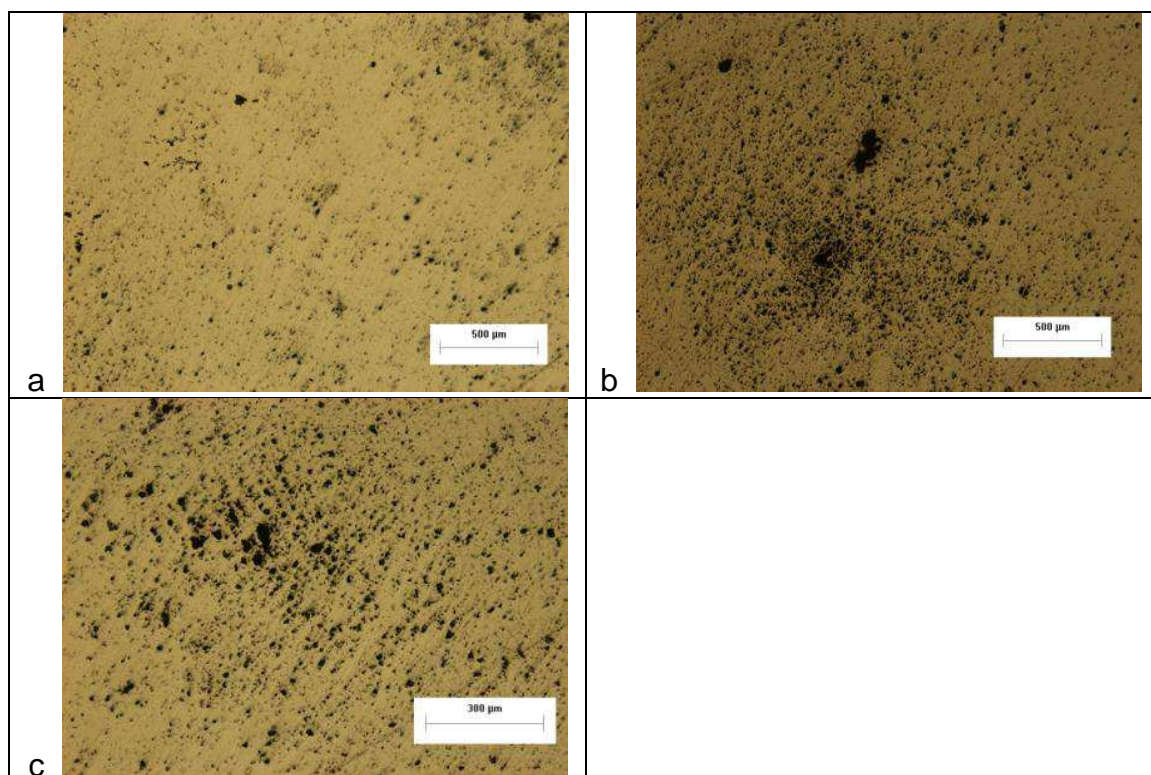


Figura 38 – Metalografias de três regiões diferentes s (a), (b) e (c) da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 11 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 300°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 300°C 3h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 28,11 | 0 | 0 | 4,602 |
| 2 | 27,86 | 0 | 0 | 2,232 |
| 3 | 36,9 | 0 | 0 | 1,216 |
| 4 | 14,78 | 0,03586 | 0 | 6,505 |
| 5 | 40,12 | 0 | 0 | 0,6305 |
| 6 | 32,43 | 0 | 0 | 1,03 |
| 7 | 24,37 | 0,211 | 0 | 9,053 |
| 8 | 19,93 | 0,05646 | 0 | 6,725 |
| 9 | 24,47 | 0 | 0 | 1,977 |
| 10 | 30,57 | 0,01602 | 0 | 6,582 |
| Média | 27,954 | 0,032 | 0,000 | 4,055 |
| Desvio padrão | 7,586 | 0,066 | 0,000 | 3,007 |
| Maior | 40,120 | 0,211 | 0,000 | 9,053 |

As Figuras 39 e 40 mostram as Imagens da amostra revenida a 450°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico. A Figura 39 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 55,79 μm .

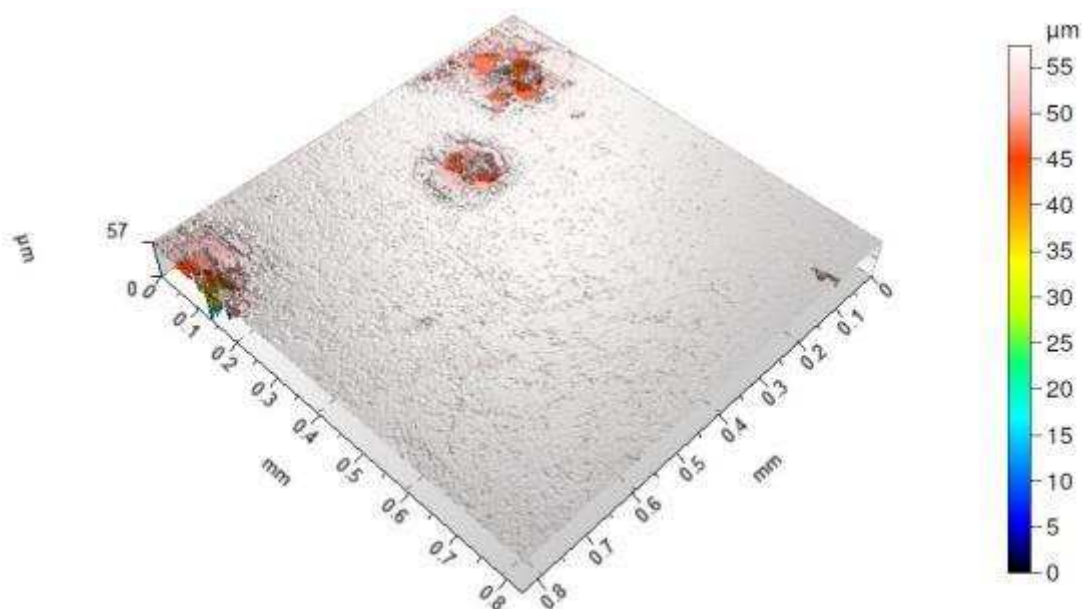


Figura 39 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 40 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída maior em relação às amostras revenidas em temperatura mais baixa, 48,78%, e uma região com profundidade máxima de 17,87 μm . A corrosão característica se apresentou com profundidade e um percentual de regiões corroídas, ambos mais altos do que para as amostras revenidas a 300°C e somente temperada.

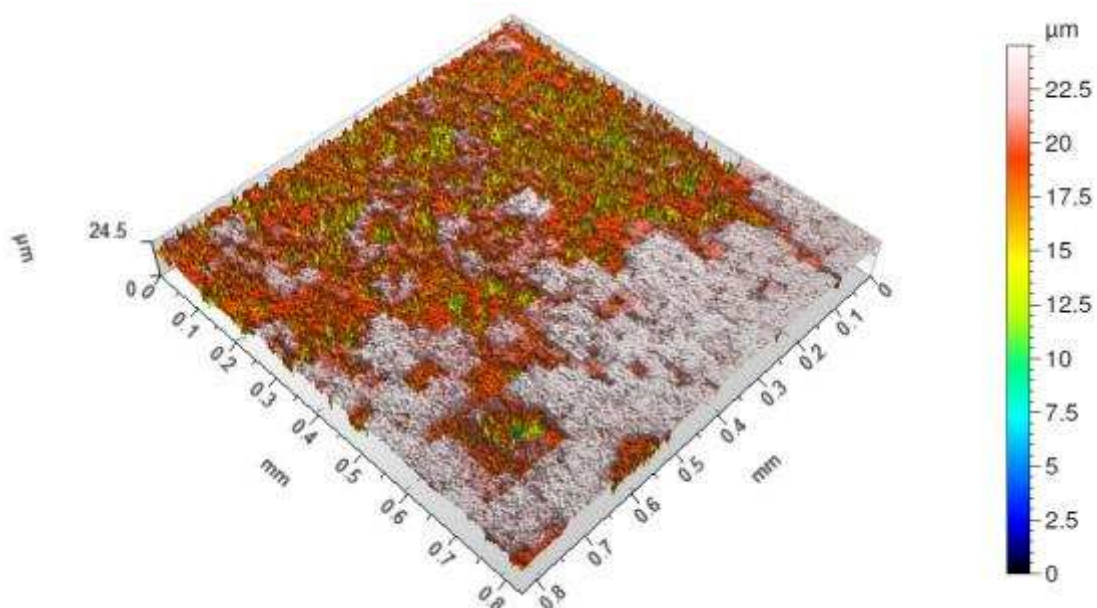


Figura 40 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 41 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 450° por 1 hora. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens, apesar do contraste, pode-se notar que o percentual de área corroída foi considerável, característica também notada nas análises superficiais. A Tabela 12 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de muitas regiões corroídas, média de 28,69%, e, em média, 0,289% da área total apresentou profundidade maior que 10 µm. A região com máxima profundidade encontrada foi de 55,79 µm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 21,308 µm.

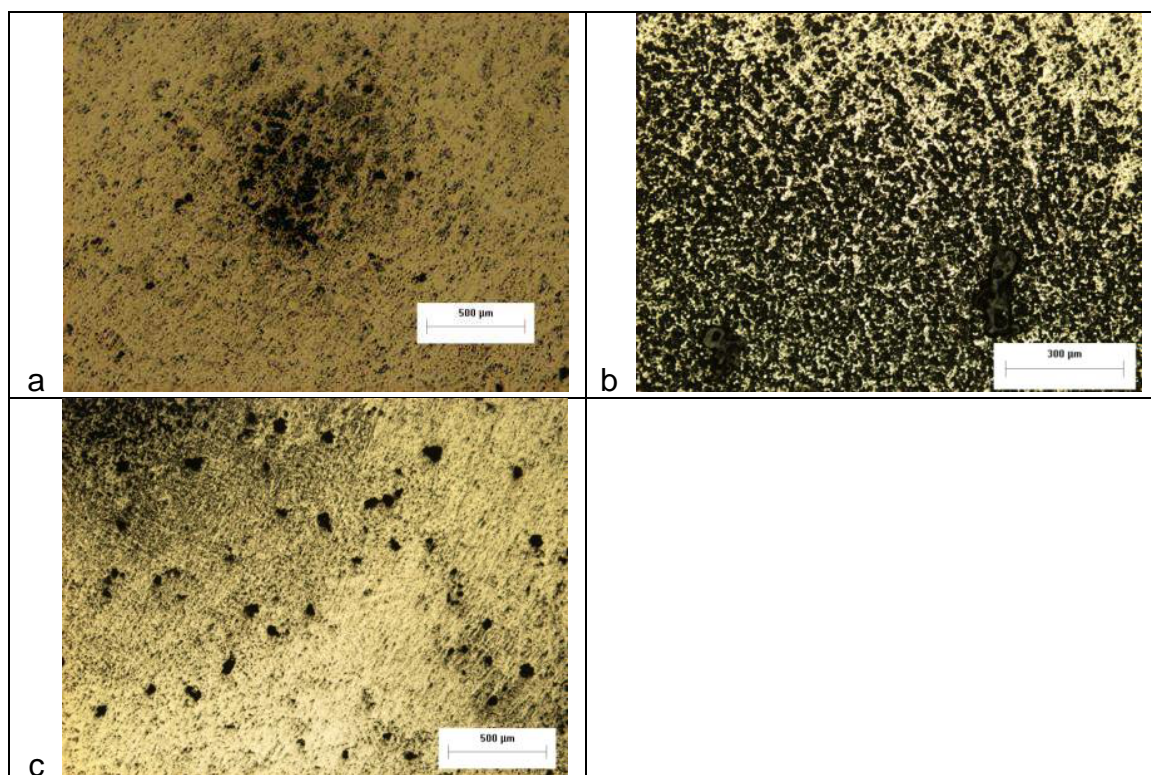


Figura 41 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 12 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 450°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 450°C 1h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 25,14 | 0,1076 | 0,0001 | 11,330 |
| 2 | 28,39 | 0,6882 | 0,0988 | 15,59 |
| 3 | 18,84 | 2,901 | 0,6626 | 33,5 |
| 4 | 48,78 | 9,716 | 0,8762 | 17,87 |
| 5 | 34,43 | 0,3059 | 0,0004 | 12,72 |
| 6 | 28,56 | 1,048 | 0,03777 | 13,48 |
| 7 | 13,1 | 3,497 | 0,8297 | 55,79 |
| 8 | 30,08 | 0,7202 | 0,05226 | 21,14 |
| 9 | 38,13 | 0,07629 | 0 | 6,931 |
| 10 | 21,45 | 1,005 | 0,3284 | 24,73 |
| Média | 28,690 | 2,007 | 0,289 | 21,308 |
| Desvio padrão | 10,181 | 2,944 | 0,363 | 14,280 |
| Maior | 48,780 | 9,716 | 0,876 | 55,790 |

As Figuras 42 e 43 mostram as Imagens da amostra revenida a 450°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico. A Figura 42 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 46,69 μm .

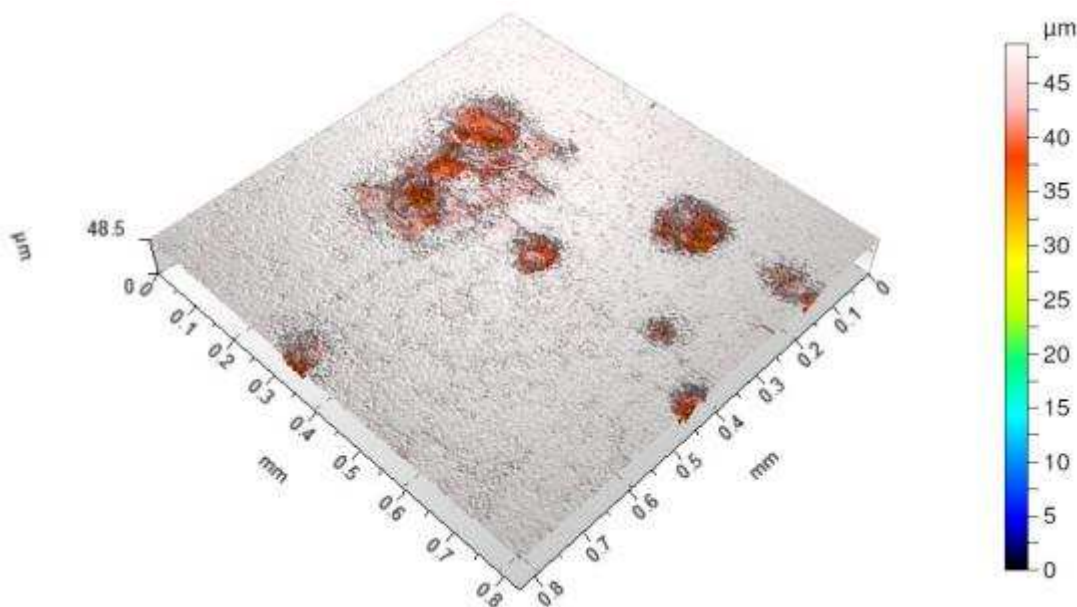


Figura 42 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 43 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída alta, com valor percentual de 26,09%, e uma região com profundidade máxima de 23,33 μm . A corrosão característica se apresentou com profundidade e um percentual de regiões corroídas próximos a da amostra revenida na mesma temperatura pelo tempo de 1 hora.

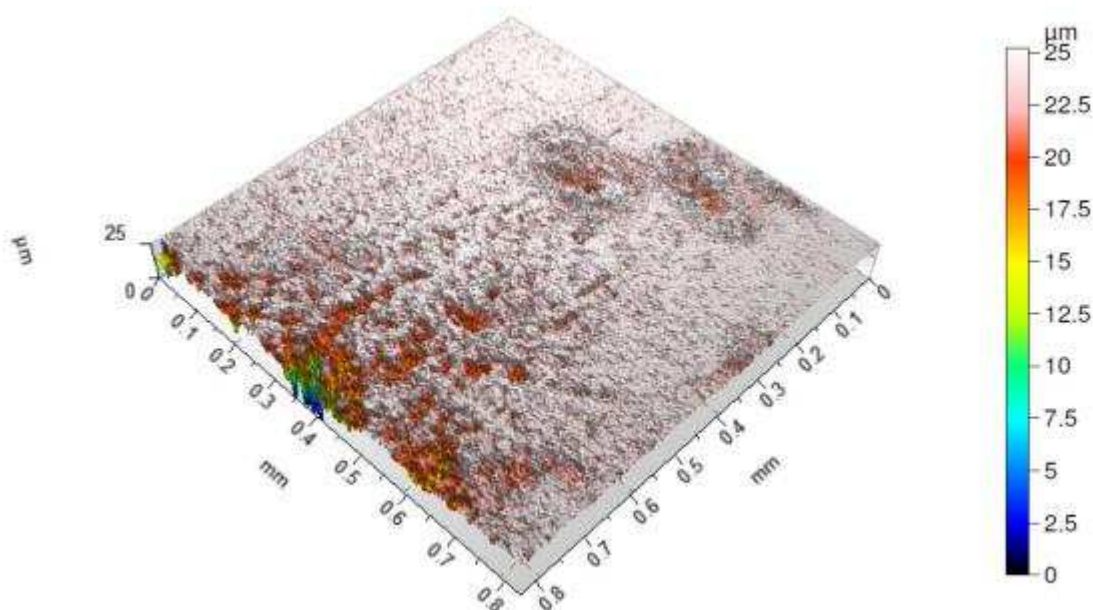


Figura 43 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 44 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 450° por 2 horas. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens, apesar do contraste, pode-se notar que o percentual de área corroída foi considerável, característica também notada nas análises superficiais. A Tabela 13 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de muitas regiões corroídas, média de 26,279%, e, em média, 0,27% da área total apresentou profundidade maior que 10 µm. A região com máxima profundidade encontrada foi de 46,69 µm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 27,586 µm.

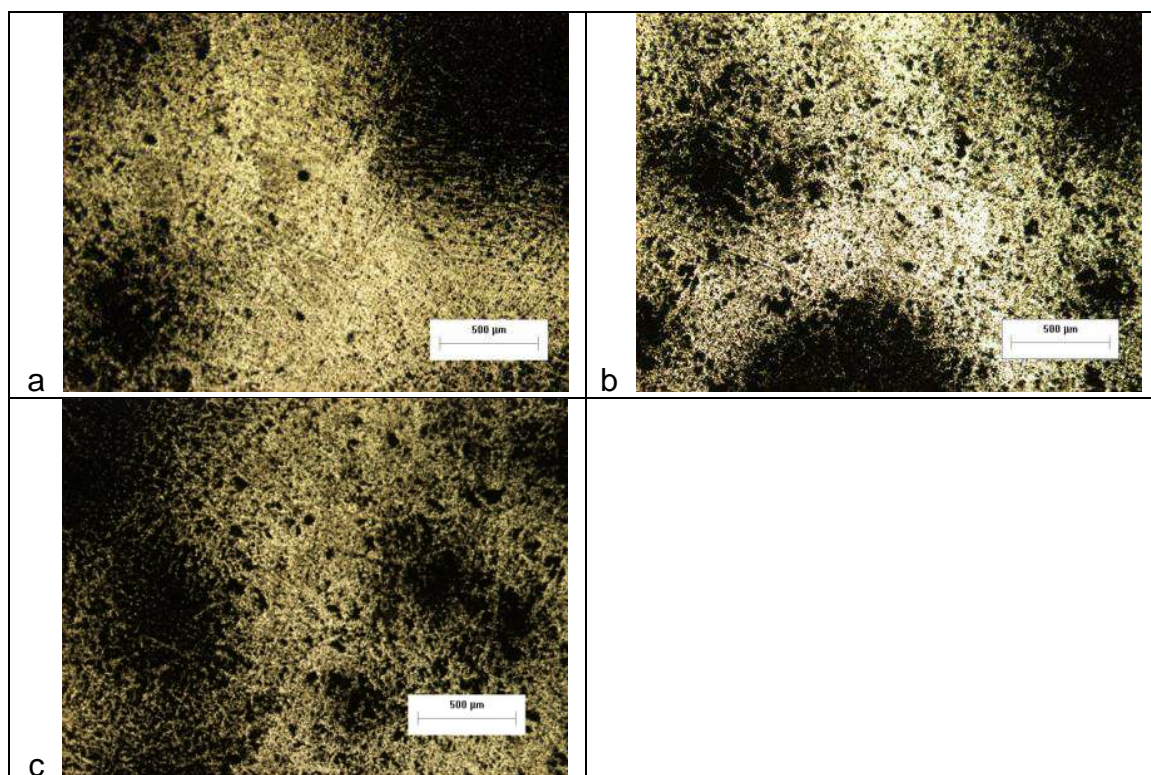


Figura 44 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 13 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 450°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 450°C 2h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 38,37 | 0,01526 | 0 | 9,717 |
| 2 | 14,61 | 5,502 | 1,082 | 46,69 |
| 3 | 24,89 | 2,161 | 0,2762 | 31,74 |
| 4 | 20,37 | 1,821 | 0,2625 | 36,89 |
| 5 | 29,96 | 0,4044 | 0,05074 | 23,77 |
| 6 | 32,91 | 0,325 | 0,01755 | 14,55 |
| 7 | 21,21 | 2,38 | 0,193 | 43,33 |
| 8 | 21,18 | 2,382 | 0,2514 | 33,27 |
| 9 | 26,09 | 2,312 | 0,5268 | 23,33 |
| 10 | 33,2 | 0,2998 | 0,04082 | 12,57 |
| Média | 26,279 | 1,760 | 0,270 | 27,586 |
| Desvio padrão | 7,275 | 1,644 | 0,328 | 12,894 |
| Maior | 38,370 | 5,502 | 1,082 | 46,690 |

As Figuras 45 e 46 mostram as Imagens da amostra revenida a 450°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico. A Figura 45 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 45,16 µm.

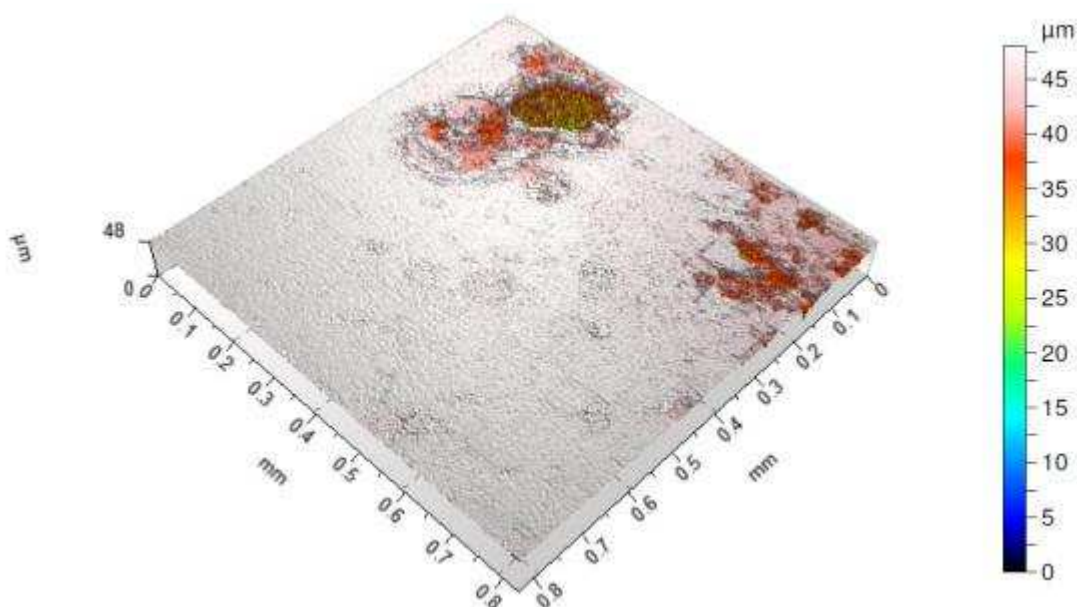


Figura 45 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 43 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída muito alta, com valor percentual de 46%, e uma região com profundidade máxima de 18,45 µm. A corrosão característica se apresentou com um percentual de regiões corroídas maior em relação às amostras revenida na mesma temperatura. As profundidades máximas médias para os três tempos de revenido nessa temperatura se apresentaram próximas, porém, para a amostra revenida a 3 horas, o percentual de regiões com profundidade considerável foi o maior.

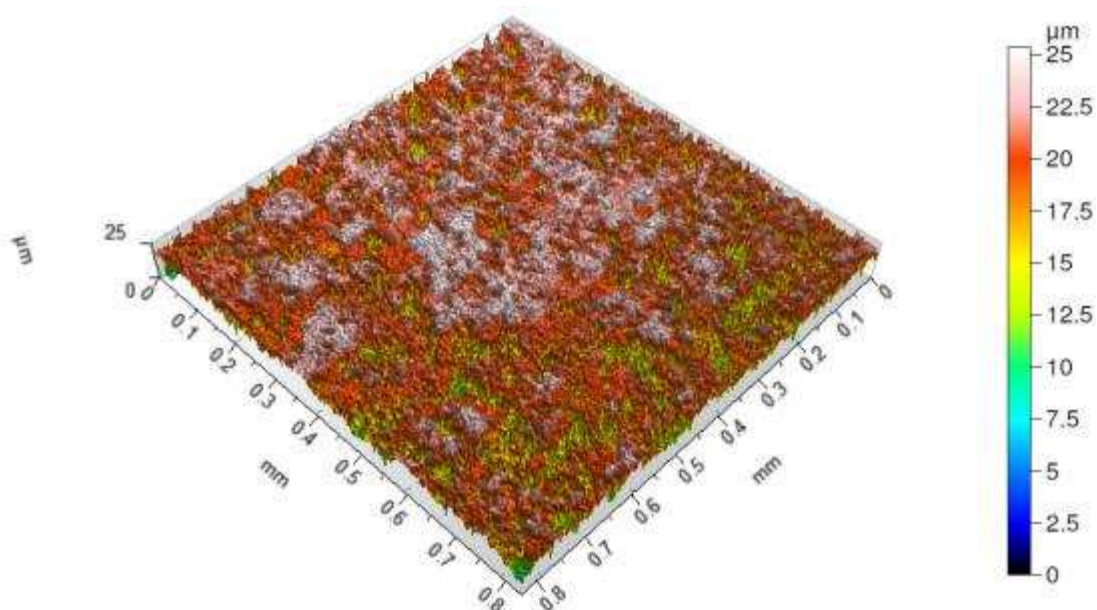


Figura 46 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 44 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 450° por 3 horas. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens, apesar do contraste, pode-se notar que o percentual de área corroída foi considerável, característica também notada nas análises superficiais. A Tabela 14 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de muitas regiões corroídas, média de 35,481%, e, em média, 0,651% da área total apresentou profundidade maior que 10 µm. A região com máxima profundidade encontrada foi de 45,16 µm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 22,306 µm.

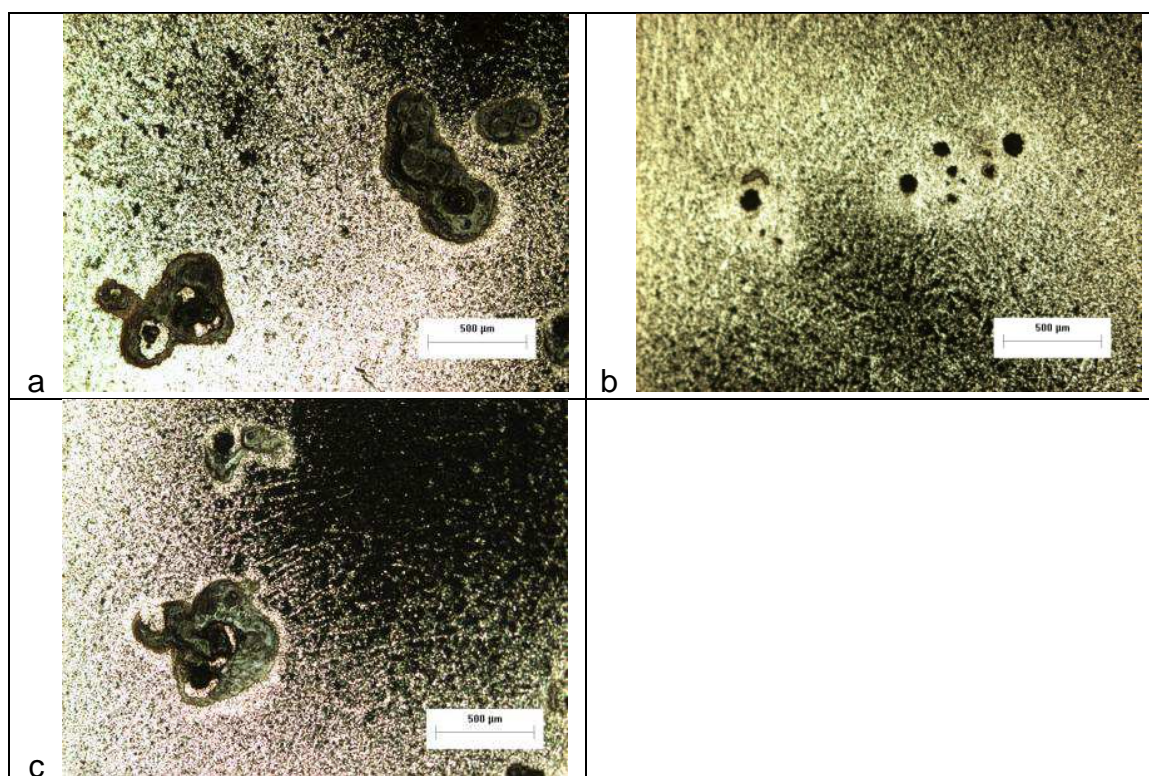


Figura 47 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 14 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 450°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 450°C 3h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 29,15 | 1,12 | 0,0002 | 12,24 |
| 2 | 48,49 | 19,12 | 1,829 | 29,59 |
| 3 | 33,55 | 4,253 | 0,1579 | 14,55 |
| 4 | 46 | 5,952 | 0,3666 | 18,45 |
| 5 | 39,69 | 0,2369 | 0,01564 | 11,31 |
| 6 | 38,44 | 0,4227 | 0,09842 | 17,95 |
| 7 | 46,4 | 0 | 0 | 4,501 |
| 8 | 18,38 | 6,306 | 2,627 | 45,16 |
| 9 | 23,82 | 1,723 | 1,164 | 34,56 |
| 10 | 30,89 | 0,7324 | 0,2537 | 34,75 |
| Média | 35,481 | 3,987 | 0,651 | 22,306 |
| Desvio padrão | 10,104 | 5,821 | 0,919 | 12,968 |
| Maior | 48,490 | 19,120 | 2,627 | 45,160 |

As Figuras 48 e 49 mostram as Imagens da amostra revenida a 600°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico. A Figura 48 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 21,14 μm .

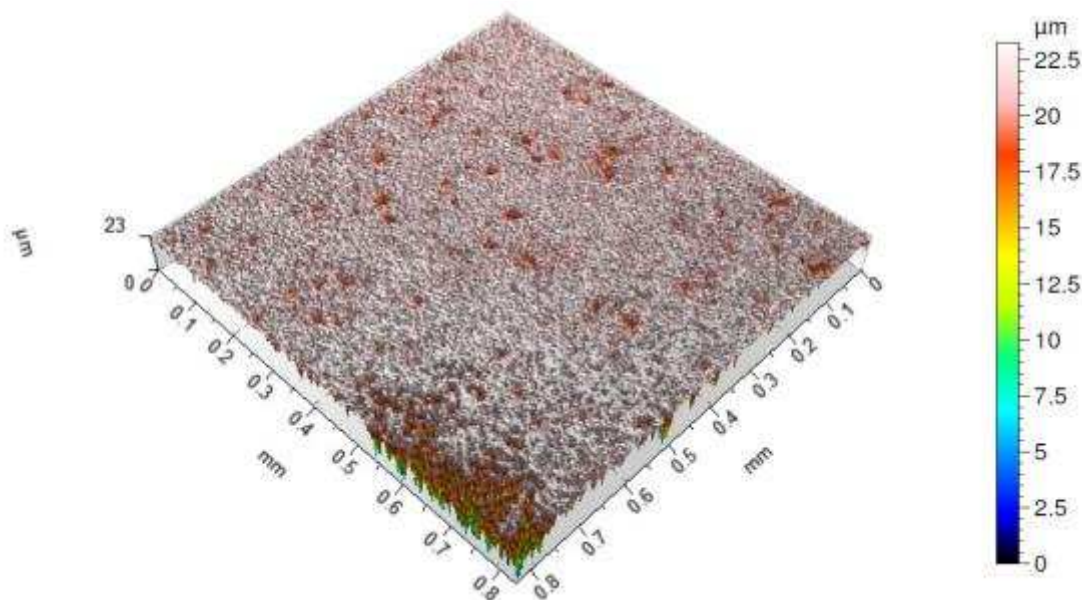


Figura 48 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 49 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída muito alta, com valor percentual de 36,21%, e uma região com profundidade máxima de 21,14 μm . A corrosão característica se apresentou com um percentual de regiões corroídas menor em relação às amostras revenida na mesma temperatura.

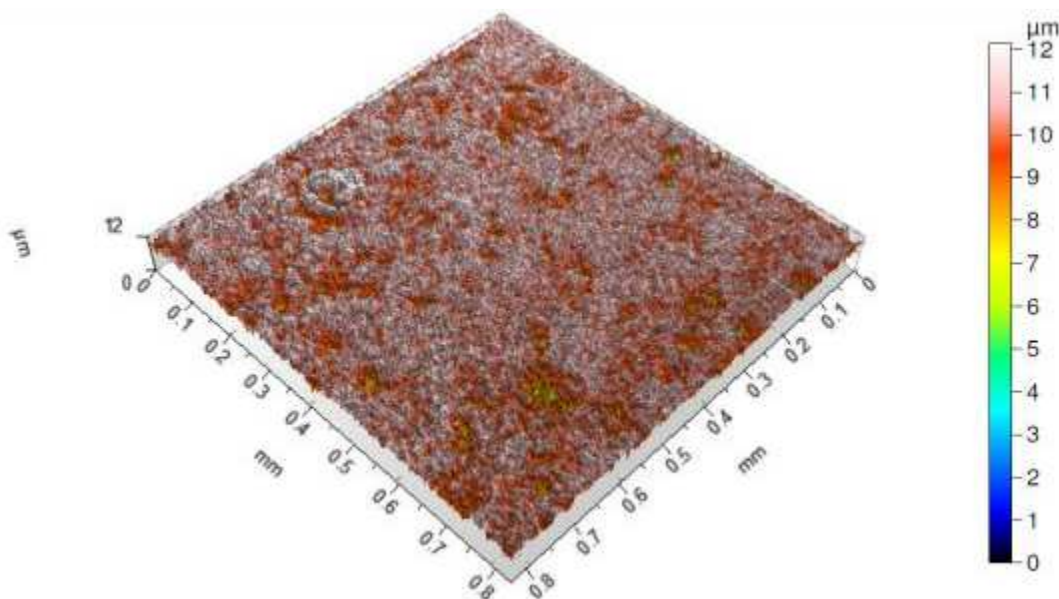


Figura 49 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 50 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 600° por 1 hora. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens, apesar do contraste, pode-se notar que o percentual de área corroída foi considerável em alguns pontos, característica também notada nas análises superficiais. A Tabela 15 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de muitas regiões corroídas, média de 42,782%, e, em média, 0,092% da área total apresentou profundidade maior que 10 µm. A região com máxima profundidade encontrada foi de 21,14 µm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 10,191µm. Em relação às amostras revenidas a 450°C e às amostras revenidas na mesma temperatura, a amostra revenida a 600°C por 1 hora apresentou o maior percentual de área corroída, porém a profundidades máximas encontradas foram menores.

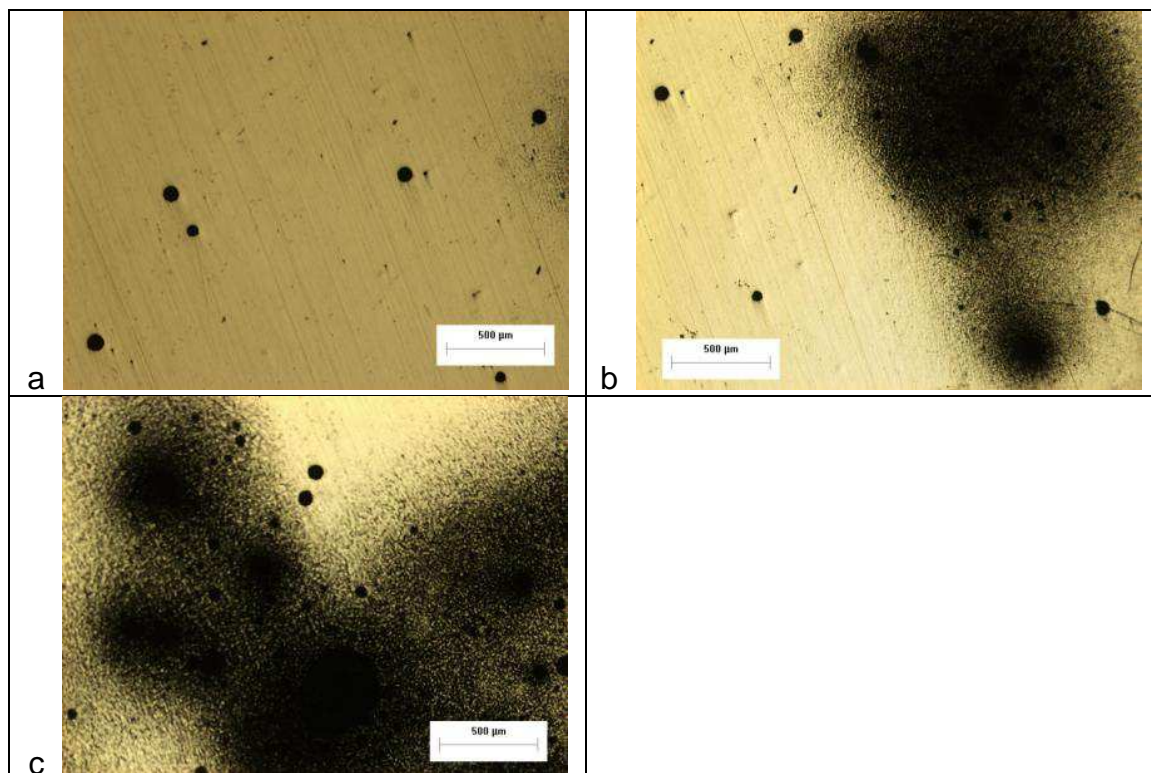


Figura 50 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 15 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 600°C durante 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 600°C 1h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 44,86 | 0,04692 | 0 | 7,935 |
| 2 | 43,42 | 0,05913 | 0 | 7,645 |
| 3 | 44,62 | 0,04387 | 0 | 6,189 |
| 4 | 40,81 | 0,7313 | 0,2037 | 14,64 |
| 5 | 43,43 | 0,06905 | 0 | 6,341 |
| 6 | 44,18 | 0,05226 | 0,0003 | 10,13 |
| 7 | 42,61 | 0,6279 | 0,08202 | 13,43 |
| 8 | 42,77 | 0,2148 | 0 | 7,313 |
| 9 | 36,21 | 2,103 | 0,6359 | 21,14 |
| 10 | 44,91 | 0,09308 | 0 | 7,151 |
| Média | 42,782 | 0,404 | 0,092 | 10,191 |
| Desvio padrão | 2,627 | 0,649 | 0,202 | 4,832 |
| Maior | 44,910 | 2,103 | 0,636 | 21,140 |

As Figuras 51 e 52 mostram as Imagens da amostra revenida a 600°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico. A Figura 51 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 50,18 µm.

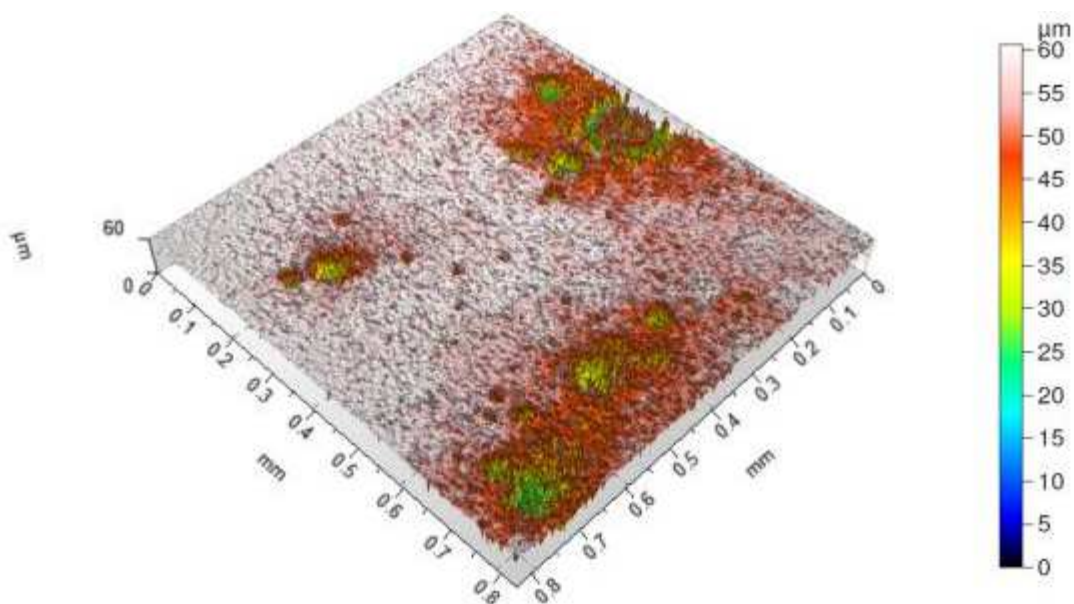


Figura 51 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 52 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída muito alta, com valor percentual de 23,15%, e uma região com profundidade máxima de 23,04 µm. A corrosão característica se apresentou com um percentual de regiões corroídas menor em relação à amostra revenida a mesma temperatura em tempo menor, porém as profundidades máximas das regiões corroídas se apresentaram maiores.

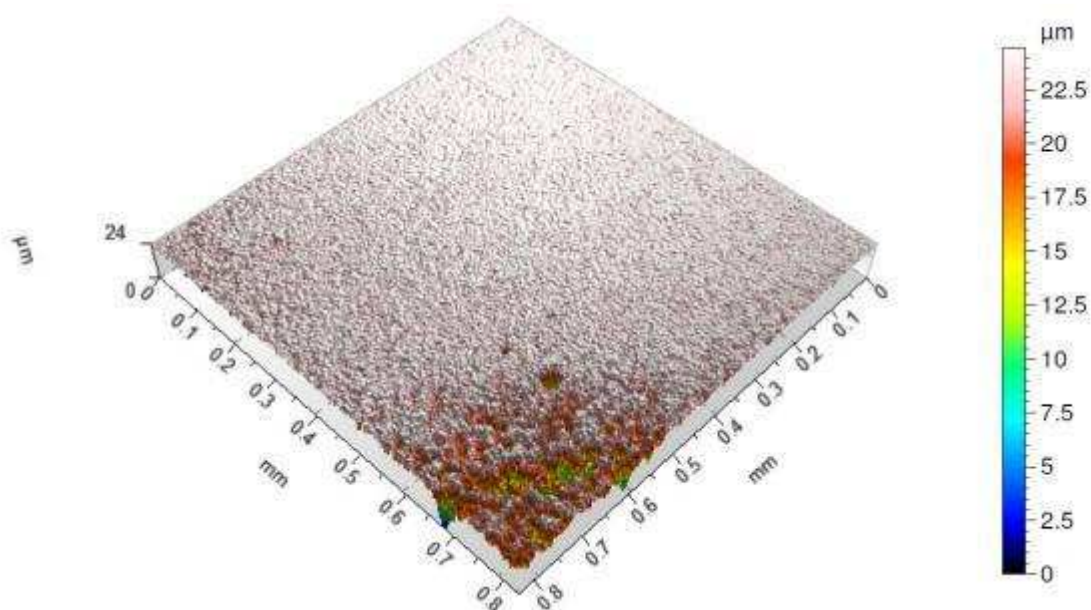


Figura 52 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 53 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 600° por 2 horas. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens, apesar do contraste, pode-se notar que o percentual de área corroída foi considerável em alguns pontos, característica também notada nas análises superficiais. A Tabela 16 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de muitas regiões corroídas, média de 37,013%, e, em média, 1,405% da área total apresentou profundidade maior que 10 μm. A região com máxima profundidade encontrada foi de 50,18 μm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 17,475 μm.

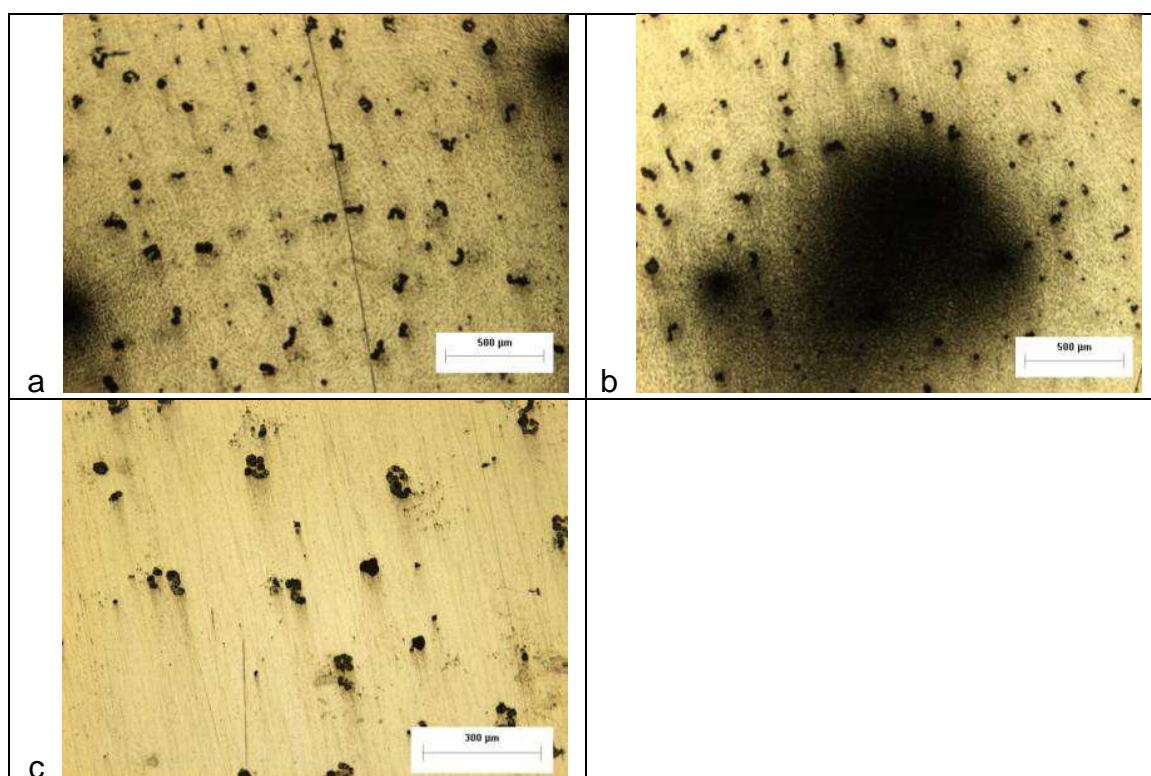


Figura 53 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 16 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 600°C durante 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 600°C 2h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 43,33 | 0 | 0 | 1,191 |
| 2 | 44,43 | 0 | 0 | 0,9117 |
| 3 | 46,18 | 0 | 0 | 2,026 |
| 4 | 35,12 | 17,83 | 10,09 | 50,18 |
| 5 | 36,52 | 6,039 | 2,075 | 33,9 |
| 6 | 23,15 | 2,296 | 0,481 | 23,04 |
| 7 | 44,91 | 0 | 0 | 1,954 |
| 8 | 19,89 | 1,754 | 0,9853 | 27,49 |
| 9 | 35,17 | 0,7999 | 0,4192 | 24,02 |
| 10 | 41,43 | 5,16 | 0,0002 | 10,04 |
| Média | 37,013 | 3,388 | 1,405 | 17,475 |
| Desvio padrão | 9,150 | 5,530 | 3,122 | 16,957 |
| Maior | 46,180 | 17,830 | 10,090 | 50,180 |

As Figuras 54 e 55 mostram as Imagens da amostra revenida a 600°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico. A Figura 54 apresenta a região com profundidade máxima dentre as medições. A maior profundidade encontrada foi de 65,09 μm .

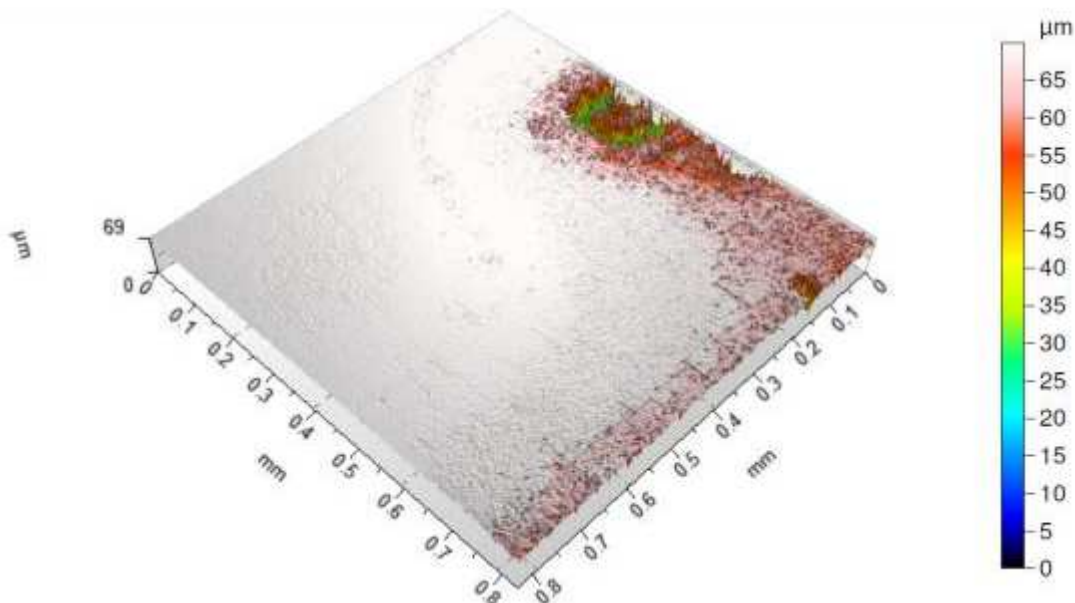


Figura 54 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 55 apresenta a característica comum encontrada nas medições. Nessa imagem pode-se notar uma área percentual corroída menor do que em outros tempos do tratamento a mesma temperatura, com valor percentual de 25,41%, e uma região com profundidade máxima de 49,46 μm . A corrosão característica se apresentou com um percentual de regiões corroídas menor em relação às amostras revenidas a mesma temperatura, porém as profundidades máximas das regiões corroídas se apresentaram as maiores.

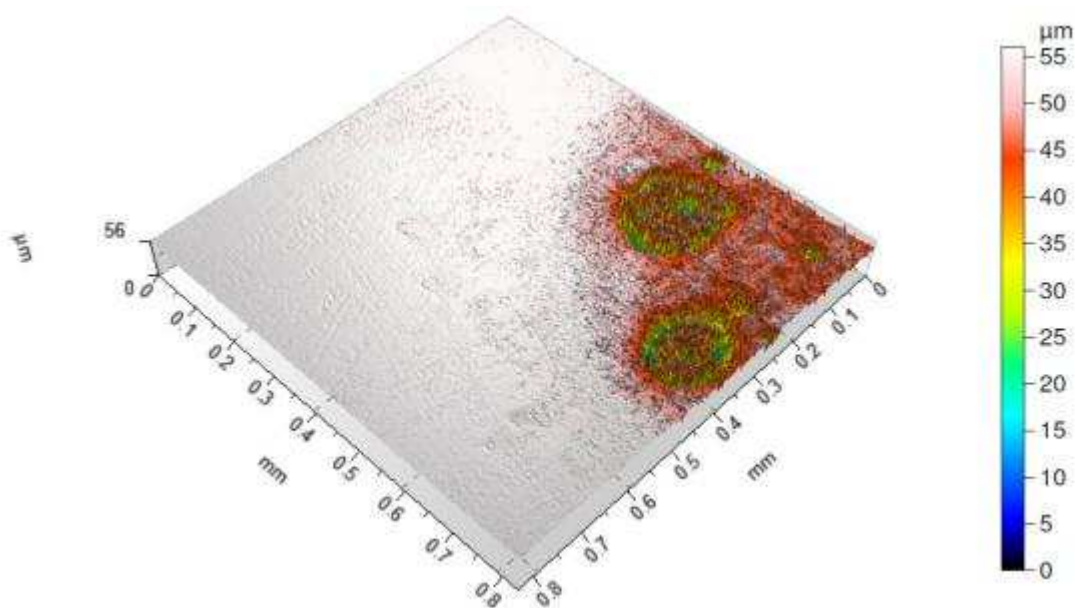


Figura 55 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

A Figura 56 apresenta as imagens obtidas em microscópio óptico para a amostra revenida a 600° por 3 horas. As metalografias encontram-se na seção Anexos. Nas imagens pode-se notar que o percentual de área corroída foi menor do que para outros tempos de tratamento na mesma temperatura, característica também notada nas análises superficiais. A Tabela 17 apresenta os dados obtidos pelo analisador de superfície para essa amostra. A característica comum foi de quantidades menores de regiões corroídas, média de 30,832%, e, em média, 2,007% da área total apresentou profundidade maior que 10 µm. A região com máxima profundidade encontrada foi de 65,09 µm e a média das profundidades máximas encontradas em cada medição foi de 25,902 µm. Para esse caso foi notável a corrosão localizada com dimensões consideráveis.

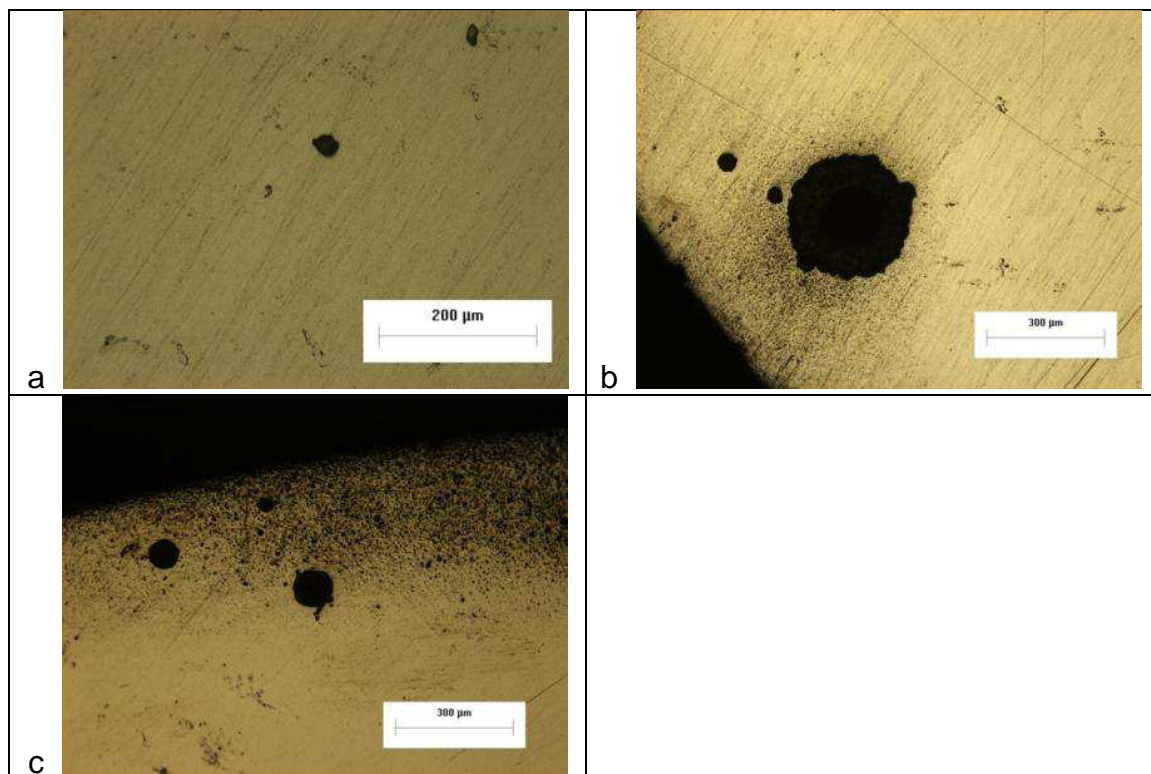


Figura 56 – Metalografias de três regiões diferentes (a), (b) e (c) da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

Tabela 17 – Dados topográficos da amostra do aço AISI 420 revenido a 600°C durante 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| 600°C 3h | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) |
|---------------|---|------------|-------------|--------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | |
| 1 | 17,98 | 8,141 | 1,477 | 44,330 |
| 2 | 22,12 | 10,37 | 4,948 | 65,09 |
| 3 | 15,7 | 2,108 | 1,28 | 33,93 |
| 4 | 46,54 | 0 | 0 | 0,6425 |
| 5 | 47,67 | 0 | 0 | 1,158 |
| 6 | 46,53 | 0 | 0 | 0,6314 |
| 7 | 36,49 | 0 | 0 | 0,6548 |
| 8 | 24,63 | 0,03624 | 0,02708 | 17,12 |
| 9 | 25,25 | 7,349 | 4,529 | 46 |
| 10 | 25,41 | 16,09 | 7,81 | 49,46 |
| Média | 30,832 | 4,409 | 2,007 | 25,902 |
| Desvio padrão | 12,373 | 5,742 | 2,779 | 24,725 |
| Maior | 47,670 | 16,090 | 7,810 | 65,090 |

A Tabela 18 resume os dados topográficos de todas as amostras revenidas e da amostra somente temperada após o ensaio eletroquímico.

Tabela 18 – Compilação dos dados topográficos das amostras do aço AISI 420 para todos os parâmetros de revenimento analisados, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³, obtidos pelo analisador de superfície.

| Parâmetros | Valor percentual de regiões corroídas (%) | | | Profundidade máxima (µm) | Profundidade máxima média (µm) |
|------------|---|------------|-------------|--------------------------|--------------------------------|
| | P > 0 µm | P > 5,0 µm | P > 10,0 µm | | |
| Temperado | 22,3030 | 0,8096 | 0,2094 | 36,420 | 17,550 |
| 300°C 1h | 18,0491 | 0,7731 | 0,2795 | 37,840 | 17,271 |
| 300°C 2h | 21,3890 | 0,6472 | 0,1139 | 28,360 | 12,171 |
| 300°C 3h | 27,9540 | 0,0319 | 0,0000 | 9,053 | 4,055 |
| 450°C 1h | 28,6900 | 2,0065 | 0,2886 | 55,790 | 21,308 |
| 450°C 2h | 26,2790 | 1,7602 | 0,2701 | 46,690 | 27,586 |
| 450°C 3h | 35,4810 | 3,9866 | 0,6512 | 45,160 | 22,306 |
| 600°C 1h | 42,7820 | 0,4041 | 0,0922 | 21,140 | 10,191 |
| 600°C 2h | 37,0130 | 3,3879 | 1,4051 | 50,180 | 17,475 |
| 600°C 3h | 30,8320 | 4,4094 | 2,0071 | 65,090 | 25,902 |

A Figura 57 apresenta um gráfico comparativo entre os percentuais de região corroída com profundidade maior do que 0 µm. Nesse gráfico nota-se que as amostras revenidas a 300°C por 1 e 2 horas apresentaram um percentual de área corroída equivalente ao material temperado, ou seja o revenido nestas condições não afetou significativamente o desempenho quanto a corrosão deste aço. Já a amostra revenida a 300°C por 3 horas e as amostras revenidas nas demais temperaturas apresentaram maior área corroída. Analisando a evolução da área corroída com o tempo pode-se verificar que: As amostras revenidas a 450°C nos tempos de 1 e 2 horas obtiveram comportamentos muito próximos. Para o caso das amostras revenidas na mesma temperatura pelo tempo de 3 horas o percentual de área corroída foi maior. Já para o caso das amostras revenidas a 600°C, quanto maior o tempo de tratamento, menor o percentual de área corroída.

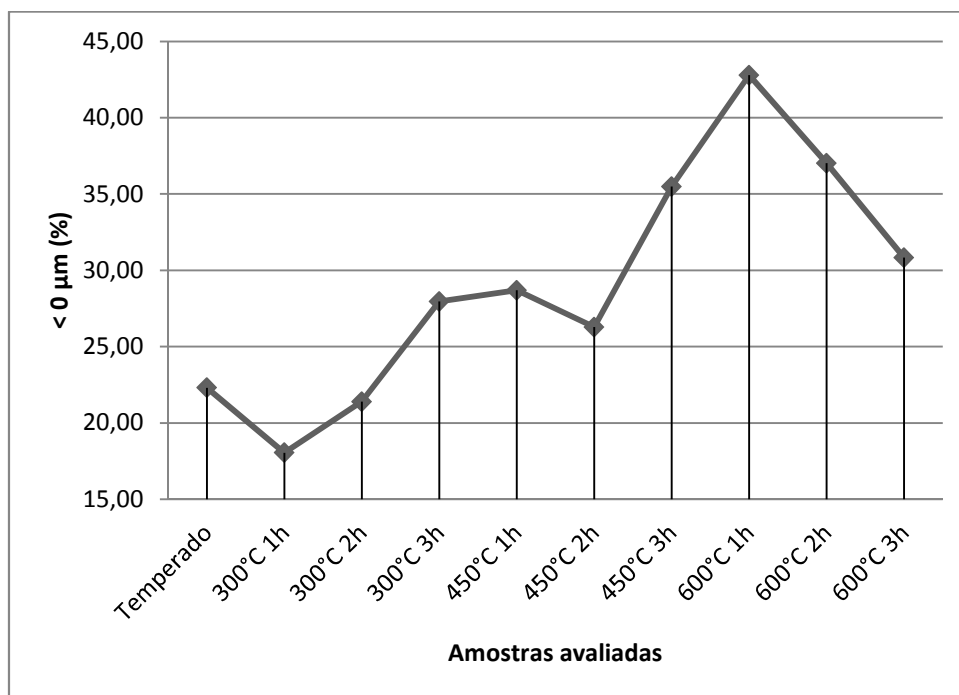


Figura 57 – Gráfico comparativo dos percentuais de regiões corroídas para o aço AISI 420, ensaiado eletroquimicamente em meio NaCl 0,5 mol/dm³, em diferentes parâmetros de revenido, cuja profundidade é maior do que 0 µm.

A Figura 58 apresenta um gráfico comparativo entre os percentuais de região corroída com profundidade maior do que 5 µm. Nesse gráfico nota-se que as amostras revenidas a 300°C por 1 e 2 horas apresentaram um percentual de área corroída equivalente ao material temperado. Já a amostra revenida a 300°C por 3 horas apresentou um percentual de área corroída com profundidade mediana ou alta menor. As amostras revenidas nas demais temperaturas apresentaram maior área corroída com profundidade maior que µm, com exceção da amostra revenida a 600°C por 1 hora. Analisando a evolução da área corroída de profundidade maior que 5 µm com o tempo pode-se verificar que: As amostras revenidas a 450°C nos tempos de 1 e 2 horas obtiveram comportamentos muito próximos. Para o caso das amostras revenidas na mesma temperatura pelo tempo de 3 horas o percentual de área corroída foi maior. Já para o caso das amostras revenidas a 600°C, quanto maior o tempo de tratamento, maior o percentual de área corroída de profundidade maior que 5 µm.

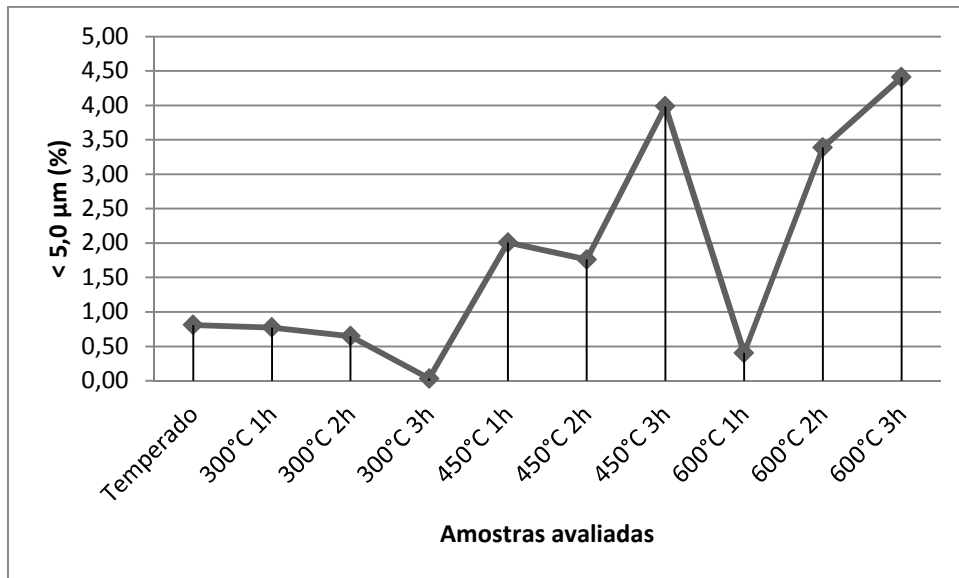


Figura 58 – Gráfico comparativo dos percentuais de regiões corroídas para o aço AISI 420, ensaiado eletroquimicamente em meio NaCl 0,5 mol/dm³, em diferentes parâmetros de revenido, cuja profundidade é maior do que 5 µm.

A Figura 59 apresenta um gráfico comparativo entre os percentuais de região corroída com profundidade maior do que 10 µm. Nesse gráfico nota-se que as amostras revenidas a 300°C por 1 e 2 horas apresentaram um percentual de área corroída, novamente, equivalente ao material temperado. Já a amostra revenida a 300°C por 3 horas não apresentou regiões com profundidade considerável. Analisando a evolução da área corroída de profundidade maior que 10 µm com o tempo pode-se verificar que: As amostras revenidas a 450°C nos tempos de 1 e 2 horas obtiveram comportamentos muito próximos. Para o caso das amostras revenidas na mesma temperatura pelo tempo de 3 horas o percentual de área corroída foi maior. Já para o caso das amostras revenidas a 600°C, quanto maior o tempo de tratamento, maior o percentual de área corroída de profundidade maior que 10 µm. Isto provavelmente deve estar associando a redução do gradiente químico do cromo na vizinhança dos precipitados de carboneto de cromo conforme apresentado na Figura 1.

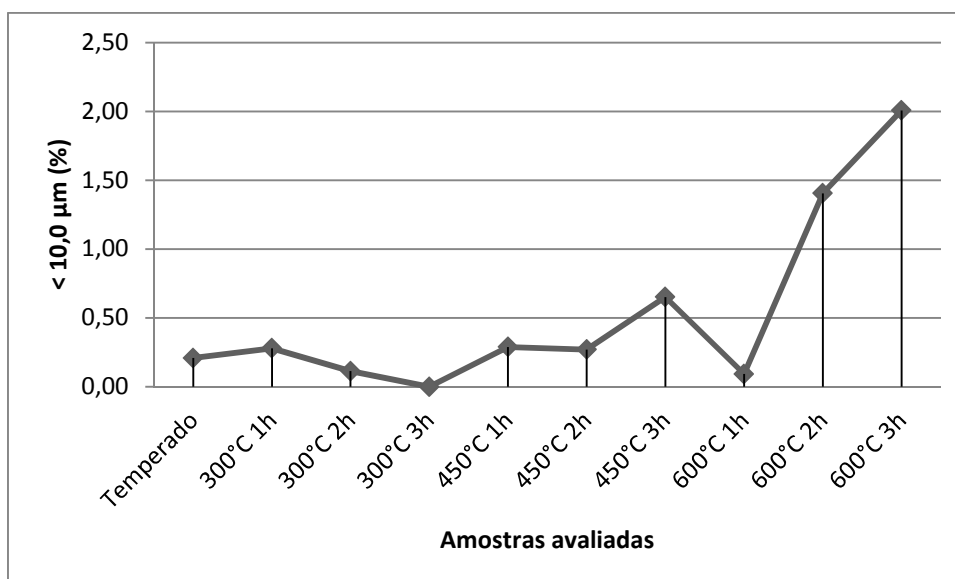


Figura 59 – Gráfico comparativo dos percentuais de regiões corroídas para o aço AISI 420, ensaiado eletroquimicamente em meio NaCl 0,5 mol/dm³, em diferentes parâmetros de revenido, cuja profundidade é maior do que 10 µm.

A Figura 60 apresenta dois gráficos comparativos entre as profundidades máximas e as profundidades máximas médias das áreas corroídas encontradas. Nesses gráficos nota-se que as amostras revenidas a 300°C por 1 e 2 horas apresentaram profundidades máximas próximas, equivalentes às do material temperado. Já a amostra revenida a 300°C por 3 horas apresentou as menores profundidades máximas encontradas. Analisando a evolução das profundidades com o tempo de tratamento: As amostras revenidas a 450°C nos tempos de 1, 2 e 3 horas obtiveram profundidades máximas próximas, já para o caso das profundidades máximas, quanto menor o tempo, menor a profundidade máxima encontrada. No caso das amostras revenidas a 600°C, quanto maior o tempo de tratamento, maiores as profundidades.

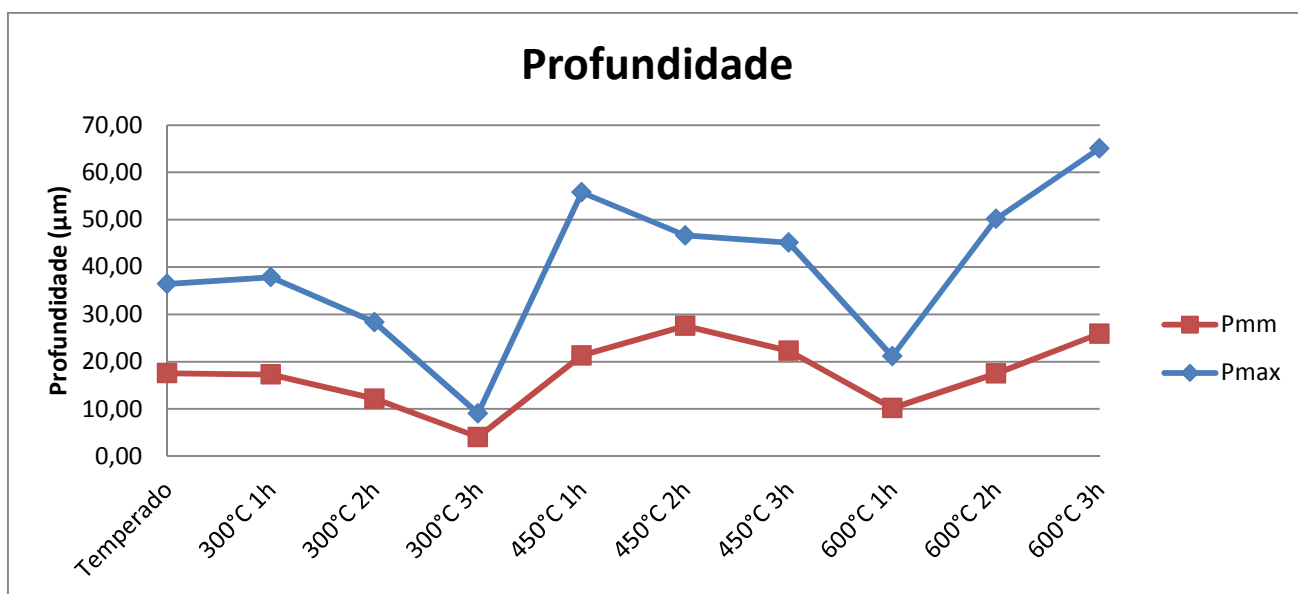


Figura 60 – Gráficos comparativos das regiões corroídas com profundidades máximas e profundidades máximas médias encontradas para o aço AISI 420, ensaiado eletroquimicamente em meio NaCl 0,5 mol/dm³, em diferentes parâmetros de revenido.

5 CONCLUSÕES

5.1 Efeito do revenimento na dureza

O tratamento de têmpera apresentou o maior valor de dureza, 599 HV. Após os tratamentos de revenido as durezas diminuíram.

5.2 Efeito do revenimento na resistência à corrosão

A amostra temperada apresentou baixo percentual de regiões corroídas, porém, essas regiões se apresentaram com profundidade considerável. Para as amostras revenidas, as que apresentaram comportamento semelhante foram as amostras tratadas a 300°C por 1 e 2 horas. Para temperaturas altas de revenimento o percentual de regiões corroídas se apresentou maior.

5.3 Efeito da temperatura de revenimento na dureza

Dentre as amostras que sofreram tratamentos de revenido, as que apresentaram os maiores valores de dureza foram as amostras de 300°C, 450°C e 500°C. Nas curvas de dureza nota-se que ocorre uma deflexão para as temperaturas de 350°C e 400°C, ocorrendo uma diminuição da dureza. A partir de 550°C as durezas se apresentaram as menores.

5.4 Efeito da temperatura de revenimento na resistência à corrosão

Em se tratando dos parâmetros avaliados com relação à resistência à corrosão, quanto maior a temperatura de revenimento, pior a resistência à corrosão, de maneira geral. As exceções ocorrem para as amostras revenidas a 450°C durante 3 horas e a 600°C por 1 hora. A primeira apresentou um percentual maior de regiões corroídas localmente em relação à outra.

5.5 Efeito do tempo de revenimento na dureza

Dentre as amostras revenidas, aquelas tratadas nas temperaturas de 350°C, 400°C e 500°C não apresentaram variação da dureza quando o tempo de tratamento foi alterado. Para as amostras revenidas a 300°C e 450°C quanto maior o tempo, maior a dureza encontrada. No caso das amostras revenidas a 600°C, quanto maior o tempo, menor a dureza.

5.6 Efeito do tempo de revenimento na resistência à corrosão

Em se tratando dos parâmetros avaliados com relação à resistência à corrosão, os parâmetros foram analisados separadamente. No caso das amostras tratadas a 300°C, os menores tempos apresentaram comportamento semelhante ao da amostra somente temperada. Esse comportamento característico foi de poucas regiões corroídas, porém com profundidade considerável. Para a amostra tratada na mesma temperatura durante 3 horas, a região corroída se apresentou maior, porém com pequena profundidade. Assim supõe-se que o tempo foi suficiente para minimizar os tempos de revenimento.

No caso das amostras tratadas a 450°C, os comportamentos daquelas tratadas por 1 e 2 horas foram semelhantes, apresentando um percentual de região corroída próximo ao da amostra tratada a 300°C por 3 horas, porém com profundidades máximas maiores. Para o caso da amostra tratada por 3 horas, o percentual de regiões corroídas aumentou, tanto para corrosão superficial quanto para a corrosão localizada.

Para as amostras tratadas a 600°C, quanto menores os tempos de tratamento, menor o percentual de regiões corroídas. Porém quanto maior o tempo, menores os percentuais de regiões corroídas com profundidade considerável, assim como para as profundidades máximas encontradas. Dessa maneira, supõe-se que para tempos maiores de tratamento para essa temperatura, o percentual de precipitados de carbonetos de cromo aumenta, situação semelhante a das amostras tratadas a 450°C

5.7 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar a resistência à corrosão para outros aços inoxidáveis martensíticos;
- Estudar os efeitos de outros meios em relação à resistência à corrosão do material, em especial, meios contendo sulfetos;
- Avaliar o efeito de outras temperaturas de revenido, a fim de comparar com os resultados já obtidos, obtendo um traçado mais confiável das curvas;
- Estudar a técnica do menisco, a fim de melhorar sua confiabilidade;
- Estudar a técnica de quantificação de área corroída utilizando analisadores de superfície.

REFERÊNCIAS

ATLAS ZUR WÄRMEBEHANDLUNG DER STÄHLE. **VerlagStahleisenmbH**. Dusseldorf, Germany, 1954, vol 1, p 128.

ASM INTERNATIONAL. **ASM HANDBOOK**. Materials Park, Ohio: ASM International, c1985-c2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 6th ed. São Paulo, SP: ABM, 1988. 576p.

FONTANA, Mars G. ; GREENE, Norbert D. **Corrosion engineering**. 2nd ed. Auckland: Mcgraw-Hill International, c1978. 465 p.

KUO, K..**Journal of the Iron and Steel Institute**. Vol. 181, pp.128, 134, 181, 218.

LIPPOLD, John C.; DAMIAN, Kotecki.J.. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. Canada. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. 2005.

MARIANO, Neide A.; MUROLO, João P..**Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e Resistência à Corrosão da Liga 12Cr1,8Ni0,1C**.Revista Matéria, v. 11, n. 2, pp. 138 – 145, 2006.

MARTINS, Marcelo; BONAVINA, Luis F.. **Efeito da temperatura na microestrutura do aço ASTM A890 GR 6A**.58° CONGRESSO ANUAL DA ABM, de 21 a 24 de Julho de 2003, Rio de Janeiro –RJ.

MORONA, Marcelo T.. **Ensaio eletroquímicos e influência da nitretação à plasma na resistência à corrosão do aço inoxidável ISO 5832-1**. Dissertação de Mestrado. UTFPR, pp. 56 – 57, 2007.

NACE MR0175/ISO 15156-3. **Petroleu'm and natural gas industries - Materials for use in H2S containing environments in oil and gas production**, 2009. 26p.

PANOSSIAN, Zehbour. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo: IPT, 1993. 2 v.

ROCHA, H. J. Dew. **TechnischeBerichte**. Vol. 2, p. 16, 1962.

SCHEUER, **Cementação a baixa temperatura do aço inoxidável martensítico AISI 420assistida por plasma**. Dissertação de Mestrado. UFPR, p. 24, 2011.

SHIH, Hong, et al. **Corrosion Resistance**. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. 472p.

THOMAS, José E. , et al. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2004. xvi, 271 p.

TOTTEN, George E.. **Steel heat treatment handbook**. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, c2007. 713 p.

UHLIG, Herbert H.. **The corrosion handbook**. New York: J. Wiley, c1948. 1188p.

<http://www.idm-instrumentos.es>. Acesso em: 09 de maio de 2012. 16:35.

ANEXOS

METALOGRAFIAS

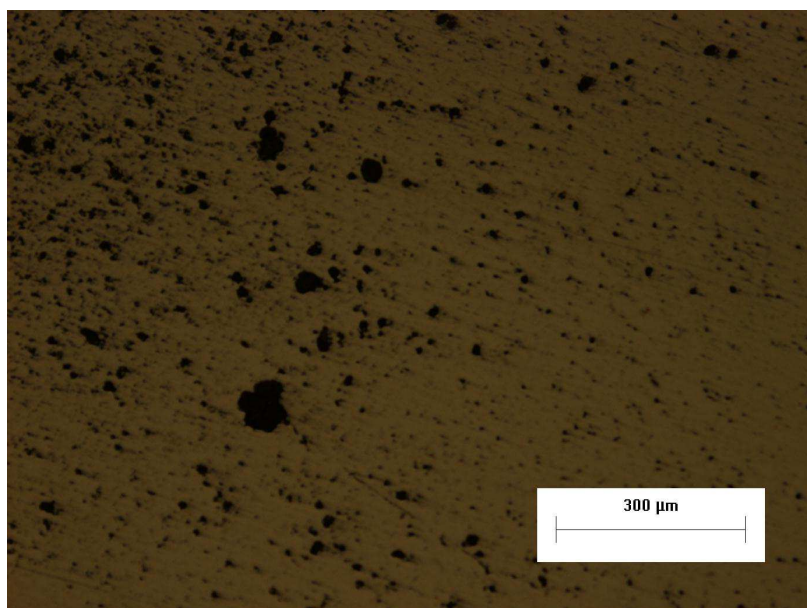


Figura 61 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 300°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

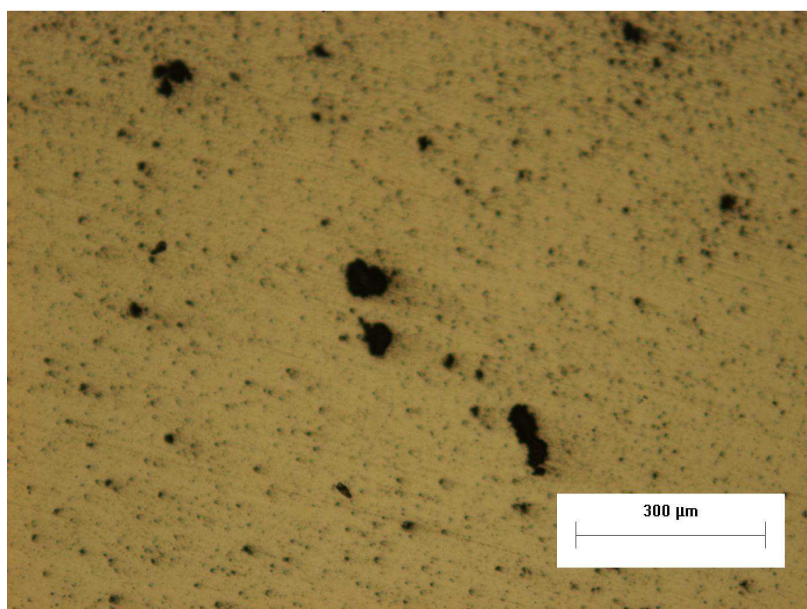


Figura 62 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 300°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

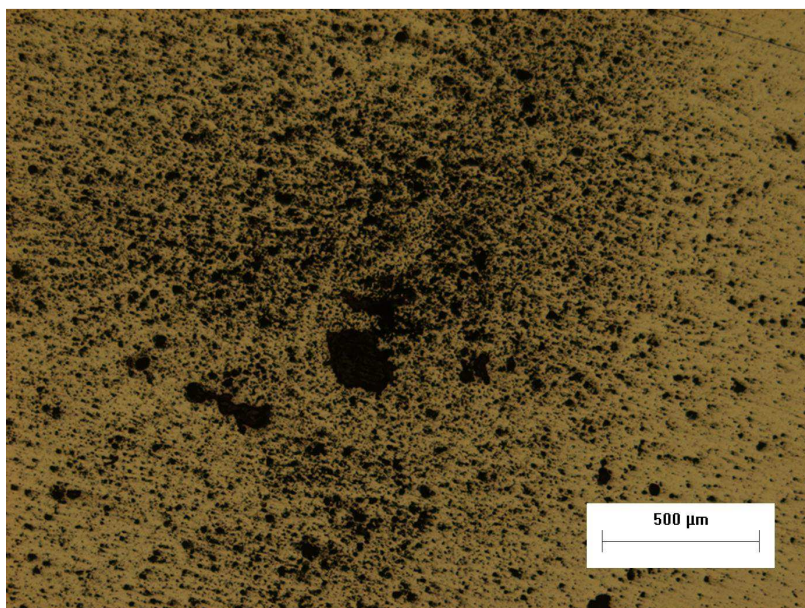


Figura 63 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 300°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

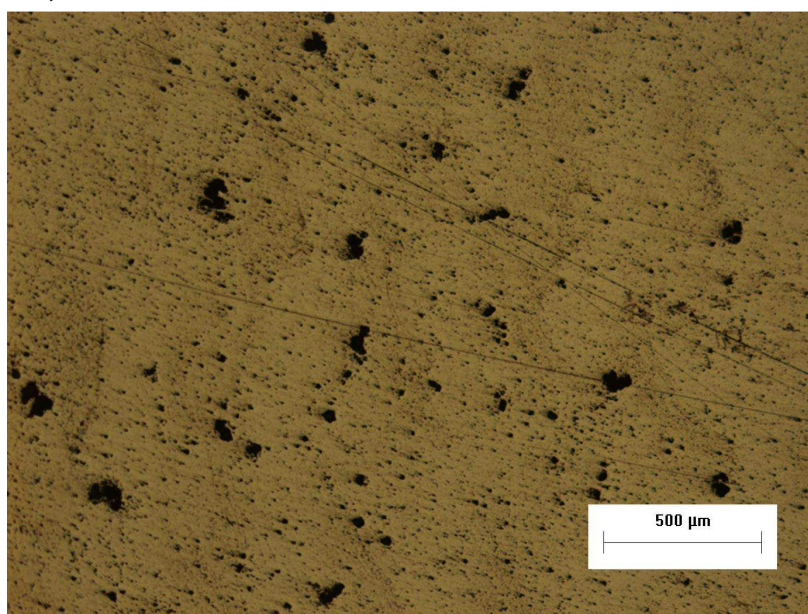


Figura 64 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 300°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

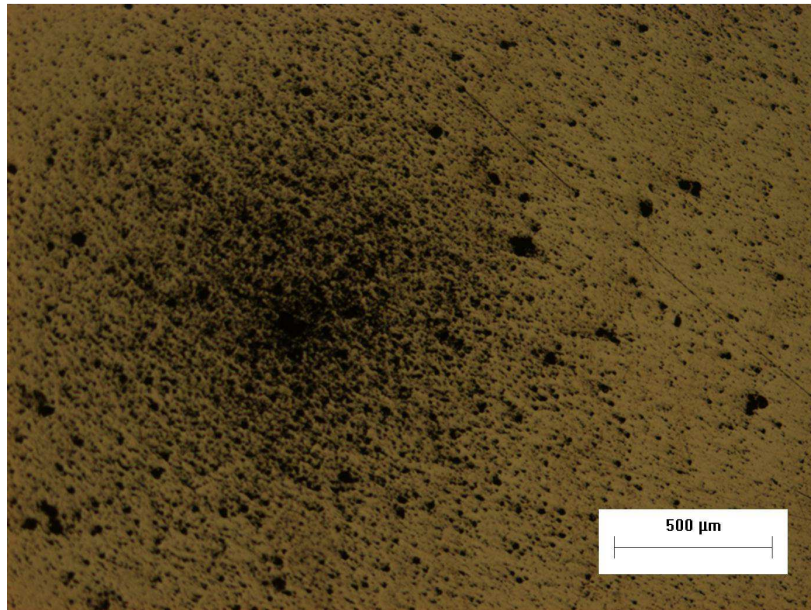


Figura 65 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 300°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

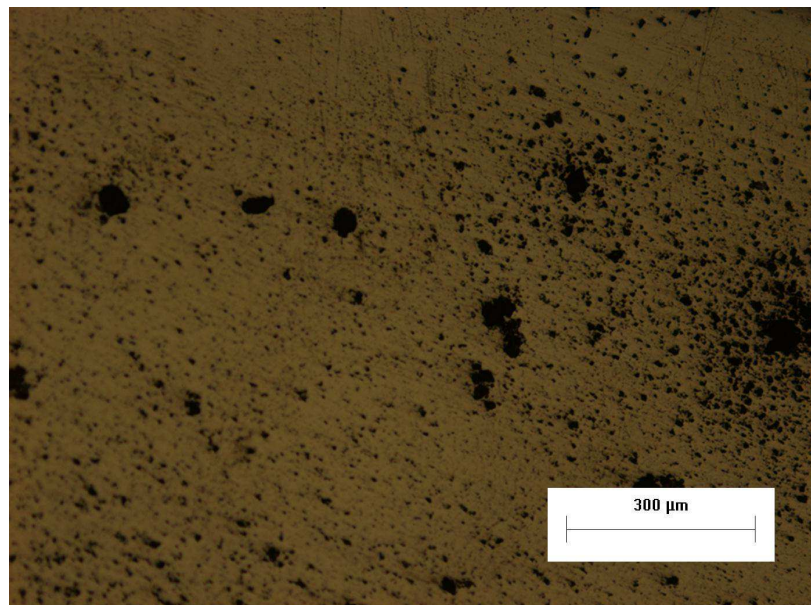


Figura 66 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 300°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

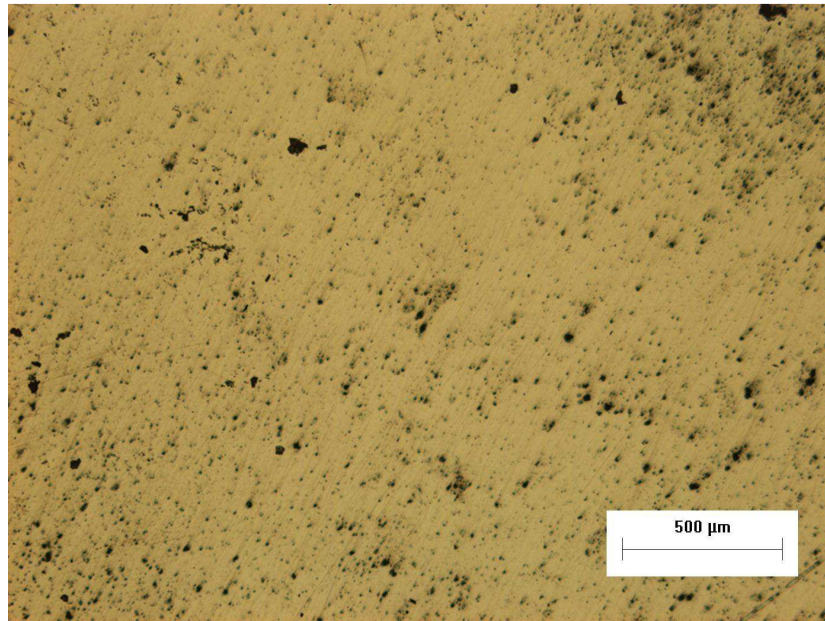


Figura 67 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 300°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

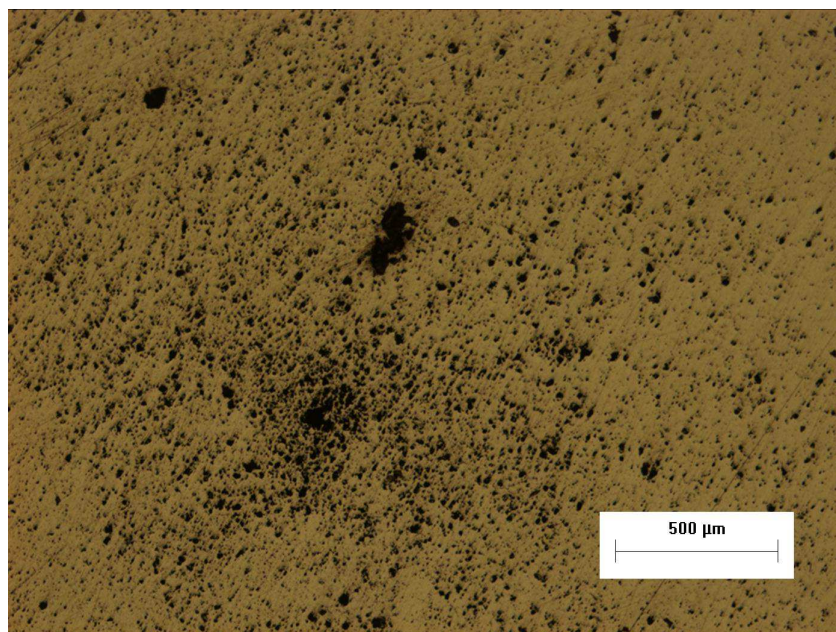


Figura 68 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 300°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

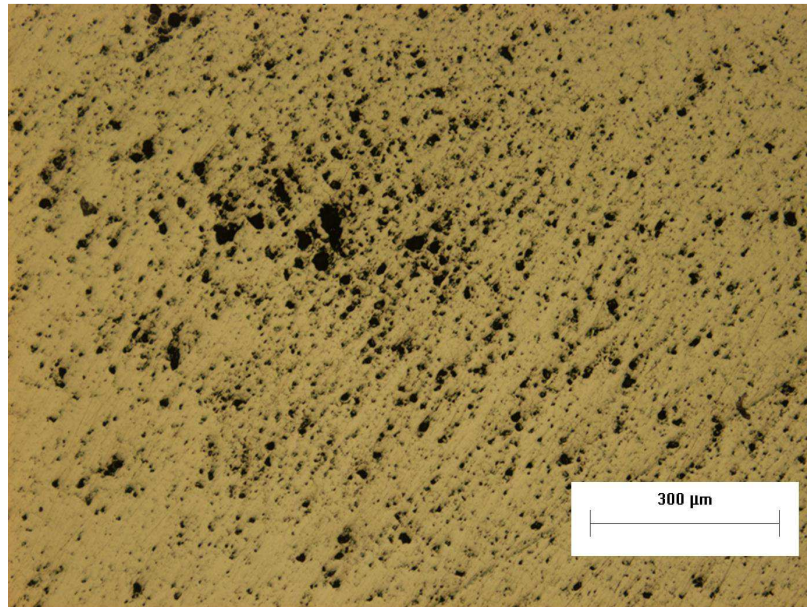


Figura 69 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 300°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

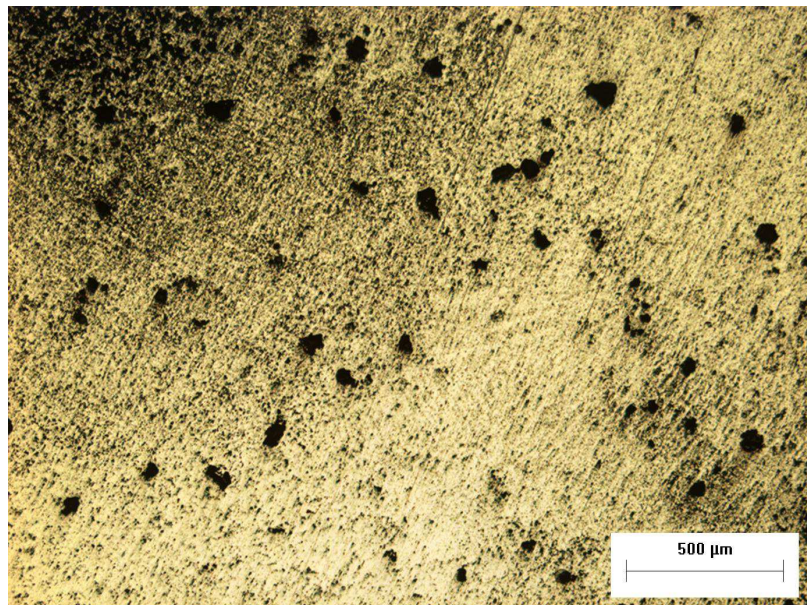


Figura 70 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 450°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

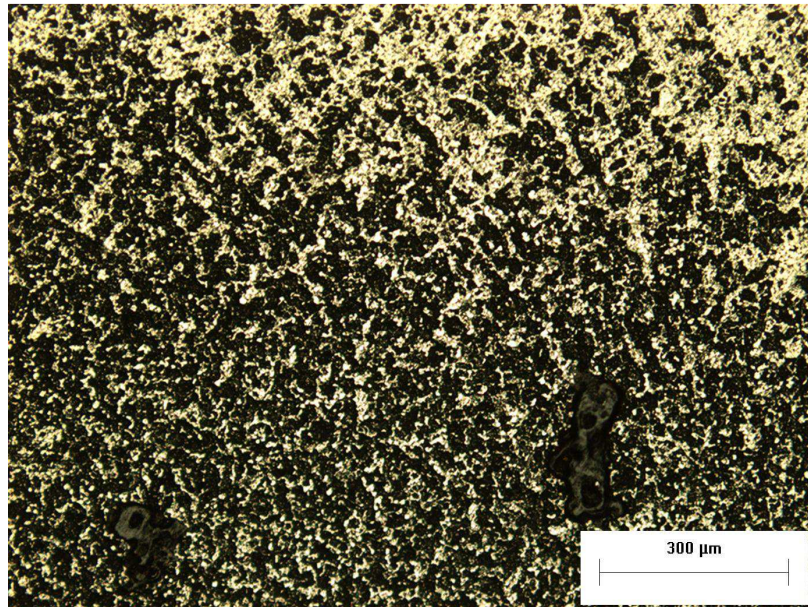


Figura 71 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 450°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

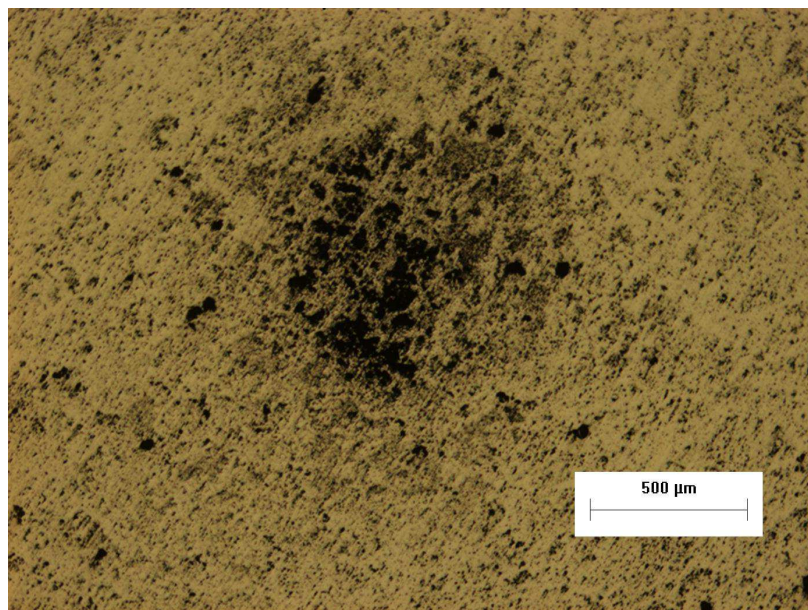


Figura 72 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 450°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

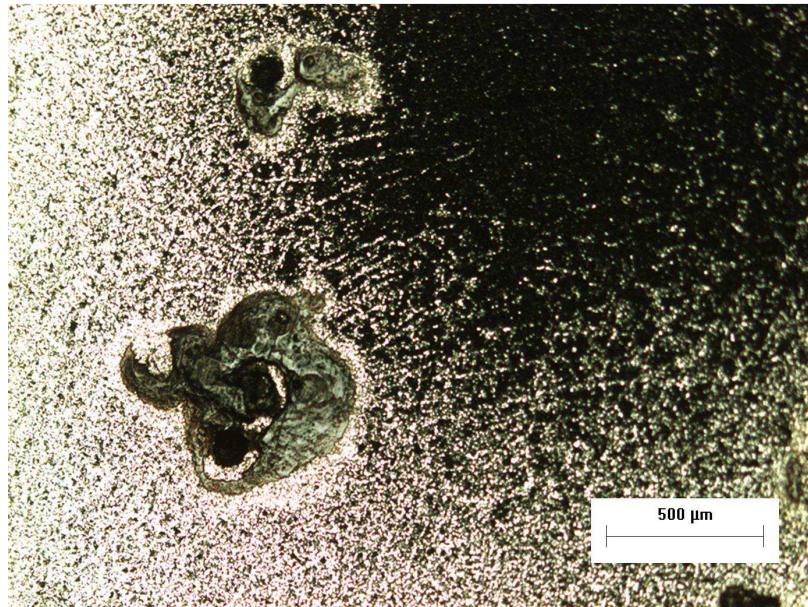


Figura 73 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 450°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

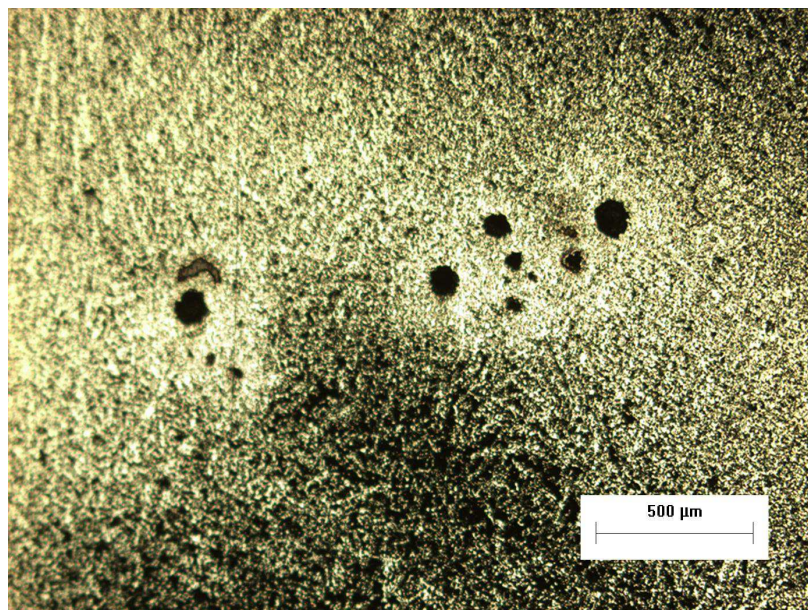


Figura 74 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 450°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

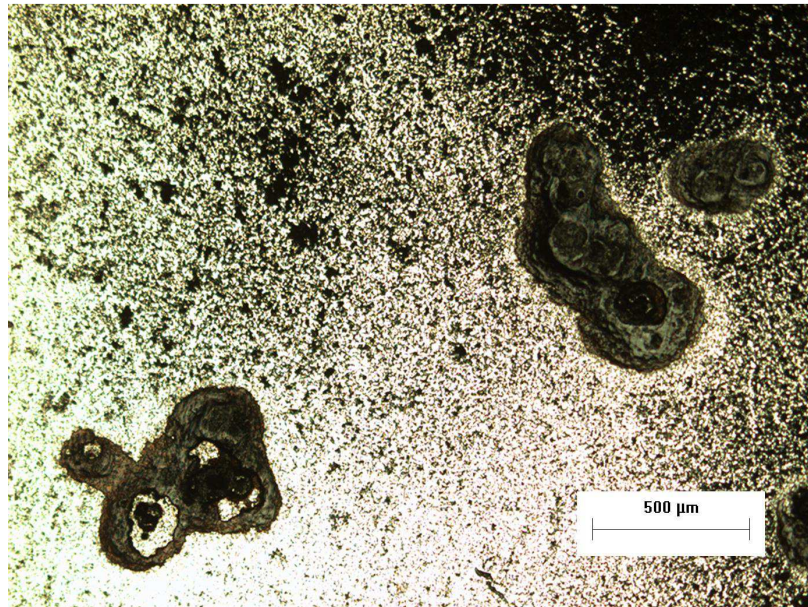


Figura 75 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 450°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

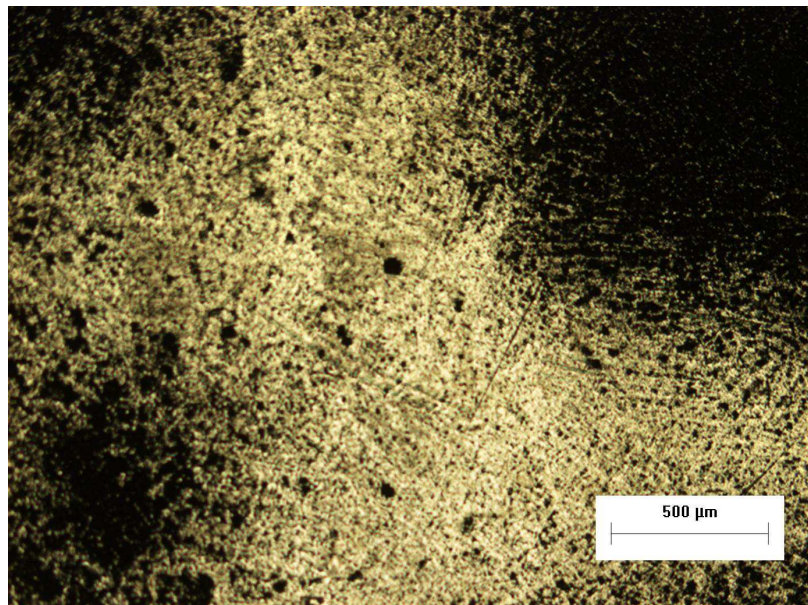


Figura 76 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 450°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

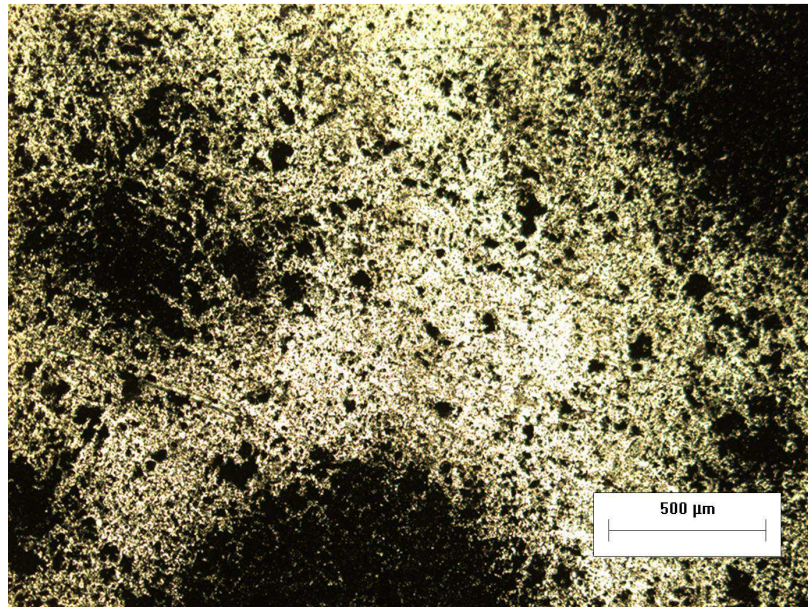


Figura 77 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 450°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

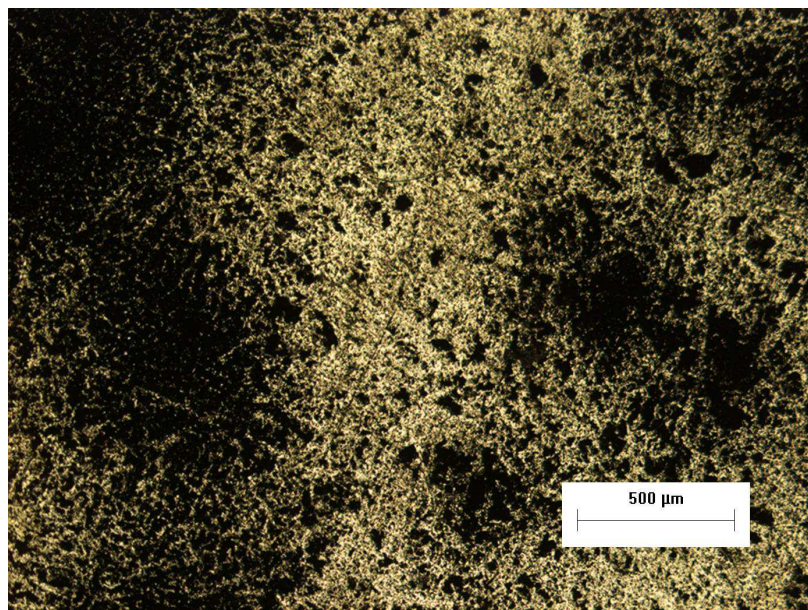


Figura 78 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 450°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

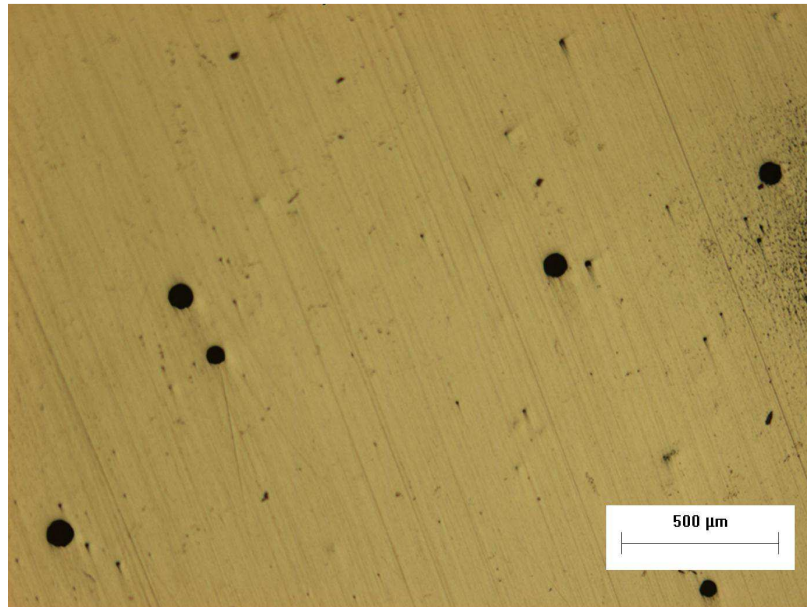


Figura 79 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 600°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

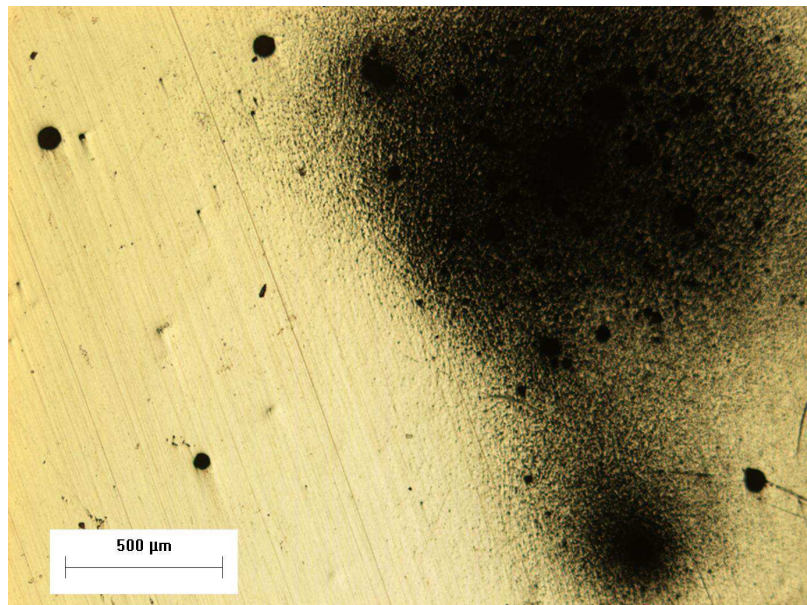


Figura 80 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 600°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

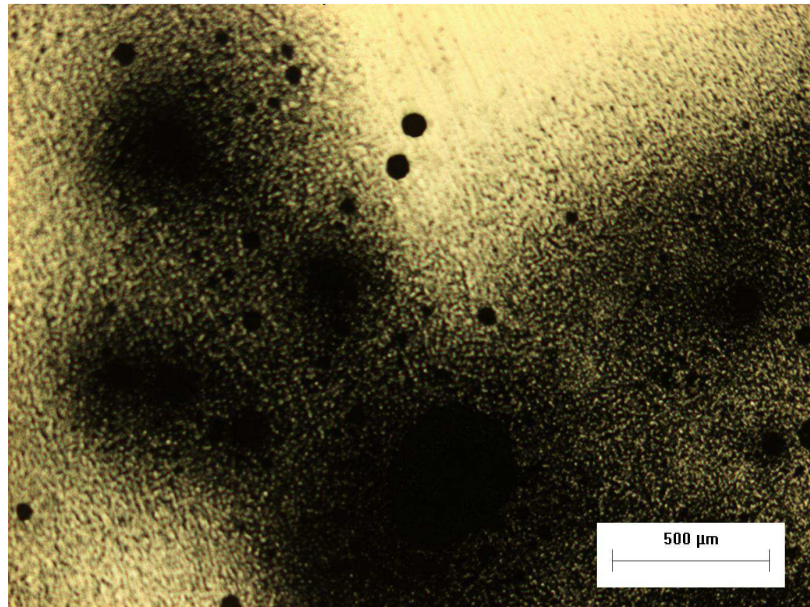


Figura 81 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 600°C 1h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

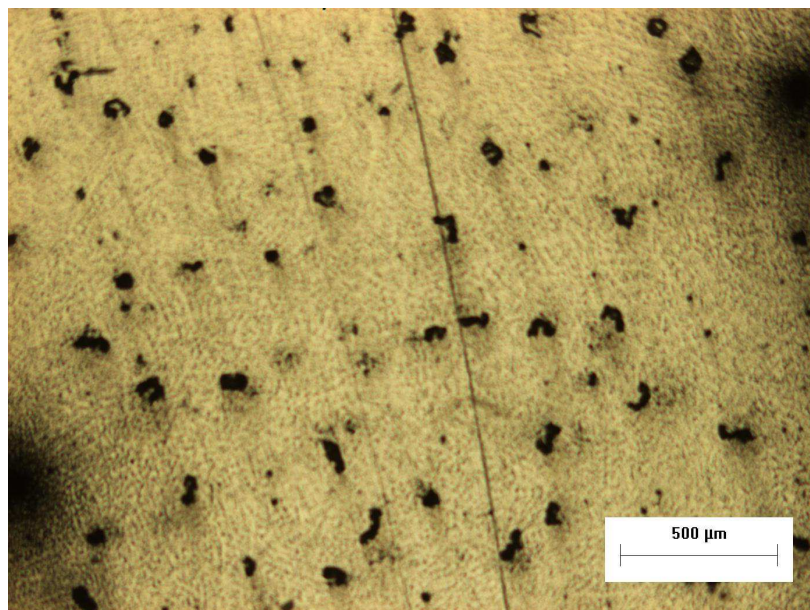


Figura 82 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 600°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

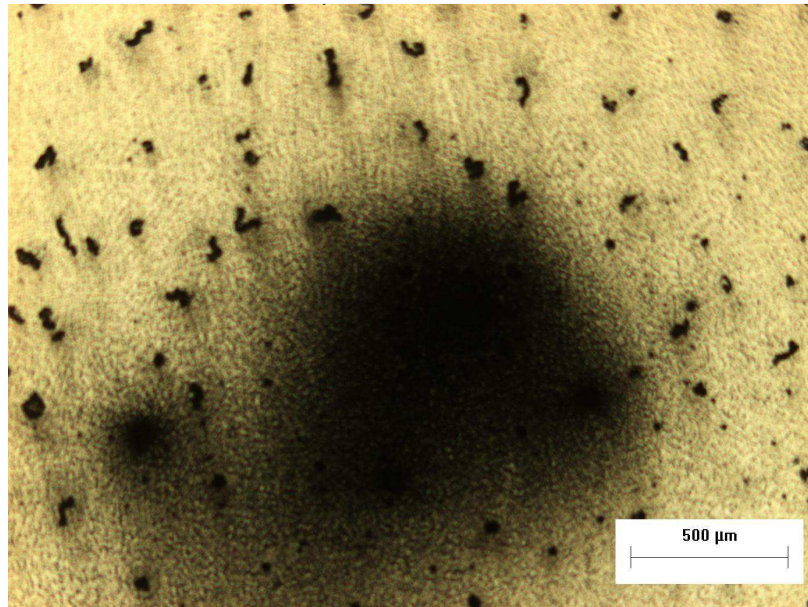


Figura 83 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 600°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

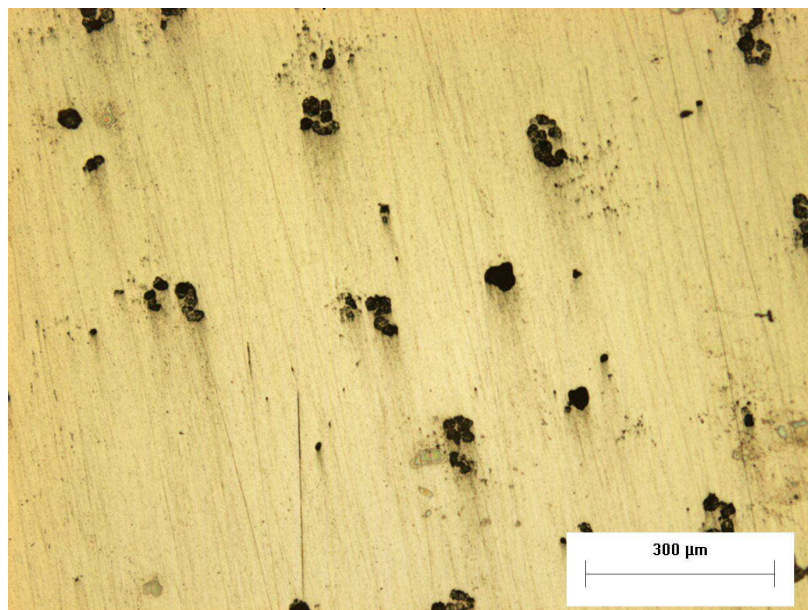


Figura 84 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 600°C 2h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

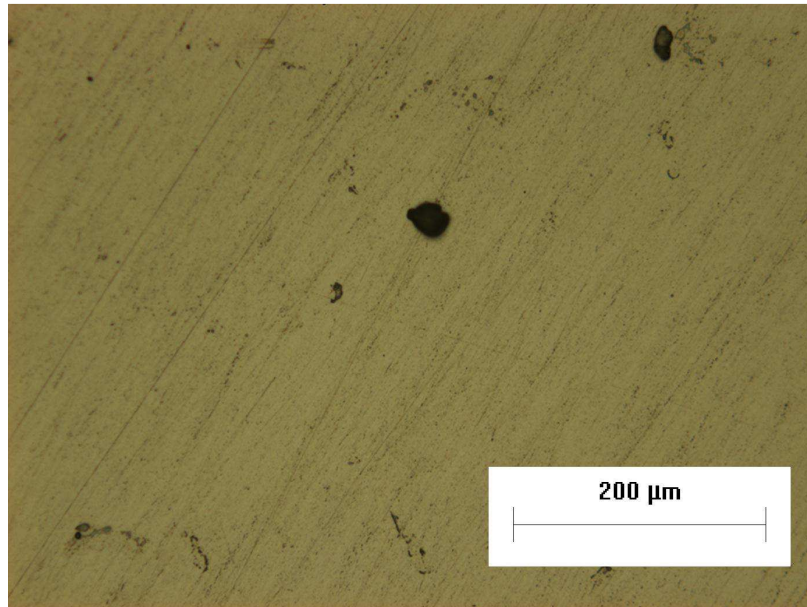


Figura 85 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova 600°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

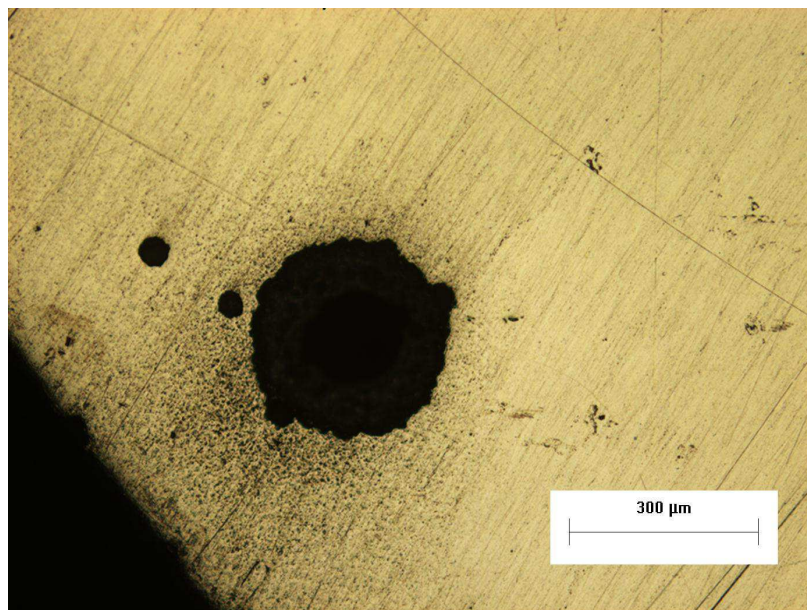


Figura 86 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova 600°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

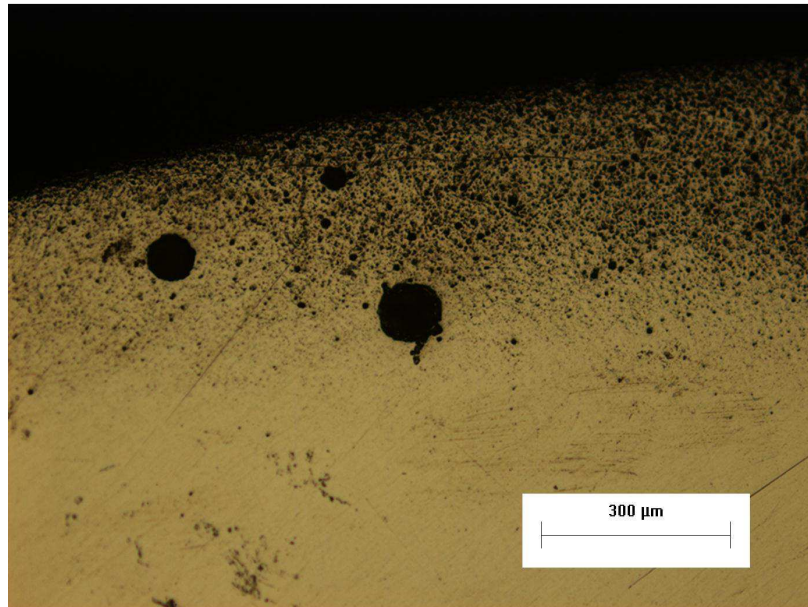


Figura 87 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova 600°C 3h após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

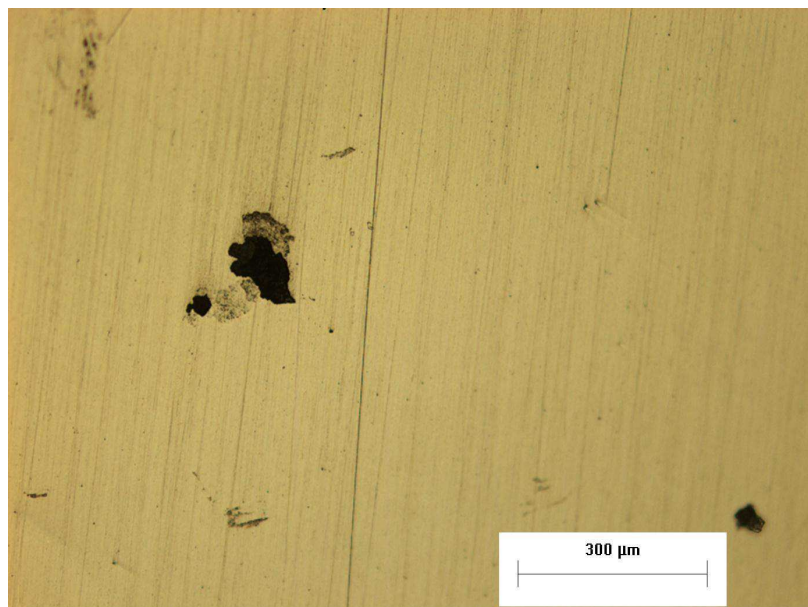


Figura 88 – Micrografia obtida em microscópio óptico eletrônico referente ao ensaio 1 do corpo de prova Temperado após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

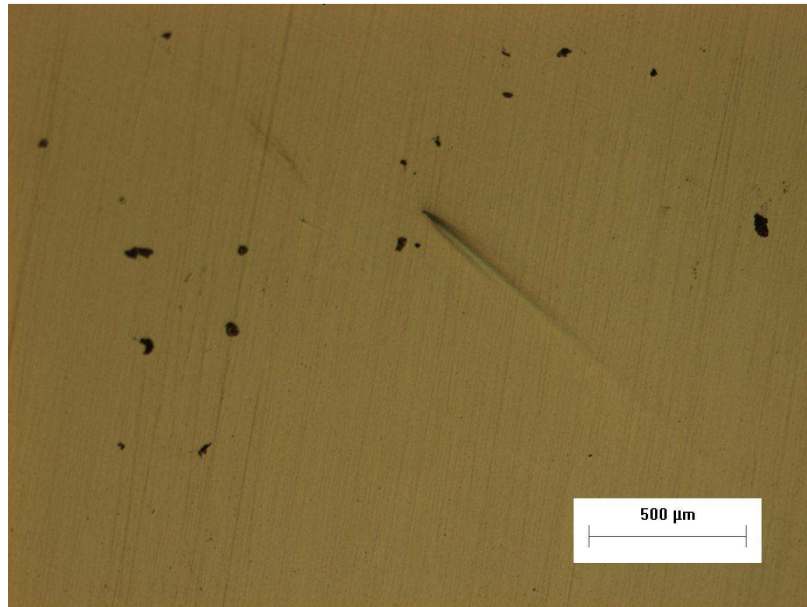


Figura 89 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 2 do corpo de prova Temperado após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

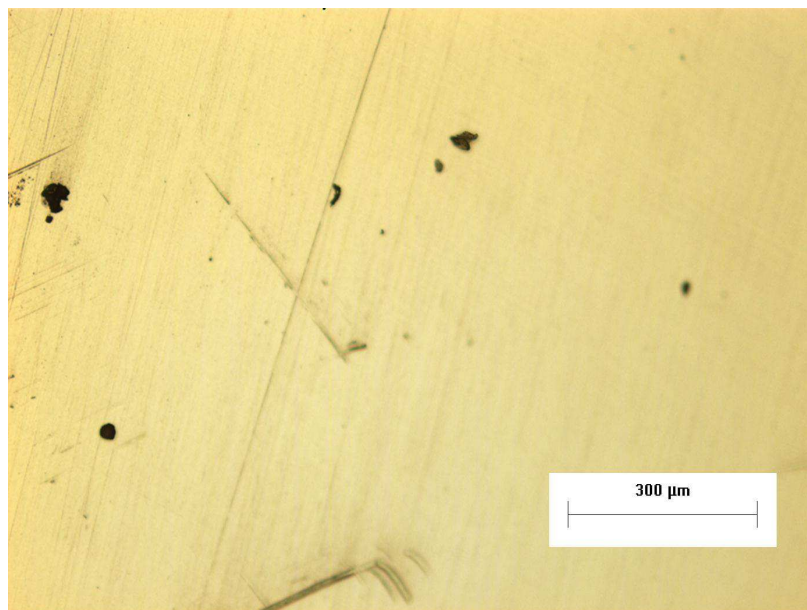


Figura 90 – Micrografia obtida em microscópio ótico eletrônico referente ao ensaio 3 do corpo de prova Temperado após ensaio potenciodinâmico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

IMAGENS OBTIDAS NO RUGOSÍMETRO

Seguem as imagens das amostras após os ensaios potenciodinâmicos em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

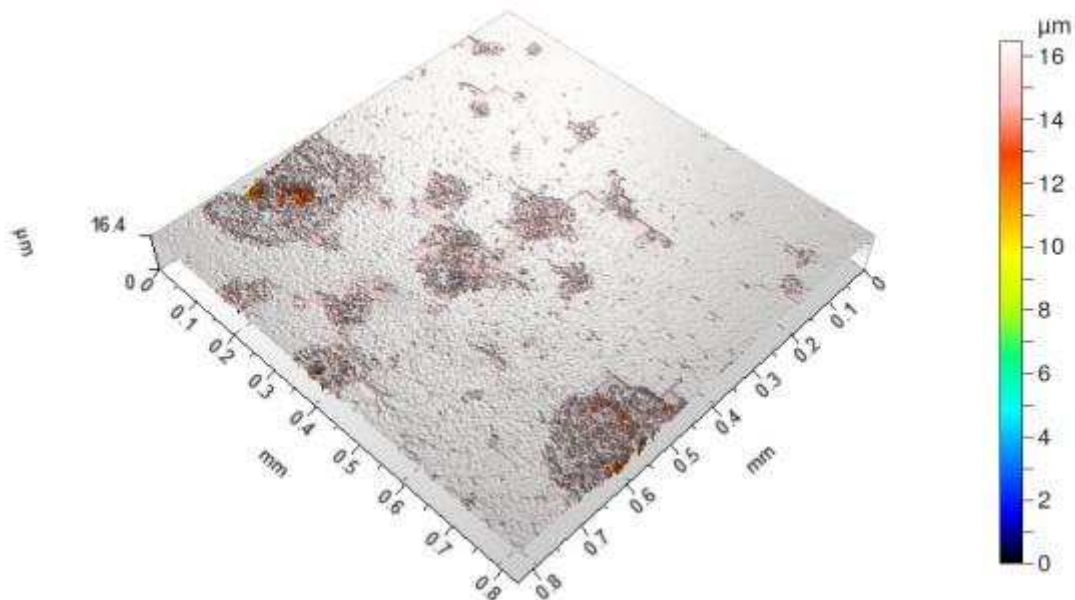


Figura 91 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

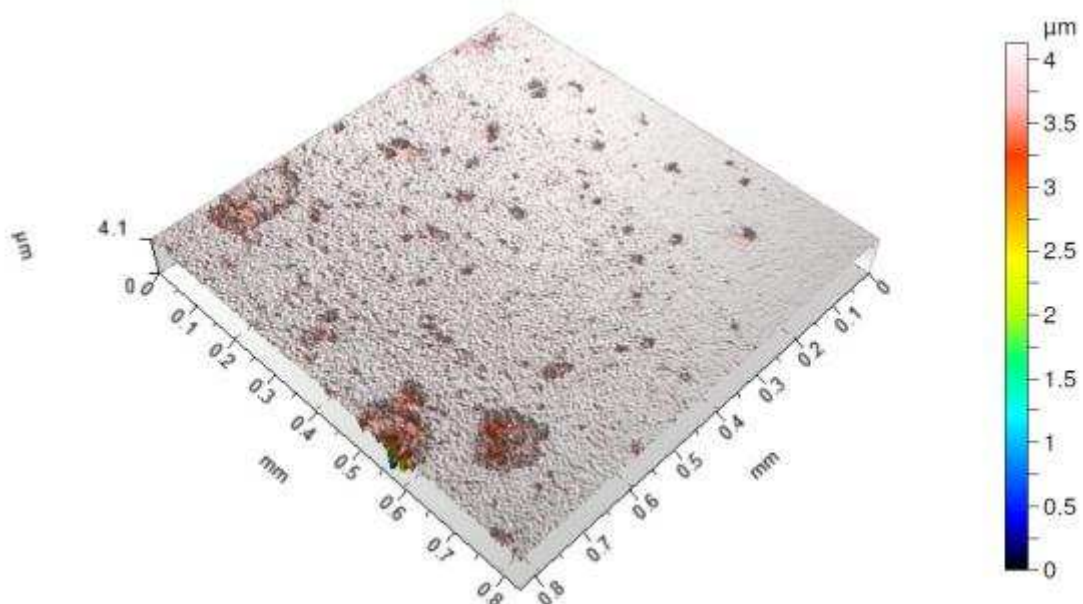


Figura 92 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

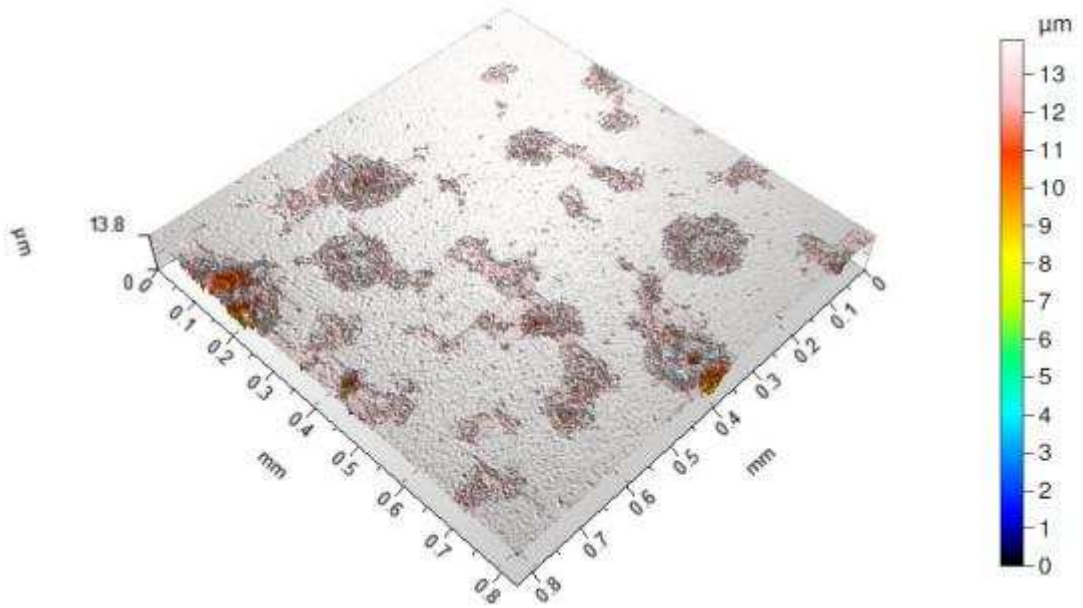


Figura 93 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

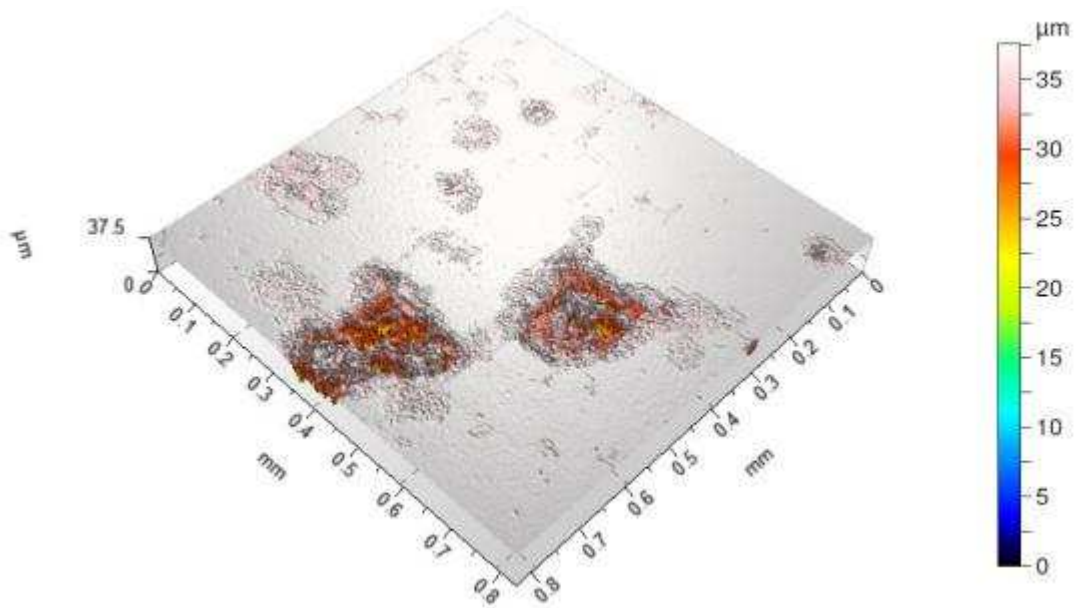


Figura 94 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

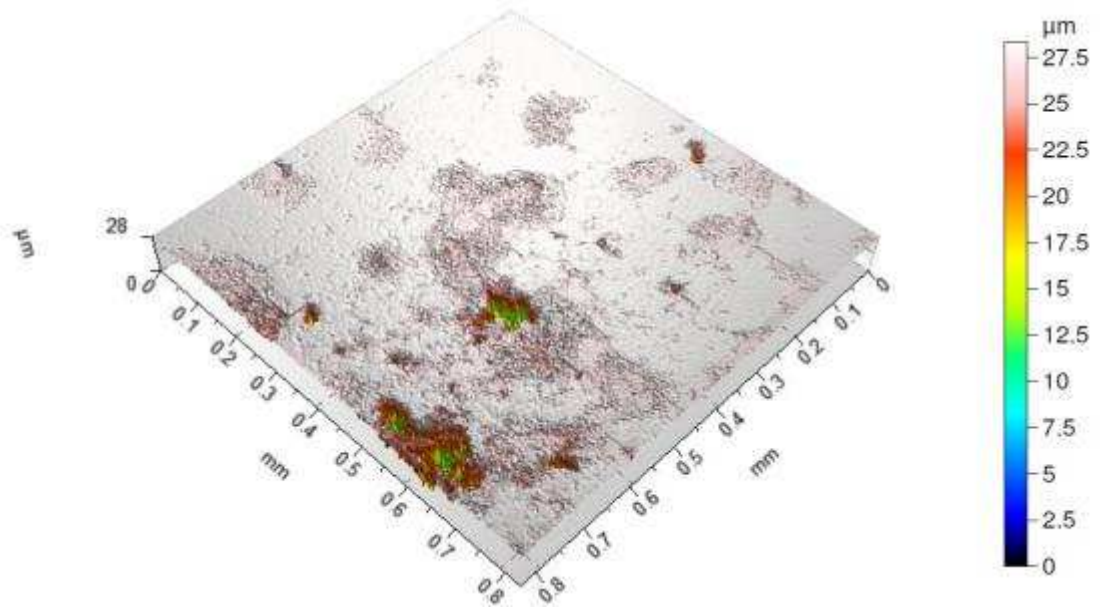


Figura 95 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.



Figura 96 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.



Figura 97 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

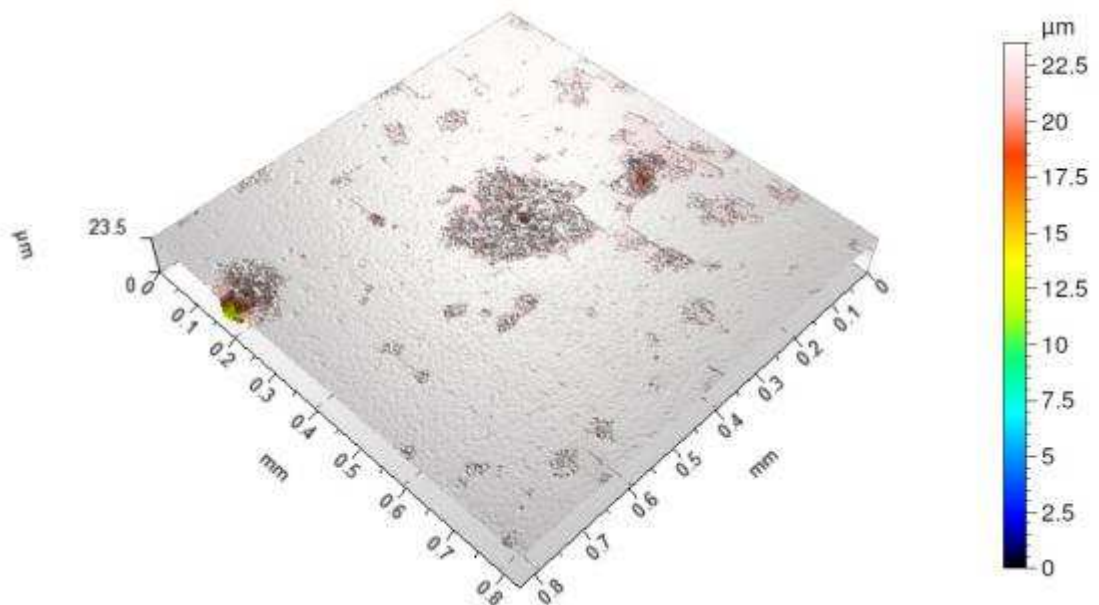


Figura 98 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

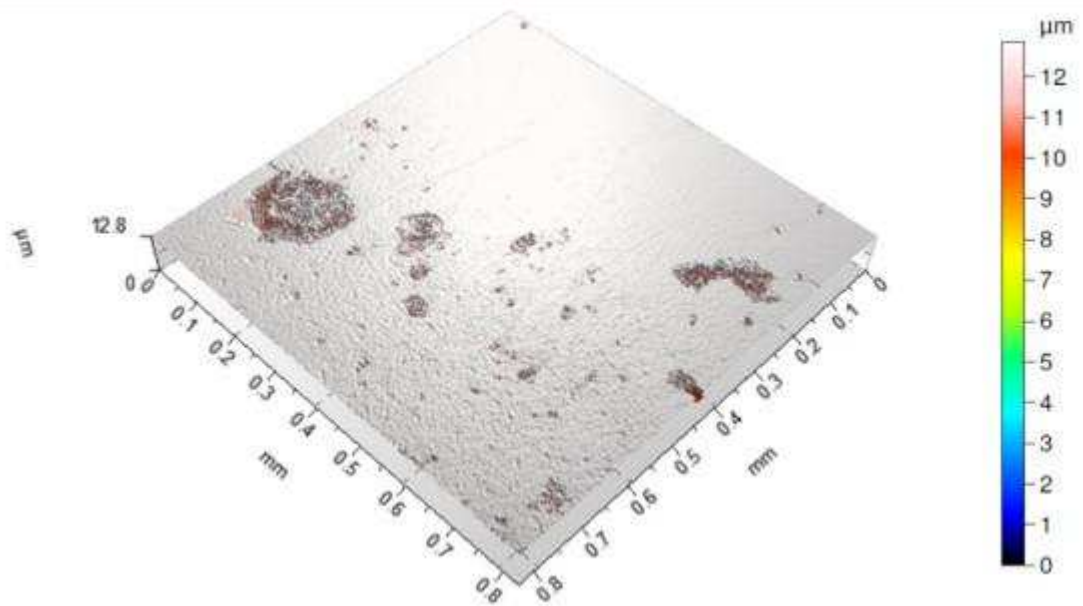


Figura 99 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

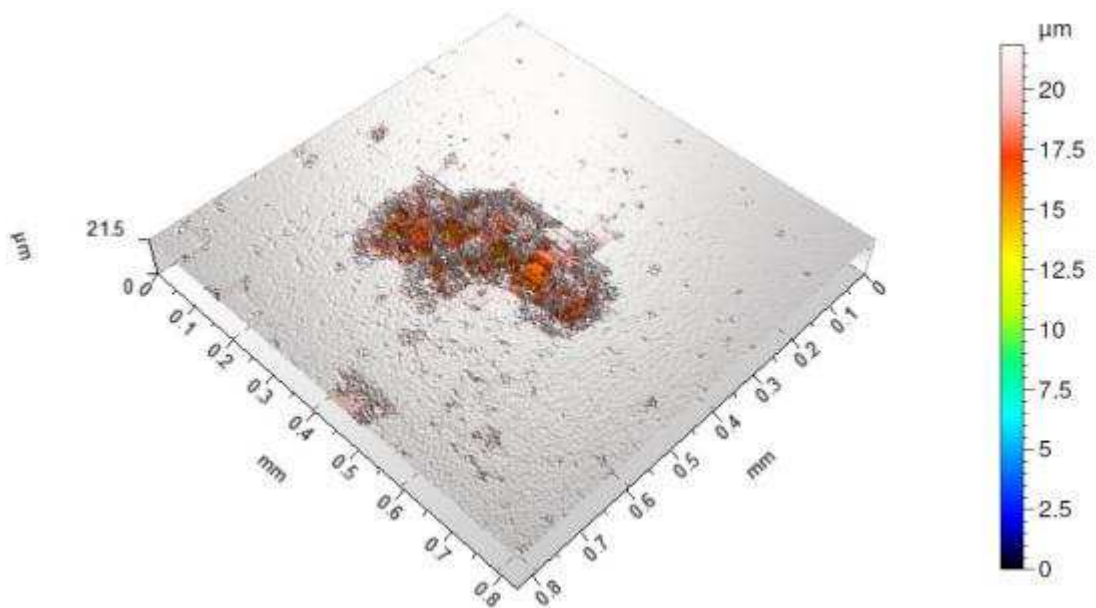


Figura 100 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra do aço AISI 420 temperado a 1000°C por 20 minutos, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

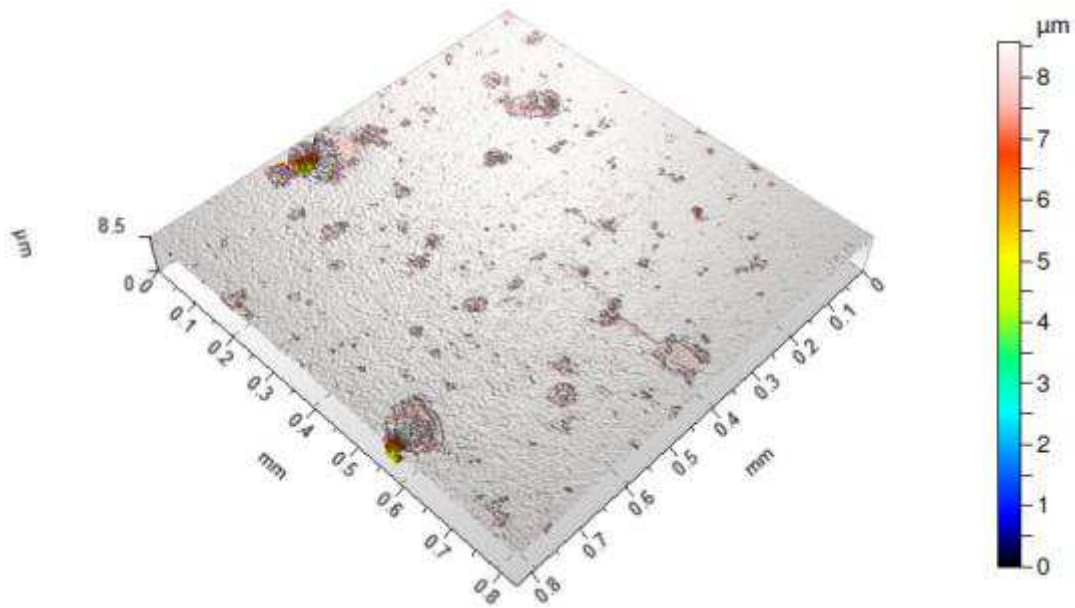


Figura 101 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

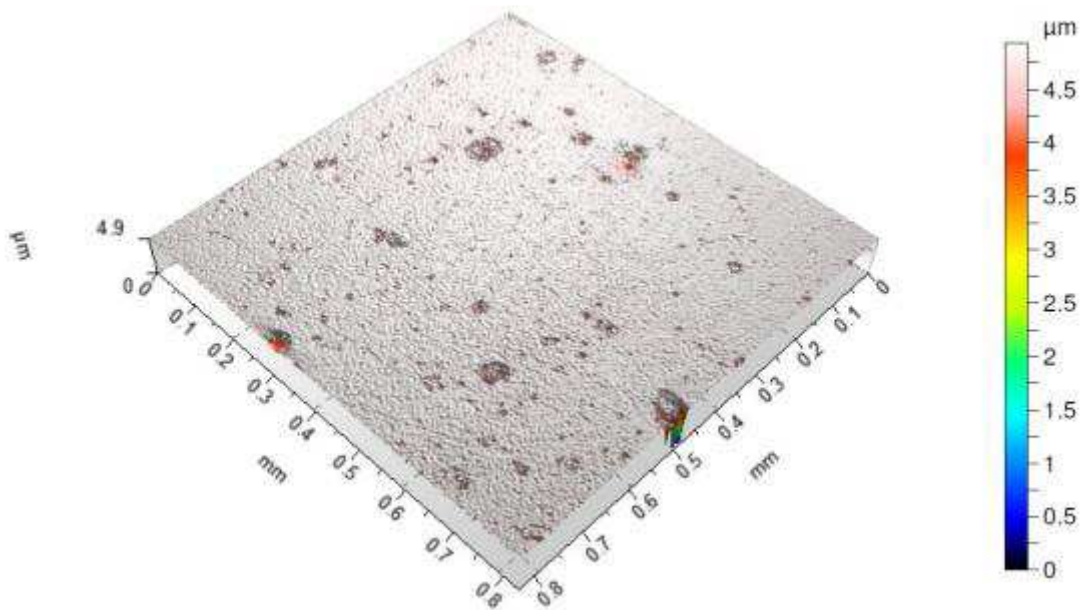


Figura 102 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

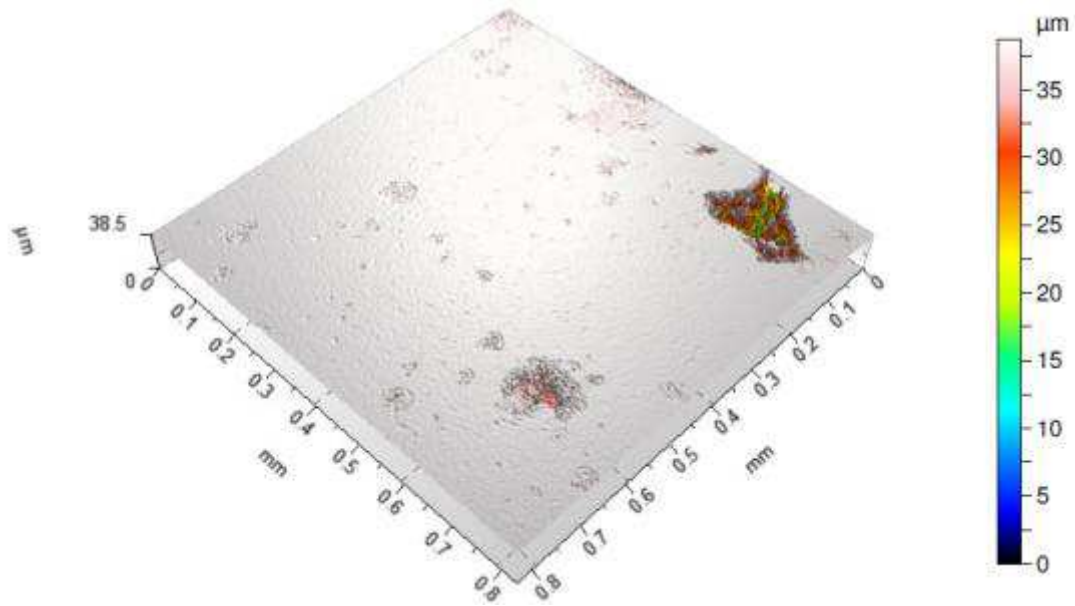


Figura 103 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

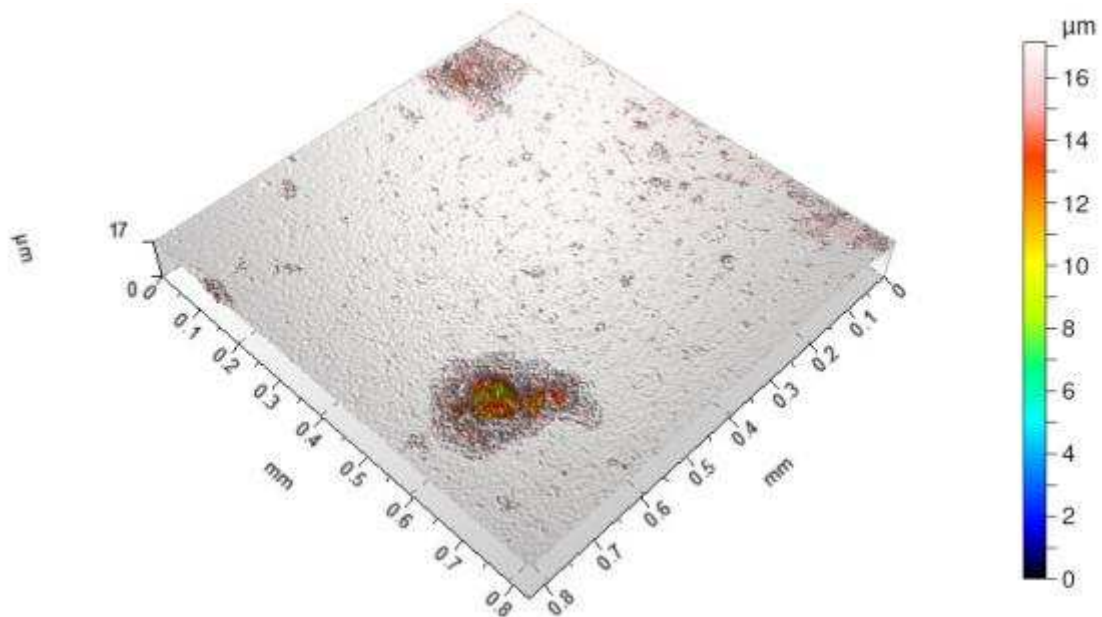


Figura 104 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

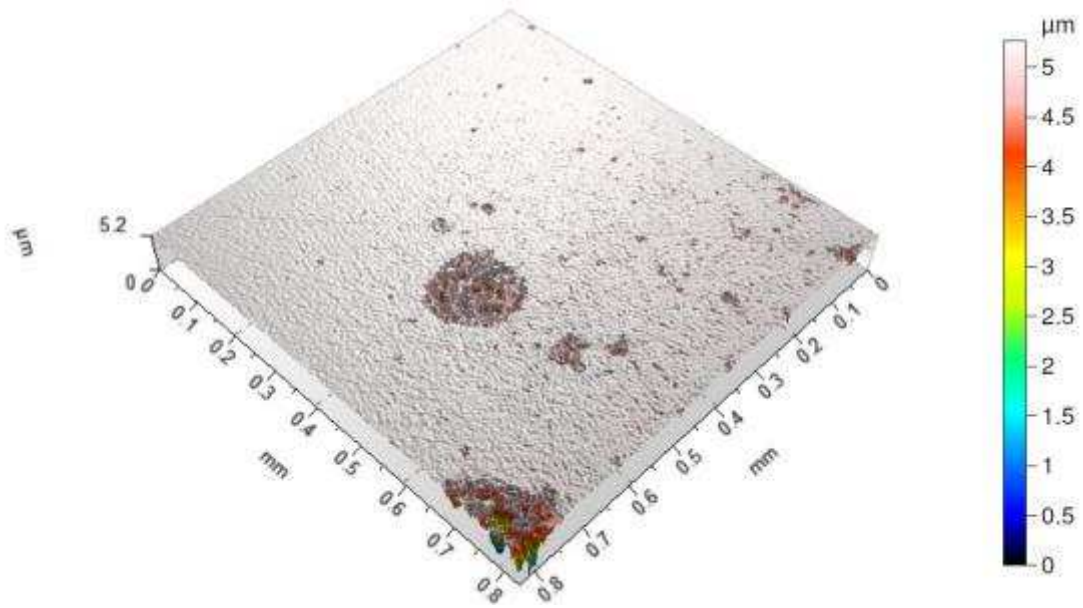


Figura 105 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

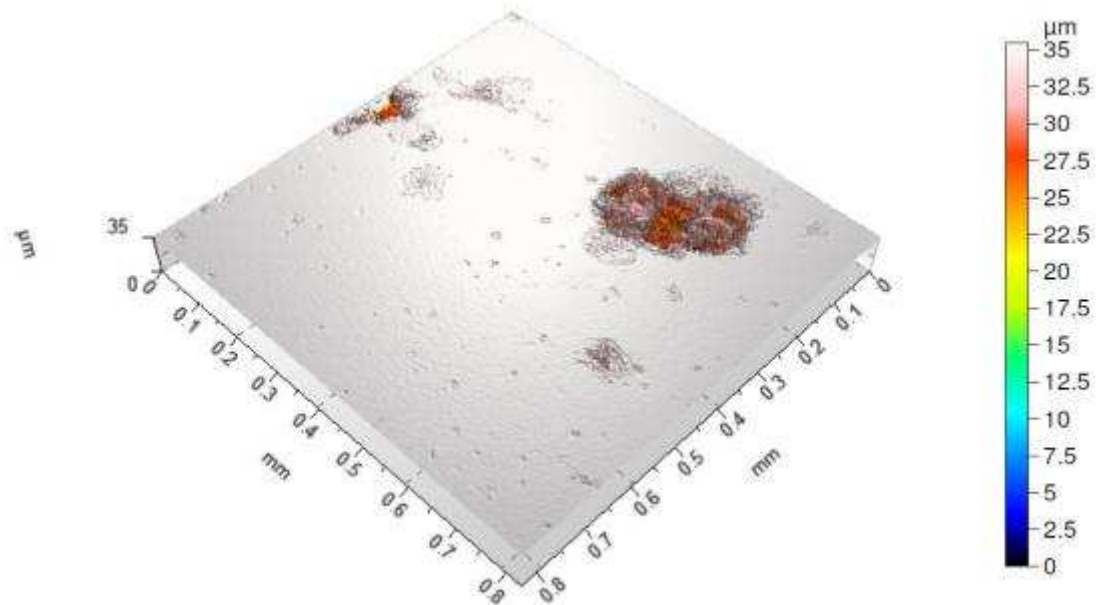


Figura 106 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

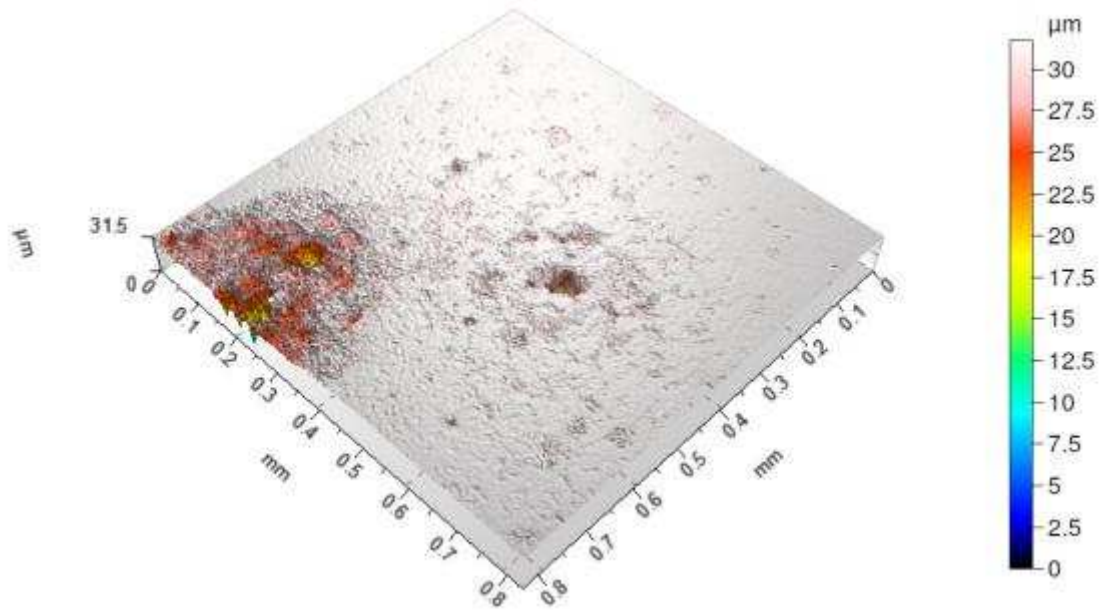


Figura 107 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

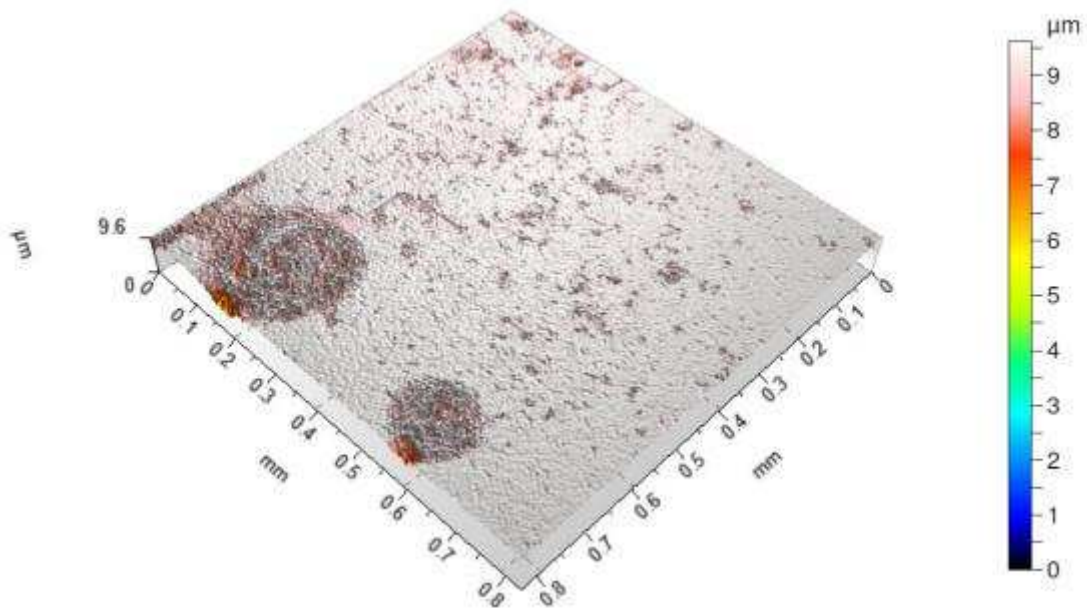


Figura 108 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

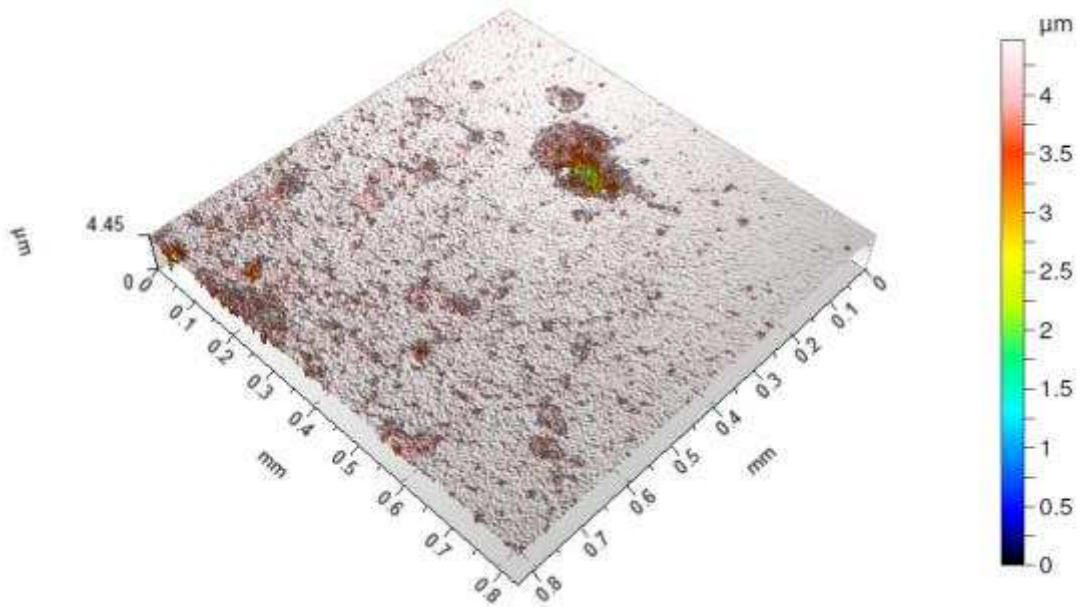


Figura 109 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

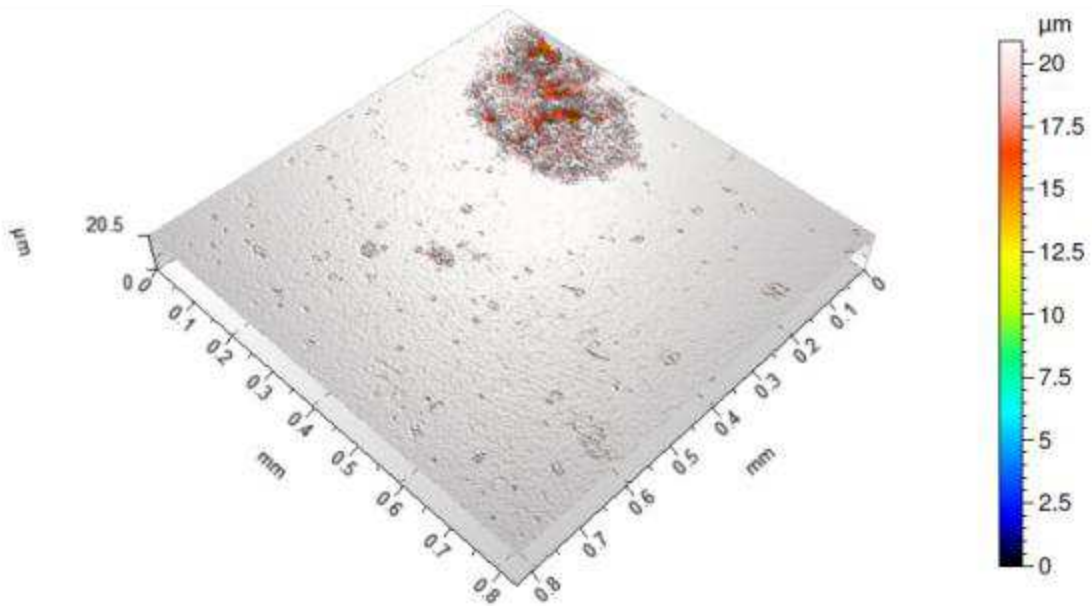


Figura 110 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 300°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

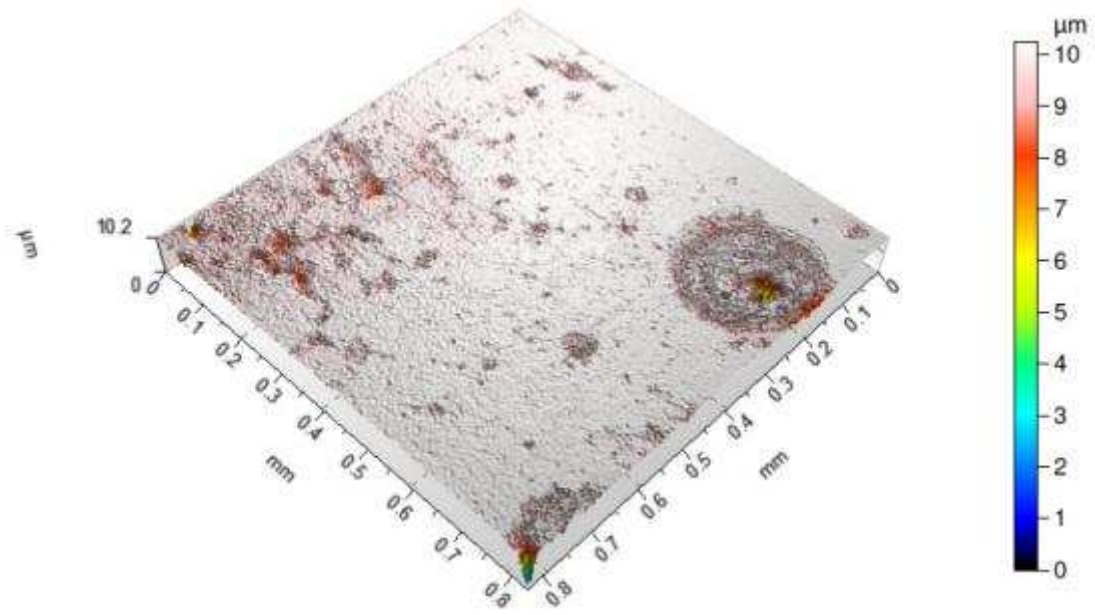


Figura 111 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

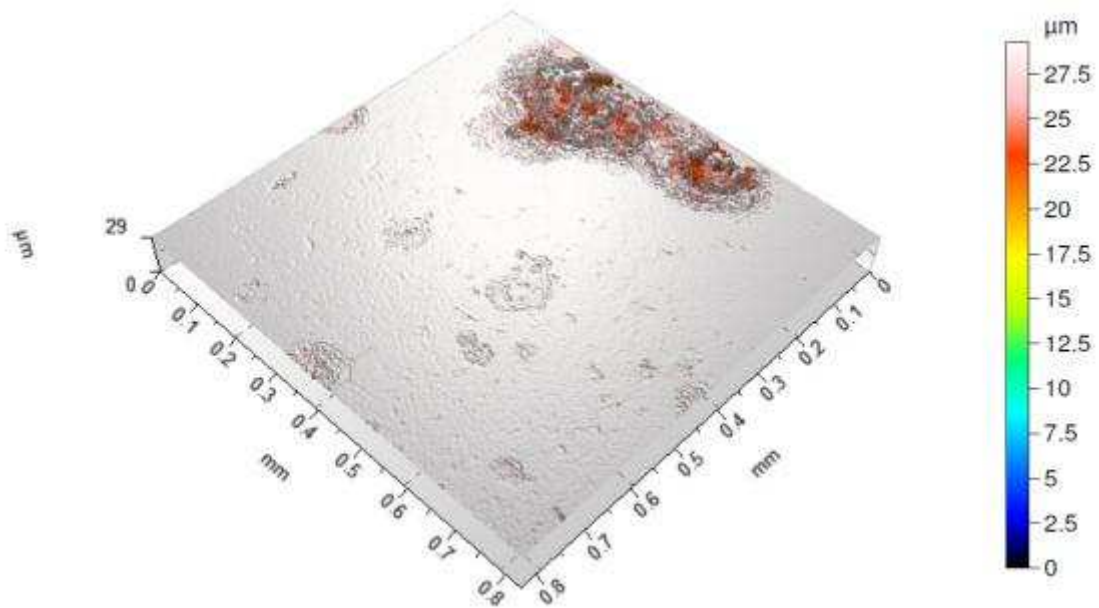


Figura 112 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

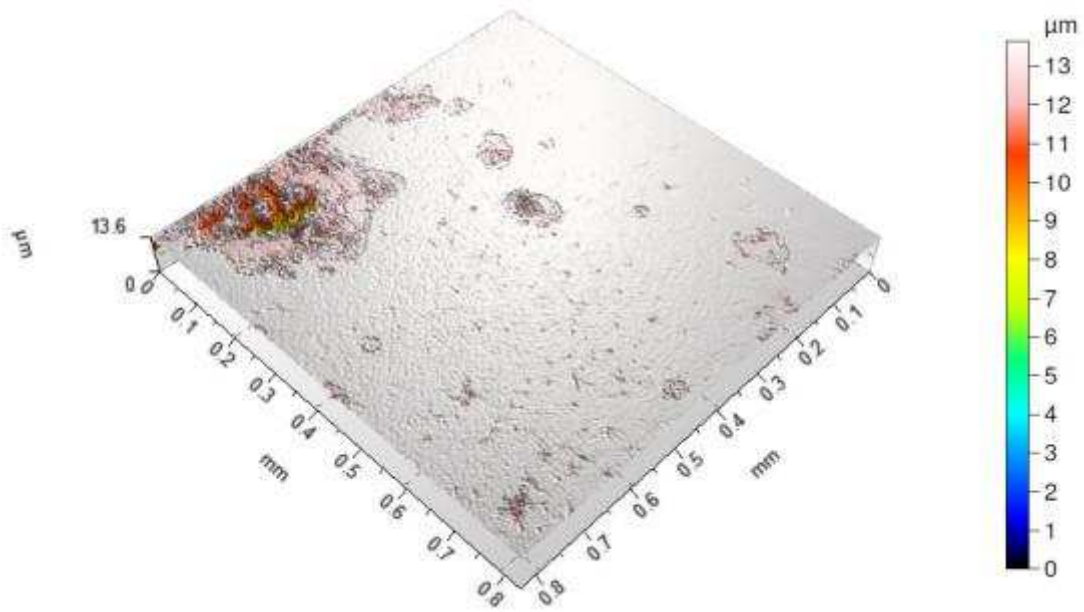


Figura 113 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.



Figura 114 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

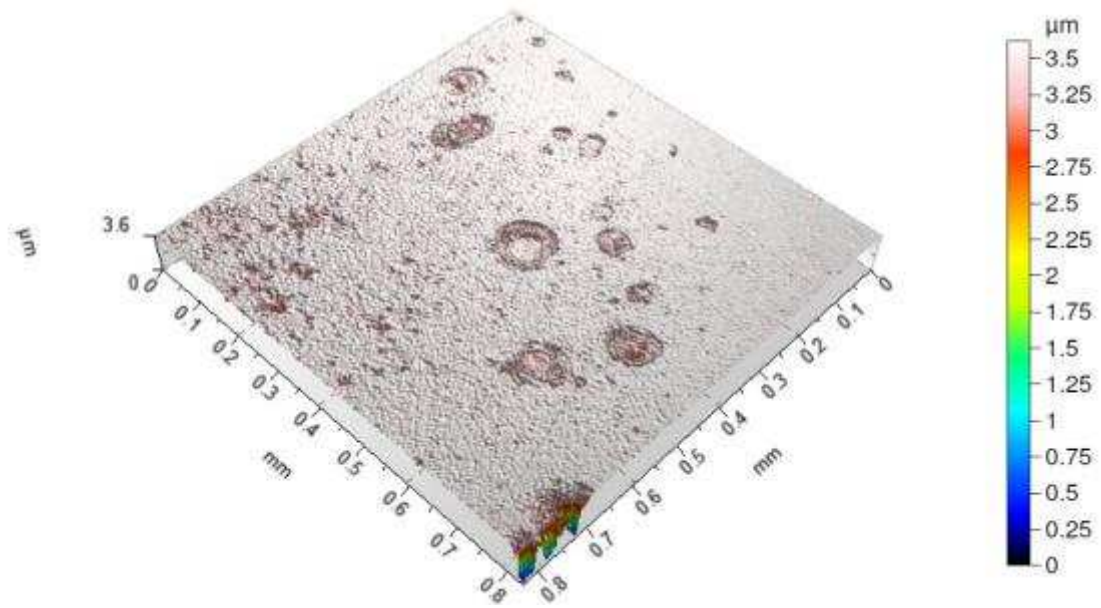


Figura 115 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

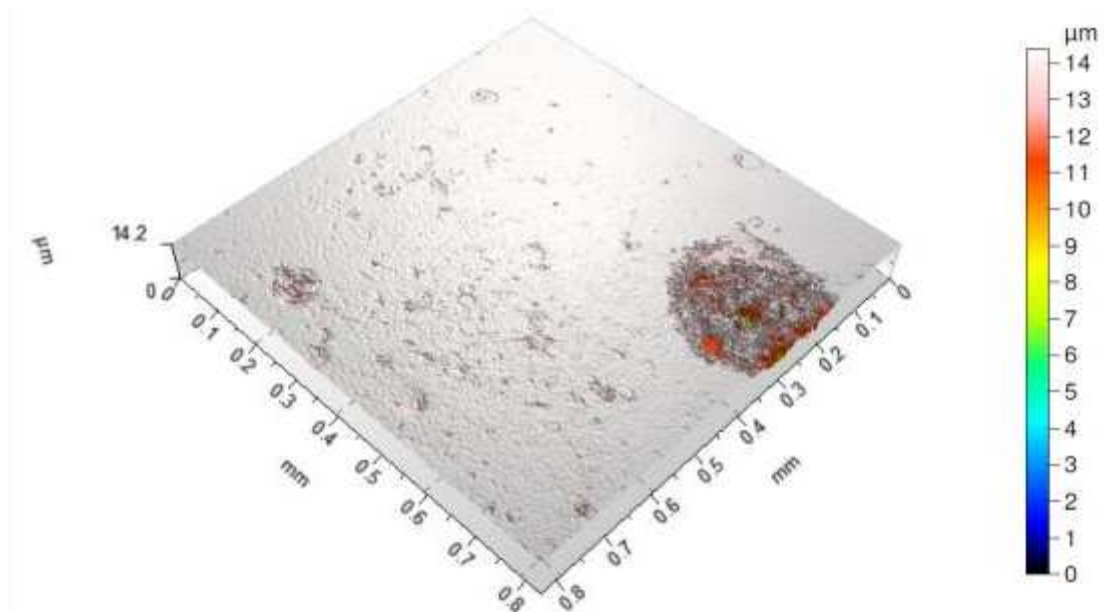


Figura 116 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

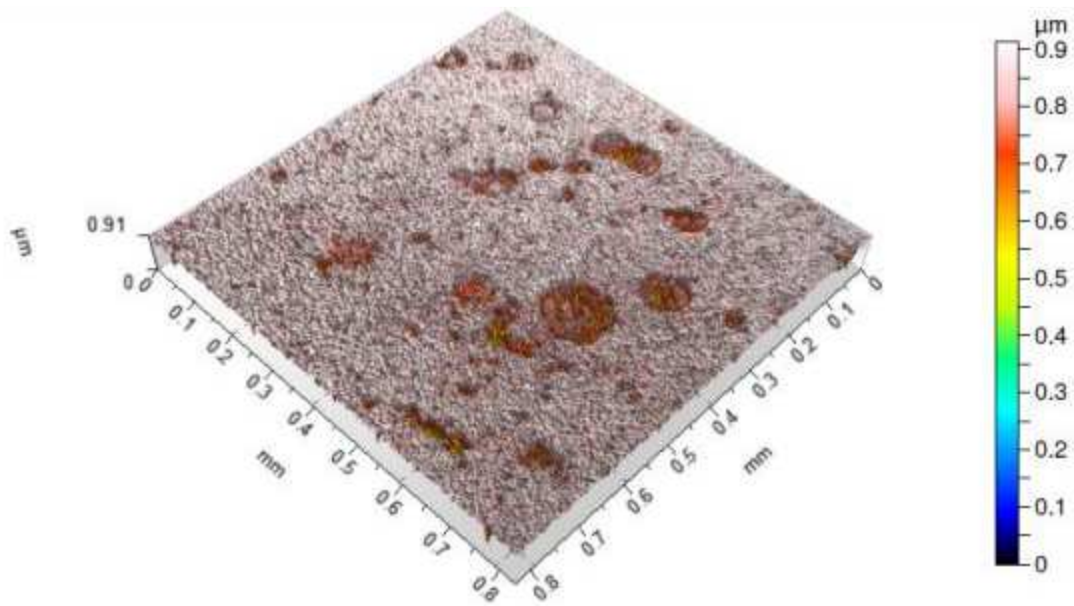


Figura 117 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

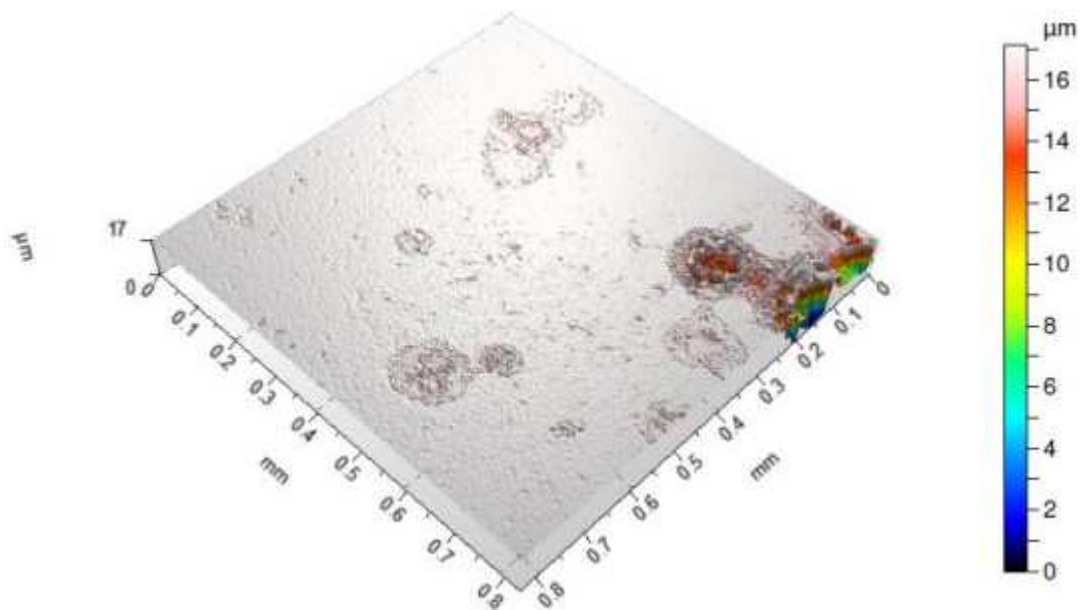


Figura 118 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

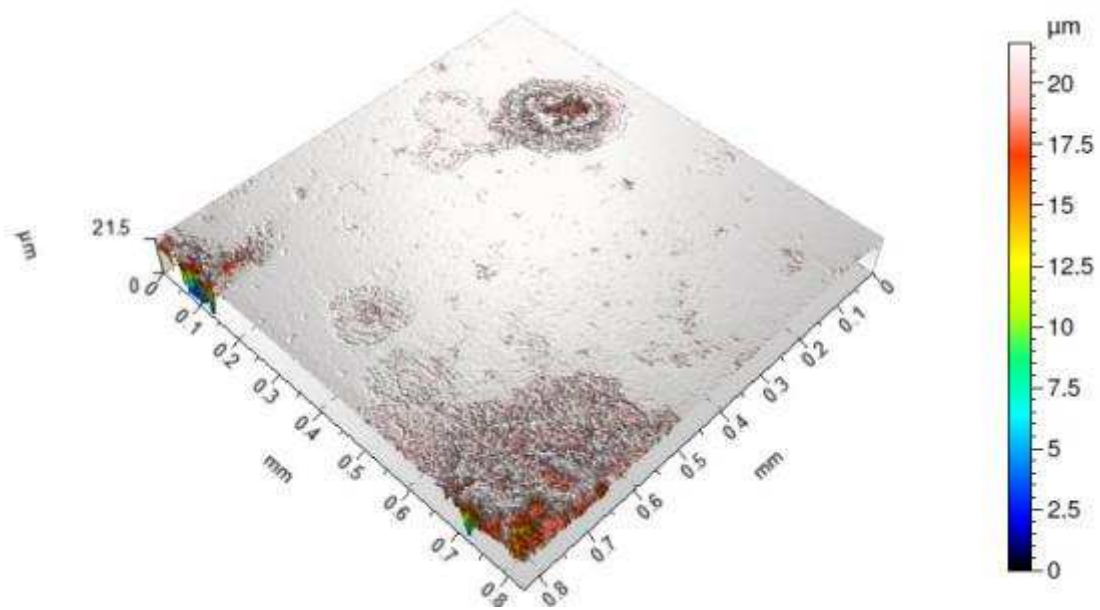


Figura 119 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

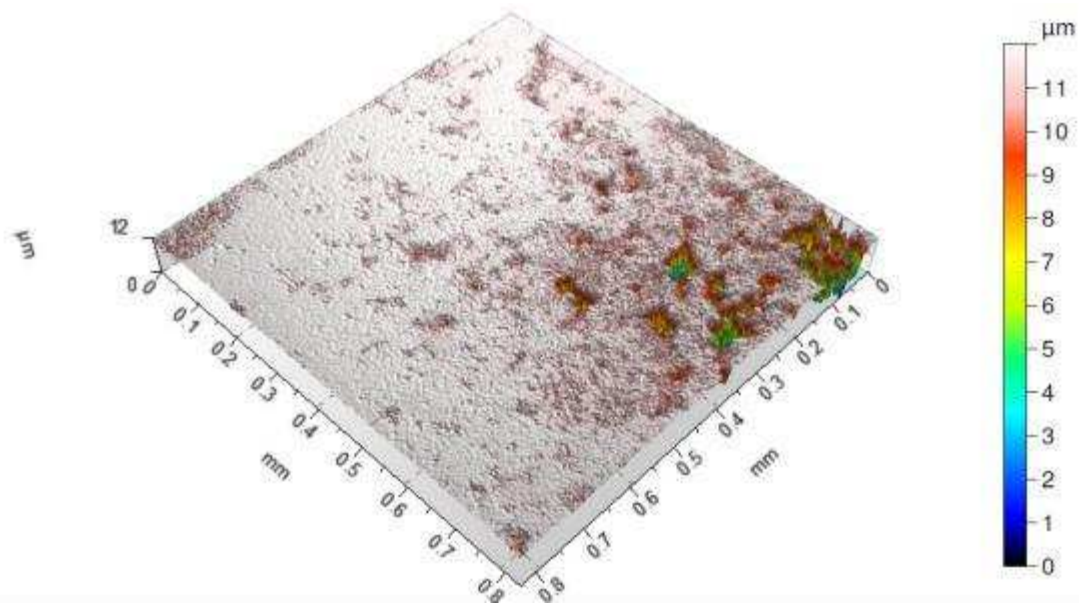


Figura 120 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 300°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

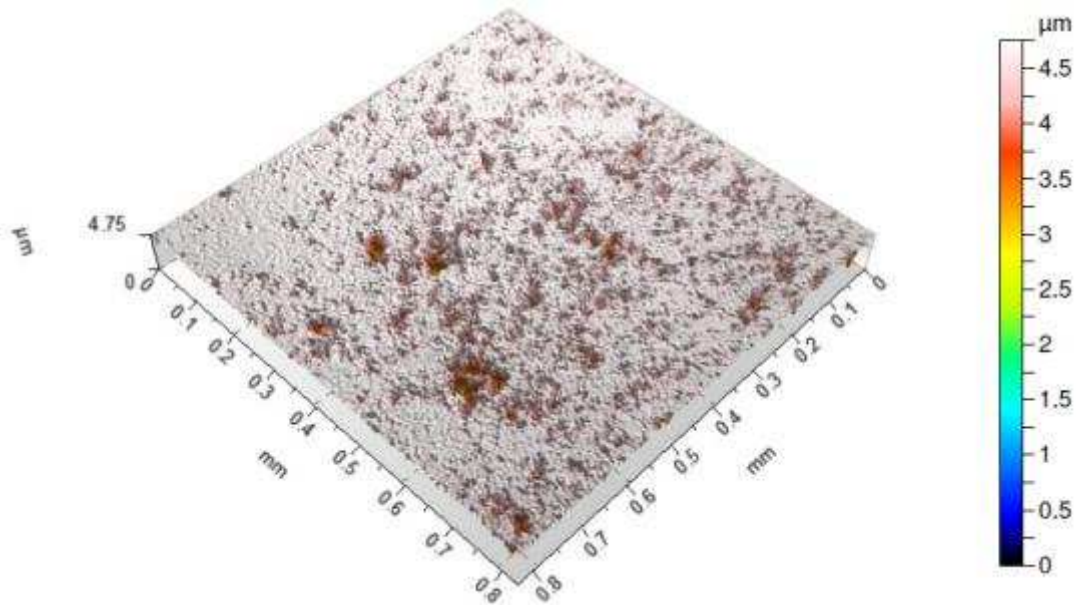


Figura 121 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.



Figura 122 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

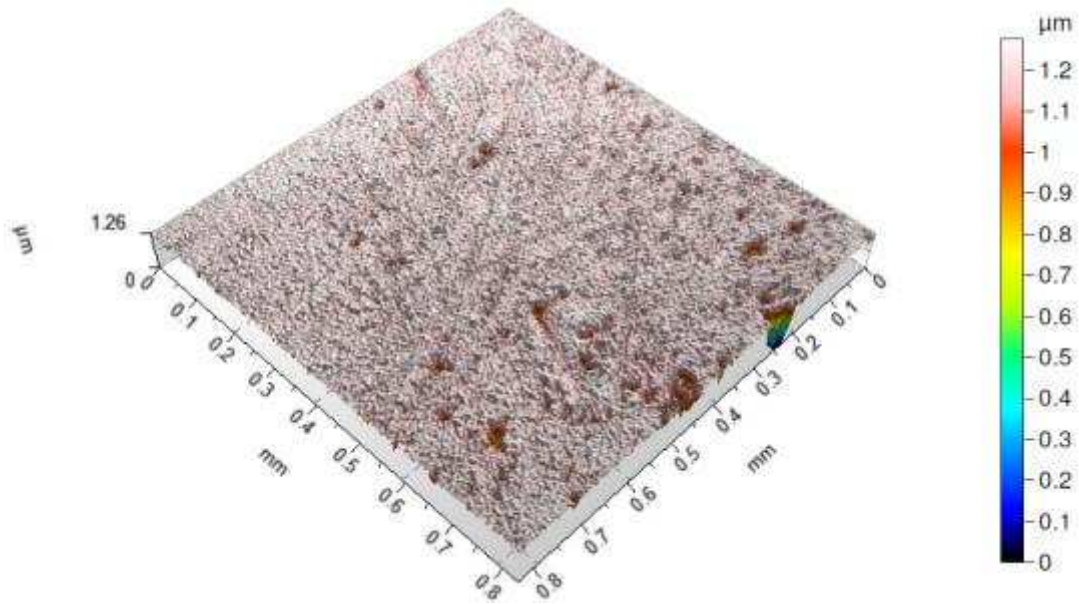


Figura 123 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

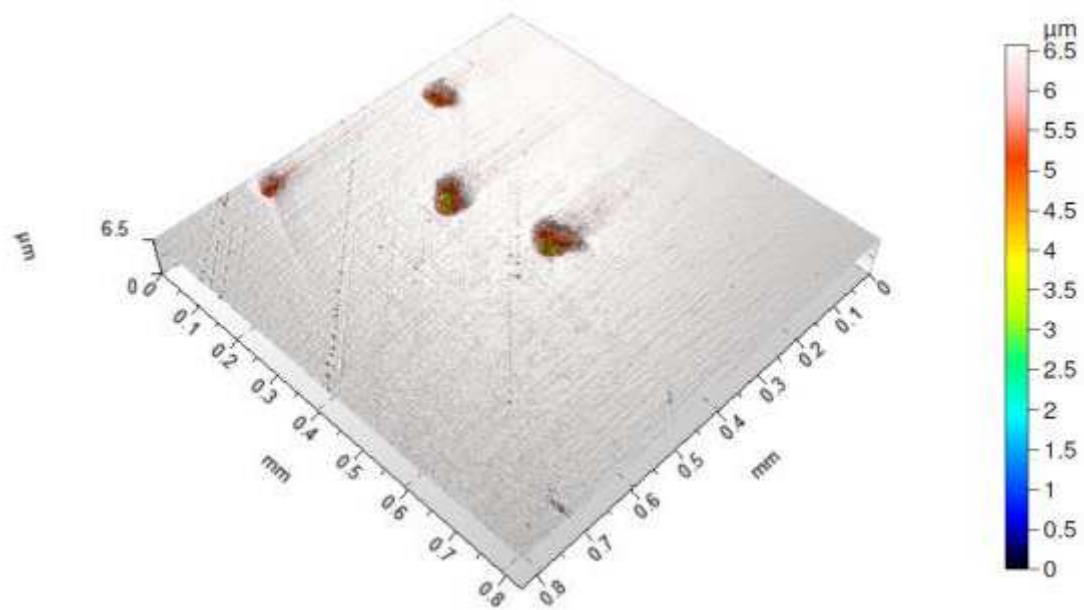


Figura 124 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

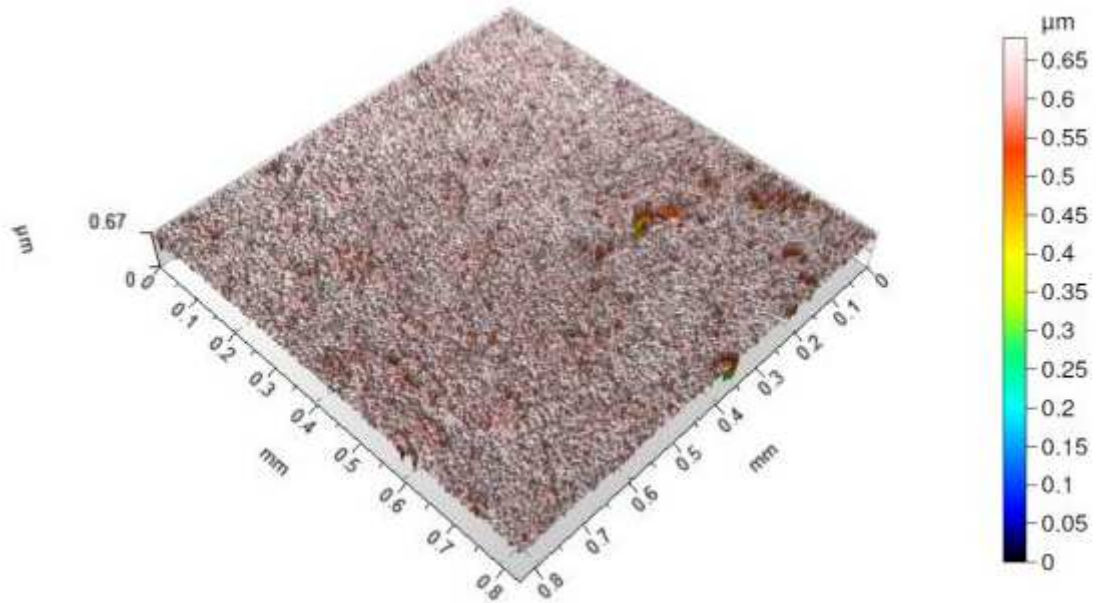


Figura 125 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.



Figura 126 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

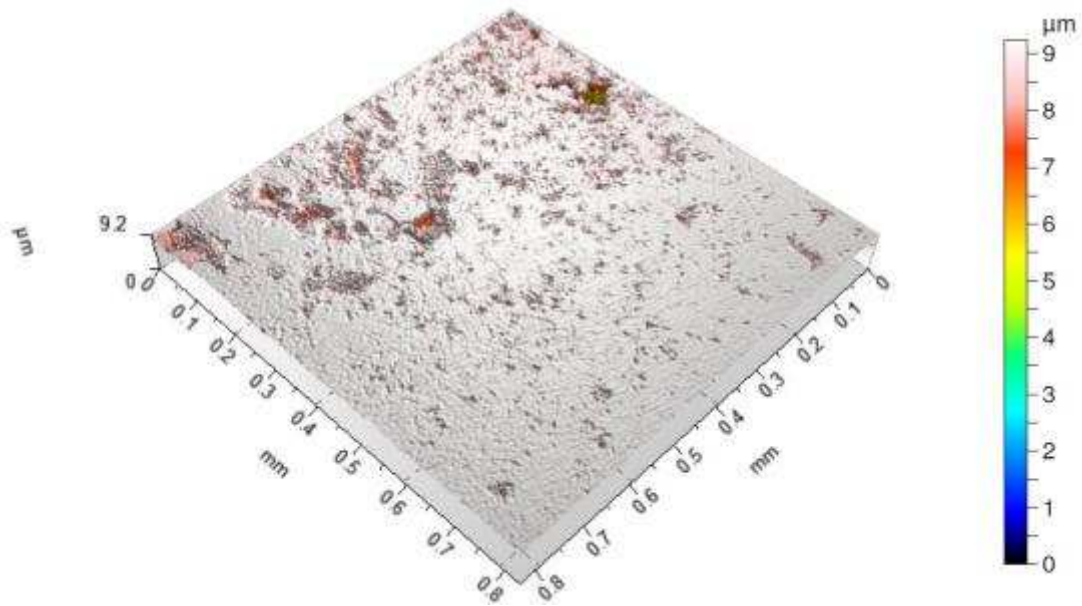


Figura 127 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

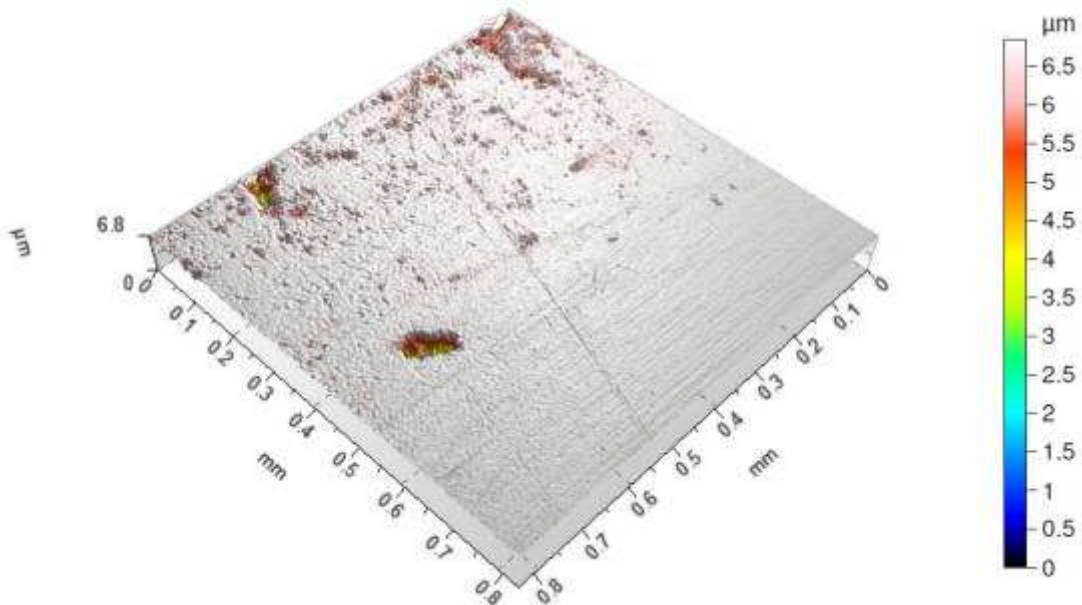


Figura 128 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

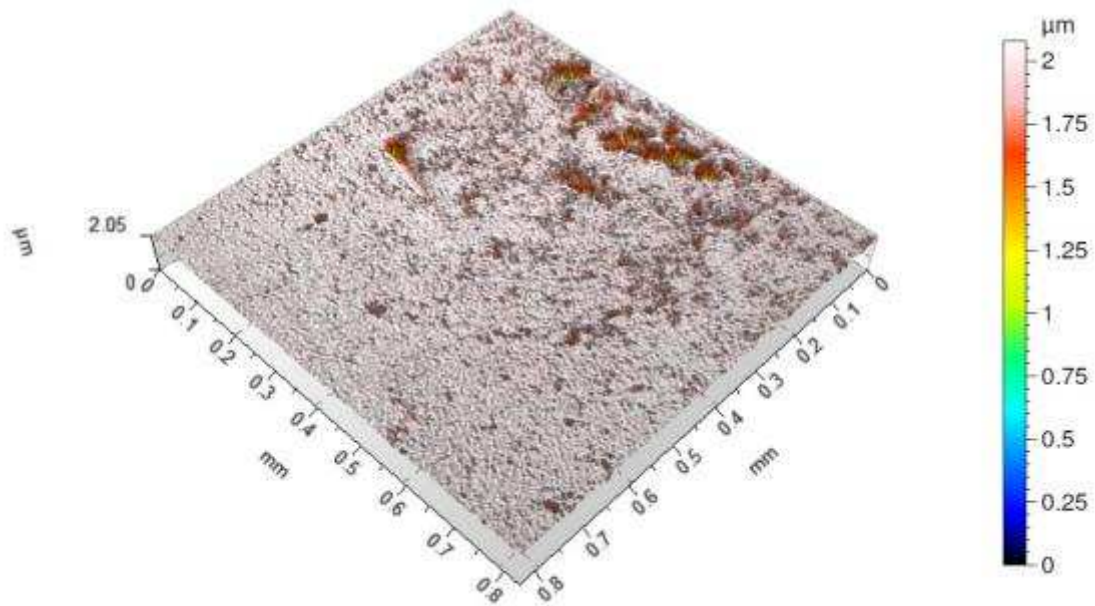


Figura 129 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

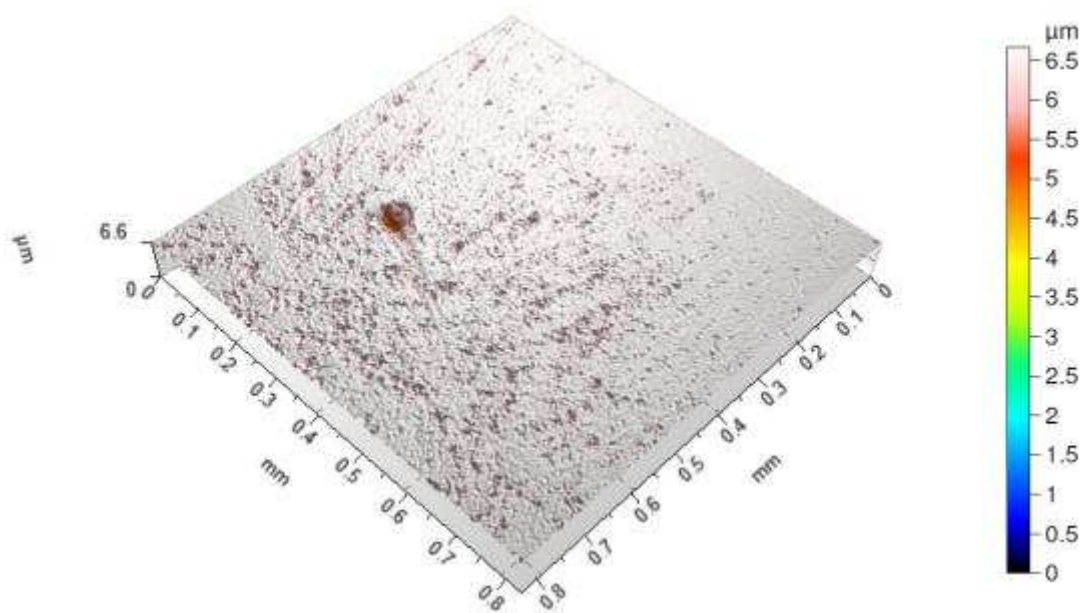


Figura 130 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 300°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

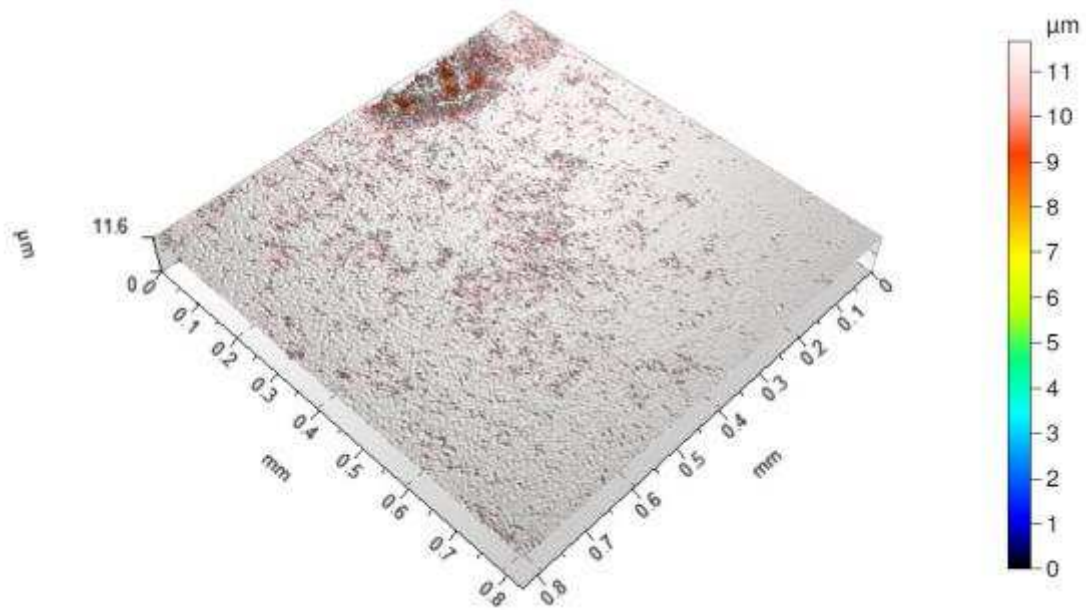


Figura 131 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

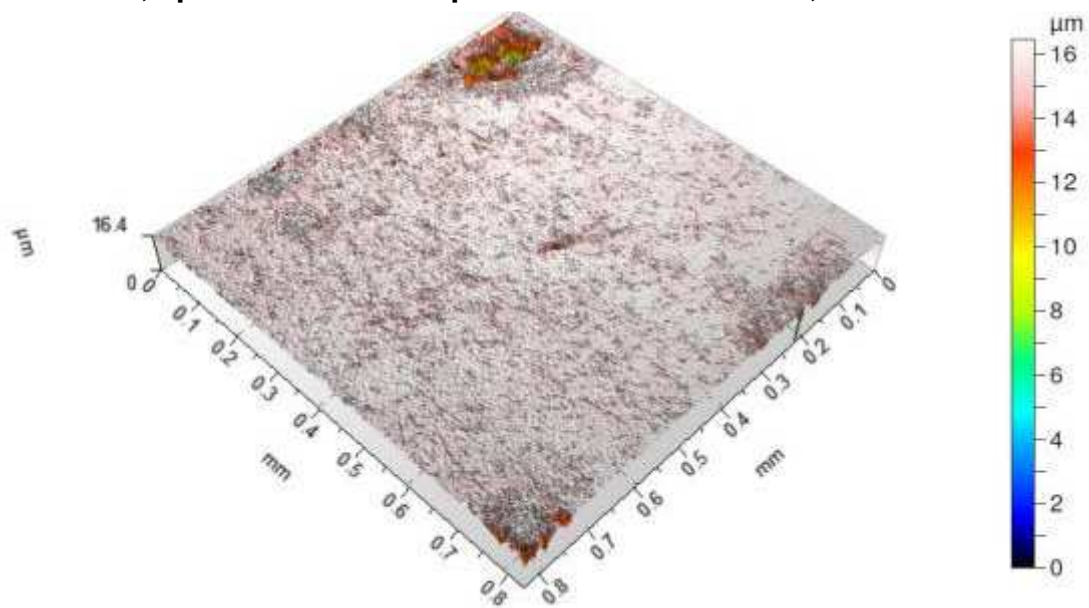


Figura 132 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

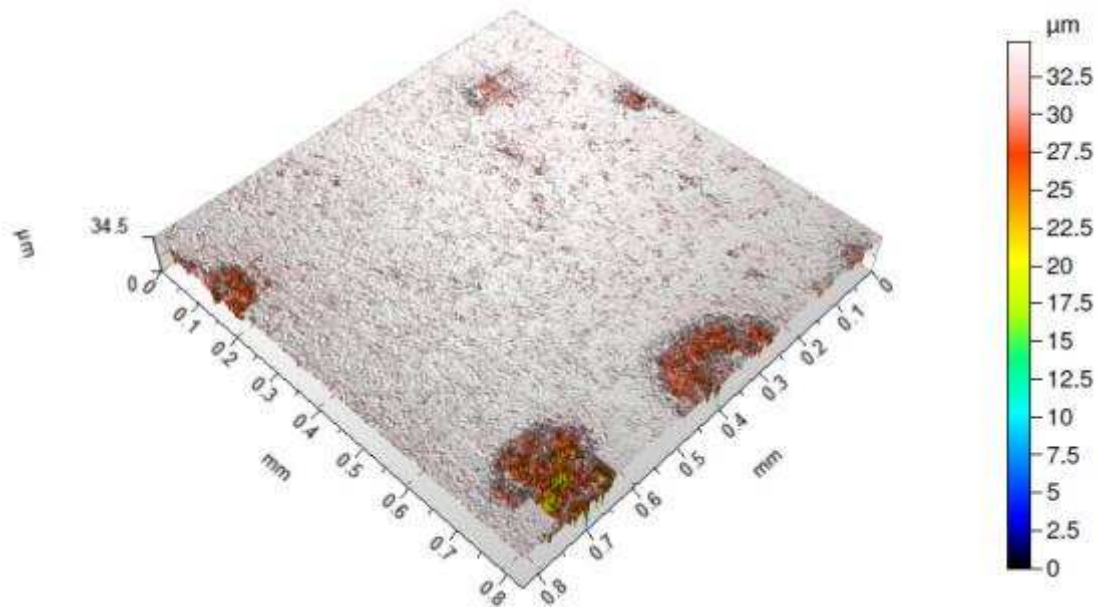


Figura 133 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

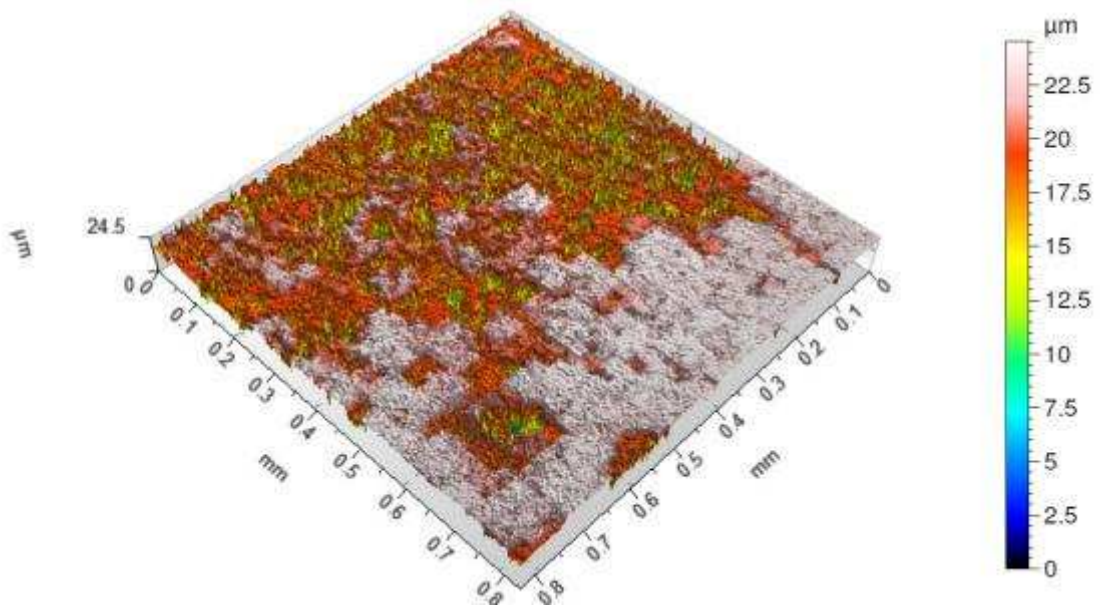


Figura 134 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

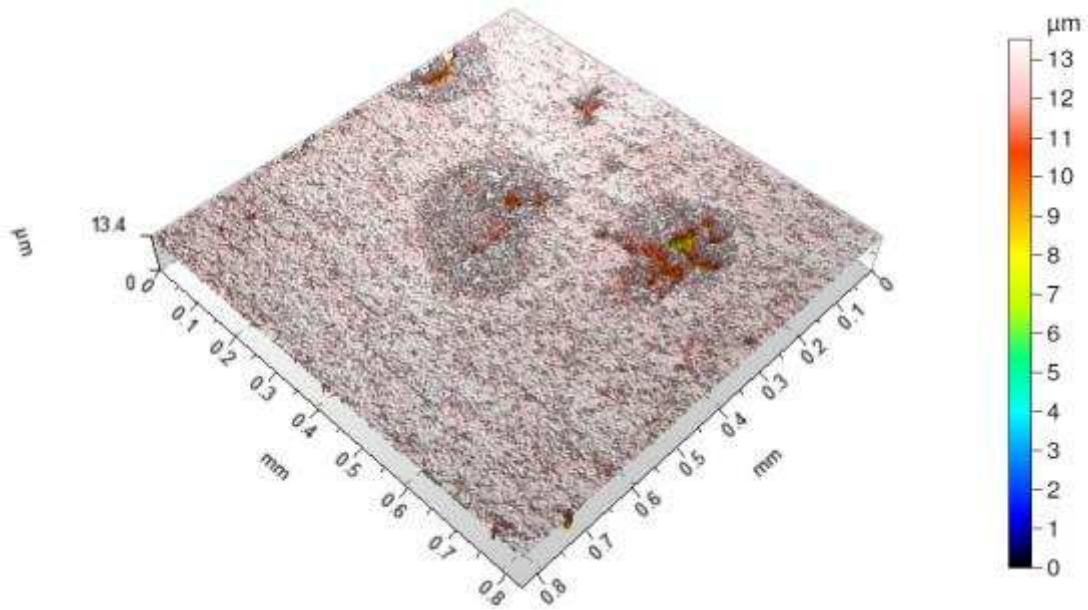


Figura 135 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

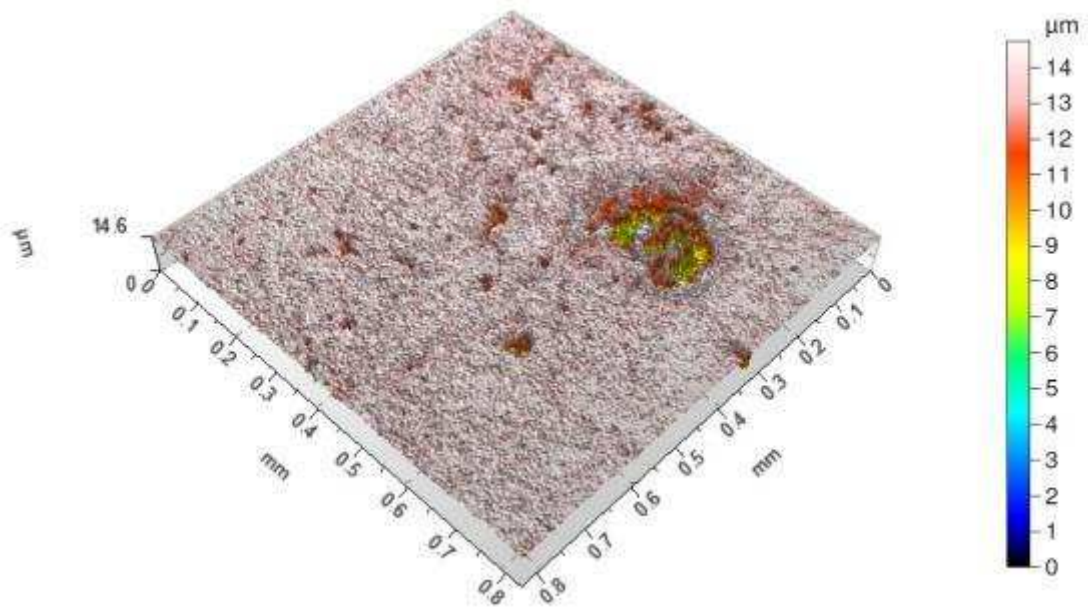


Figura 136 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

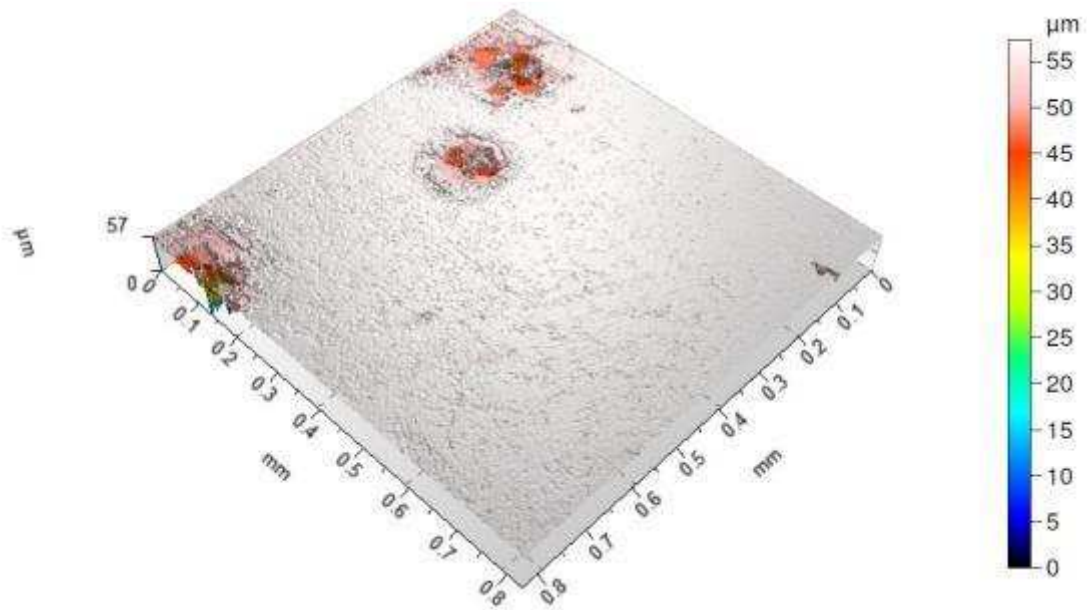


Figura 137 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

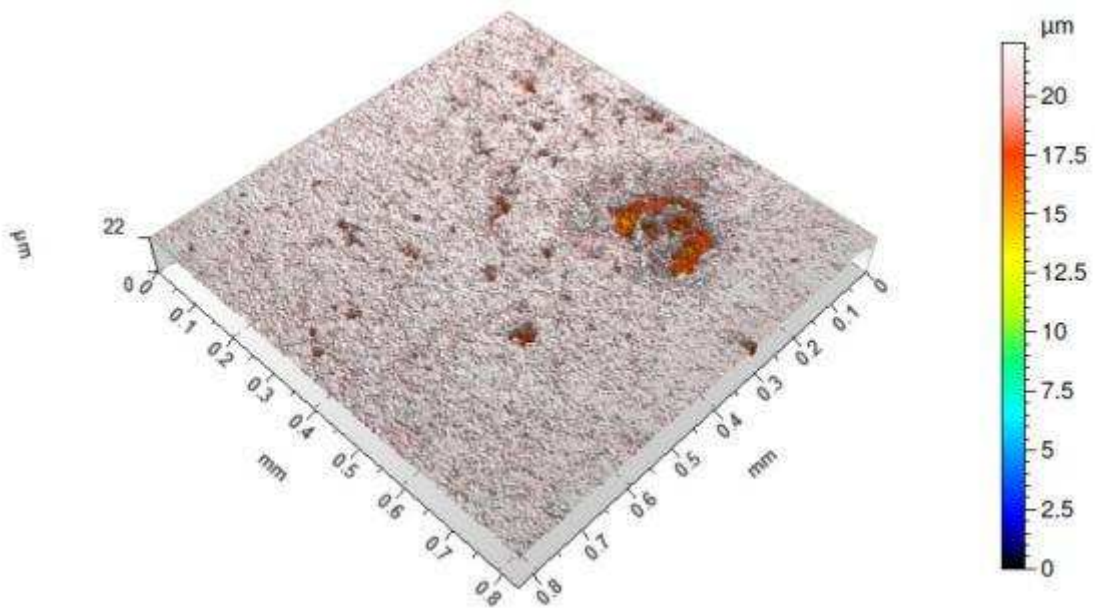


Figura 138 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

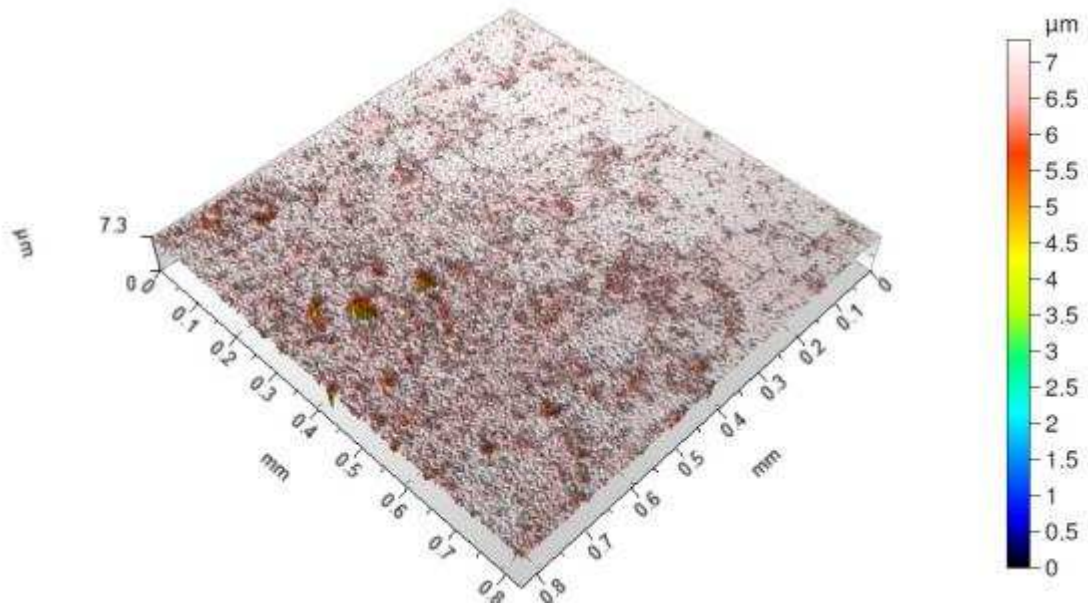


Figura 139 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

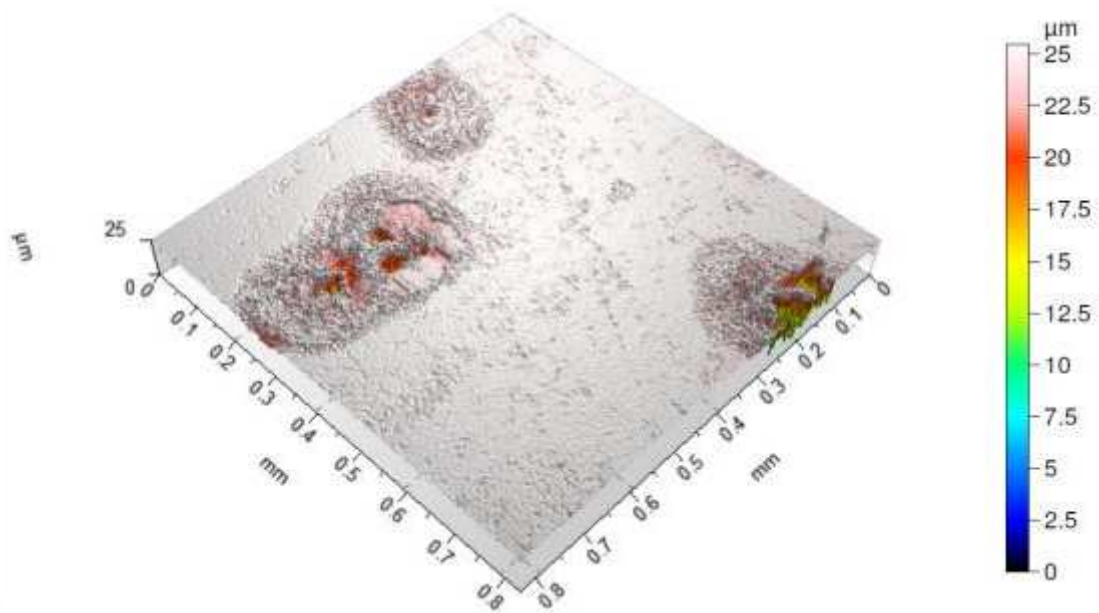


Figura 140 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 450°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

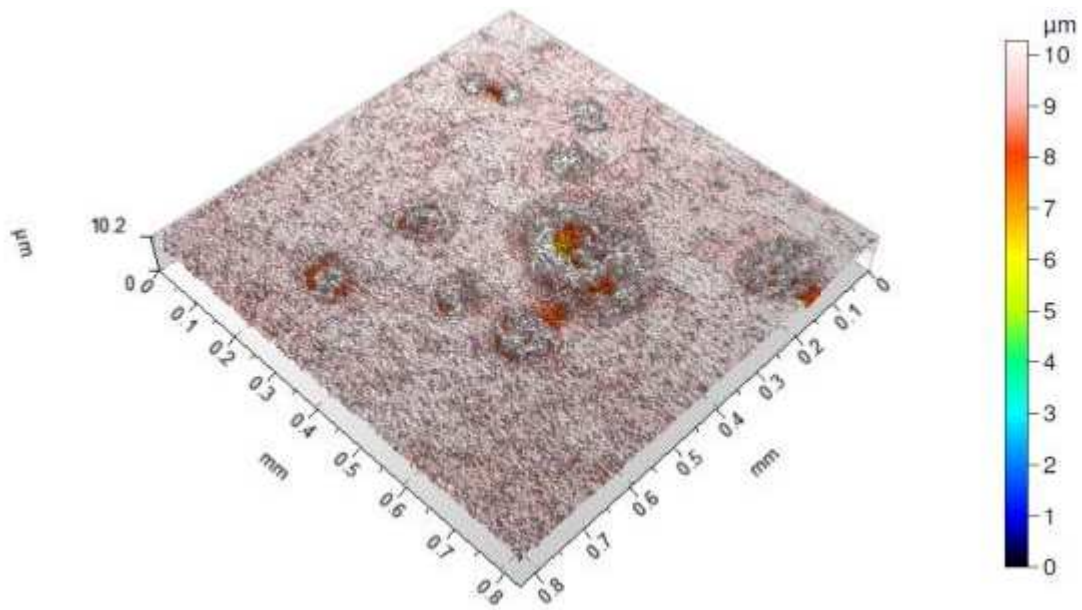


Figura 141 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

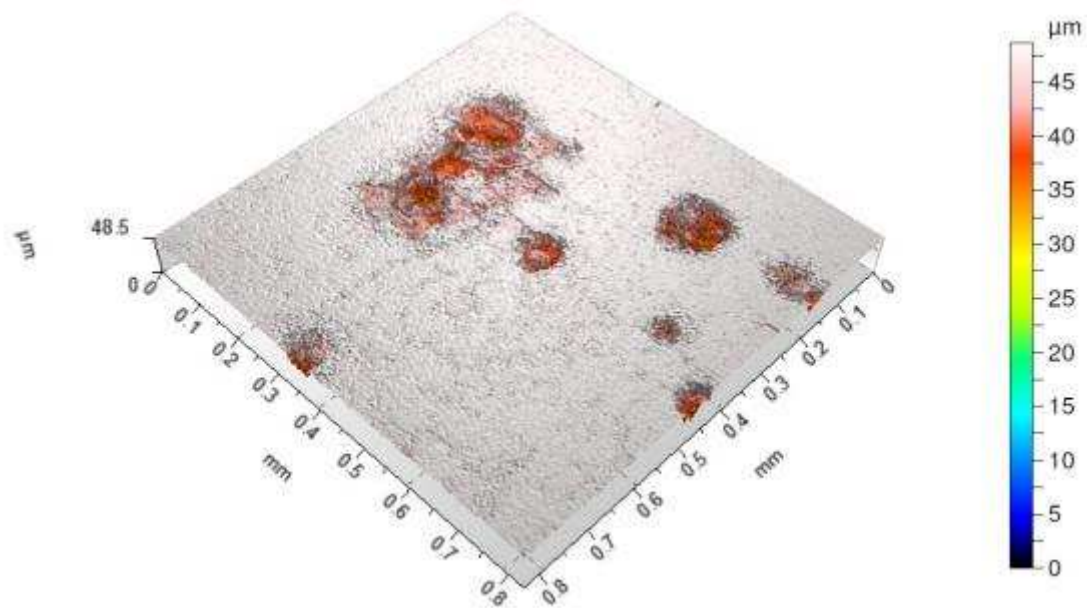


Figura 142 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

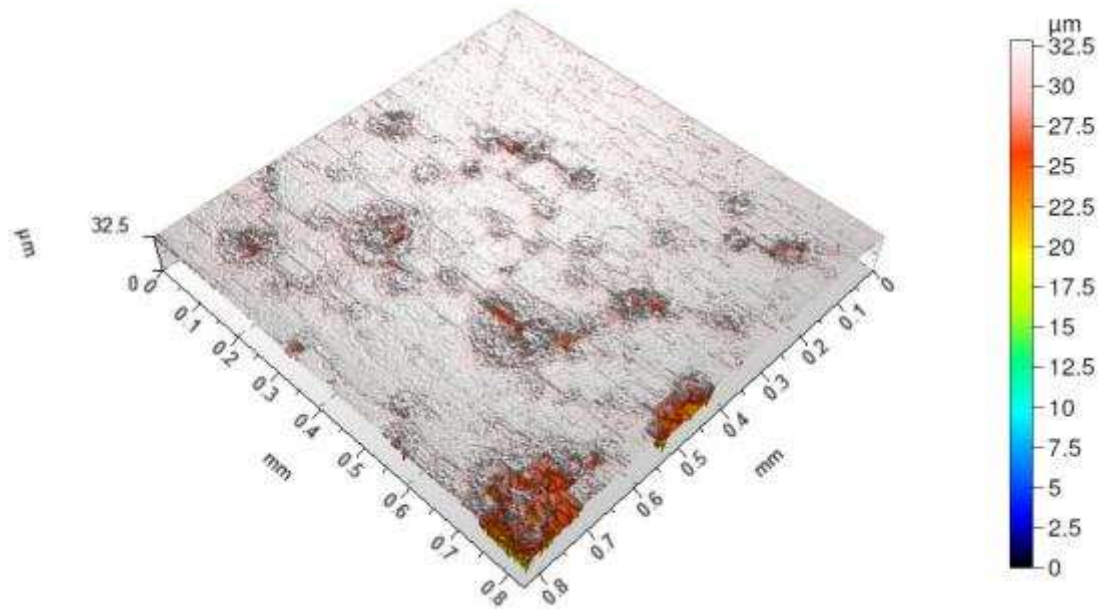


Figura 143 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

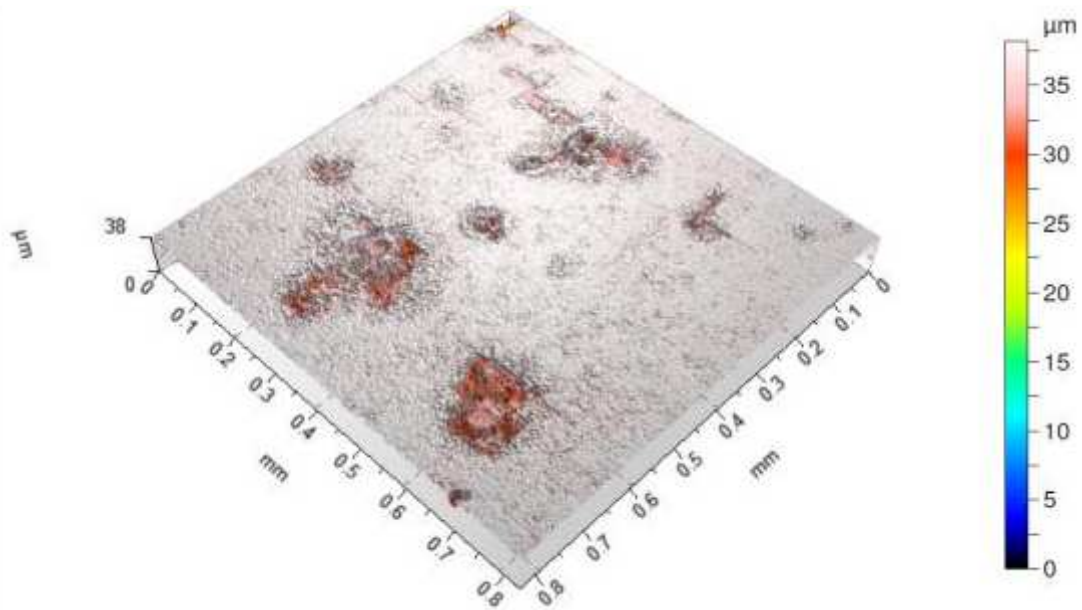


Figura 144 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

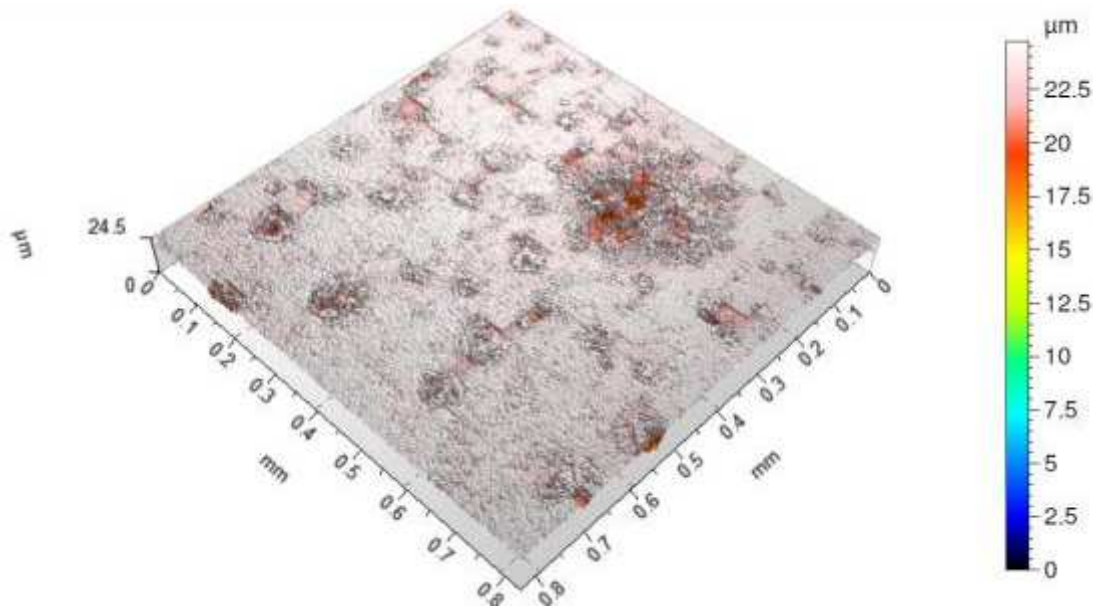


Figura 145 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

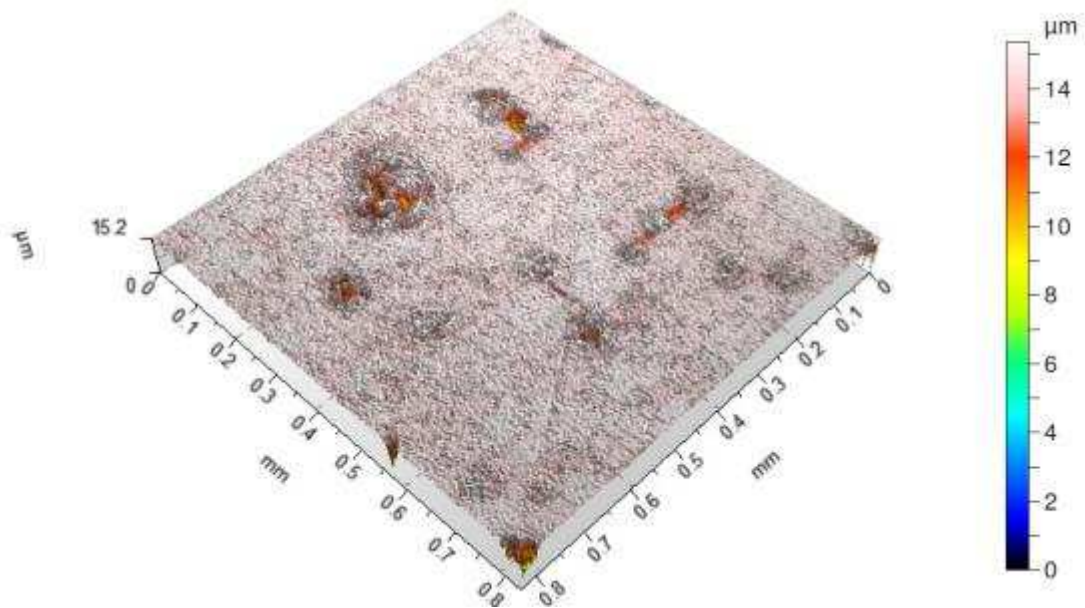


Figura 146 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

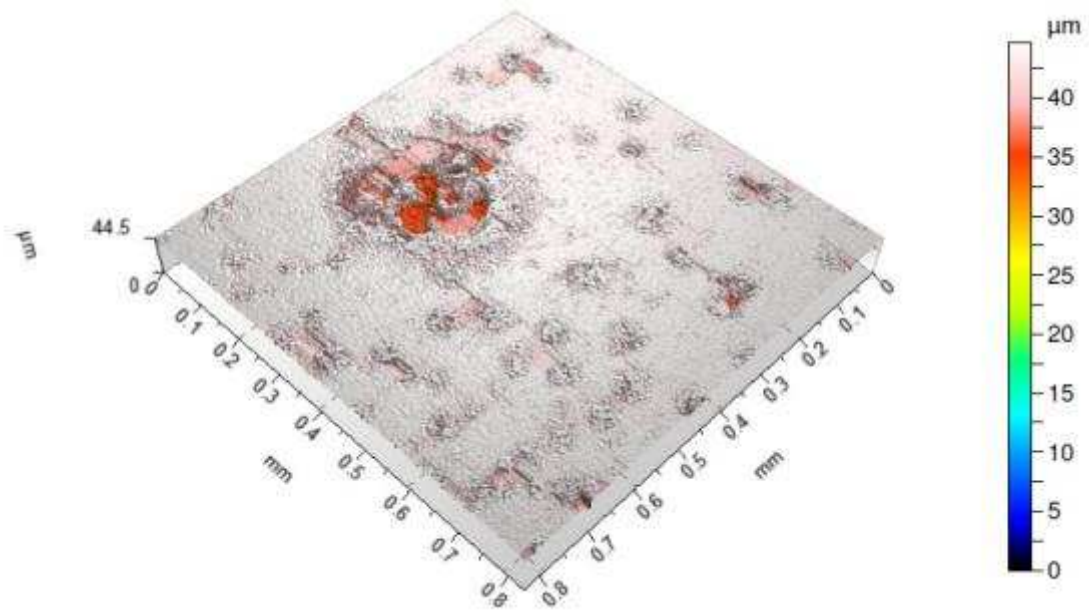


Figura 147 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio $\text{NaCl } 0,5 \text{ mol/dm}^3$.

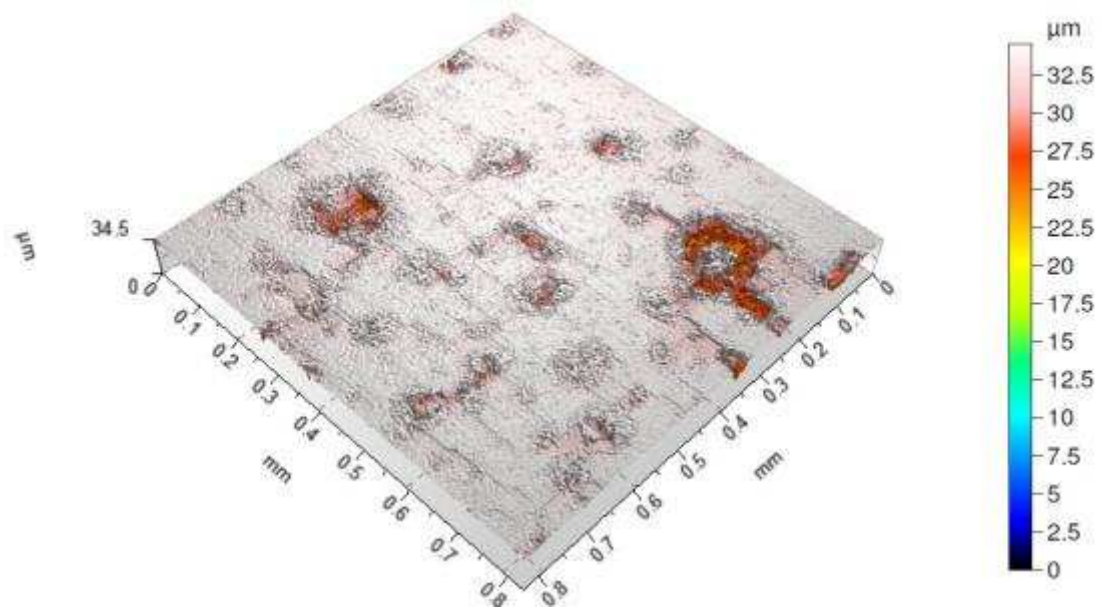


Figura 148 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio $\text{NaCl } 0,5 \text{ mol/dm}^3$.

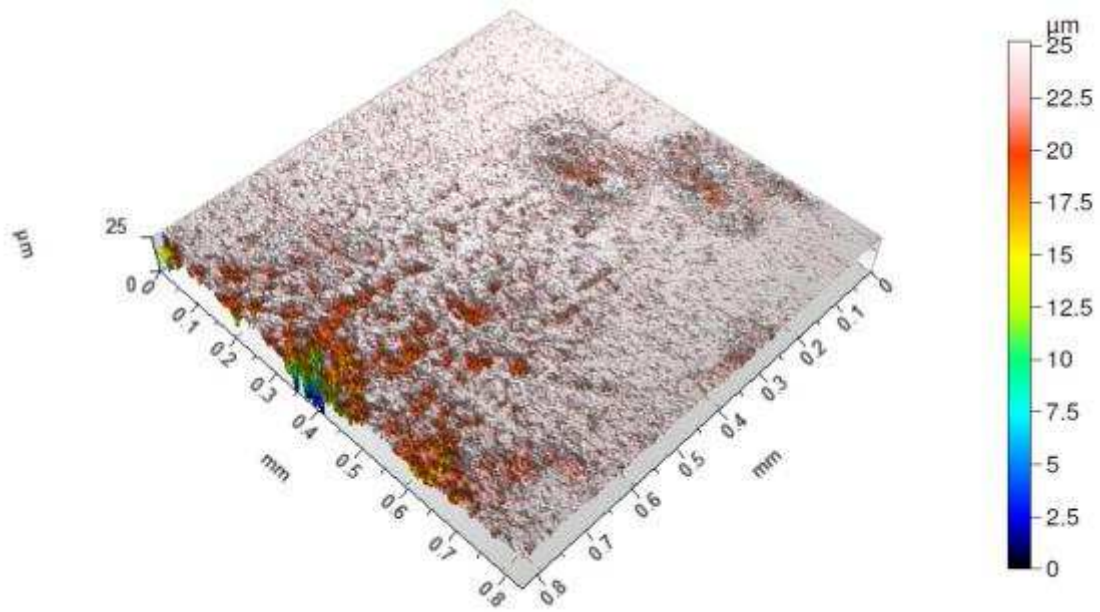


Figura 149 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

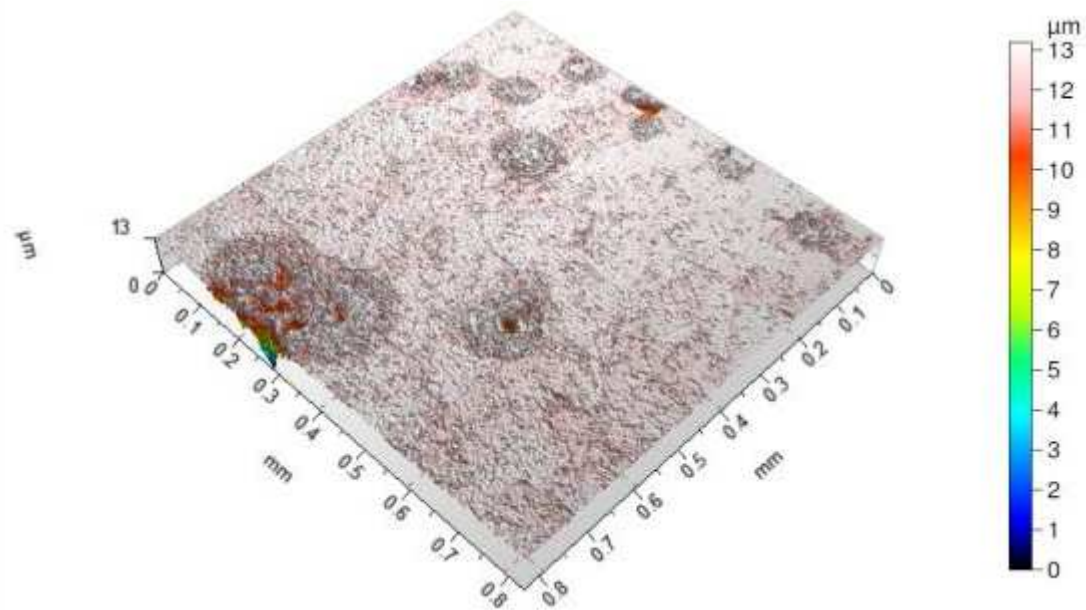


Figura 150 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 450°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

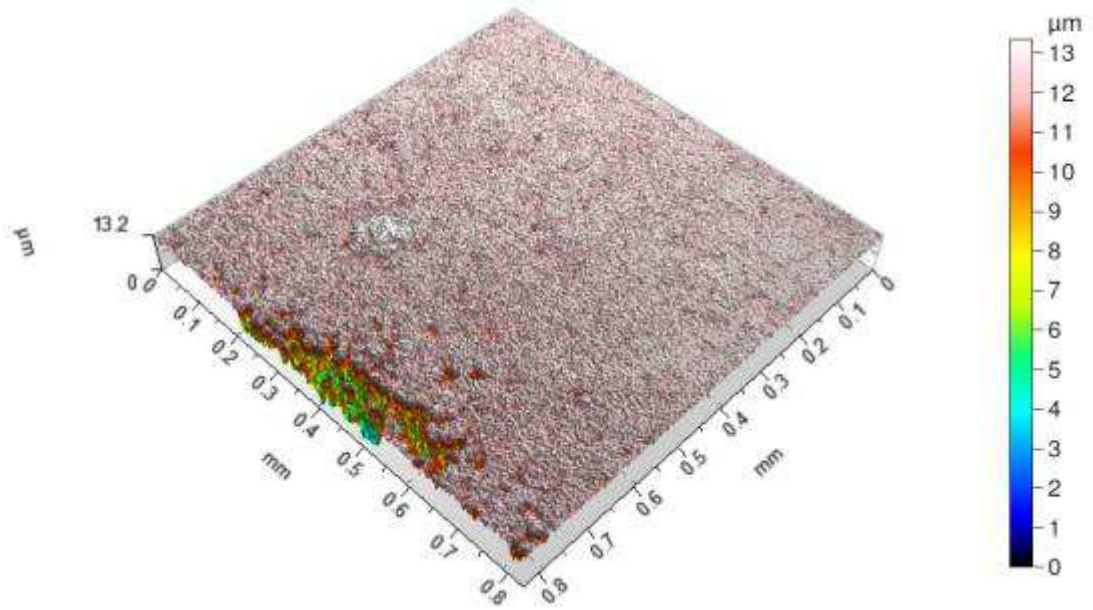


Figura 151 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

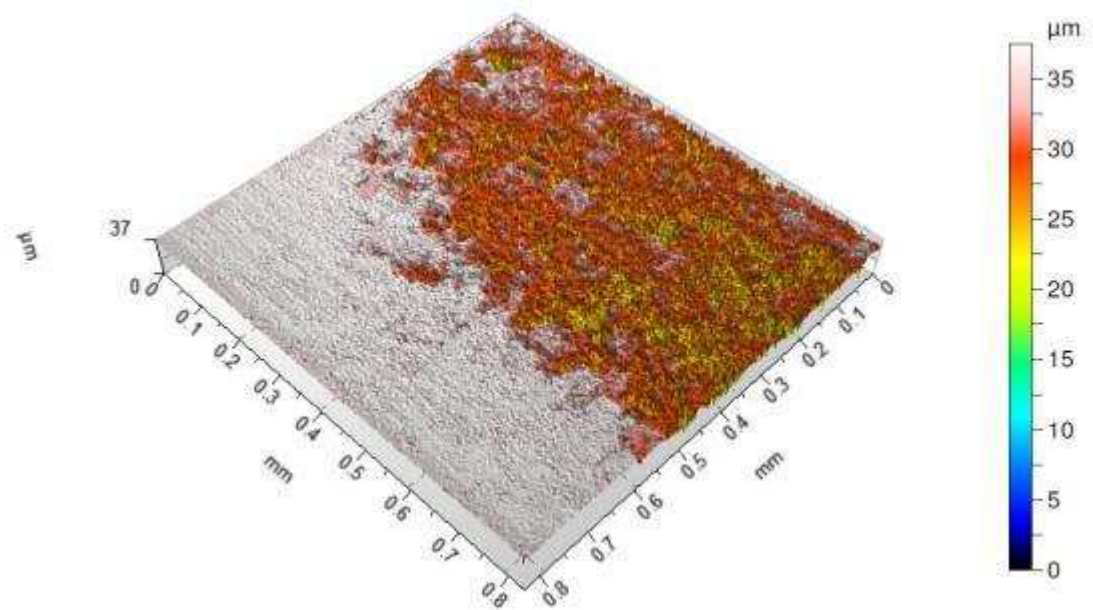


Figura 152 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

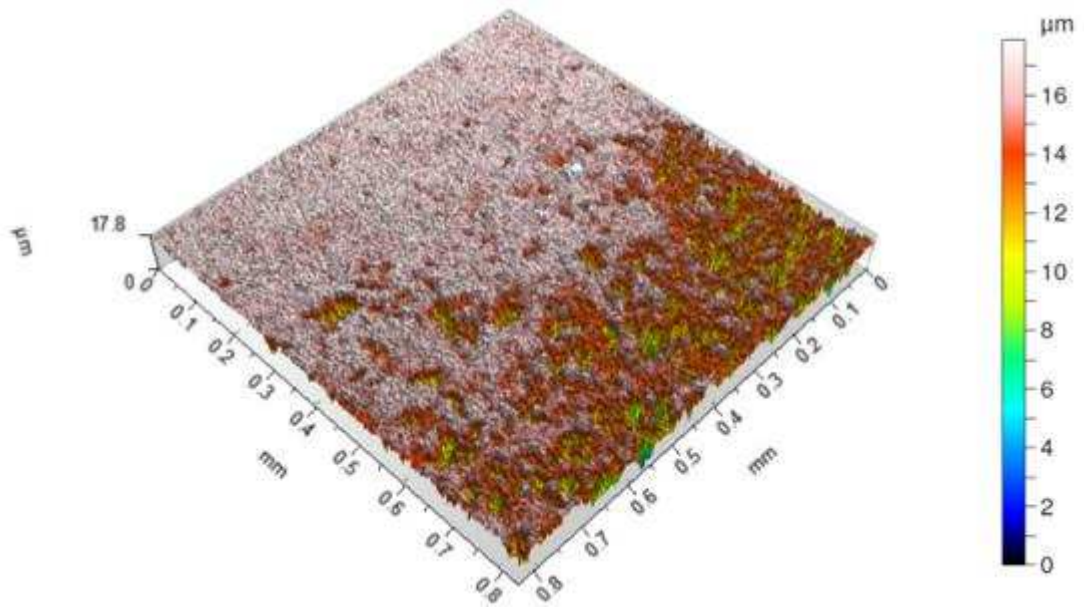


Figura 153 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

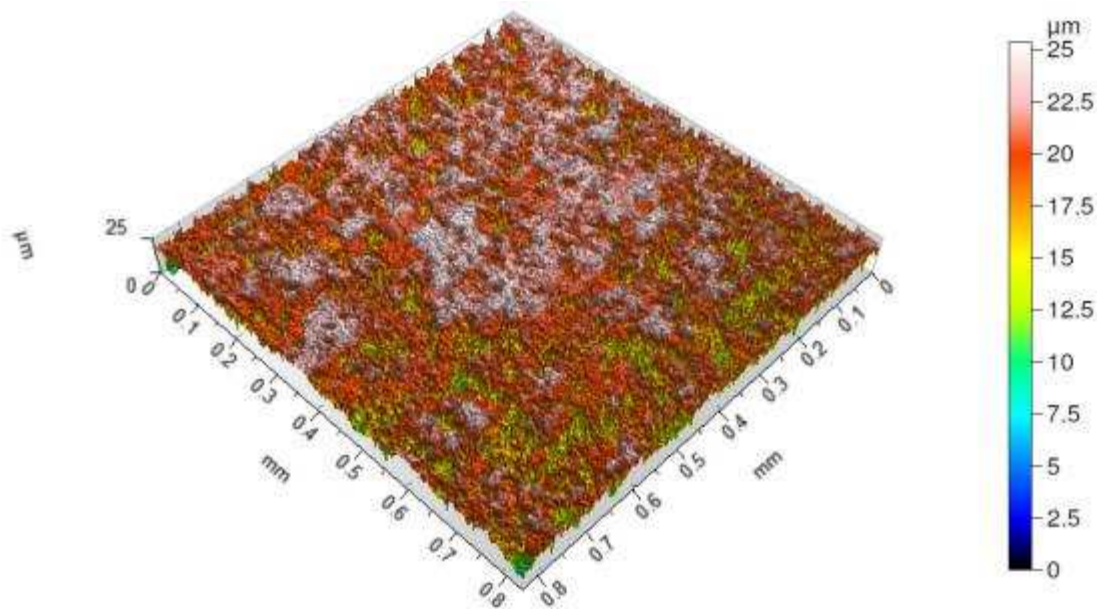


Figura 154 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

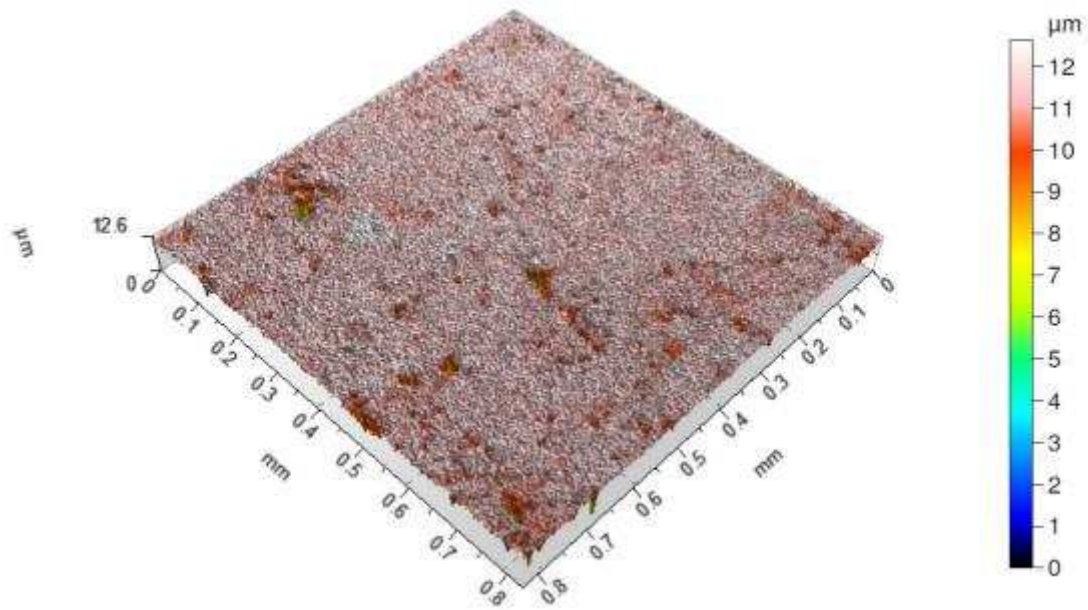


Figura 155 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio $\text{NaCl } 0,5 \text{ mol/dm}^3$.

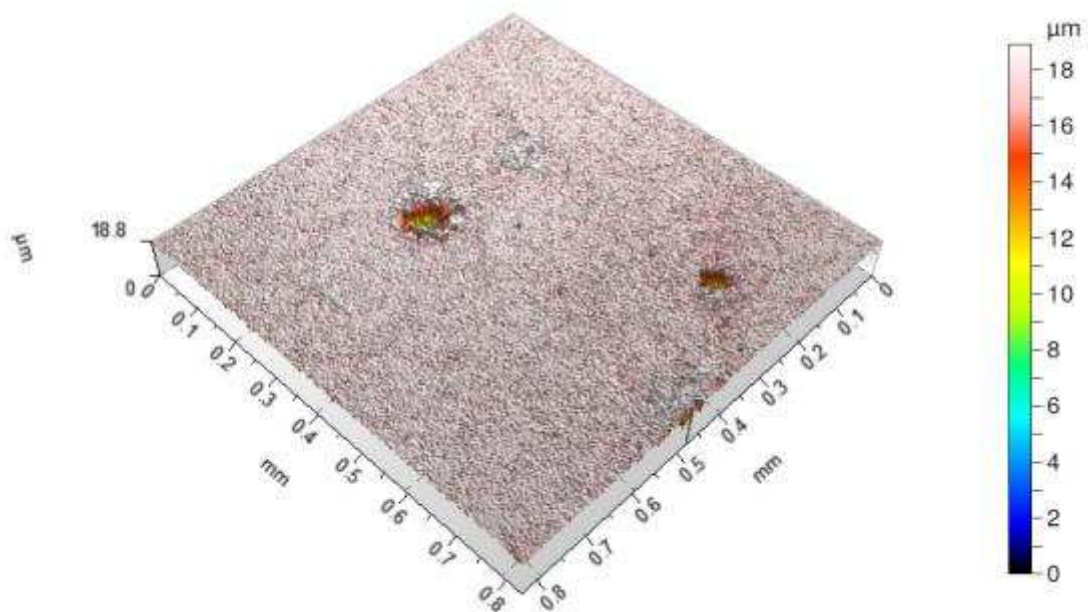


Figura 156 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio $\text{NaCl } 0,5 \text{ mol/dm}^3$.

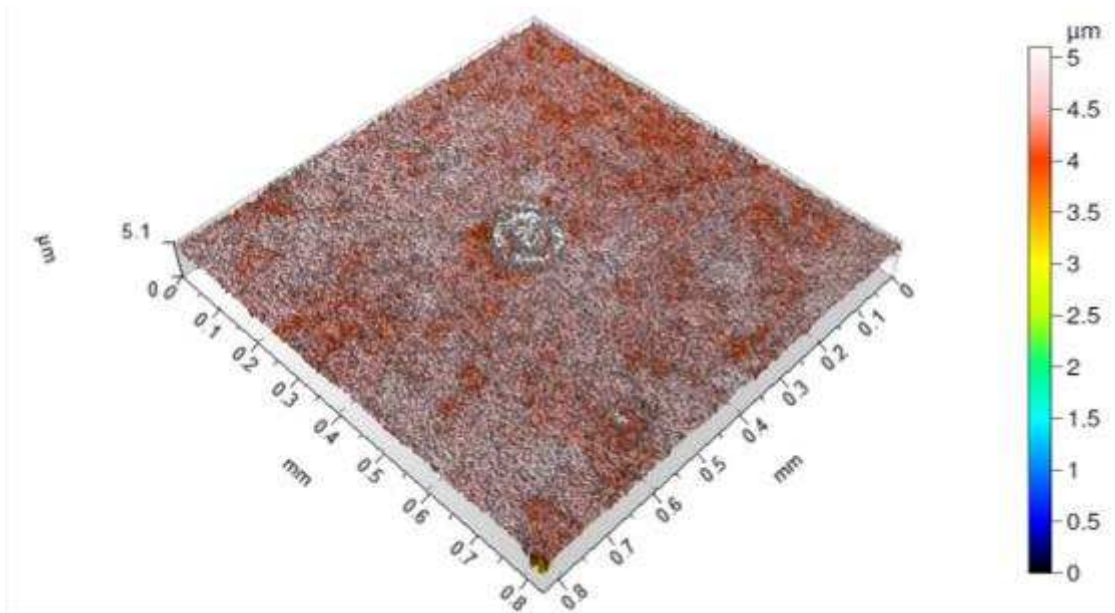


Figura 157 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

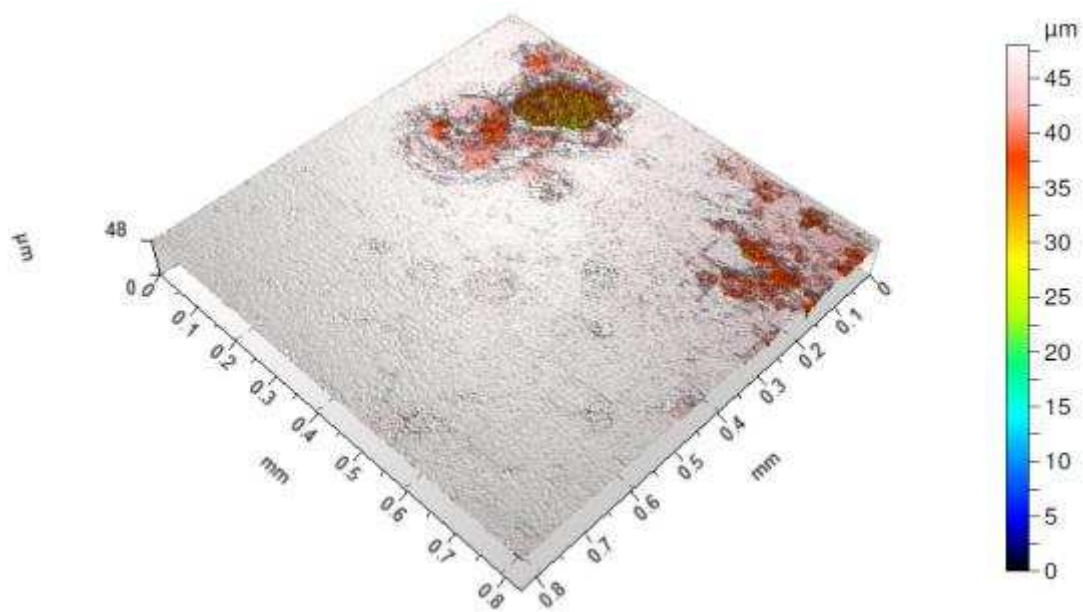


Figura 158 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

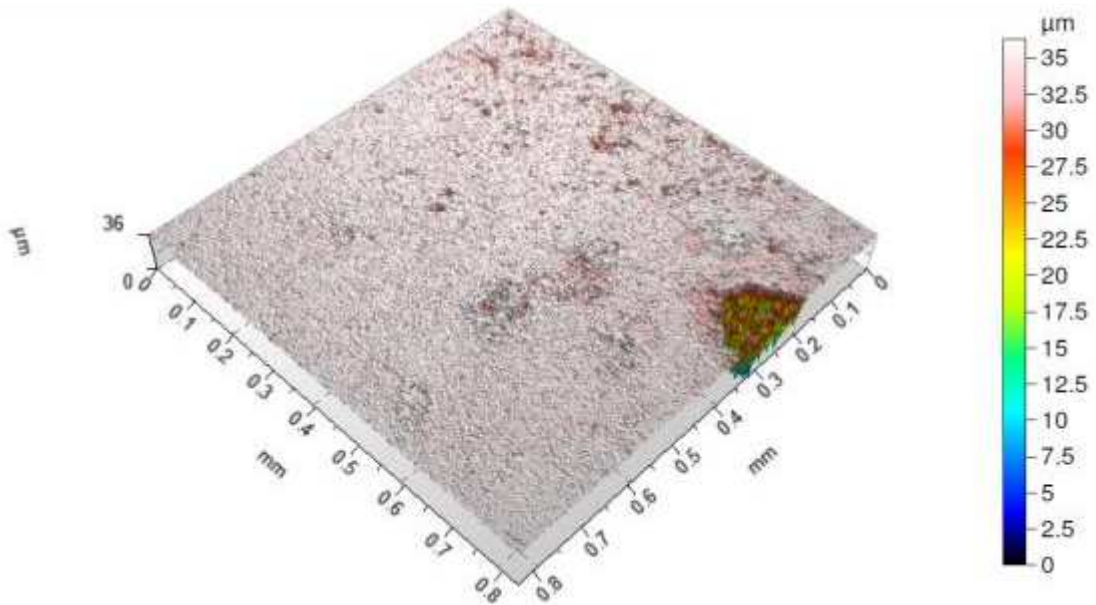


Figura 159 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

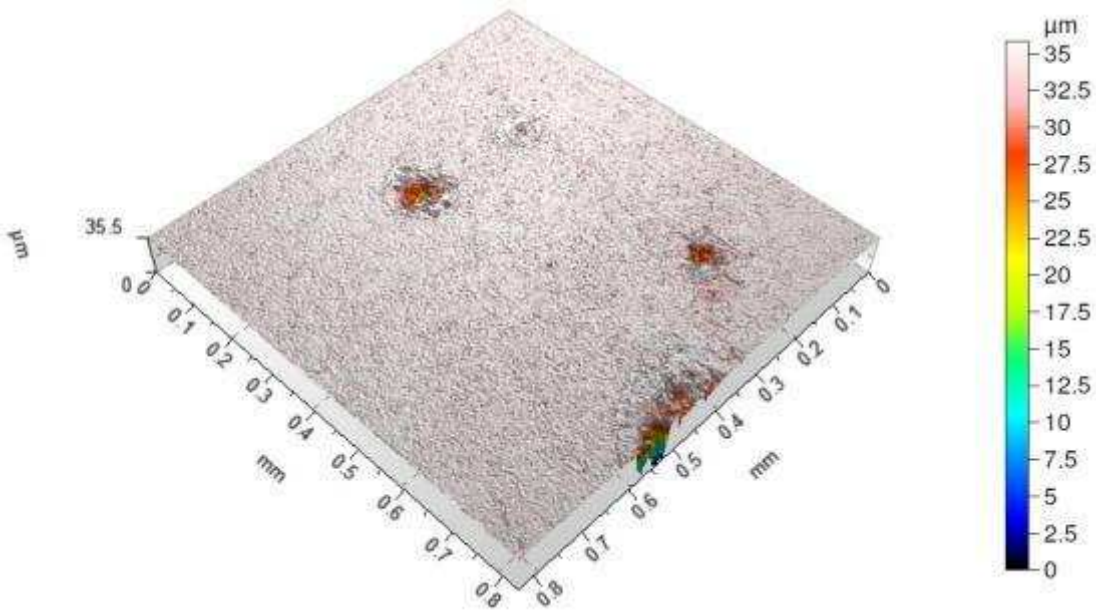


Figura 160 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 450°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

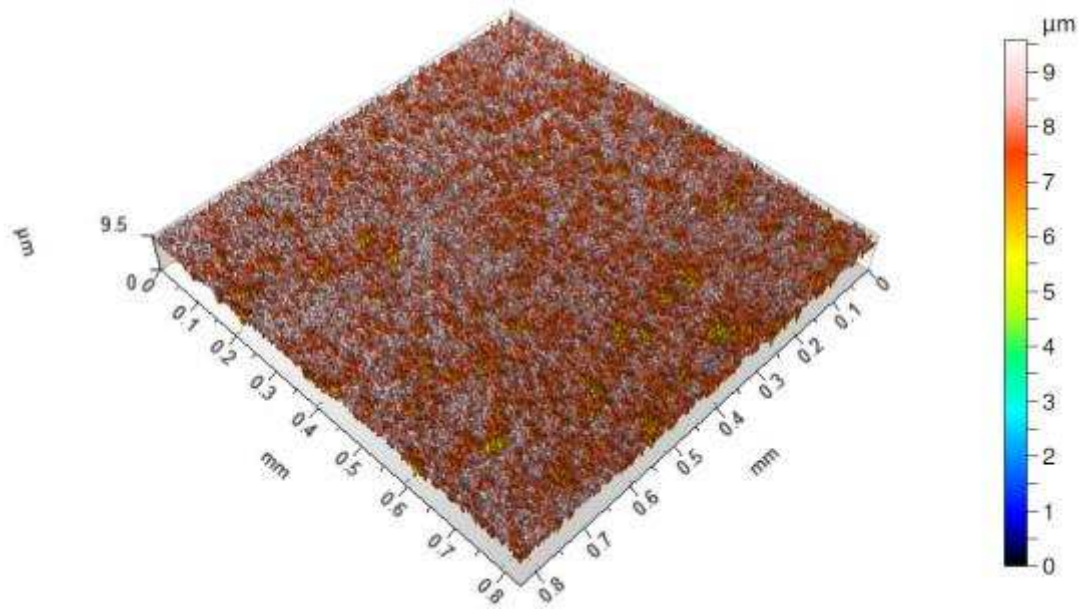


Figura 161 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

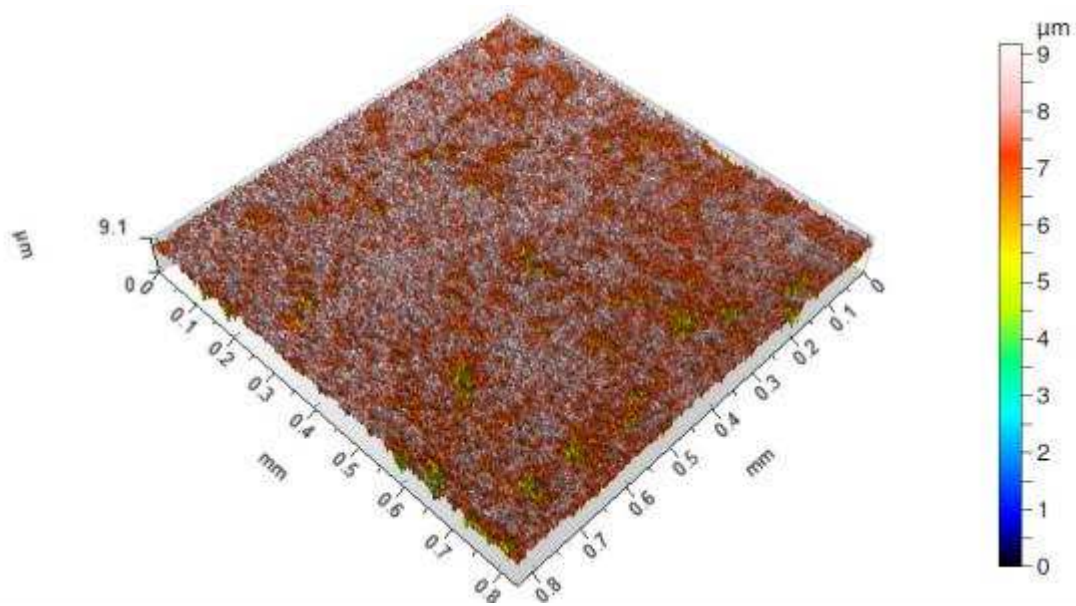


Figura 162 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

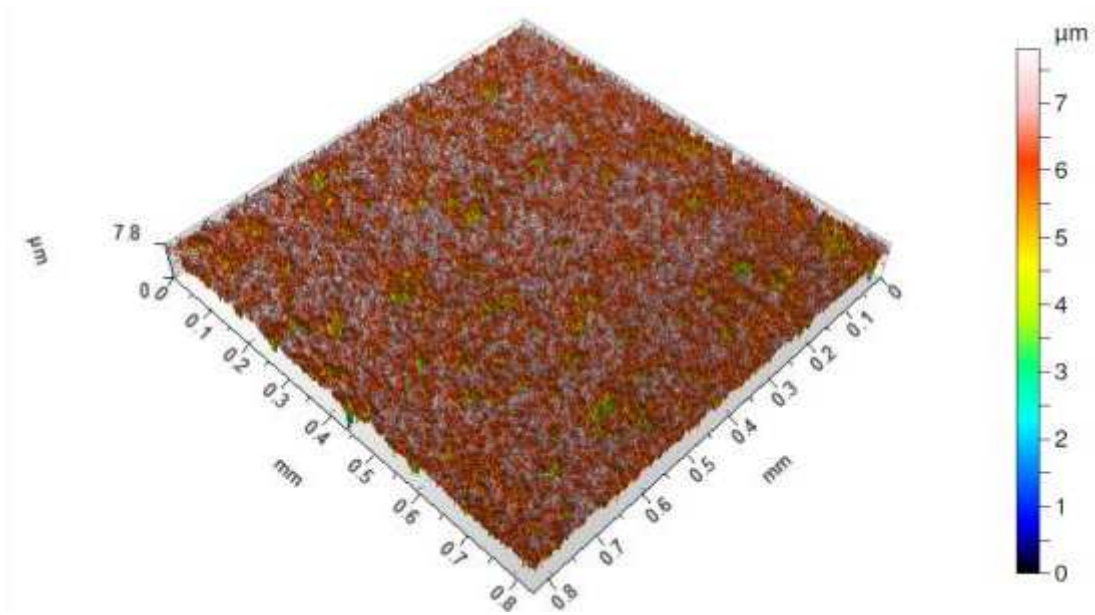


Figura 163 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

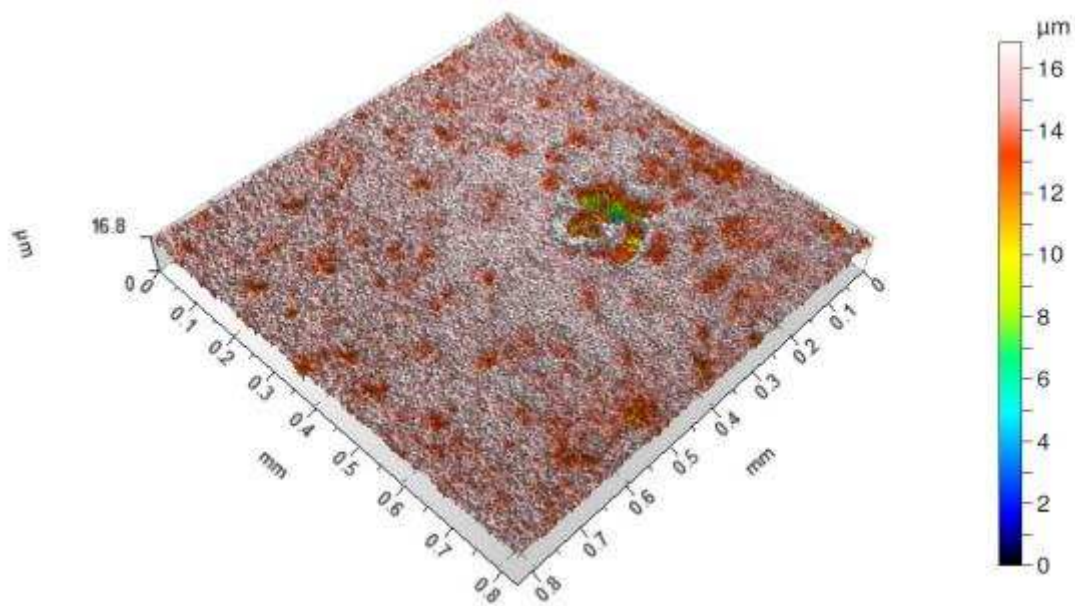


Figura 164 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

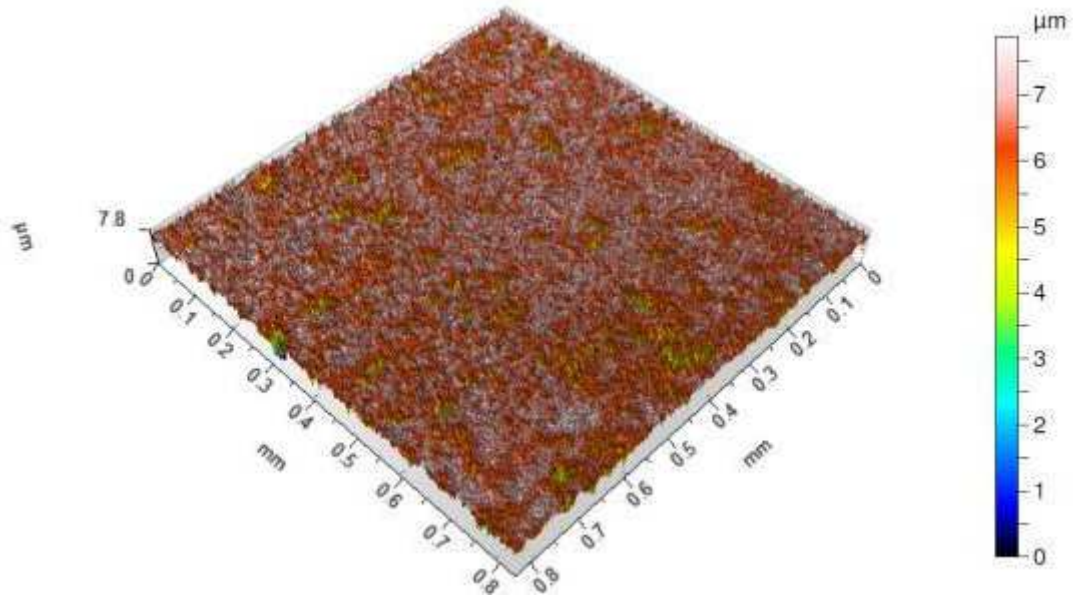


Figura 165 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

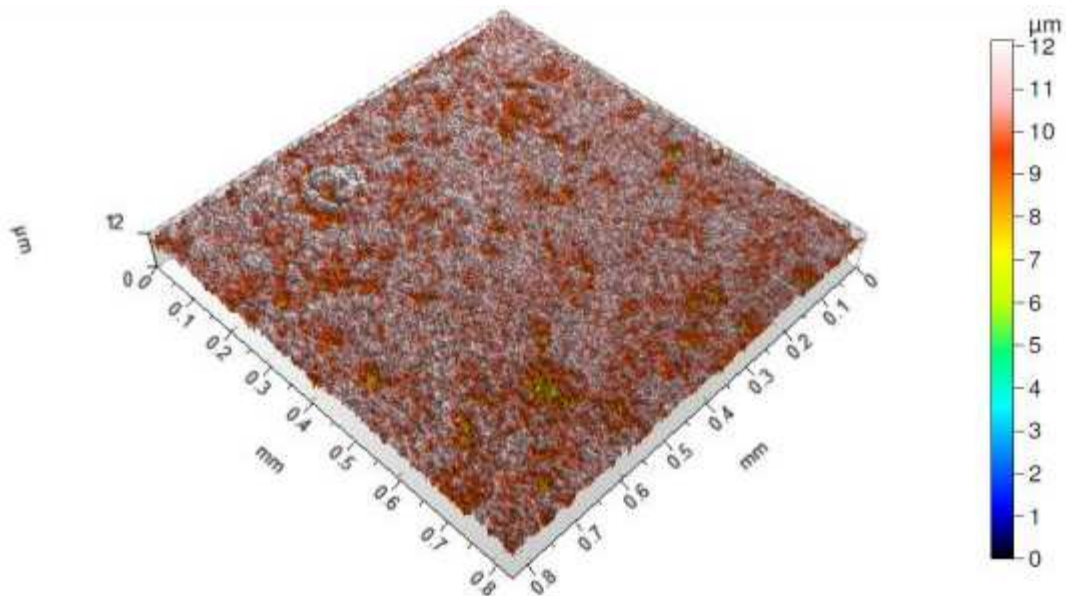


Figura 166 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

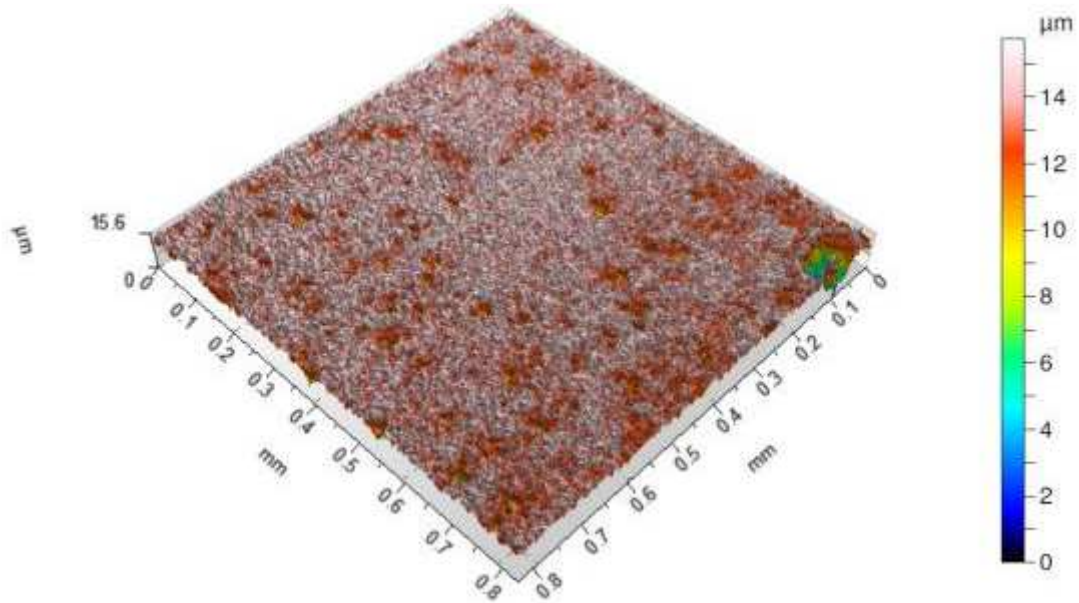


Figura 167 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

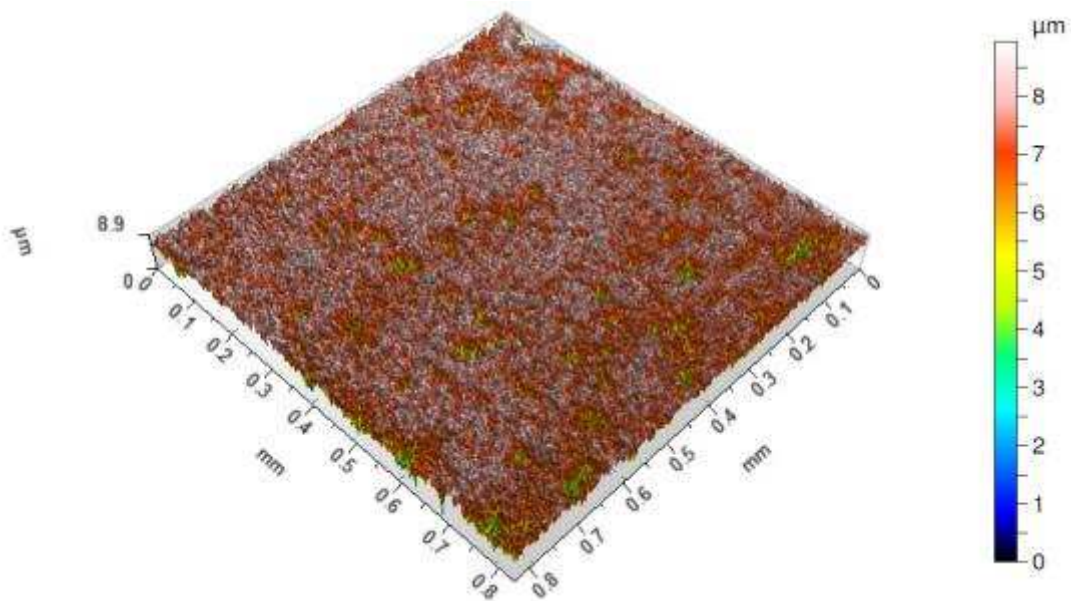


Figura 168 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

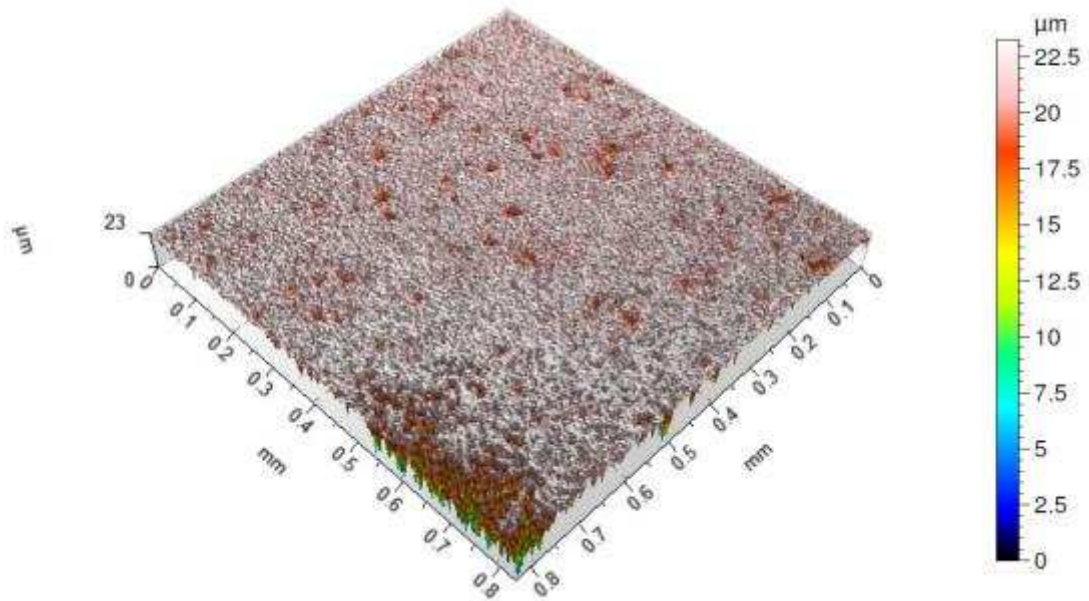


Figura 169 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

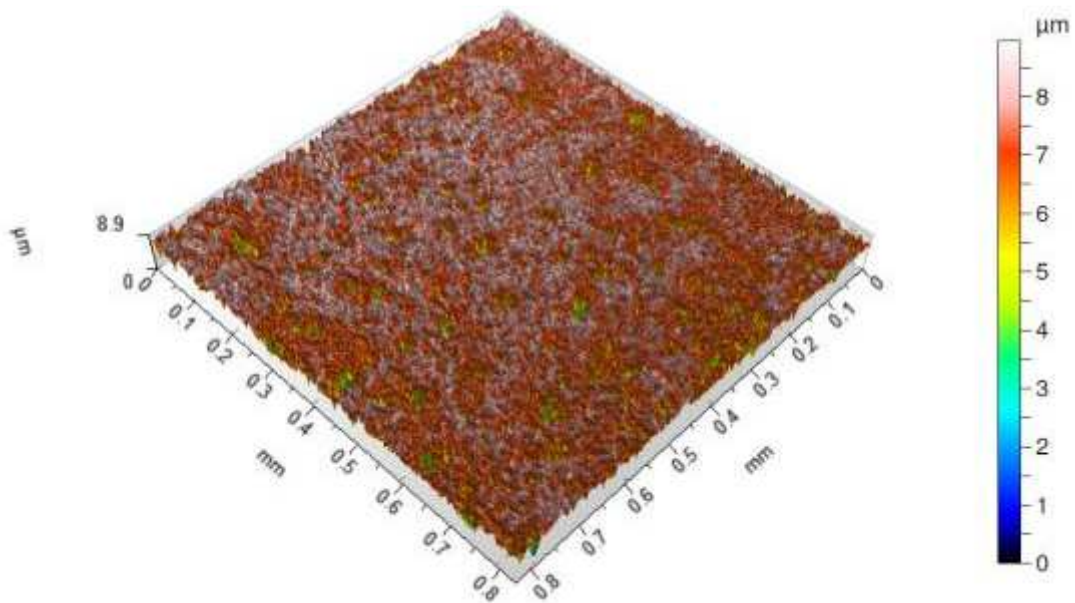


Figura 170 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 600°C por 1 hora, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.



Figura 171 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

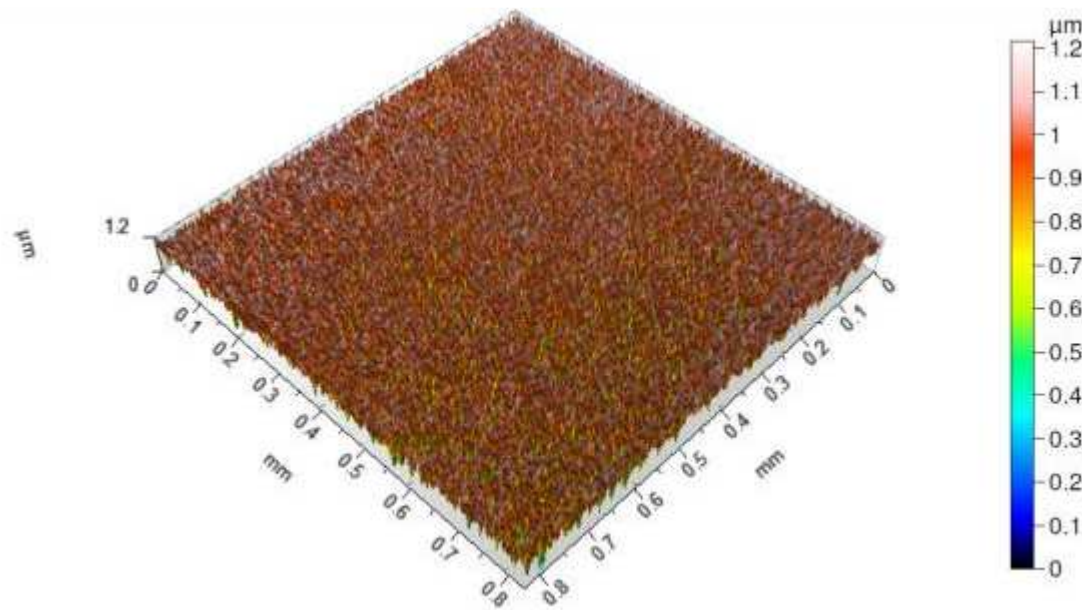


Figura 172 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

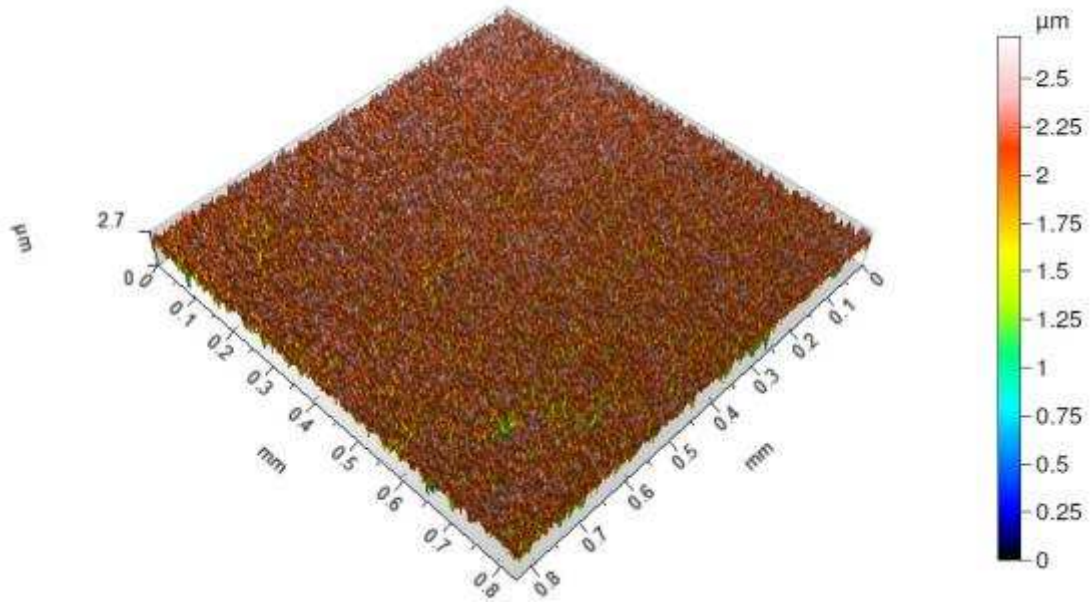


Figura 173 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

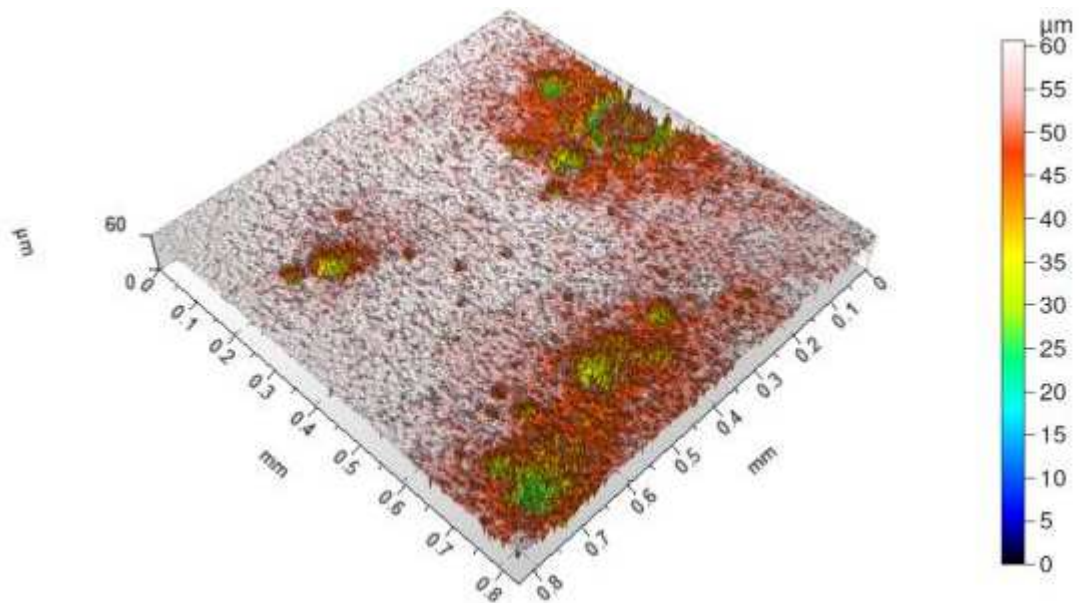


Figura 174 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

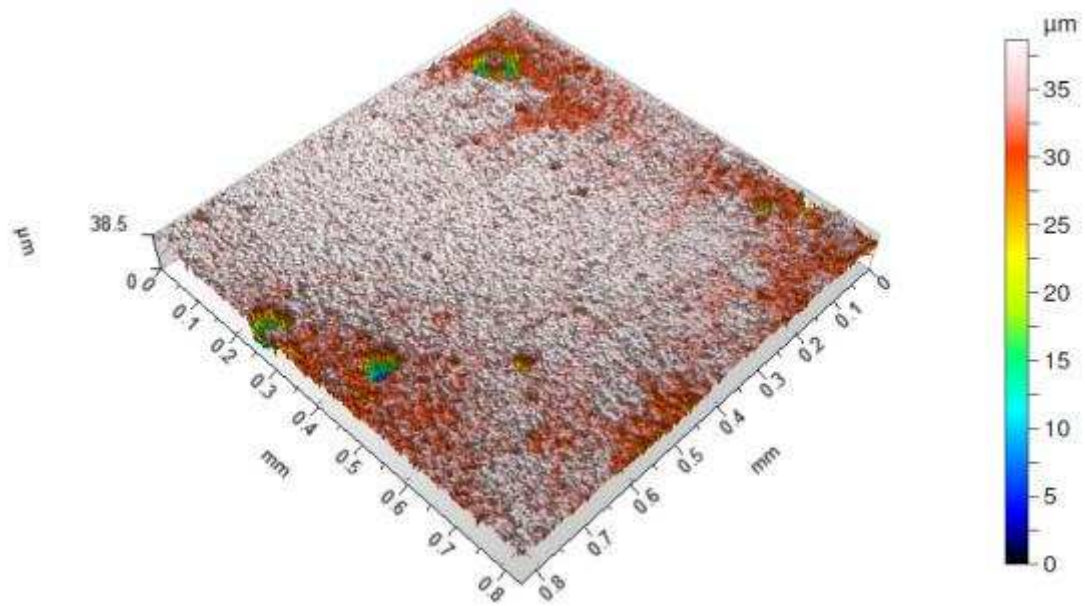


Figura 175 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio $\text{NaCl } 0,5 \text{ mol/dm}^3$.

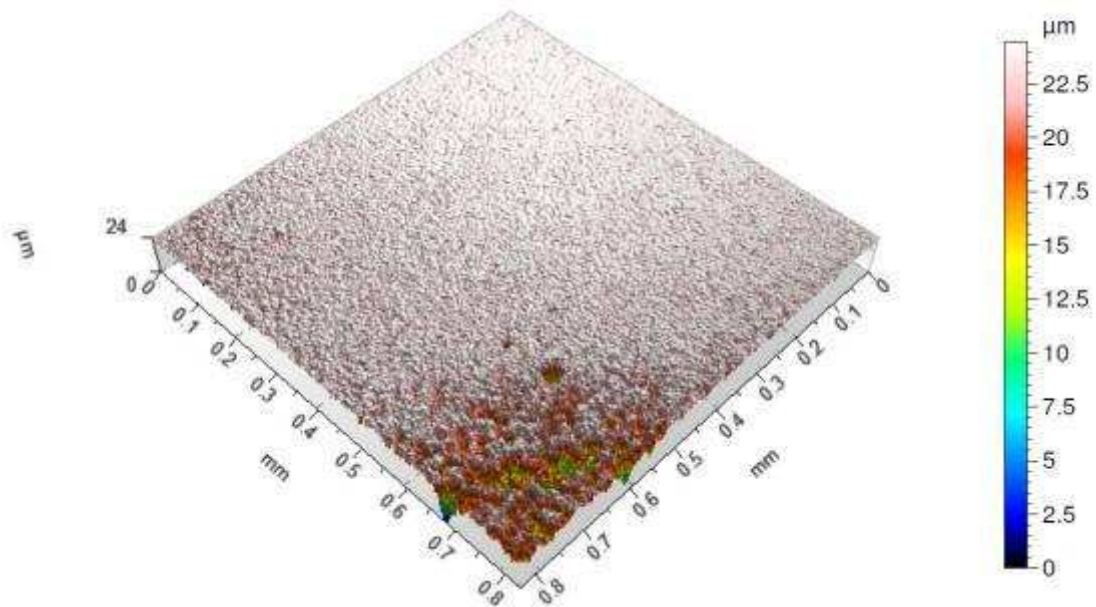


Figura 176 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio $\text{NaCl } 0,5 \text{ mol/dm}^3$.



Figura 177 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

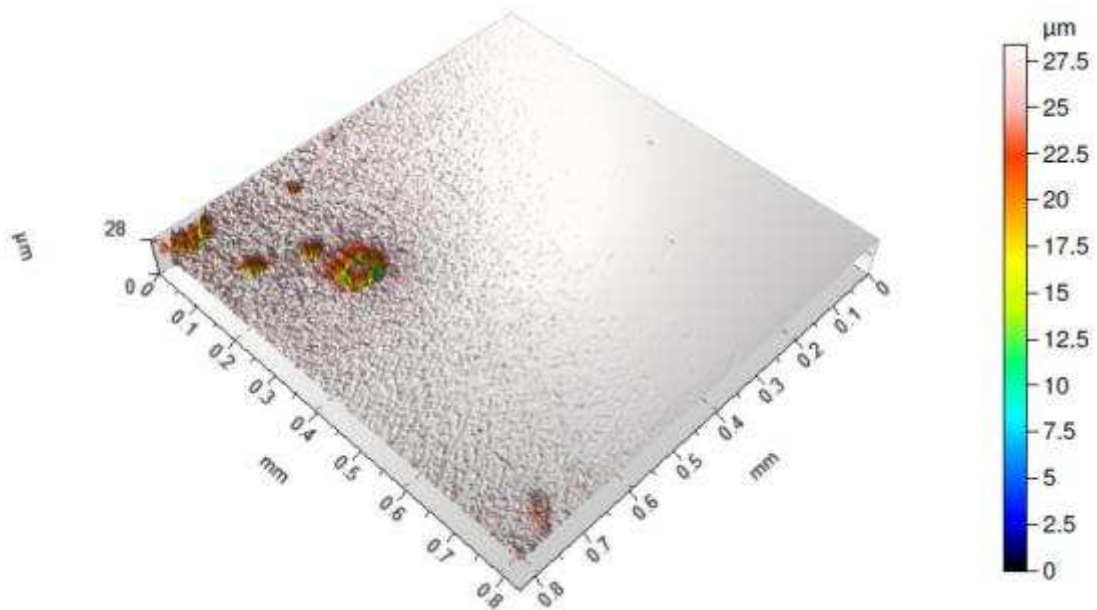


Figura 178 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

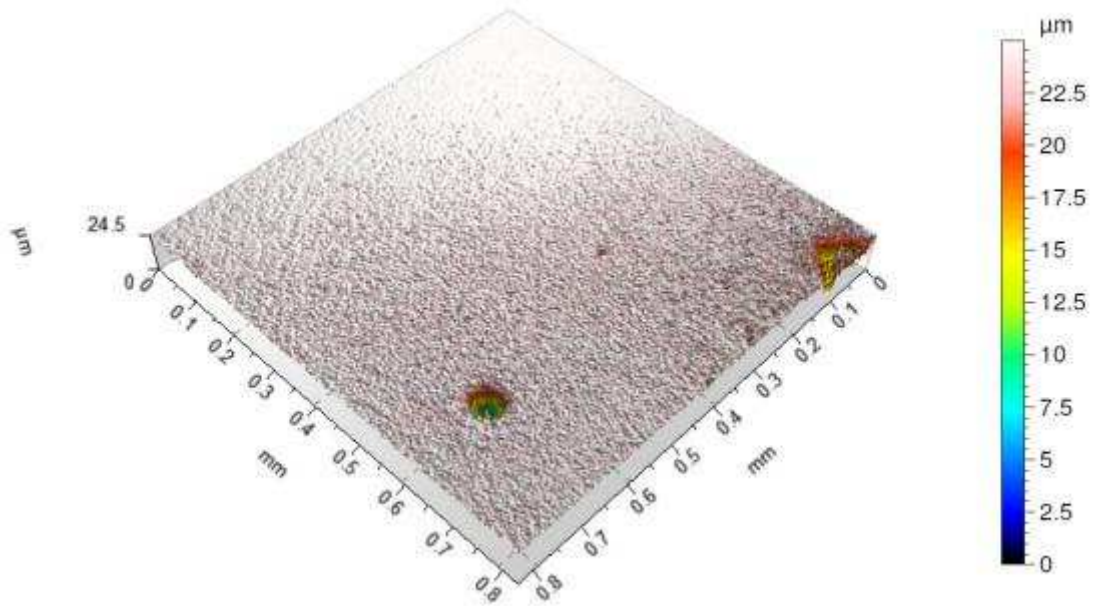


Figura 179 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

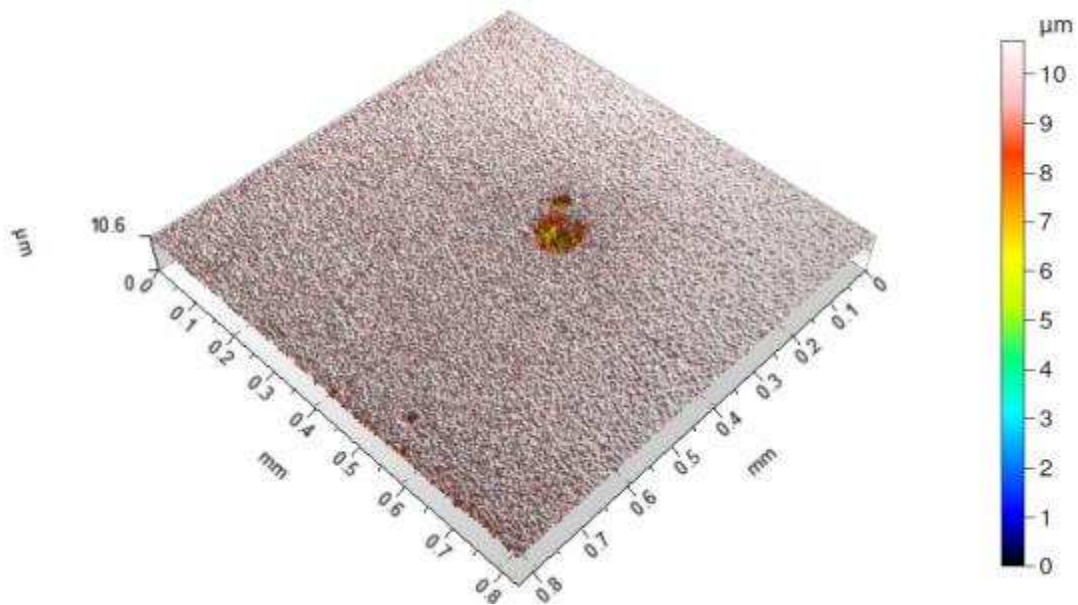


Figura 180 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 600°C por 2 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl $0,5 \text{ mol/dm}^3$.

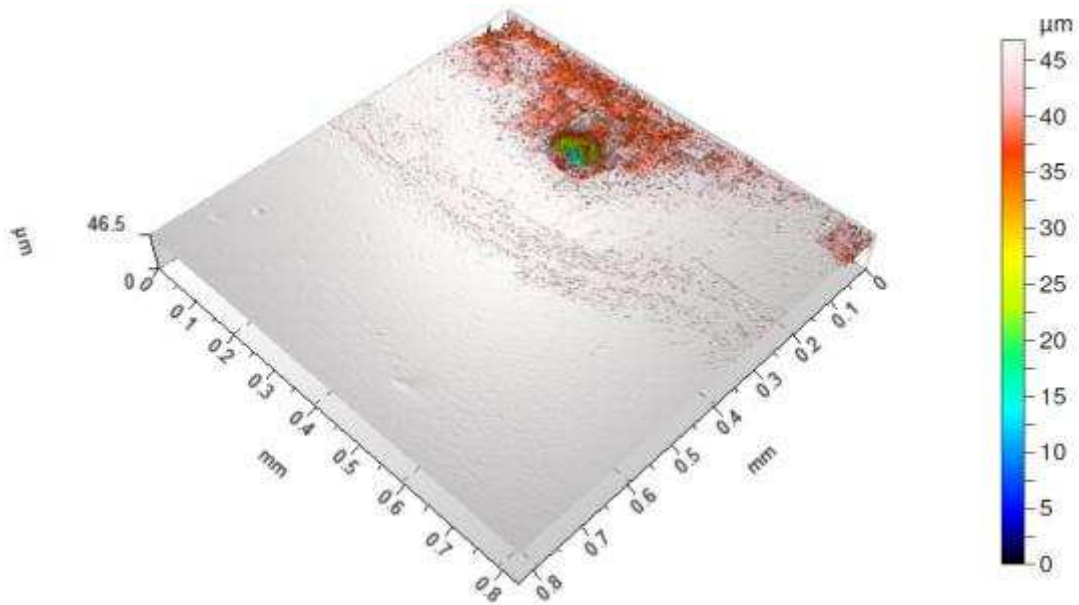


Figura 181 – Imagem topográfica da Região 1 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

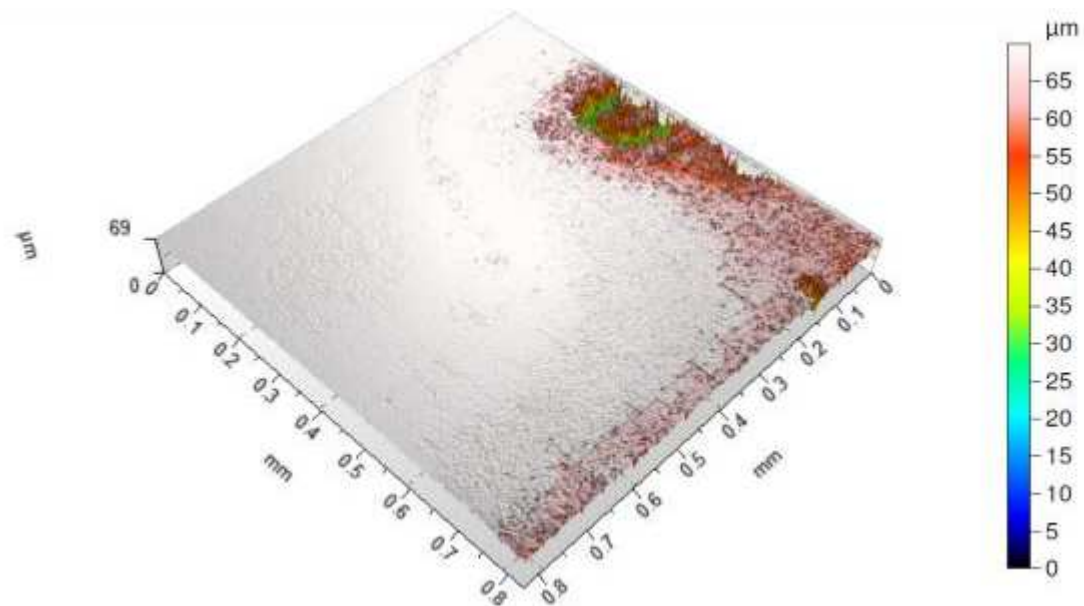


Figura 182 – Imagem topográfica da Região 2 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

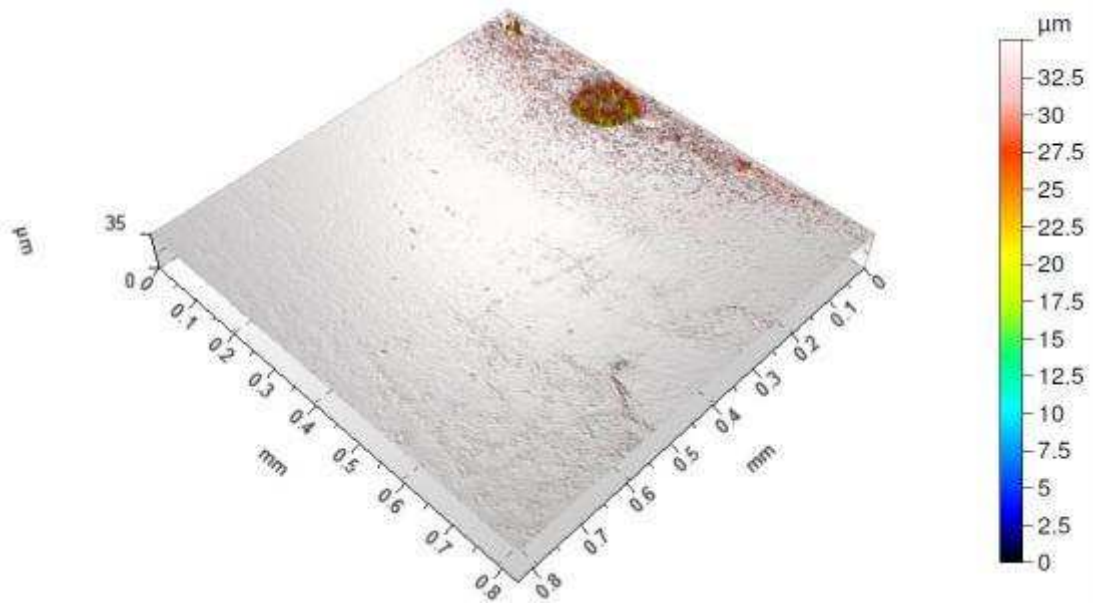


Figura 183 – Imagem topográfica da Região 3 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

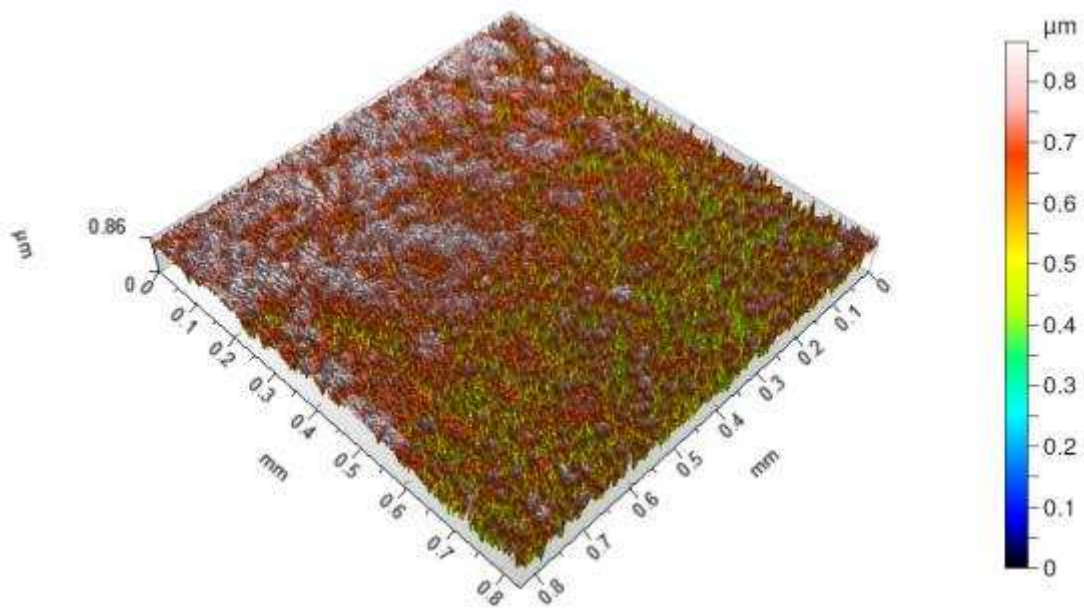


Figura 184 – Imagem topográfica da Região 4 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

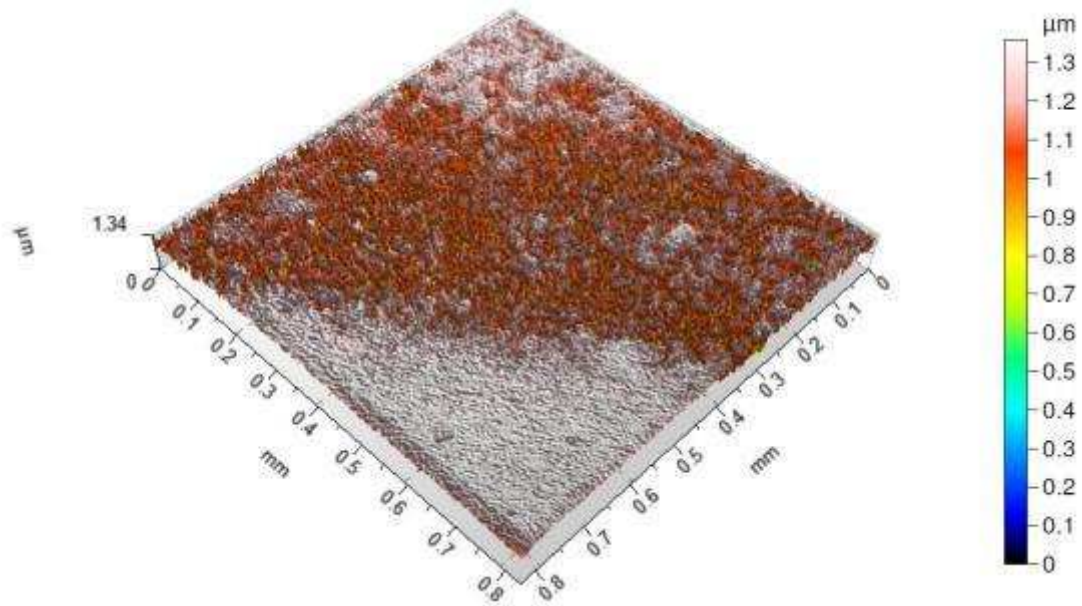


Figura 185 – Imagem topográfica da Região 5 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

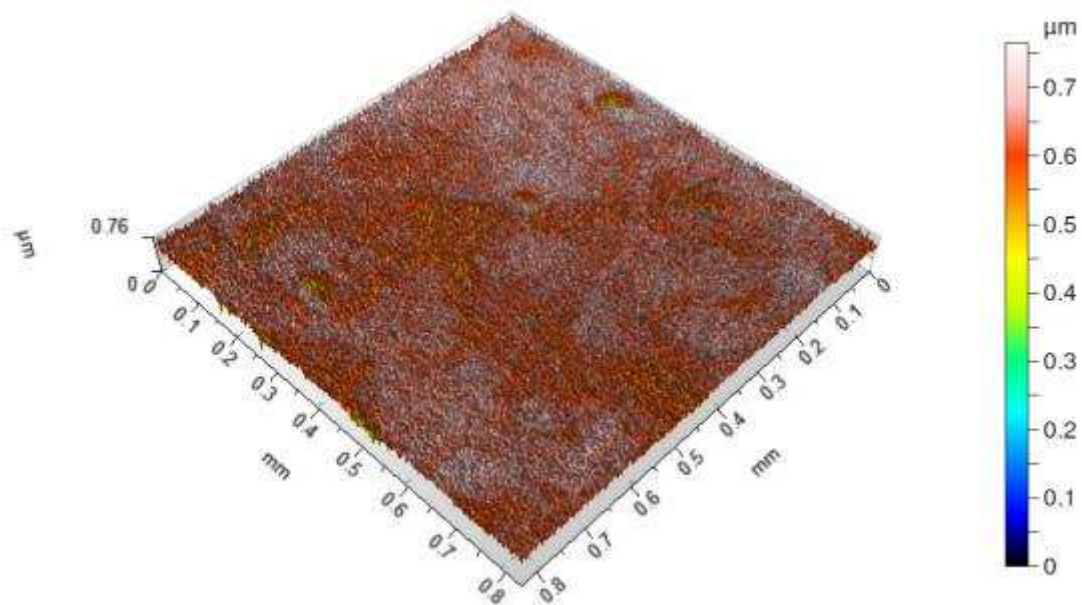


Figura 186 – Imagem topográfica da Região 6 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

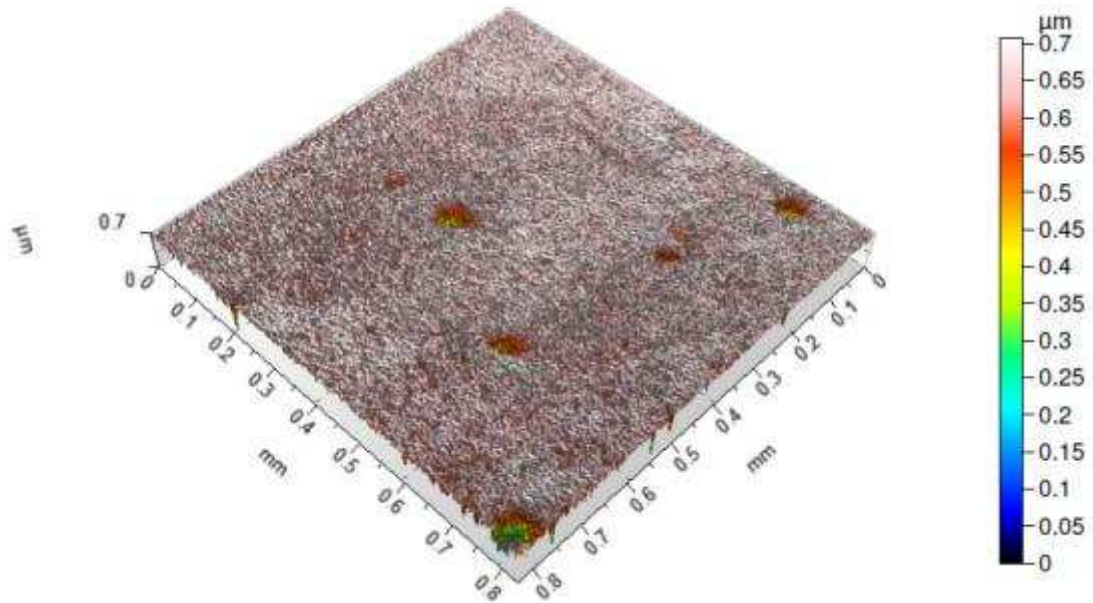


Figura 187 – Imagem topográfica da Região 7 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

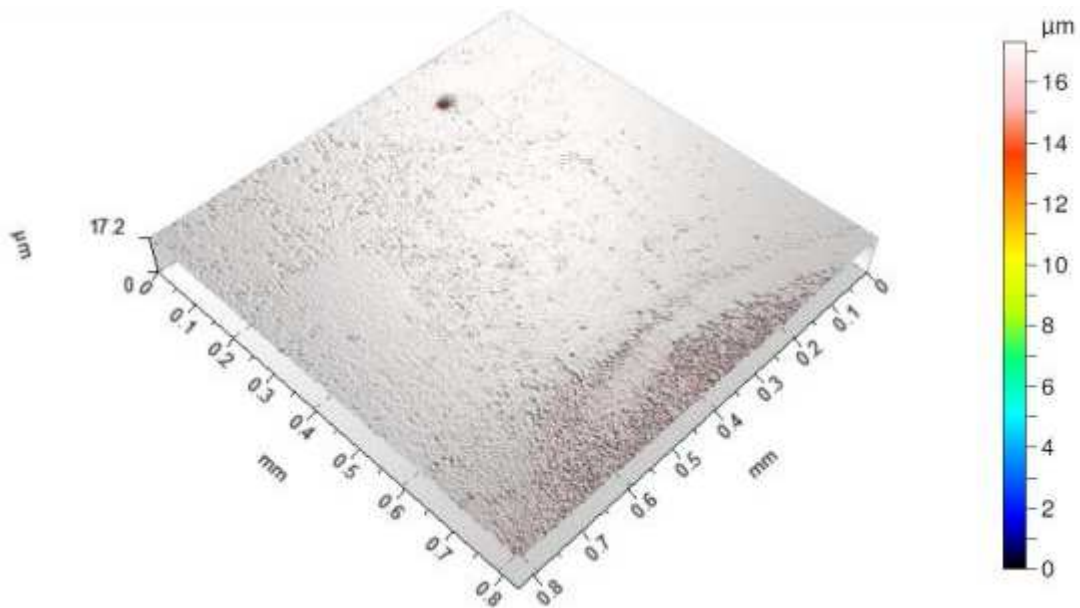


Figura 188 – Imagem topográfica da Região 8 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

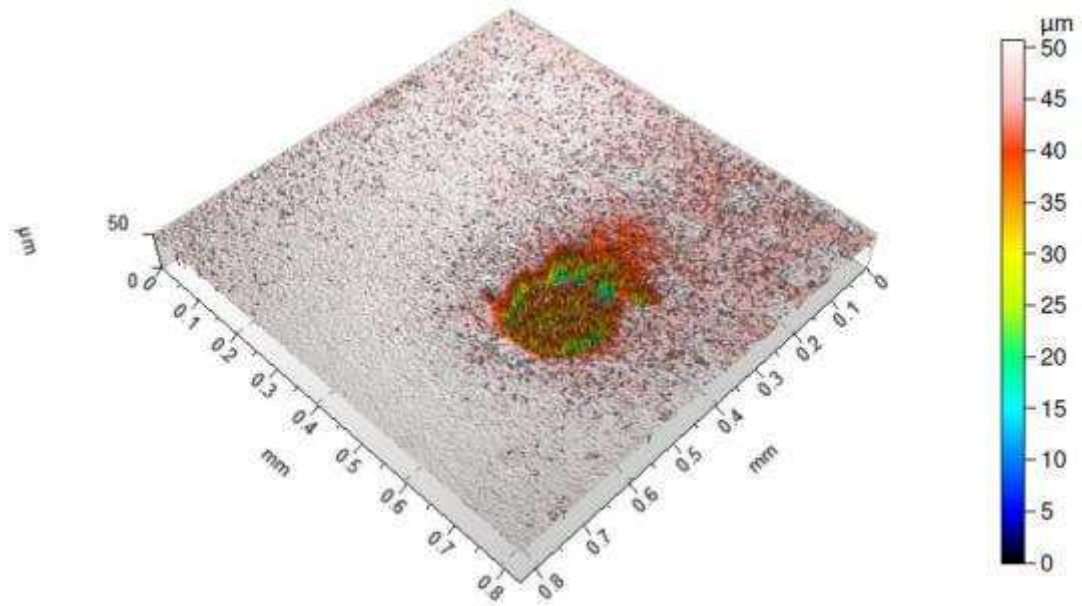


Figura 189 – Imagem topográfica da Região 9 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.

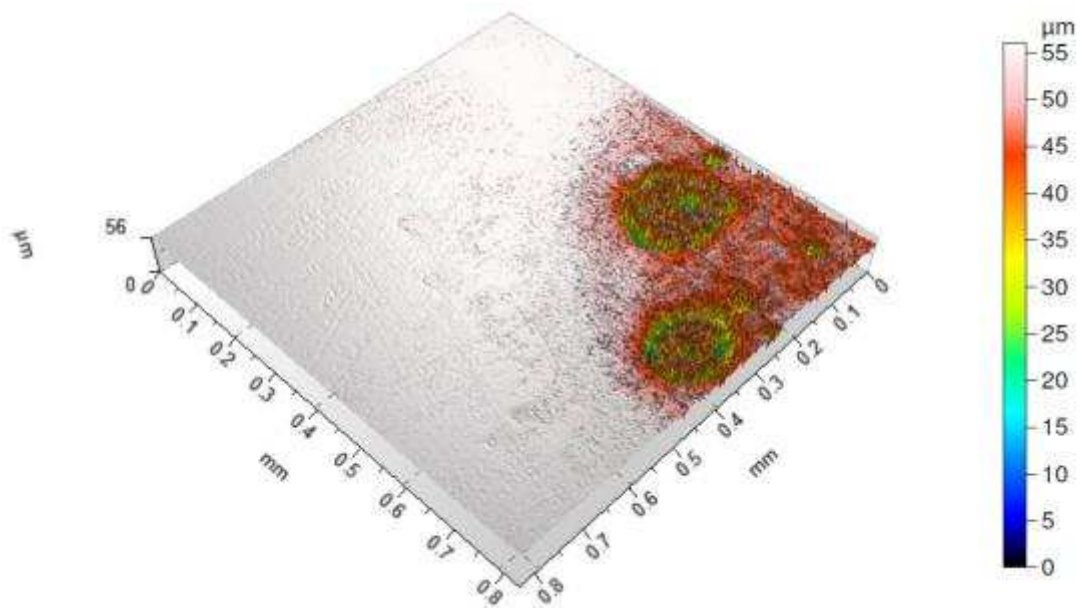


Figura 190 – Imagem topográfica da Região 10 da amostra revenida a 600°C por 3 horas, após ensaio eletroquímico em meio NaCl 0,5 mol/dm³.