

VILMAR JOÃO DE SOUZA JUNIOR

Estudo de corrosão por pites em superfície de aço 15-5 PH

Guaratinguetá - SP
2016

Vilmar João de Souza Junior

Estudo de corrosão por pites em superfície de aço 15-5 PH

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador (a): Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein

Guaratinguetá
2016

S729e Souza Junior, Vilmar João de
Estudo de corrosão por pites em superfície de aço 15-5PH / Vilmar
João de Souza Junior – Guaratinguetá, 2018.
88 f. : il.
Bibliografia: f. 85-87

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira hein
Co-Orientadora: Me. Camila Cristina Silva Prado

1. Corrosão. 2. Aço inoxidável. 3. Aço – corrosão. I. Título.

CDU 620.193



Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

VILMAR JOÃO DE SOUZA JUNIOR

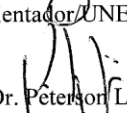
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS


Prof. Dr. Miguel Ángel Ramírez Gil
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein
Orientador UNESP/FEG


Prof. Dr. Peterson Luis Ferrandini
UNESP/FEG


Eng. M. Camila Cristina Silva do Prado
UNESP/FEG

Dezembro de 2016

RESUMO

Apesar de apresentarem custos mais elevados que outros materiais, a aparência estética e as propriedades superiores tornam os inoxidáveis mais atrativos que outras ligas nas mais diversas aplicações. O aço 15-5 PH está inserida no grupo dos endurecíveis por precipitação e apresenta ótima resistência a corrosão até a temperatura de aproximadamente 300°C, além de boa tenacidade e soldabilidade. As ligas inoxidáveis, apesar do nome, podem sofrer processos de corrosão e a corrosão por pites (ou puntiforme) ganha um destaque, já que os pites vão crescendo e podem nuclear trincas. Portanto, estudos que focam no adensamento dos conhecimentos sobre esse tipo de corrosão são bastante importantes e motivaram a realização do presente trabalho, no qual seis amostras de aço 15-5 PH passaram por rotas de tratamento térmico de solubilização (900°C) e precipitação (496, 579 e 621°C), sendo duas amostras por condição. Após o experimento, concluiu-se que as temperaturas de tratamento influenciaram nos resultados de modo que aquelas tratadas a 579°C sofreram maiores efeitos corrosivos do que as outras e que a tinta usada para isolar as superfícies que não passaram por metalografia não aderiu corretamente e promoveu corrosão por frestas em todas as amostras. As medidas de rugosidade mostraram um aumento do valor tanto de S_q quanto de S_a .

PALAVRAS CHAVE: Aços inoxidáveis. 15-5 PH. Corrosão por pites.

ABSTRACT

Although they present higher costs than other materials, the aesthetic appearance and superior properties make stainless steel more attractive than other alloys in the most diverse applications. The 15-5 PH steel is included in the group of precipitation hardened steels and has excellent corrosion resistance up to approximately 300 ° C, as well as toughness and weldability. Stainless alloys, despite their name, can suffer corrosion processes and pitting (or punctiform) corrosion gains prominence, because as the pitting grows, they can bring up cracks. Therefore, studies that focus on the densification of the knowledge about this type of corrosion are very important and motivated the accomplishment of the present work, in which six samples of 15-5 PH steel went through thermal treatments routes of solubilization (900 ° C) and precipitation (496, 579 and 621 ° C), two samples per condition. After the experiment, it was concluded that treatment temperatures influenced the results so that those treated at 579 ° C suffered greater corrosive effects than others and that the paint used to isolate as surfaces that did not go through metallography did not adhere correctly and promoted corrosion by cracks in all samples. As roughness measurements showed an increase in value of both Sq and Sa.

KEYWORDS: Stainless steel. 15-5 PH. Pitting corrosion.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	07
1.1	O AÇO INOXIDÁVEL	07
1.1.1	Os aços inoxidáveis austeníticos	08
1.1.2	Os aços inoxidáveis ferríticos	08
1.1.3	Os aços inoxidáveis martensíticos	09
1.1.4	Os aços inoxidáveis duplex	09
1.1.5	Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação	10
1.1.5.1	O aço 15-5 PH	10
1.2	CORROSÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS	11
1.2.1	Tipos de corrosão nos aços inoxidáveis	11
1.2.1.1	Corrosão em frestas ou arestas	11
1.2.1.2	Corrosão intergranular	12
1.2.1.3	Corrosão sob tensão	13
1.2.1.4	Fragilização por hidrogênio	14
1.2.1.5	Corrosão por pites	15
2	OBJETIVO	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	MATERIAIS	20
3.1.1	Amostras de aço 15-5 PH	20
3.2	ANÁLISE METALOGRÁFICA DAS AMOSTRAS	20
3.2.1	Preparação das amostras	20
3.2.2	Aquisição das imagens	20
3.2.3	A imersão em solução salina	21
4	RESULTADOS	22
4.1	ANTES DA IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA	22
4.1.1	Amostras tratadas a 496°C	22
4.1.1.1	Amostra 1	22
4.1.1.2	Amostra 2	27
4.1.2	Amostras tratadas a 579°C	32
4.1.2.1	Amostra 1	32
4.1.2.2	Amostra 2	37
4.1.3	Amostras tratadas a 621°C	42

4.1.3.1	Amostra 1	42
4.1.3.2	Amostra 2	47
4.2	DEPOIS DA IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA	52
4.2.1	Amostras tratadas a 496°C	52
4.2.1.1	Amostra 1	52
4.2.1.2	Amostra 2	57
4.2.2	Amostras tratadas a 579°C	62
4.2.2.1	Amostra 1	62
4.2.2.2	Amostra 2	67
4.2.3	Amostras tratadas a 621°C	72
4.2.3.1	Amostra 1	72
4.2.3.2	Amostra 2	77
5	DISCUSSÕES	82
6	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 O AÇO INOXIDÁVEL

Os aços inoxidáveis são uma família de aços compostos principalmente de ferro e cromo (com um mínimo de 10,5% de cromo). Apesar de apresentarem custos mais elevados que outros materiais, a aparência estética e as propriedades superiores tornam os inoxidáveis atrativos. Ao contrário dos aços carbono comuns, eles apresentam uma gama crescente de resistência mecânica e à corrosão. Fato que ocorre, por conta da adição correta de elementos de liga, sendo cada elemento responsável por prover diferentes atributos relacionados a propriedades mecânicas e de resistência a diferentes ambientes (CALLISTER, 2012).

Tabela 1 – Efeitos dos principais elementos de liga

Influência na propriedade	Elementos													
	C	Si	S	P	Cr	Ni	Mn	Co	Mo	V	W	Cu	Ti	
Rigidez	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	nd	-	
Resistência ao impacto	-	-	-	-	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Resistência ao desgaste	+	nd	nd	nd	+	nd	+	nd	+	+	+	nd	+	
Endurecimento	nd	+	nd	nd	+	+	+	nd	+	nd	nd	nd	nd	
Dureza	+	+	nd	nd	+	+	nd	+	+	+	+	nd	nd	
Usinabilidade	-	-	+	-	-	-	-	nd	nd	-	-	nd	nd	
Ductilidade	-	-	-	-	-	+	-	-	nd	nd	-	nd	nd	
Resistência a altas temperaturas	+	+	nd	+	+	nd	nd	+	+	+	+	nd	nd	
Retenção de dureza	+	+	nd	+	-	nd	+	+	+	+	+	nd	nd	
Resistência a corrosão	nd	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	nd	

Fonte: Mendes (2000).

A tabela 1 ilustra o tipo de influência de alguns elementos de liga nos materiais em que estiverem inseridos. O enxofre e o titânio, por exemplo, diminuem a rigidez de um material, assim como a maioria dos elementos apresentados, exceto o níquel. Nenhum elemento aumenta a resistência ao impacto e nenhum diminui a resistência a altas temperaturas e a dureza.

A resistência à corrosão é uma propriedade que será tratada de maneira diferencial no presente trabalho. Assim, analisando a tabela pode-se observar que a maioria dos elementos de liga aumenta a resistência a corrosão, exceto o enxofre, que promove uma redução dessa propriedade, e o carbono e o titânio que não influenciam. Apesar de haver tantos elementos que alterem a resistência à corrosão, o maior influenciador é o cromo, que já foi comentado como sendo um dos principais componentes dos aços inoxidáveis. De maneira geral, o segundo

elemento mais presente é o manganês, com no máximo 15% de presença na composição de aços inoxidáveis, como ocorre com o aço inoxidável ABNT 205. (VILLARES METALS, 2016)

Os aços inoxidáveis são divididos em cinco grupos: austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação.

1.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos

Dentre as famílias de aços inoxidáveis, os austeníticos são os que apresentam maior resistência à corrosão, além de possuírem propriedades mecânicas excepcionais. (SANCHES, 2009)

A microestrutura dessa classe de aços é predominantemente austenítica (cúbica de face centrada), estabilizada pela grande quantidade de elementos de liga, dentre eles Ni, Mn, N e C, que proporciona maior resistência mecânica. À temperatura ambiente, os austeníticos possuem baixo limite de escoamento, alto limite de resistência a tração, elevada ductilidade e fácil soldabilidade. (ARAÚJO, 2009)

Outra característica interessante dos aços inoxidáveis austeníticos é que eles mantêm as propriedades citadas a baixas temperaturas (até aproximadamente -5°C) e a temperaturas relativamente altas (até 925°C). (NÚCLEO INOX, 2016)

1.1.2 Aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, assim como o ferro puro a temperatura ambiente. O principal elemento de liga presente é o cromo, com concentração típica entre 11 e 25%. Como o teor de carbono é bastante baixo, a resistência mecânica deles é limitada, além de não serem endurecíveis por têmpera. (CHIAVERINI, 1998)

Os ferríticos possuem o mais baixo custo dentre os inoxidáveis e sua resistência à corrosão é menor se comparados com os austeníticos, assim como sua tenacidade, conformabilidade e soldabilidade. (NÚCLEO INOX, 2016)

Apesar de suas propriedades inferiores em relação aos austeníticos, os aços inoxidáveis ferríticos têm algumas aplicações especiais, como na construção do núcleo de válvulas solenoides. (CHIAVERINI, 1998)

1.1.3 Aços inoxidáveis martensíticos

Esses aços inoxidáveis são similares aos aços carbono e de baixa liga, com estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado. A presença do carbono permite que esses materiais sejam endurecidos por tratamento térmico, sendo que o valor final da dureza depende do teor de carbono na liga, chegando a até 60 HRC. Normalmente, são utilizados em aplicações que exigem alta resistência mecânica sob baixas temperaturas. (GARRISON, 2001)

Existem três tipos de aços inoxidáveis martensíticos: o primeiro é composto por aqueles com carbono e reforçados pela precipitação do carboneto de ferro quando temperado a baixas temperaturas, o segundo tipo contém baixa concentração de carbono e são reforçados pela precipitação de partículas de cobre ou intermetálicos, e por fim, o terceiro tipo é fortalecido pela precipitação de carbonetos. Todos possuem concentração de cromo entre 12 e 15%. (GARRISON, 2001)

Para esta família de aços inoxidáveis, a resistência a corrosão só ocorre após a têmpera. (RAJASEKHAR, 2008)

No caso da realização de revenimento, este não pode ser feito na faixa de 400 a 600°C, por provocar perda acentuada na resistência a corrosão e queda de tenacidade, ou seja, fragilidade do revenido. (MÜRI, 2009)

1.1.4 Aços inoxidáveis duplex

Esses aços possuem os elevados valores de alongamento da austenita e os altos valores de limite de escoamento da ferrita, ou seja, exibem propriedades mecânicas bastante notáveis. (SENATORE, 2006)

São aplicáveis em ambientes com alta concentração de íons cloreto (até 80000 ppm) entretanto, sua condição de trabalho ideal se dá a baixas temperaturas, até 80°C, pois quando

submetidos a aquecimentos prolongados podem precipitar produtos secundários que reduzem suas propriedades mecânicas, além de apresentam condição termodinâmica metaestável após tratamento térmico de solubilização. (MARTINS, 2006)

Quanto a resistência a corrosão, os aços inoxidáveis duplex apresentam PRE (Pitting Resistance Equivalent) da ordem de 35-45, sendo que os aços inoxidáveis comuns possuem valores que variam de 20 a 25. (FEDELLE, 1999)

1.1.5 Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação

Dentre as famílias de aços inoxidáveis, os endurecíveis por precipitação apresentam os maiores valores de resistência mecânica, além de uma elevada resistência a corrosão, perdendo apenas para os austeníticos. Como o nome diz, são tratáveis termicamente pelo mesmo processo usado em algumas ligas de alumínio e níquel, o envelhecimento. Seus principais elementos de liga são o cobre, o titânio, nióbio e alumínio (VILLARES METALS, 2016; MODENESI, 2001)

Eles são divididos em três grupos: aços austeníticos, semiausteníticos e martensíticos. As composições desses aços devem ser balanceadas com precisão de modo a produzirem endurecimento por dois mecanismos separados, primeiramente por meio da transformação da austenita em martensita e posterior precipitação, via tratamento térmico de envelhecimento, de compostos intermetálicos. (PECKNER ET AL., 1977; WHITE, 1969)

Os tratamentos térmicos consistem de três passos básicos para os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação austeníticos e semi-austeníticos: condicionamento da austenita, transformação para martensita e posterior precipitação ou envelhecimento. No caso dos martensíticos, não é necessário o tratamento de condicionamento (FINE, 1964).

1.1.5.1 O aço 15-5 PH

Essa liga está inserida no grupo dos endurecíveis por precipitação e também pode ser chamado de aço 15Cr-5Ni. Possui estrutura martensítica, apresentando, portanto, elevadas propriedades mecânicas e ótima resistência a corrosão até a temperatura de aproximadamente

300°C. O 15-5PH também possui boa tenacidade tanto na direção longitudinal quanto na transversal, além de boa soldabilidade. (AK STEEL, 2007)

Tabela 2 – Composição química específica do aço inox 15-5 PH

Elementos	Mínimo	Máximo
Carbono	-	0,070
Magnésio	-	1,000
Silicone	-	1,000
Fósforo	-	0,030
Enxofre	-	0,015
Cromo	14,000	15,500
Níquel	3,500	5,500
Nióbio	-	0,450
Cobre	2,500	4,500
Molibdênio	-	0,500

Fonte: Capellato (2014).

1.2 CORROSÃO NOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Apesar do nome esses materiais também estão sujeitos à ação corrosiva, de modo que existem diferentes tipos de corrosão que intercorrem nessas ligas metálicas, como por arestas ou frestas, intergranular, sob tensão, fragilização por hidrogênio e a corrosão por pites. É importante ressaltar que, na realidade, ocorre uma mistura desses fenômenos e que um pode levar à ocorrência de outro durante a vida útil num mesmo material, apesar de algumas ligas metálicas serem mais resistentes a alguns tipos de corrosão do que outras.

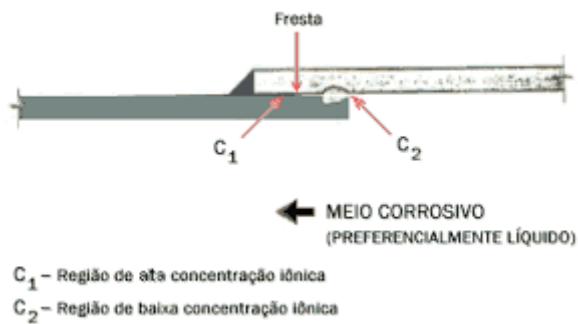
1.2.1 Tipos de corrosão nos aços inoxidáveis

1.2.1.1 Corrosão em frestas ou arestas

Essa é uma forma de corrosão localizada que ocorre em regiões com frestas ou fechadas, de modo que o meio corrosivo pode adentrar e permanecer estagnado nessas regiões. As frestas podem ser ocasionadas por um detalhe de projeto, uma falha na execução da soldagem ou, até

mesmo, pelo depósito de sujeira, produtos contaminantes e incrustações na superfície do material. De maneira geral, meios que contêm cloreto são particularmente perigosos para os aços inoxidáveis. (MECANOCHEMIE INDÚSTRIAS QUÍMICAS, 2016)

Figura 1 - Corrosão em frestas

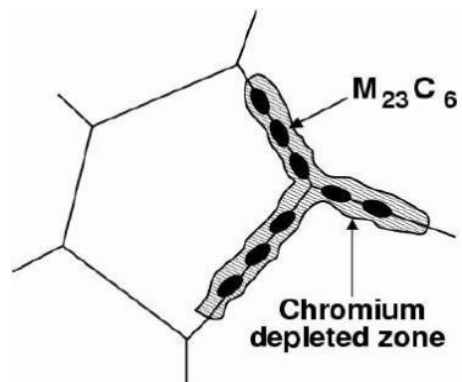


Fonte: Vitoria Química (2016).

1.2.1.2 Corrosão intergranular

Esse tipo de corrosão ocorre quando o aço inoxidável é submetido a temperaturas entre 450 e 750°C, faixa na qual pode ocorrer a sensitização. Nessa faixa o material se torna suscetível a precipitar carbonetos de cromo no contorno de grão, o que diminui a porcentagem de cromo livre (este cromo normalmente se uniria ao oxigênio para formar uma capa protetora de óxido de cromo). Consequentemente, o aço fica exposto e sujeito a corrosão nas bordas intergranulares. A perda de massa acaba sendo bastante elevada devido ao desprendimento dos grãos envolvidos na corrosão. (INSTITUTO NACIONAL DOS DISTRIBUIDORES DE AÇO, 2016)

Figura 2 - Sensitização e corrosão intergranular



Fonte: Müri (2009).

1.2.1.3 Corrosão sob tensão

A corrosão sob tensão ocorre em materiais susceptíveis a esse tipo de corrosão na presença simultânea de um agente corrosivo e uma tensão aplicada ou residual. Os requisitos para a ocorrência podem ser verificados na figura 3. (MÜRI, 2009)

Figura 3 - Corrosão sob tensão



Fonte: Fernandes (2010).

Figura 4 - Corrosão sob tensão em um autoclave de aço 304



Fonte: Vitoria Química (2016)

Na imagem 4 observa-se a presença de trincas na superfície de um material metálico características da corrosão sob tensão. Essas trincas são pouco espaçadas umas das outras e com diferentes comprimentos e profundidades. O eventual coalescimento das mesmas ocasiona trincas mais longas e profundas e pode levar a falha do material.

Em dutos, as trincas estão orientadas longitudinalmente à tensão circunferencial, que normalmente é a componente de tensão dominante resultante da pressão interna. O grau de

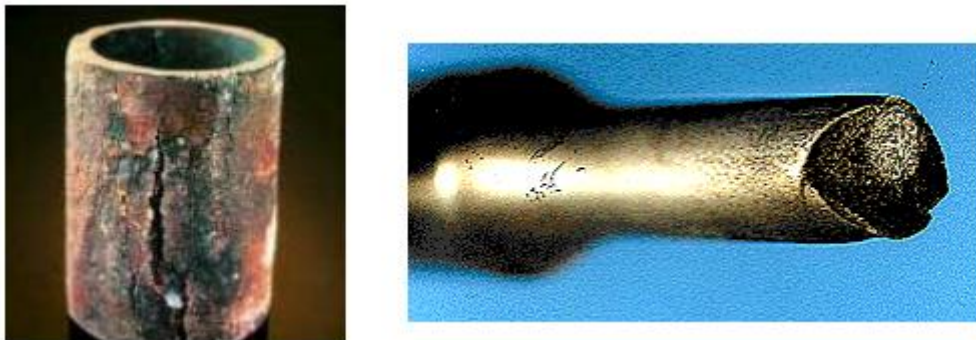
corrosão sob tensão depende das características na região da trinca, como pH e presença de substâncias corrosivas. (MÜRI, 2009)

1.2.1.4 Fragilização por hidrogênio

Em metais de alta resistência, pode-se observar uma mudança no aspecto de superfície de fratura conforme a quantidade de hidrogênio absorvido aumenta, de uma estrutura rica em dimples pequenos para uma fratura de clivagem.

A fragilização por hidrogênio pode ocorrer tanto nos estágios iniciais da fabricação do aço quanto nos estágios subsequentes, como por exemplo na soldagem, tratamento térmico, galvanização, reação catódica durante a corrosão, etc. Pode ocorrer até mesmo durante a proteção catódica, no qual o efeito fragilizante é ampliado para potenciais mais negativos, durante o fenômeno de superproteção catódica, pois a quantidade de hidrogênio gerado aumenta.

Figura 5 – Estruturas de aço que apresentaram fragilização por hidrogênio



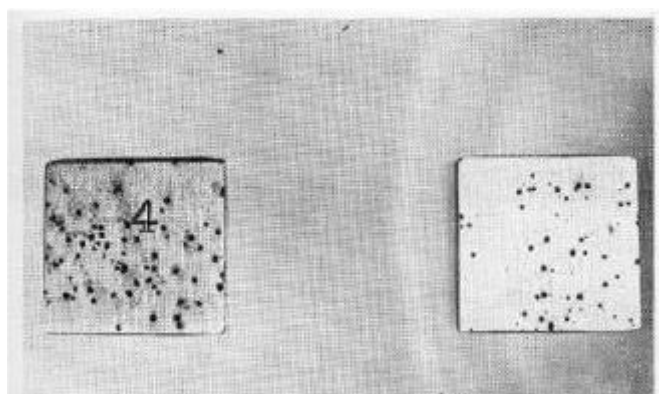
Fonte: Silva (2007).

O processo de fragilização ocorre quando o hidrogênio atômico, por apresentar pequeno volume, penetra o metal e difunde-se rapidamente para regiões com descontinuidades, como inclusões e vazios. Ao encontrar outros átomos de hidrogênio, eles reagem e formam o hidrogênio molecular, que tem maior volume e, assim, provoca aumento da pressão localmente, surgindo as bolhas observadas na figura 5.

1.2.1.5 Corrosão por pites

Também chamada de corrosão puntiforme, é caracterizada por pequenos pontos na superfície de metais, geralmente com profundidade maior que o diâmetro. É bastante comum em metais e ligas metálicas formadores de películas protetoras, geralmente passivas, que quando submetidos a meios suficientemente agressivos têm sua camada protetora danificada em determinadas regiões bem localizadas, o que gera um efeito corrosivo bastante intenso nessas regiões. Processos de trabalho a frio também facilitam o trabalho corrosivo de pites nos aços, principalmente na presença de íons cloretos.

Figura 6 – Corrosão por pites no aço inoxidável AISI 304



Fonte: Vitoria Química (2016).

É interessante ressaltar que, quando submetidos ao ambiente corrosivo, mesmo os aços inoxidáveis estão suscetíveis ao fenômeno da corrosão e que, com o tempo, os pites vão crescendo e podem nuclear trincas, além de fazer o material sofrer outros tipos de corrosão conforme os pites se distribuem mais densamente na superfície. Assim, naturalmente, os metais tendem a retornar para sua forma mais estável, o que geralmente significa na forma de óxidos.

Os pites de corrosão podem apresentar diversos formatos durante seu crescimento, o que é chamado de morfologia dos pites. De maneira geral, pode-se classificar essa morfologia conforme ilustra a figura 7. Porém, na realidade, o crescimento das cavidades não apresenta formatos bem definidos e a figura 7 apenas mostra uma generalização. Por conseguinte, a figura 8 ilustra mais exemplos de morfologias possíveis de serem encontradas nos materiais que sofrem corrosão por pites.

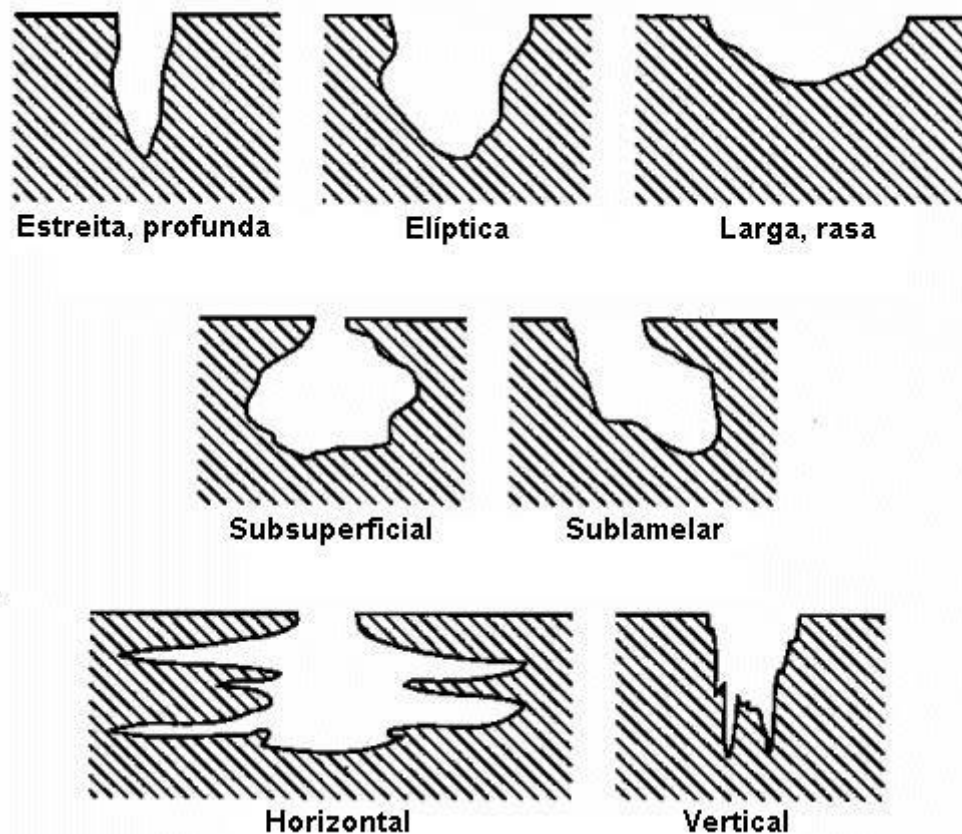
Ainda que essa classificação continue sendo uma generalização, ela abrange bem o que pode ser encontrado numa análise com microscopia óptica em materiais que sofreram corrosão por pites.

Figura 7 – Alguns exemplos de morfologia dos pites de corrosão



Fonte: Fernandes (2010).

Figura 8 – Alguns exemplos de morfologia dos pites de corrosão



Fonte: Fernandes (2010).

A partir da necessidade de padronizar uma forma de identificar o quanto um material é suscetível à corrosão por pites, desenvolveram-se os PREM (Pitting Resistance Equivalent

Numbers). Eles são uma forma de comparar a resistência a corrosão por pites de diversos aços inoxidáveis, baseados em suas composições químicas. Eles são úteis a título de comparação e ordenação dos materiais, porém, não são e não devem ser usados para prever se uma determinada composição é aplicável baseando-se na possibilidade de sofrer corrosão por pites, sendo, assim, valores de referência.

O cálculo do PREM não é unificado, de modo que a fórmula pode mudar dependendo do peso dado a cada elemento de liga que compõe o material e que confere resistência à corrosão. Por exemplo, uma das versões do cálculo do PREM é a fórmula 1 abaixo:

$$\text{PREM} = \text{Cr} + 3.3\text{Mo} + 16\text{N} \quad (1)$$

Ela significa que foi dado um peso maior para o nitrogênio do que para o molibdênio da ordem de 5 vezes. Durante o cálculo, no lugar do símbolo do elemento atribui-se o seu valor na composição do aço, de modo que, se há 1% de nitrogênio, atribui-se 0,01 no lugar do símbolo N.

Outra fórmula para o cálculo do PREM é dada pela fórmula 2:

$$\text{PREN} = \text{Cr} + 3.3(\text{Mo} + 0.5\text{W}) + 16\text{N} \quad (2)$$

Tabela 3 – Valores de PREM para diversos aços

PREM = Cr + 3.3(Mo +0.5W) + 16N				
Type	Cr	Mo	N	PREN
Ferríticos				
-	10.5-12.5	NS	0.030 max	10.5-12.5
430	16.0-18.0	NS	NS	16.0-18.0
434	16.0-18.0	0.9-1.4	NS	19.0-22.6
441	17.5-18.5	NS	NS	17.5-18.5
444	17.0-20.0	1.8-2.5	0.030max	23.0-28.7
Austeníticos				
304	17.5-19.5	NS	0.11max	17.5-20.8
304LN	17.5-19.5	NS	0.12-0.22	19.4-23.0
316/316L	16.5-18.5	2.0-2.5	0.11max	23.1-28.5
316L (2.5% min Mo)	17.0-19.0	2.5-3.0	0.11max	25.3-30.7
316LN	16.5-18.5	2.0-2.5	0.12-0.22	25.0-30.3
904L	19.0-21.0	4.0-5.0	0.15max	32.2-39.9
Sanicro 28	24.0-26.0	3.0-4.0	0.11max	35.9-43.0
254SMO	19.5-20.5	6.0-7.0	0.18-0.25	42.2-47.6
1925hMo	19.0-21.0	6.0-7.0	0.15-0.25	41.2-48.1
4565S	24.0-26.0	4.0-5.0	0.30-0.60	42.0-52.1
Duplex				
2202	22.0	0.4	0.20	26.5
2101LDX	21.0-22.0	0.1-0.8	0.20-0.25	24.5-28.6
SAF 2304	22.0-24.0	0.1-0.6	0.05-0.20	23.1-29.2
SAF 2205	21.0-23.0	2.5-3.5	0.10-0.22	30.8-38.1
SAF 2507 ₂	24.0-26.0	3.0-4.0	0.24-0.35	> 40 ₂
Zeron 100 ₂	24.0-26.0	3.0-4.0	0.20-0.30	> 40 ₂
Ferrinox 255 ₂	24.0-26.0	3.0-4.0	0.20-0.30	> 40 ₂

Fonte: British Stainless Steel Association (2016).

Tabela 4 – Principais aplicações dos aços inoxidáveis duplex conforme o PREM

Segmento da indústria	PREM = 25	PREM = 30 - 36	PREM = 32 - 40	PREM = > 40
Químico	Tubulações e instrumentação	Serpentinas para fusão de enxofre	Separadores de uréia, vasos de pressão	Tubulações para evaporação de sal
Petroquímico	Reatores com carcaça de aço	Unidades de dessanilização	Equipamento de dessulfuração	Tubulações para ambientes contendo HCl
óleo e gás	Resfriadores e tubulações	Tubulações de gás natural	Tubulações de gás e campanas de mergulho	Tubulações contra incêndio e perfuração marinha

Fonte: Chaves (2013).

Fonte

2 OBJETIVO

Como foi mencionado anteriormente, os aços inoxidáveis são largamente utilizados em engenharia, porém, apesar no nome, não são completamente imunes a ataques corrosivos, sendo a corrosão por pites o enfoque do trabalho.

O principal objetivo do projeto é realizar um estudo dos pites de corrosão no aço 15-5 PH por meio de análise da superfície de amostras do material a partir de um microscópio confocal. Posteriormente, será feita a análise do perfil para observar a morfologia dos pites e o quanto eles penetraram na superfície do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Amostras de aço 15-5 PH

Para a realização do trabalho, pequenas placas quadradas de aço inoxidável 15-5 PH com aproximadamente 1 centímetro de lado foram processadas nas condições de endurecimento por precipitação H925, H1075 e H1150. Para tanto, elas foram cortadas a partir de uma barra e, a cada duas amostras utilizou-se uma condição diferente, o que resultou num total de seis amostras.

3.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA DAS AMOSTRAS

3.2.1 Preparação das amostras

As peças de aço 15-5 PH foram, primeiramente, coladas em baquelite por meio de uma resina termoplástica que as fixou e nivelou. Posteriormente, as amostras passaram pelo lixamento consecutivo com lixas de 220, 320, 400, 600, 1200 e 2000 por meio de uma politriz automática, com força 13N e rotação de 250 rpm para o porta amostras e 15m rpm para o disco com a lixa. Esse processo planificou a superfície e eliminou impurezas e defeitos superficiais.

O polimento foi realizado com suspensão de diamante de seis micrometros e um micrometro, consecutivamente. Ressaltando que a politriz foi novamente utilizada, porém, a rotação do porta amostras foi alterada para 300 rpm.

3.2.2 Aquisição das imagens

As amostras passaram por um mapeamento da superfície por meio de um microscópio confocal Leica DCM 3D com ampliação de 100 vezes, o que permitiu determinar a rugosidade e as características da superfície antes da imersão em solução salina que induzirá o surgimento de pites de corrosão. Foram mapeados cinco pontos da superfície.

3.2.3 A imersão em solução salina

Inicialmente, uma solução de água e sal foi preparada de modo a simular as mesmas condições encontradas no ambiente marinho. A concentração salina foi de 3,5% e pH 8,2.

Cada uma das amostras teve as superfícies que não passaram por metalografia recobertas com uma camada de tinta em spray Colorgin Decor multiuso de cor cinza.

Após imersas individualmente em frascos contendo 300 ml de solução e suspensas com fios de Nylon (fios de pesca), as amostras foram monitoradas diariamente para que, assim que fosse observado o surgimento de pites, elas fossem retiradas e levadas ao microscópio confocal para determinar a distribuição dos pites que surgiram e qualquer outra alteração que possa ter ocorrido na superfície.

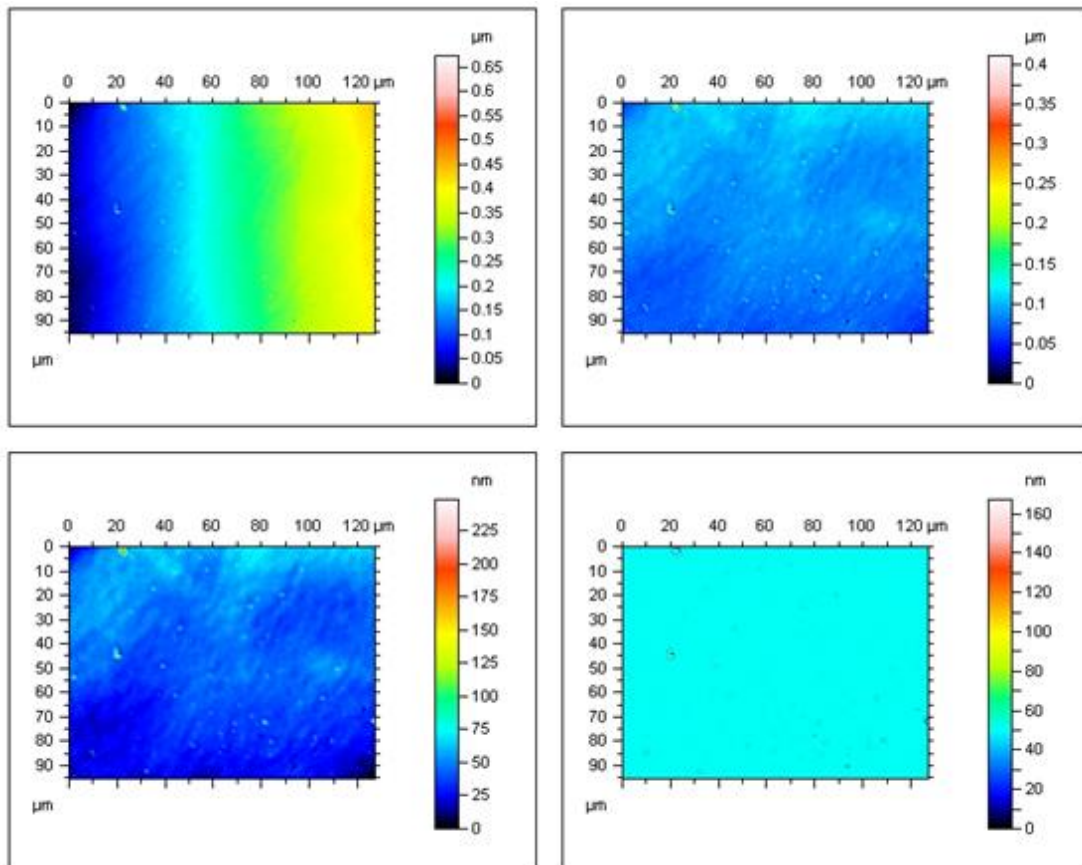
4 RESULTADOS

4.1 ANTES DA IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA

4.1.1 Amostras tratadas a 496°C

4.1.1.1 Amostra 1

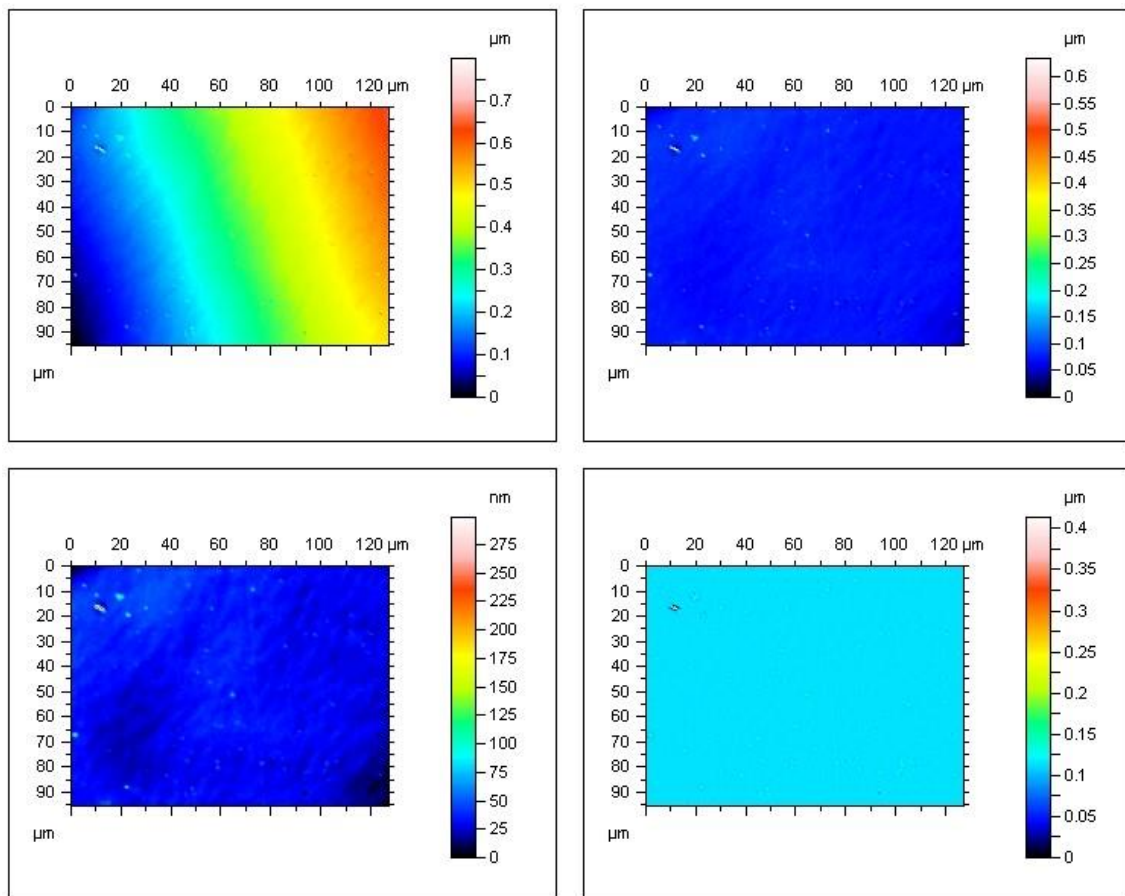
Figura 9 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.84268	nm
Ssk	15.5022	
Sku	746.472	
Sp	116.874	nm
Sv	50.3352	nm
Sz	167.209	nm
Sa	0.830739	nm

Fonte: Produção do próprio autor

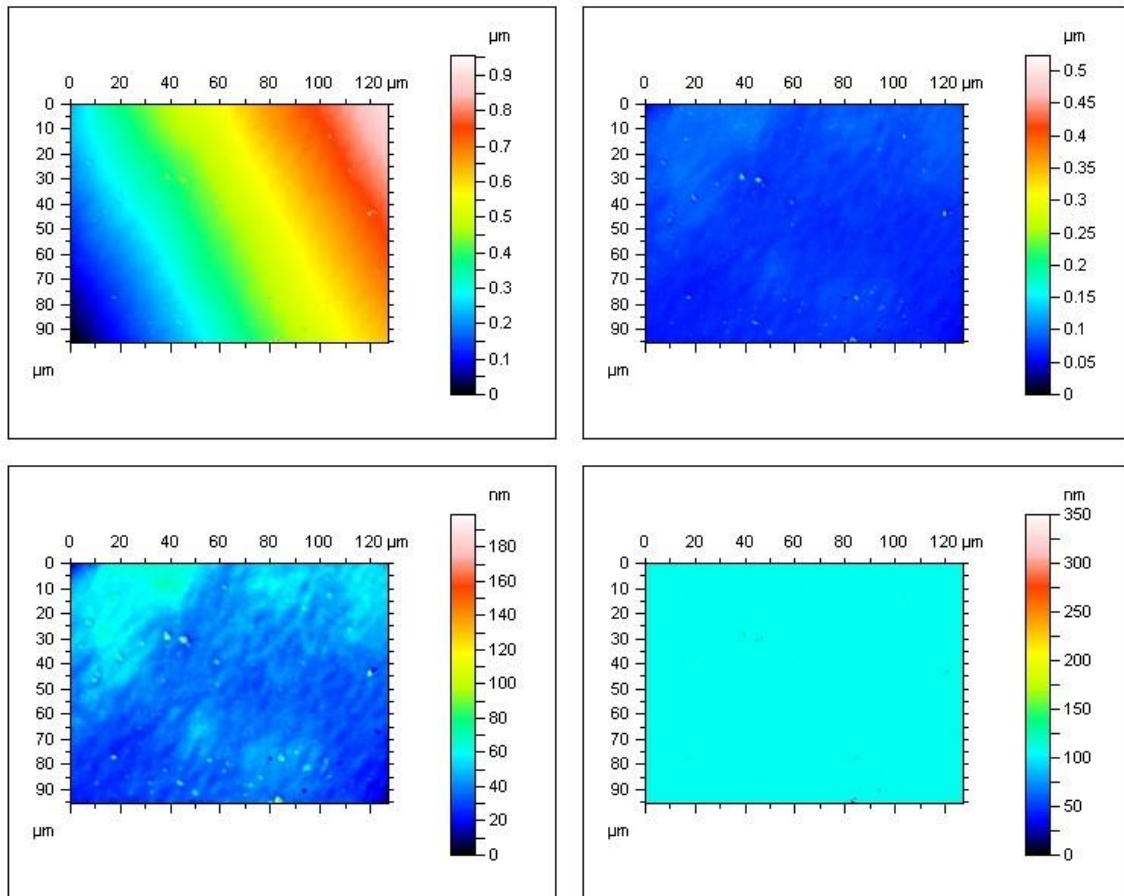
Figura 10 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.00290349	μm
Ssk	33.3939	
Sku	2764.65	
Sp	0.301290	μm
Sv	0.112423	μm
Sz	0.413712	μm
Sa	0.000847846	μm

Fonte: Produção do próprio autor

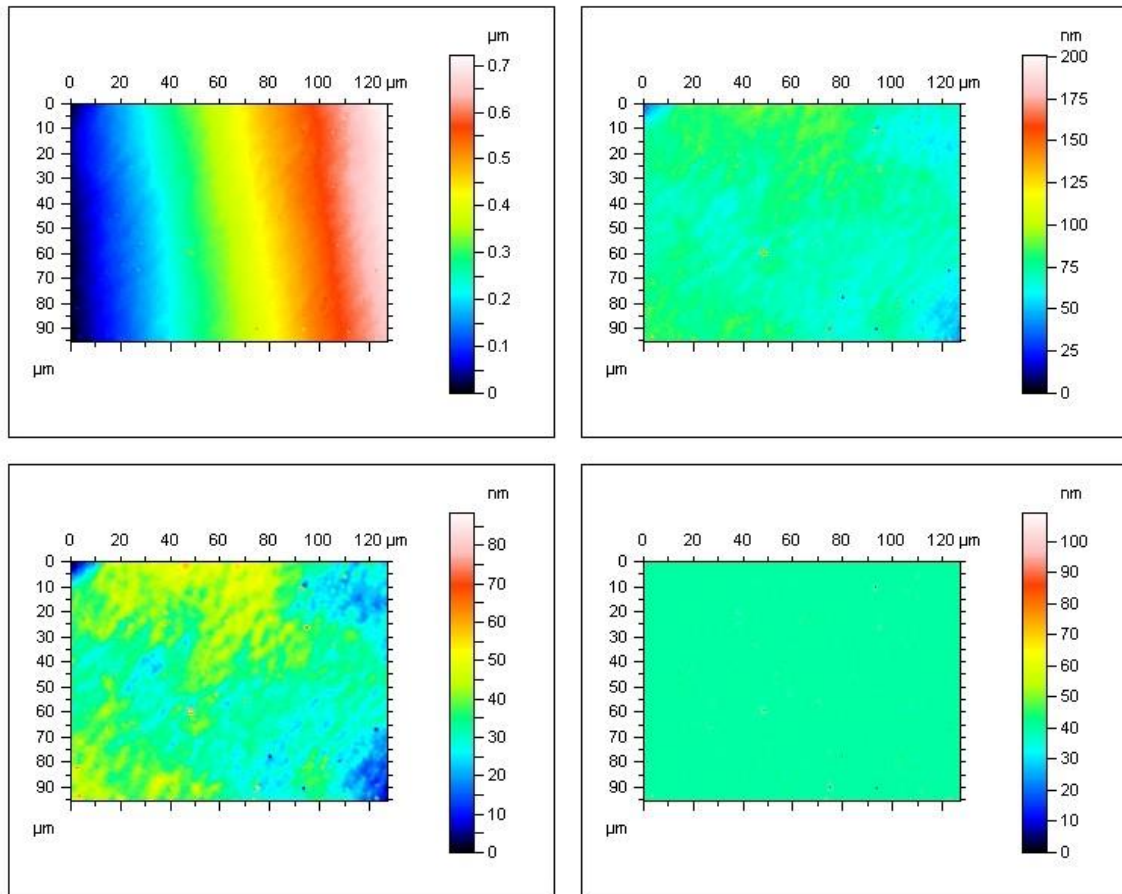
Figura 11 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	2.26130	nm
Ssk	33.8227	
Sku	2647.99	
Sp	243.076	nm
Sv	107.216	nm
Sz	350.291	nm
Sa	0.823004	nm

Fonte: Produção do próprio autor

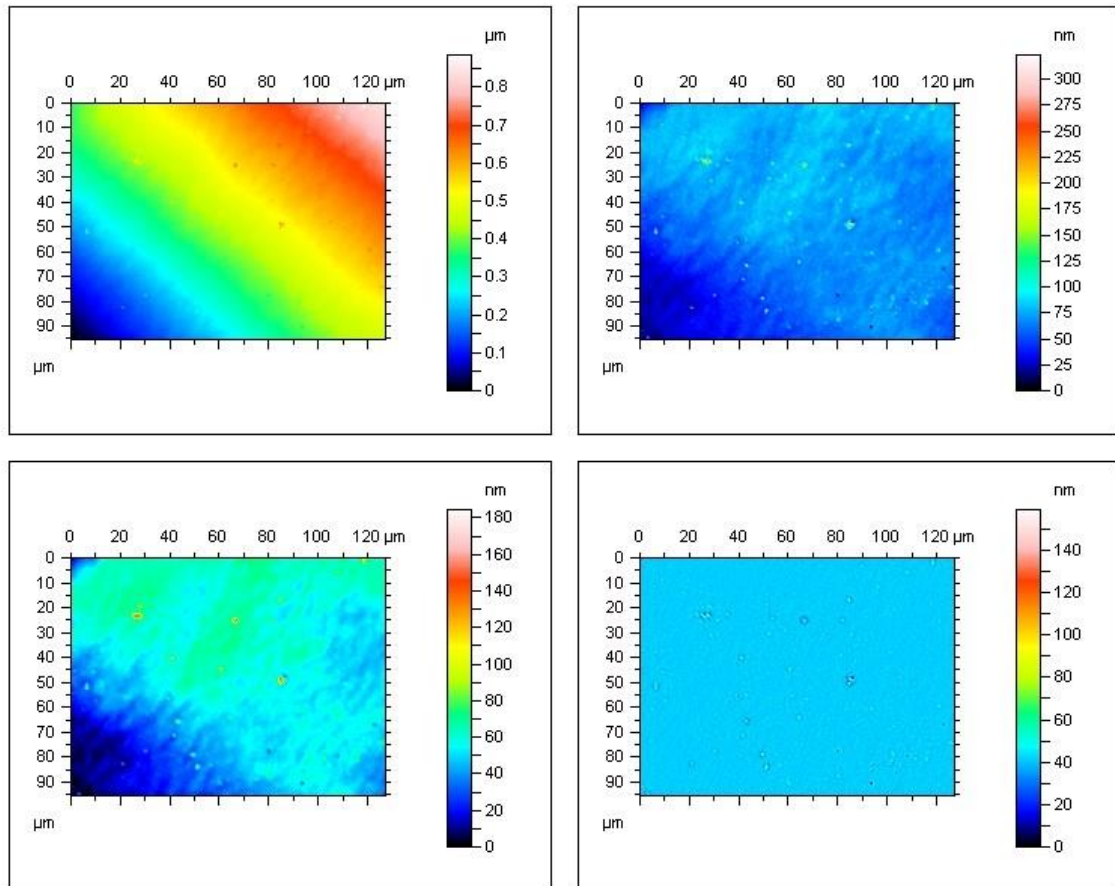
Figura 12 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.32950	nm
Ssk	4.68004	
Sku	167.545	
Sp	69.2801	nm
Sv	39.8428	nm
Sz	109.123	nm
Sa	0.804182	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 13 – Quinto ponto analisado

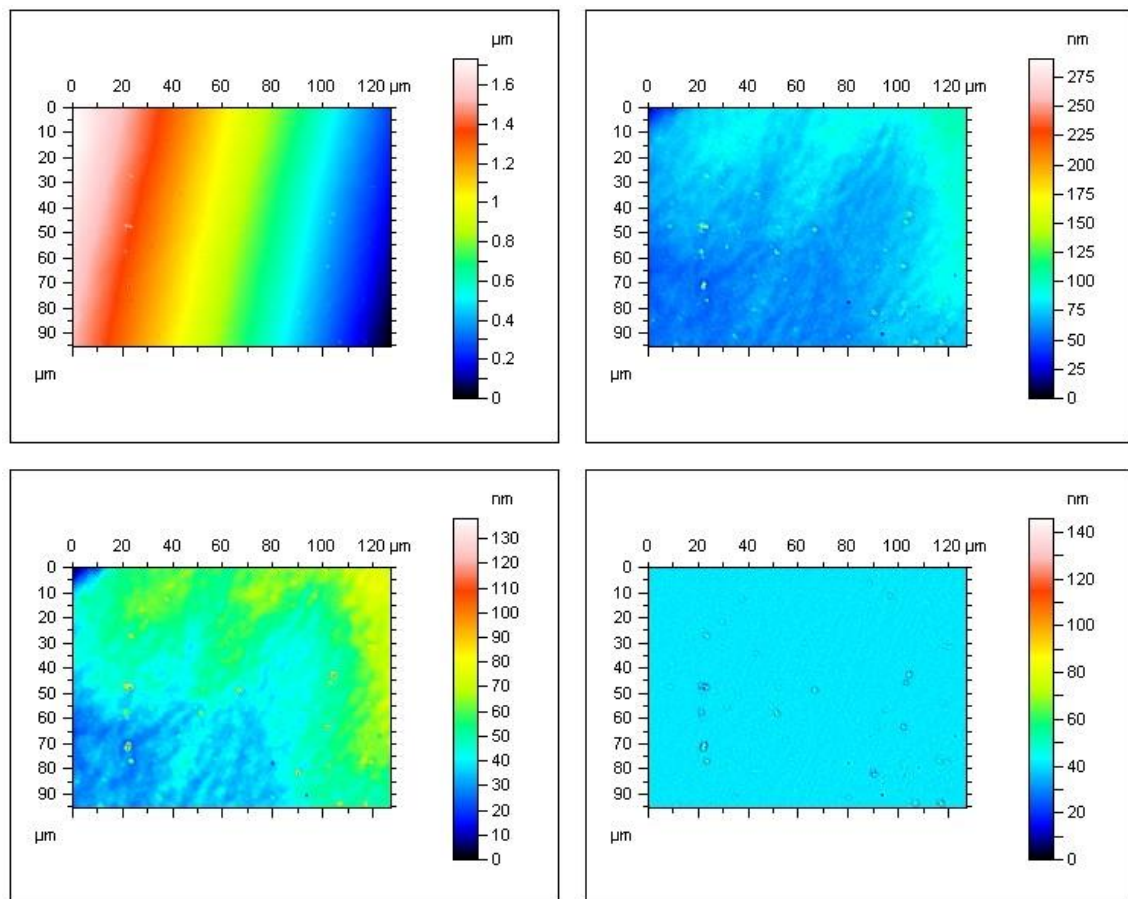


ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.74091	nm
Ssk	12.4129	
Sku	500.157	
Sp	118.276	nm
Sv	40.7810	nm
Sz	159.057	nm
Sa	0.848229	nm

Fonte: Produção do próprio autor

4.1.1.2 Amostra 2

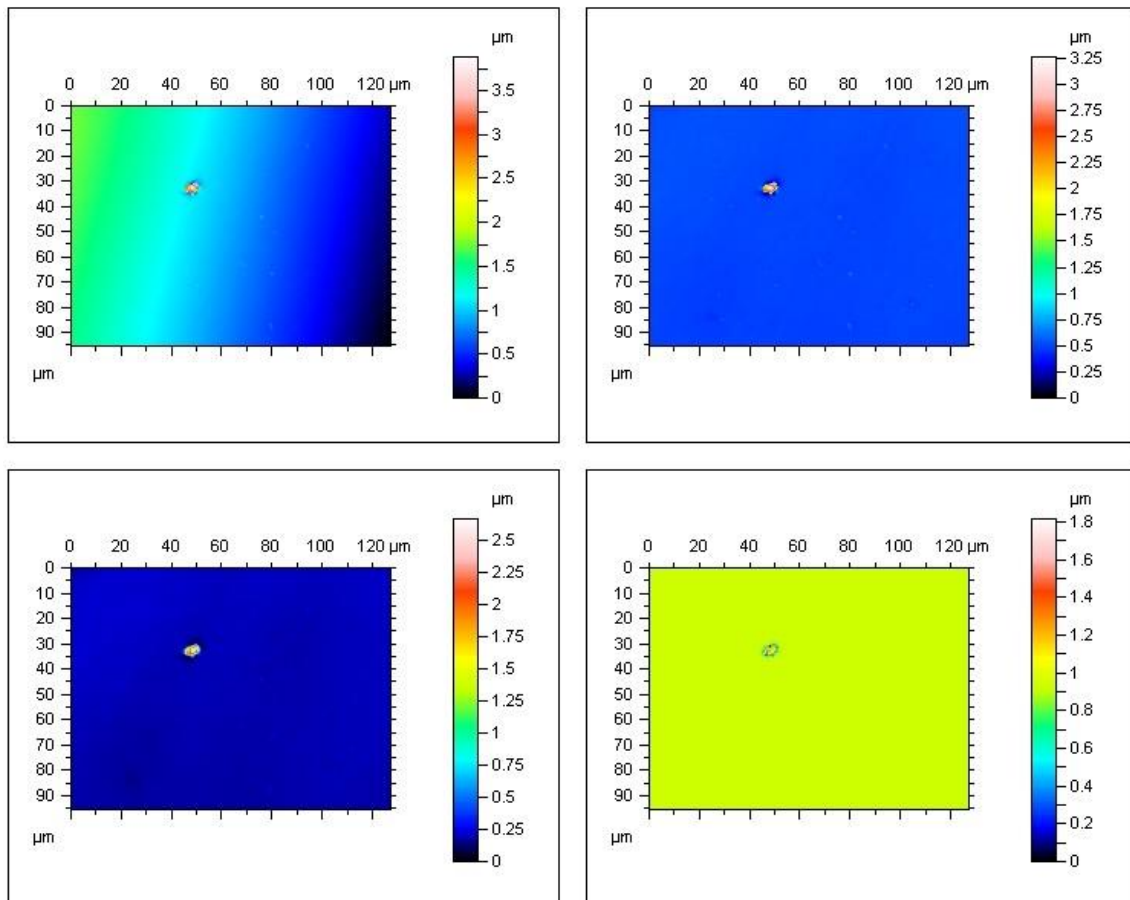
Figura 14 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.83329	nm
Ssk	14.9856	
Sku	530.153	
Sp	105.570	nm
Sv	40.2612	nm
Sz	145.831	nm
Sa	0.789230	nm

Fonte: Produção do próprio autor

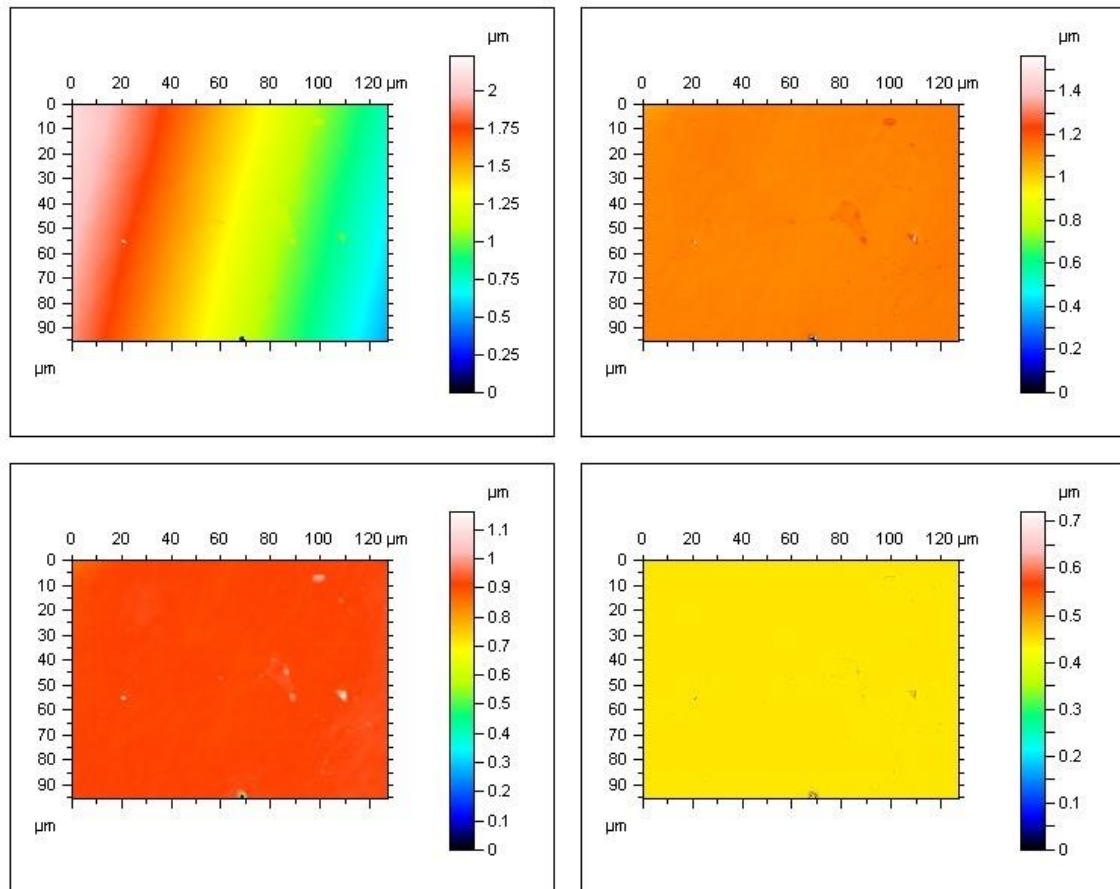
Figura 15 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.0176309	μm
Ssk	4.91778	
Sku	907.190	
Sp	0.885328	μm
Sv	0.930328	μm
Sz	1.81566	μm
Sa	0.00156666	μm

Fonte: Produção do próprio autor

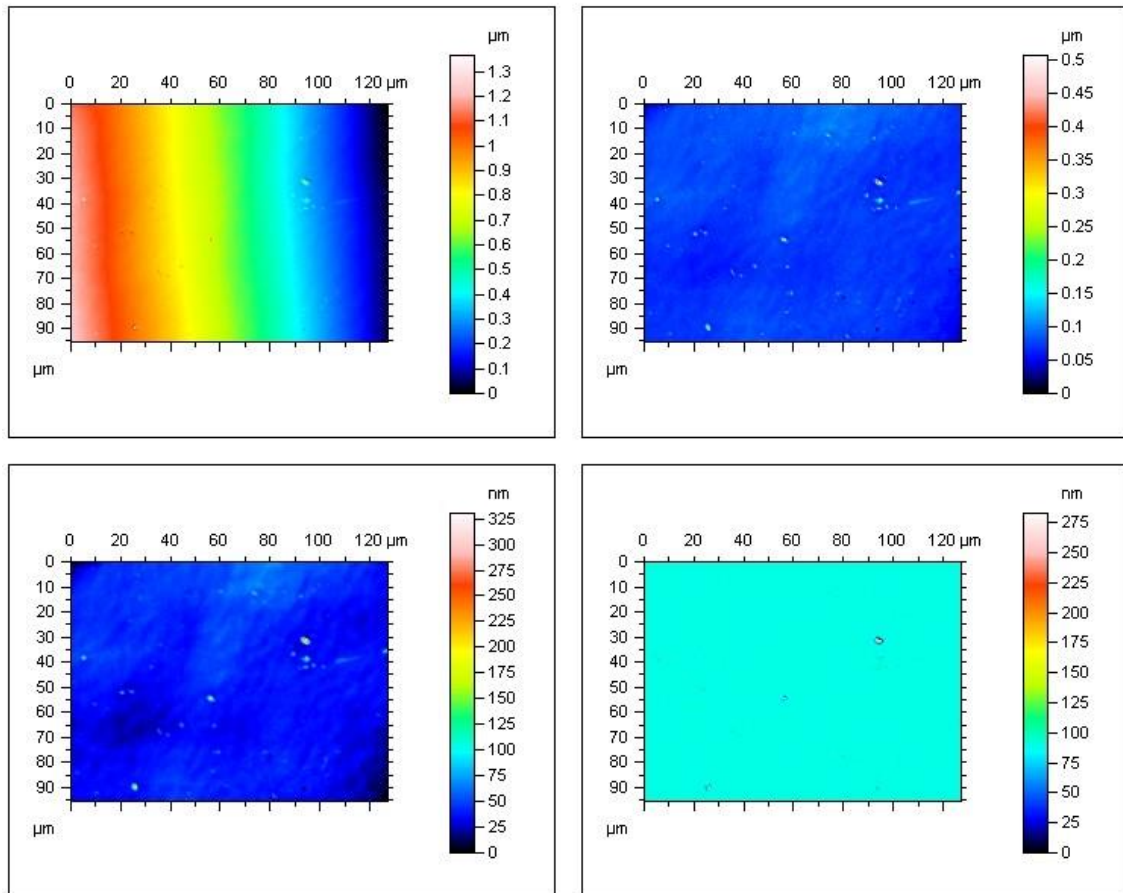
Figura 16 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.00519395	µm
Ssk	-9.96843	
Sku	1748.80	
Sp	0.278604	µm
Sv	0.441859	µm
Sz	0.720463	µm
Sa	0.00100583	µm

Fonte: Produção do próprio autor

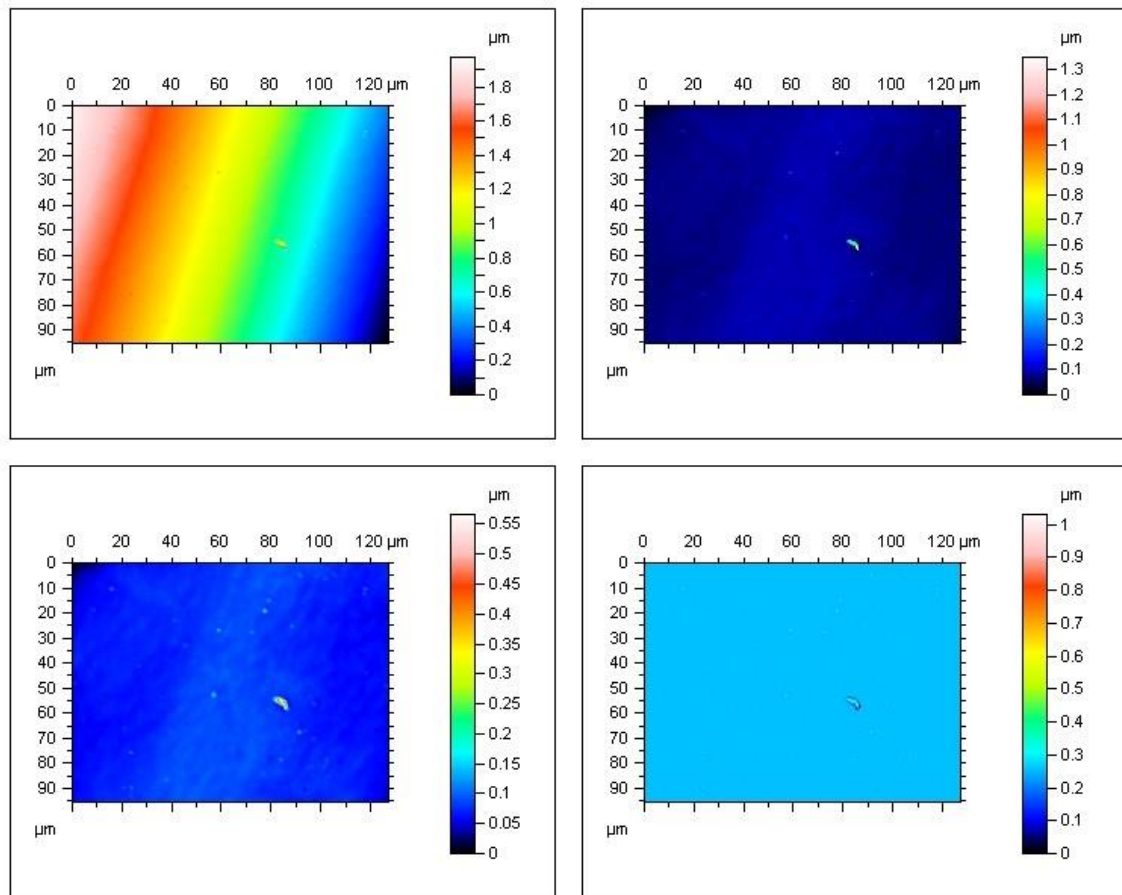
Figura 17 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	2.68488	nm
Ssk	22.8908	
Sku	1174.41	
Sp	194.131	nm
Sv	88.8101	nm
Sz	282.941	nm
Sa	0.885779	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 18 – Quinto ponto analisado



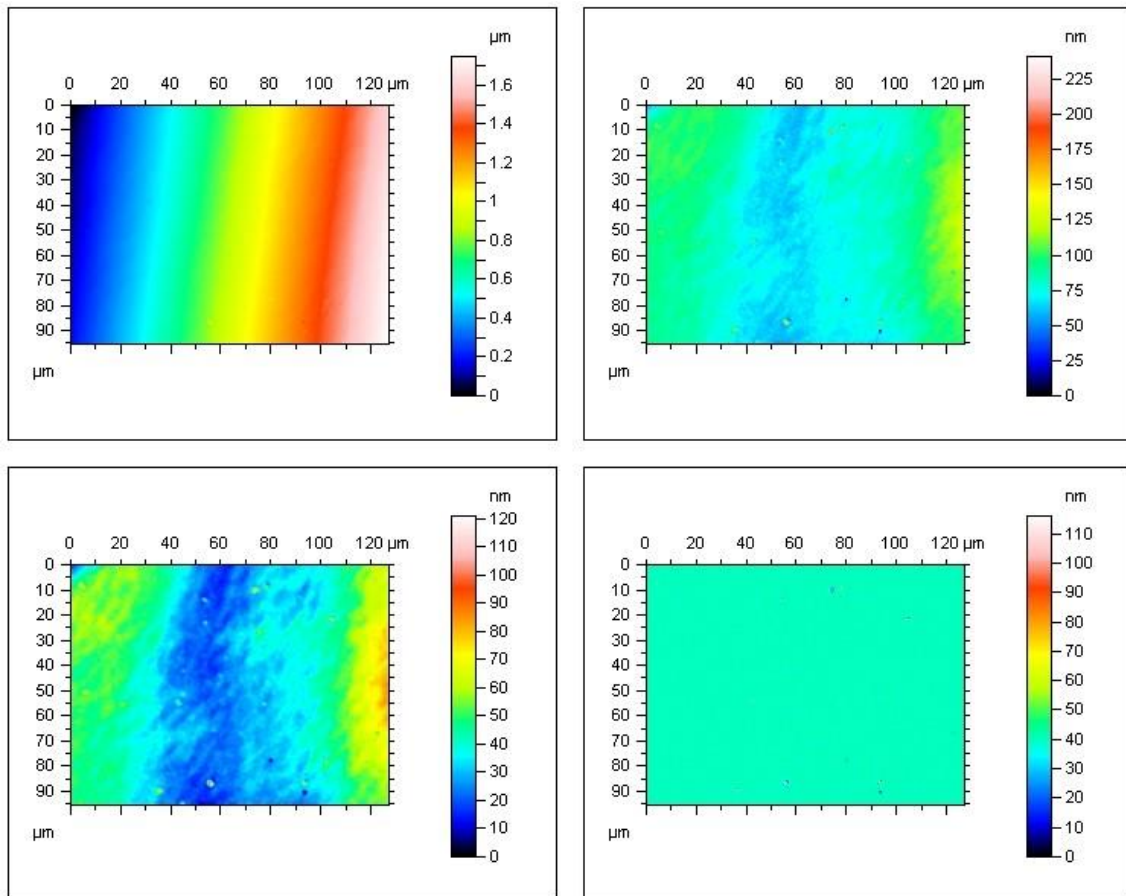
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.00514571	μm
Ssk	43.8821	
Sku	5355.56	
Sp	0.776822	μm
Sv	0.253619	μm
Sz	1.03044	μm
Sa	0.00096054	μm

Fonte: Produção do próprio autor

4.1.2 Amostras tratadas a 579°C

4.1.2.1 Amostra 1

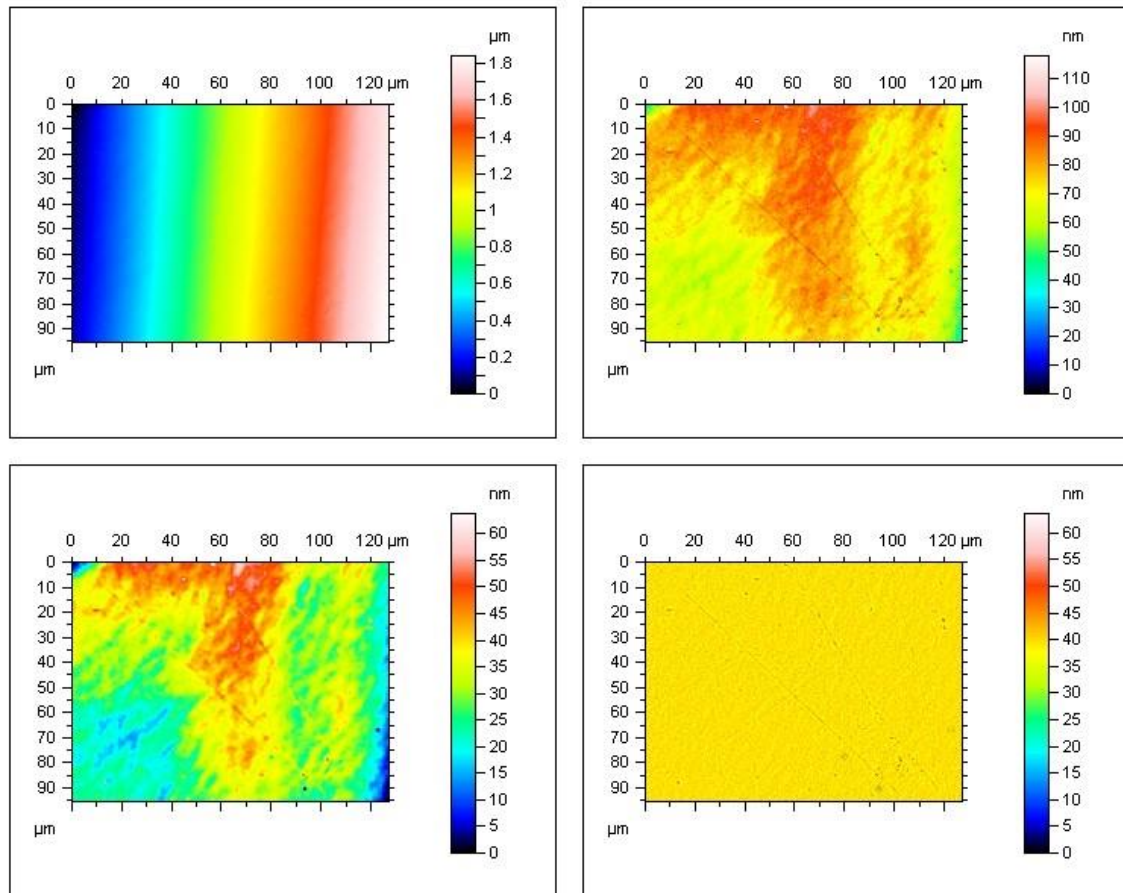
Figura 19 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.30839	nm
Ssk	11.5625	
Sku	532.565	
Sp	76.1426	nm
Sv	39.8989	nm
Sz	116.041	nm
Sa	0.706507	nm

Fonte: Produção do próprio autor

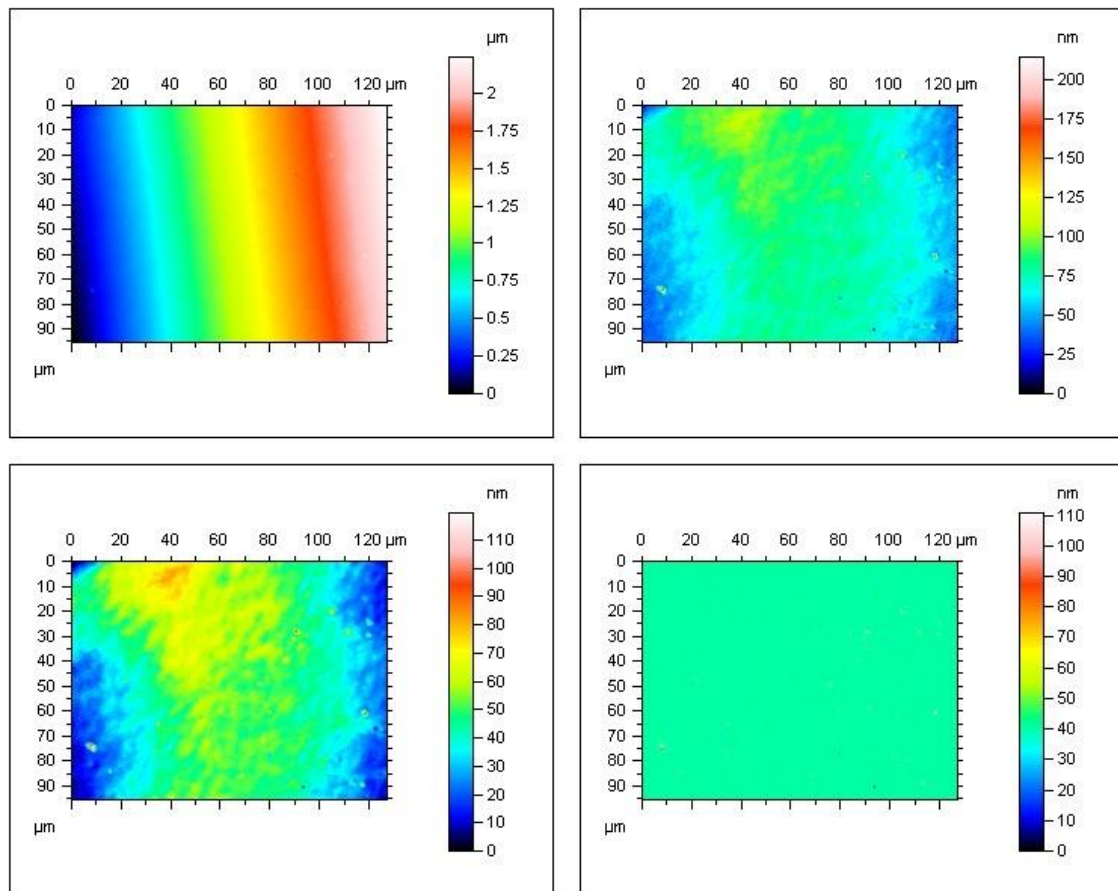
Figura 20 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.986067	nm
Ssk	-0.16462	
Sku	60.6935	
Sp	24.2730	nm
Sv	39.3850	nm
Sz	63.6580	nm
Sa	0.694494	nm

Fonte: Produção do próprio autor

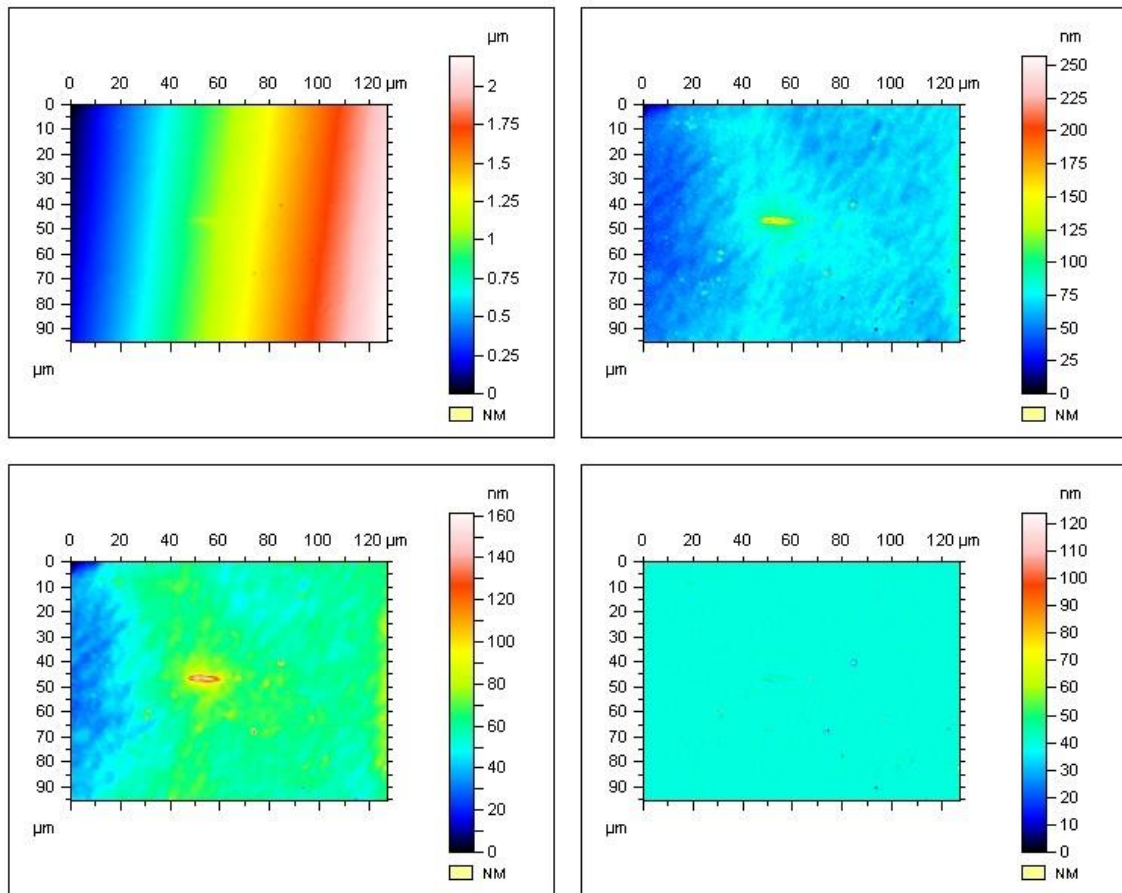
Figura 21 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.38186	nm
Ssk	6.81325	
Sku	222.240	
Sp	70.3166	nm
Sv	40.4440	nm
Sz	110.761	nm
Sa	0.789494	nm

Fonte: Produção do próprio autor

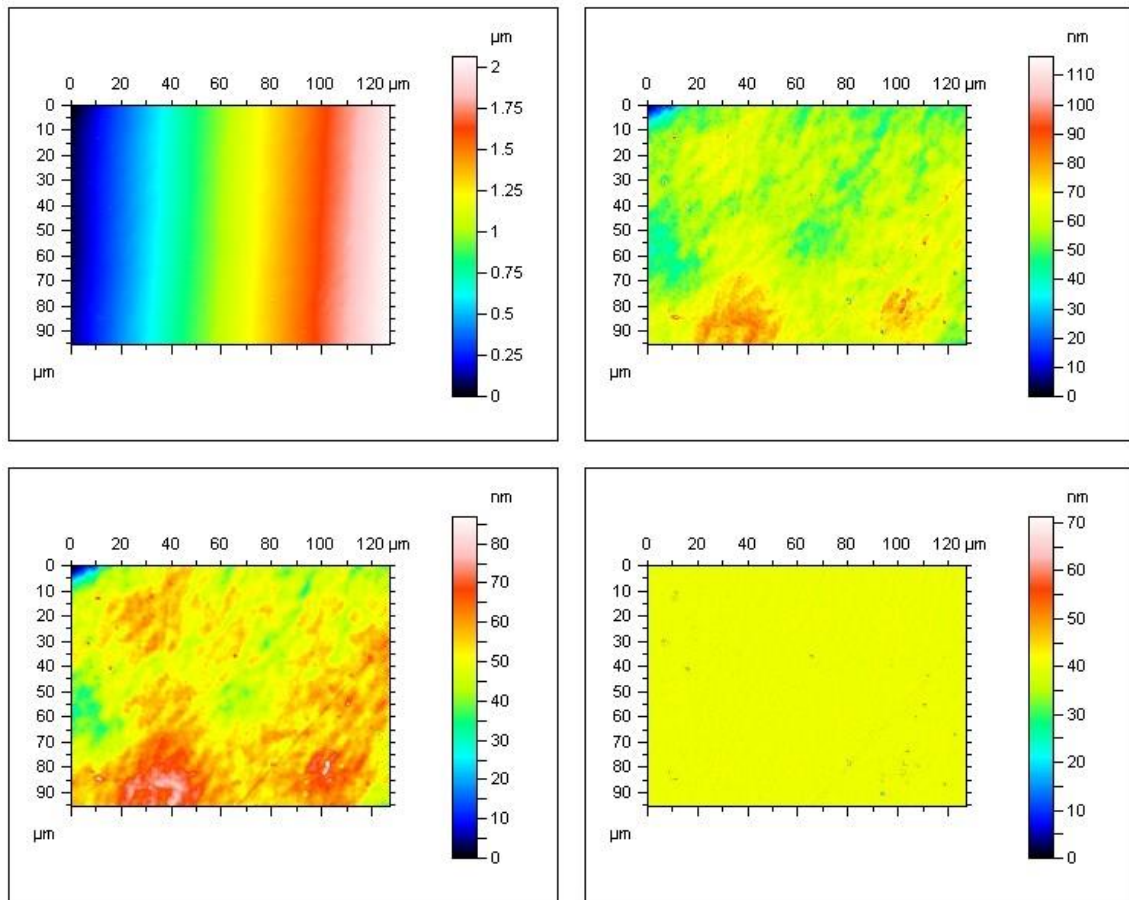
Figura 22 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.37624	nm
Ssk	10.3926	
Sku	479.644	
Sp	84.2628	nm
Sv	39.5478	nm
Sz	123.811	nm
Sa	0.785947	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 23 – Quinto ponto analisado

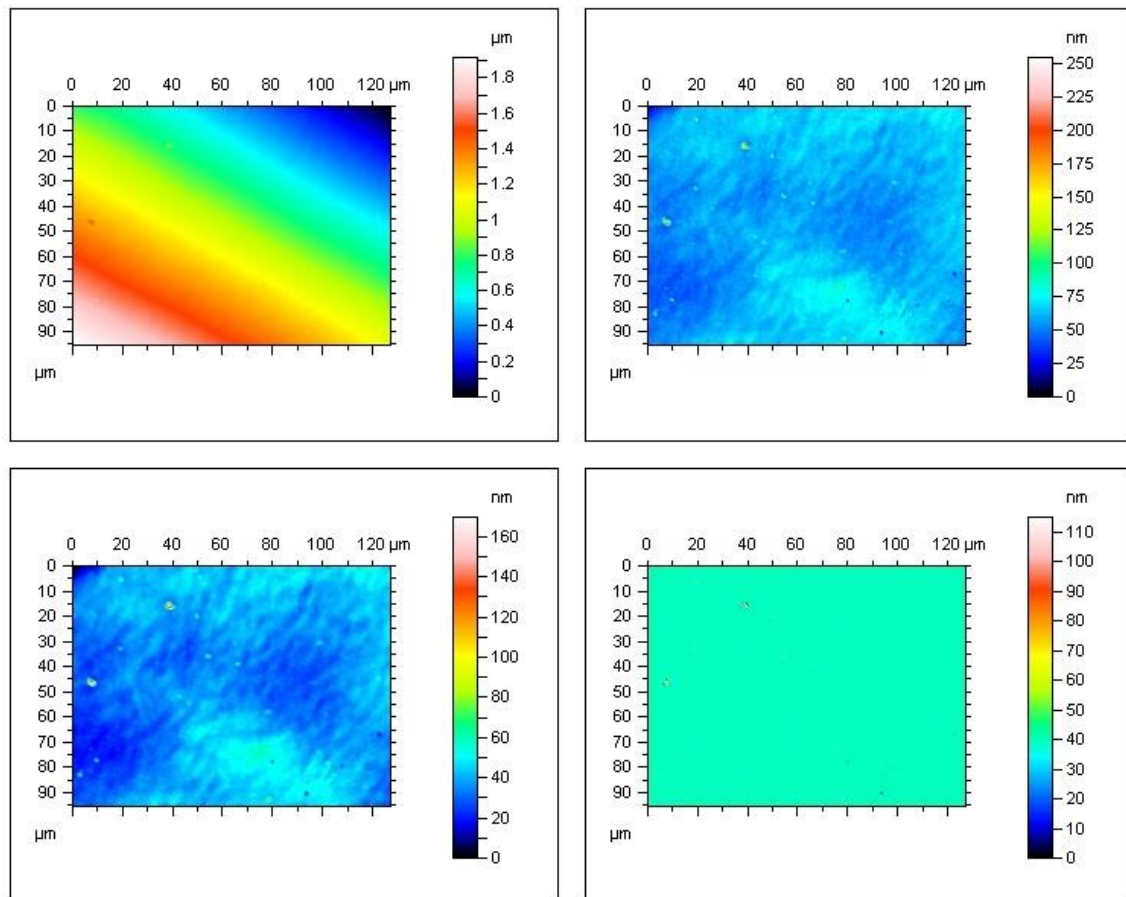


ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.09366	nm
Ssk	0.845018	
Sku	62.3791	
Sp	31.2077	nm
Sv	40.0458	nm
Sz	71.2535	nm
Sa	0.753980	nm

Fonte: Produção do próprio autor

4.1.2.2 Amostra 2

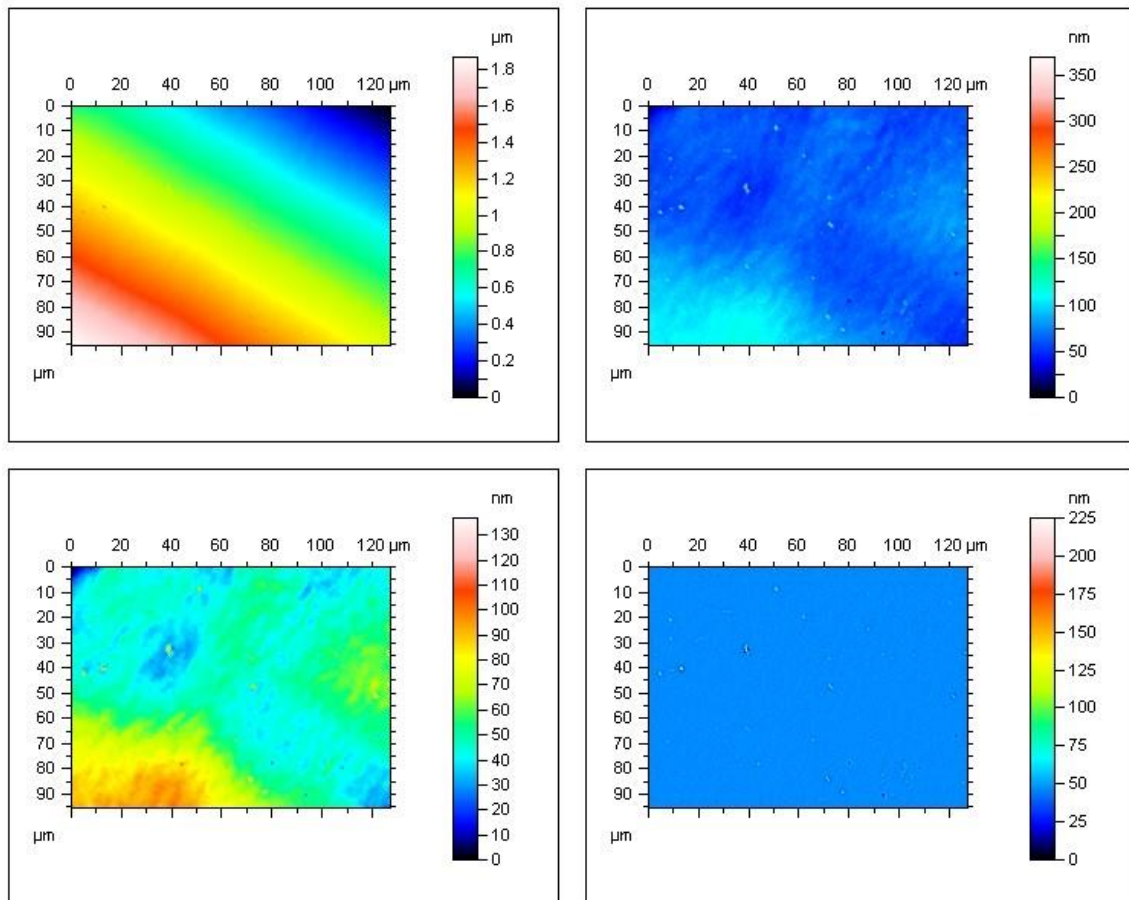
Figura 24 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.36047	nm
Ssk	9.63467	
Sku	385.265	
Sp	75.2989	nm
Sv	39.6478	nm
Sz	114.947	nm
Sa	0.725607	nm

Fonte: Produção do próprio autor

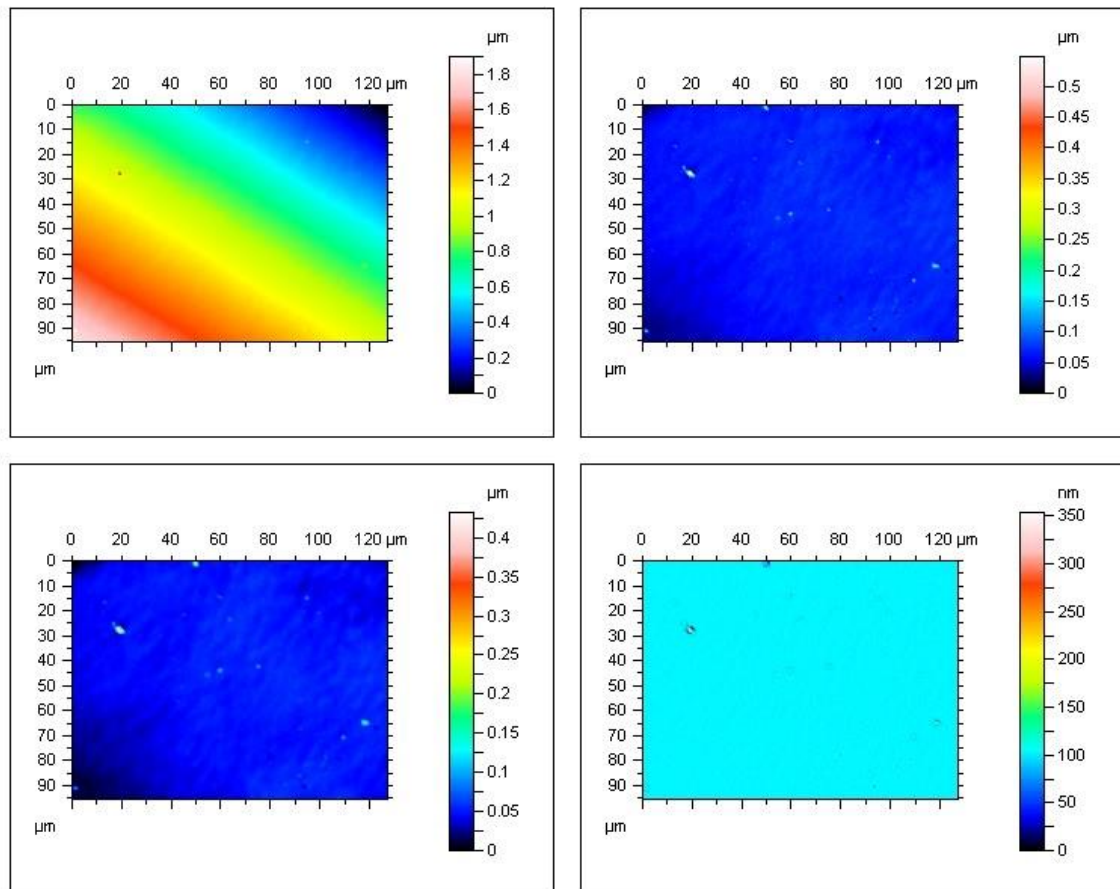
Figura 25 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.61002	nm
Ssk	26.2292	
Sku	2178.89	
Sp	179.003	nm
Sv	46.0799	nm
Sz	225.083	nm
Sa	0.738875	nm

Fonte: Produção do próprio autor

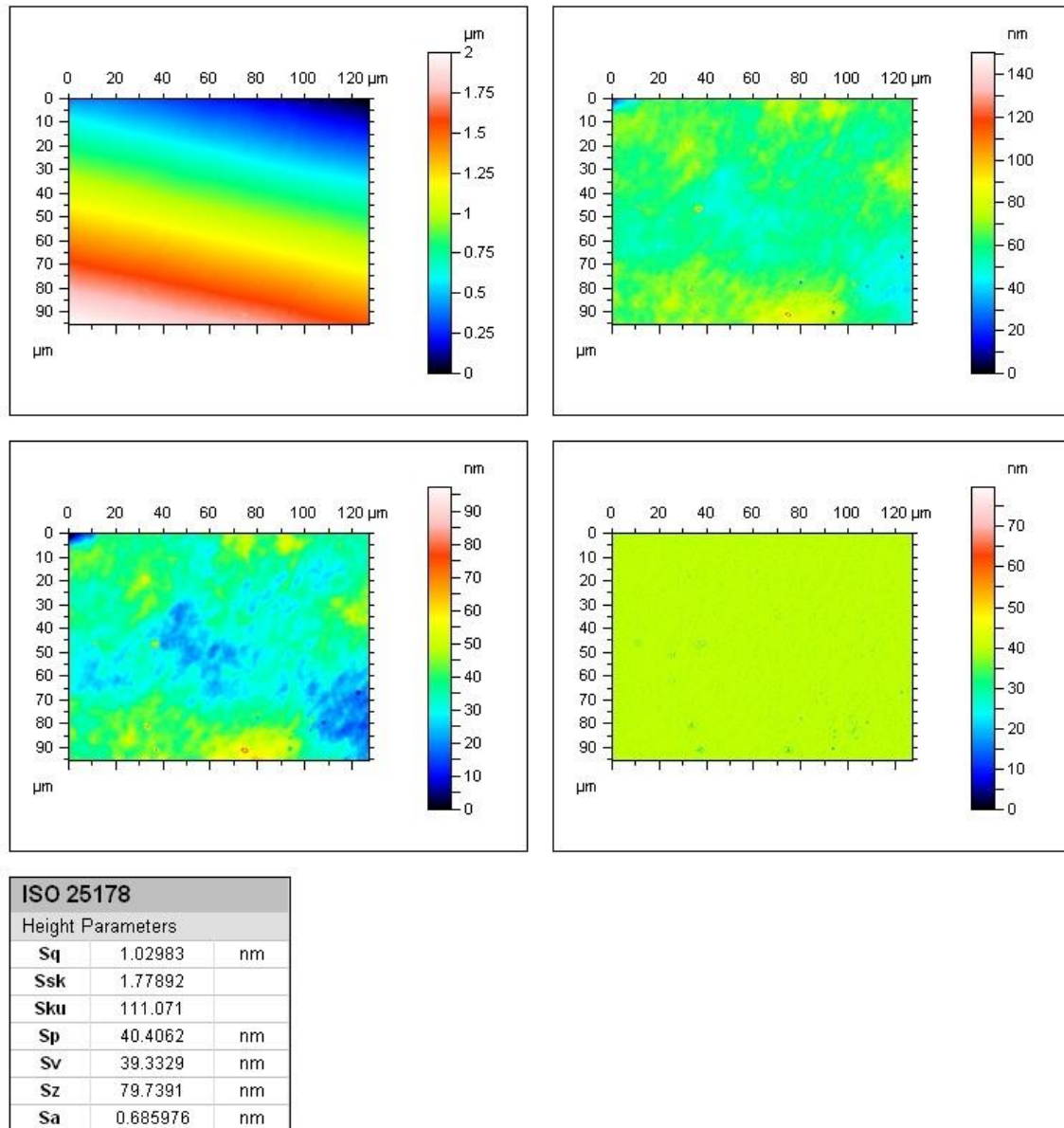
Figura 26 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	2.69897	nm
Ssk	25.0254	
Sku	1659.86	
Sp	252.098	nm
Sv	101.708	nm
Sz	353.806	nm
Sa	0.814791	nm

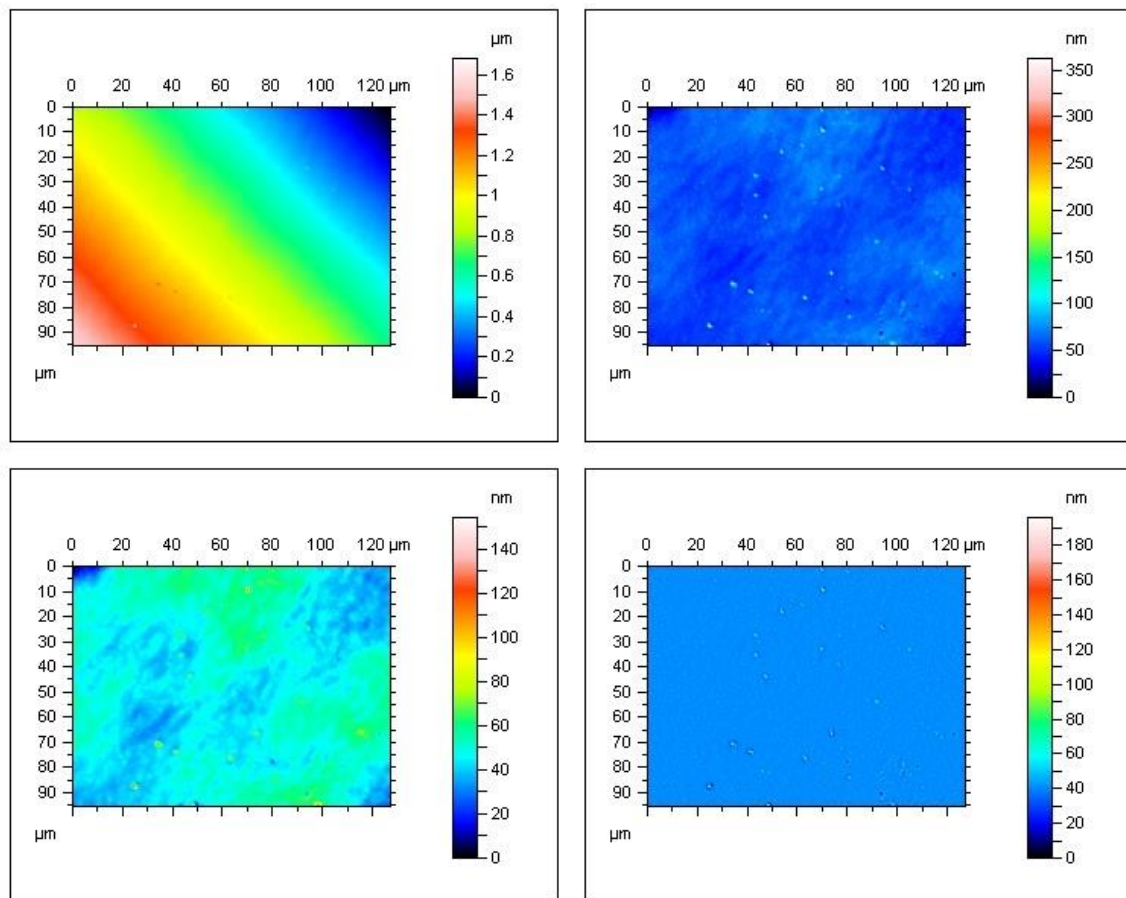
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 27 – Quarto ponto analisado



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 28 – Quinto ponto analisado



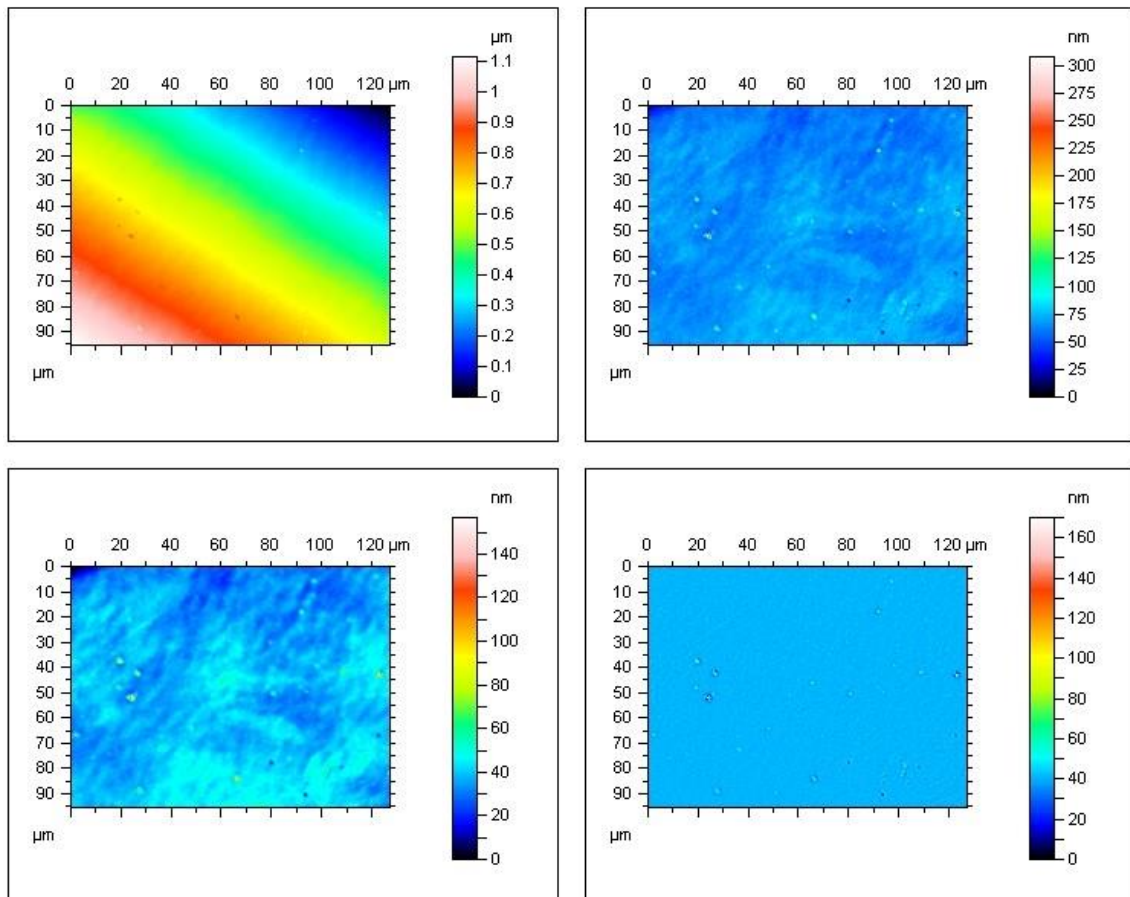
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.63553	nm
Ssk	19.0503	
Sku	1197.87	
Sp	155.634	nm
Sv	40.3931	nm
Sz	196.027	nm
Sa	0.817750	nm

Fonte: Produção do próprio autor

4.1.3 Amostras tratadas a 621°C

4.1.3.1 Amostra 1

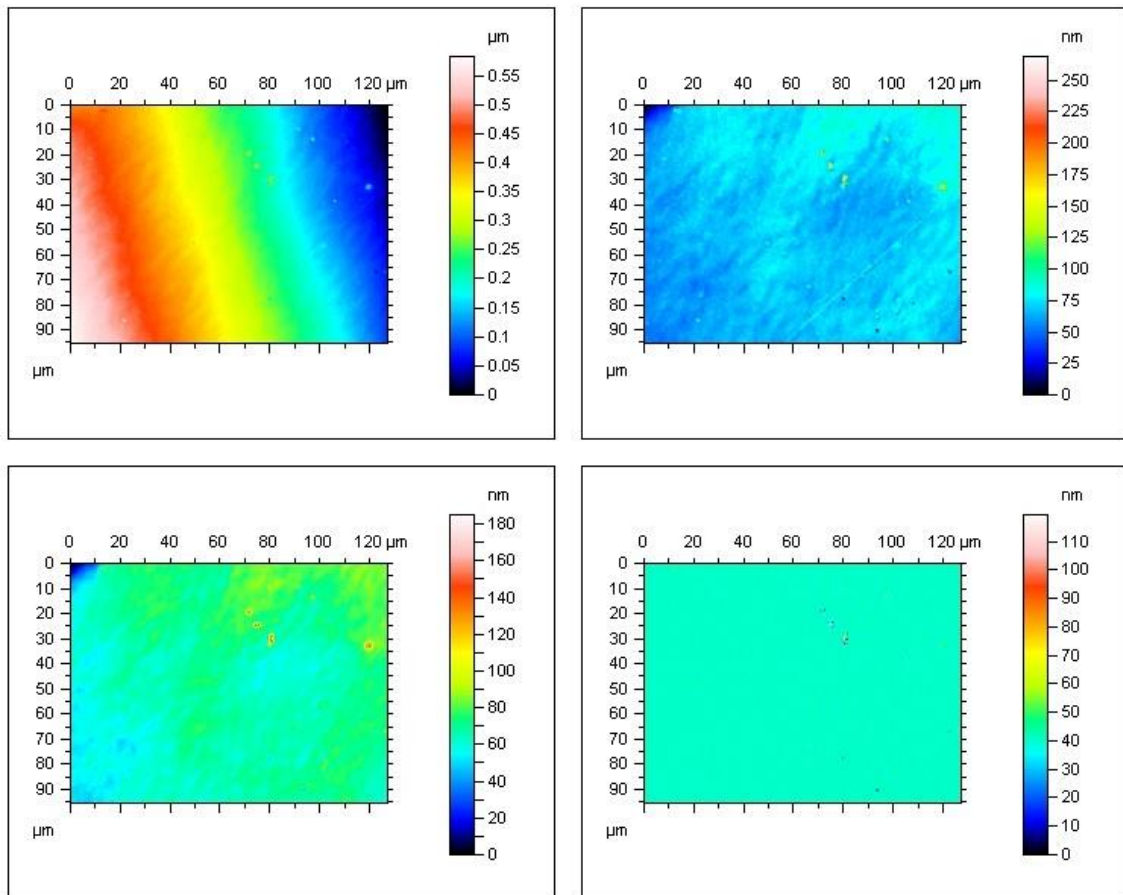
Figura 29 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.52895	nm
Ssk	19.0642	
Sku	1044.87	
Sp	129.674	nm
Sv	40.3667	nm
Sz	170.041	nm
Sa	0.739016	nm

Fonte: Produção do próprio autor

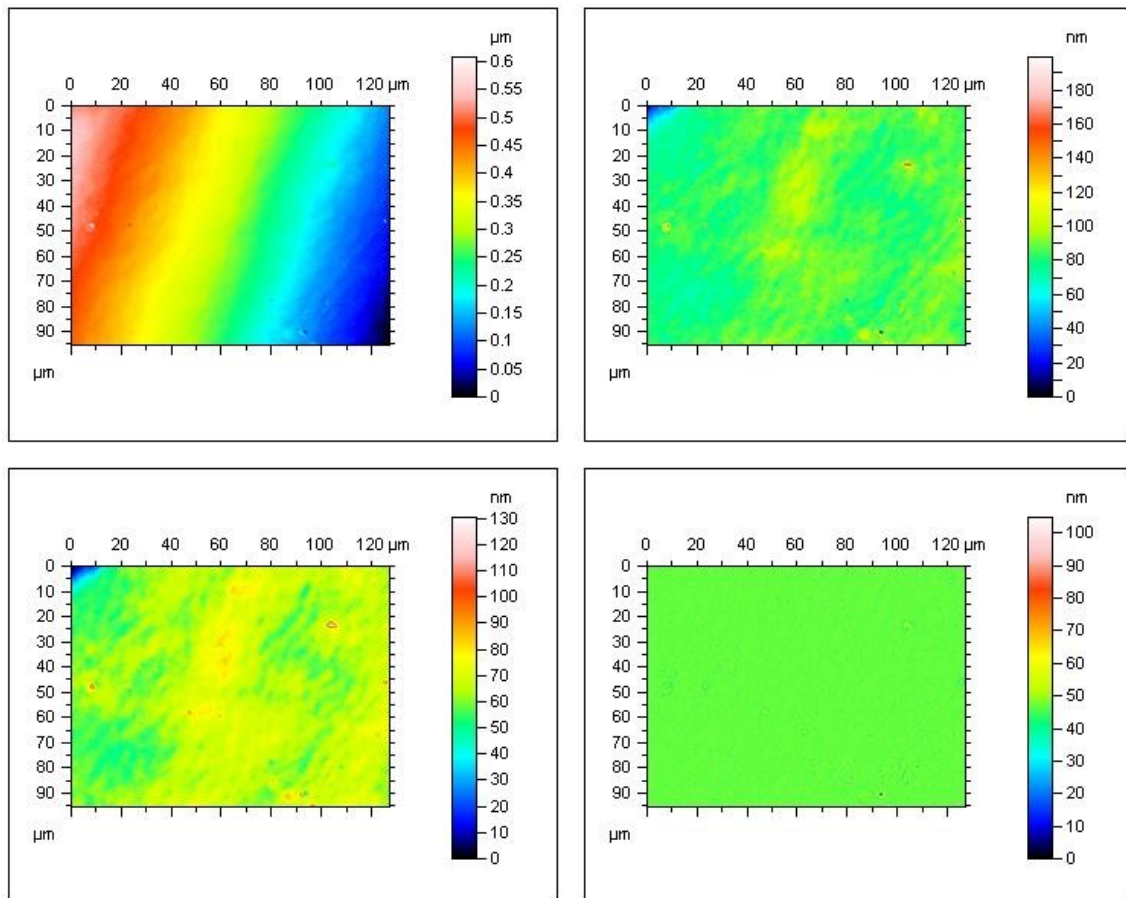
Figura 30 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.44059	nm
Ssk	10.3449	
Sku	441.935	
Sp	79.1965	nm
Sv	40.1307	nm
Sz	119.327	nm
Sa	0.782681	nm

Fonte: Produção do próprio autor

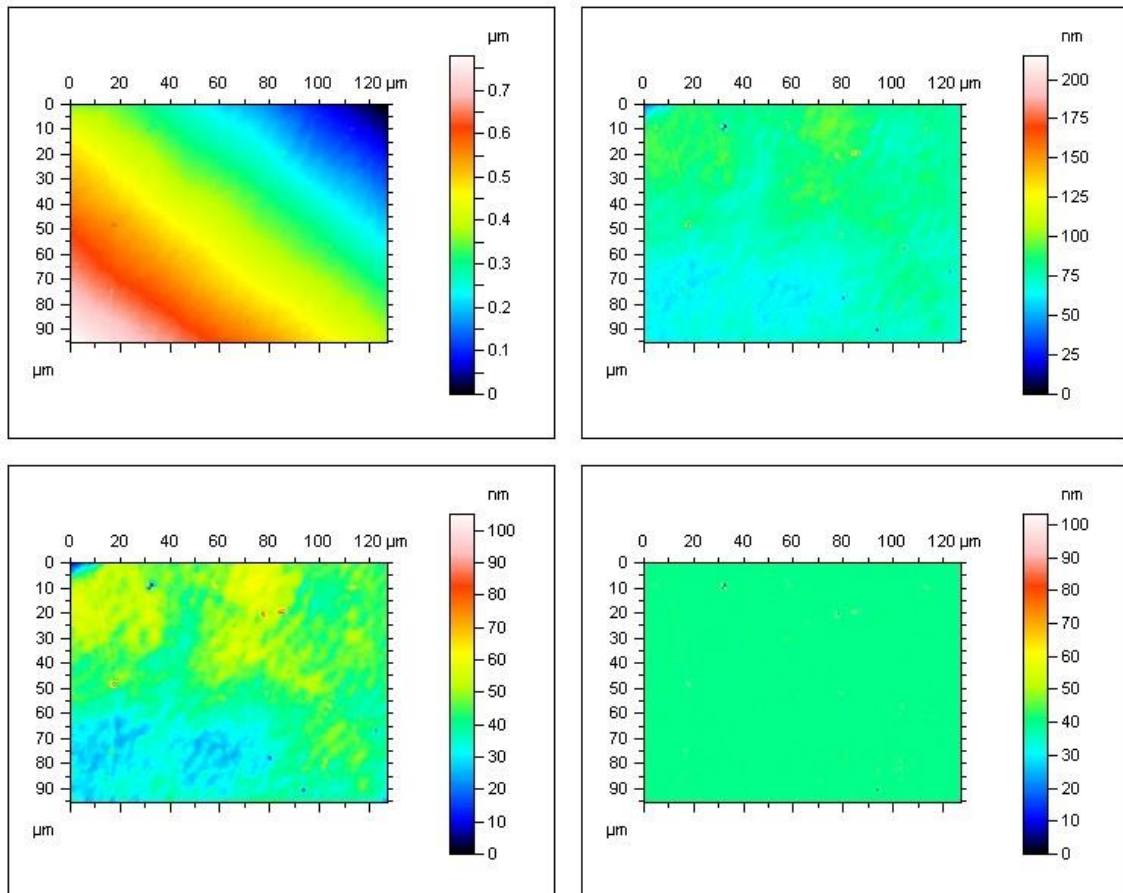
Figura 31 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.15674	nm
Ssk	4.35695	
Sku	235.160	
Sp	58.3941	nm
Sv	46.4122	nm
Sz	104.806	nm
Sa	0.728965	nm

Fonte: Produção do próprio autor

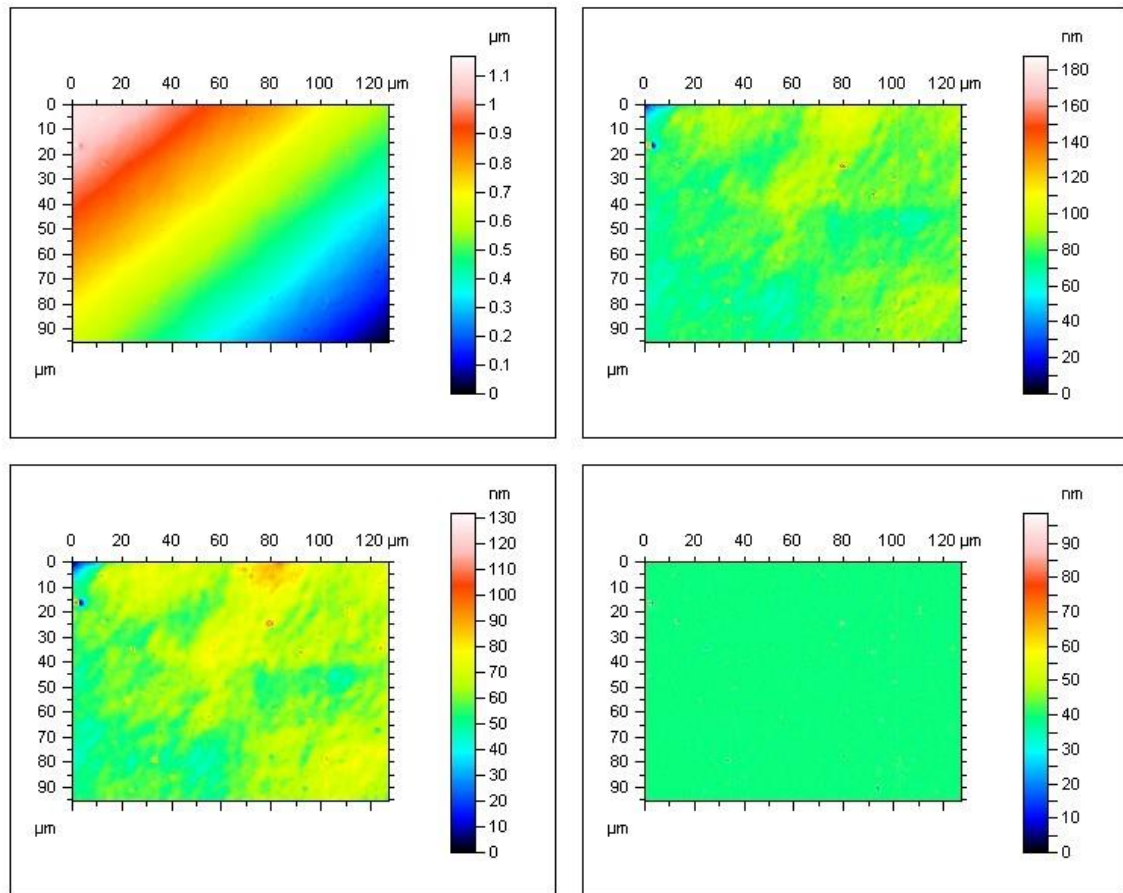
Figura 32 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.17876	nm
Ssk	4.25342	
Sku	231.419	
Sp	63.3933	nm
Sv	39.7363	nm
Sz	103.130	nm
Sa	0.706099	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 33 – Quinto ponto analisado

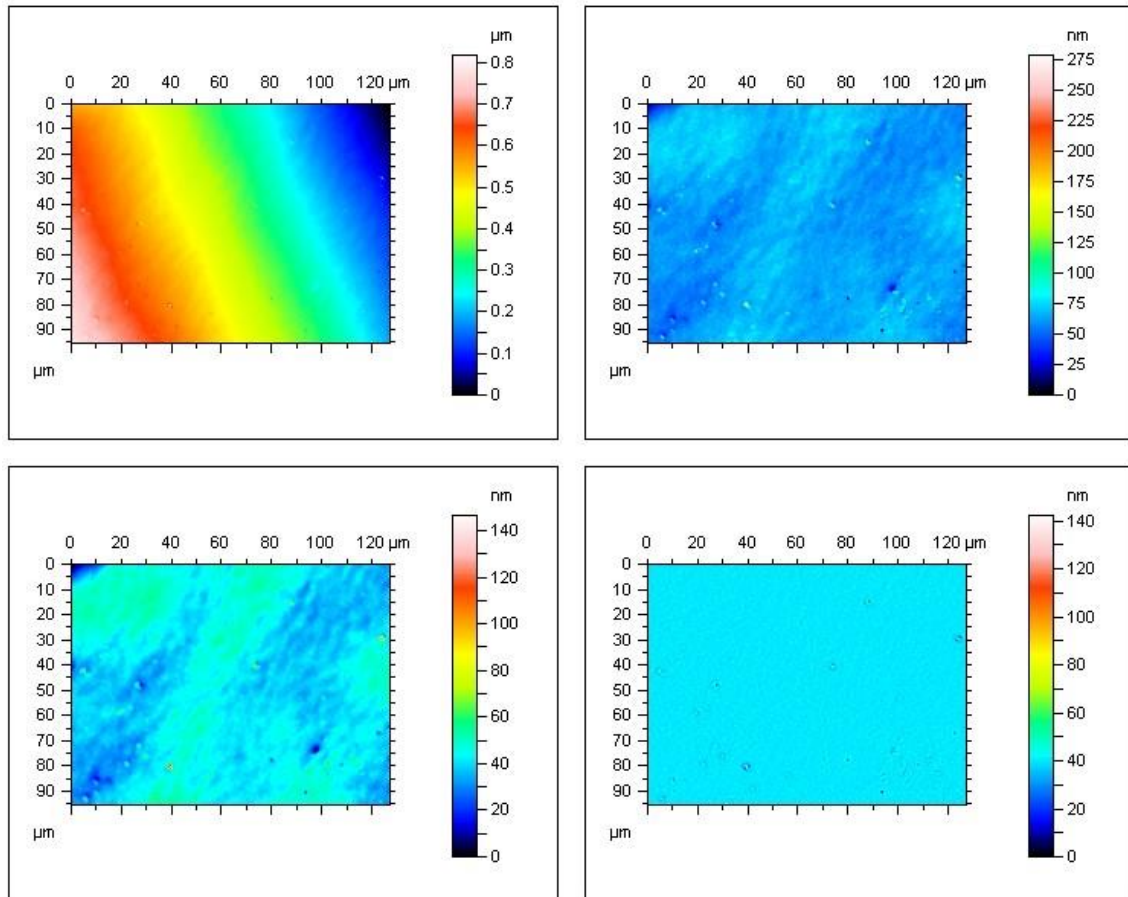


ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.31478	nm
Ssk	4.26008	
Sku	156.756	
Sp	59.7227	nm
Sv	38.9045	nm
Sz	98.6272	nm
Sa	0.794313	nm

Fonte: Produção do próprio autor

4.1.3.2 Amostra 2

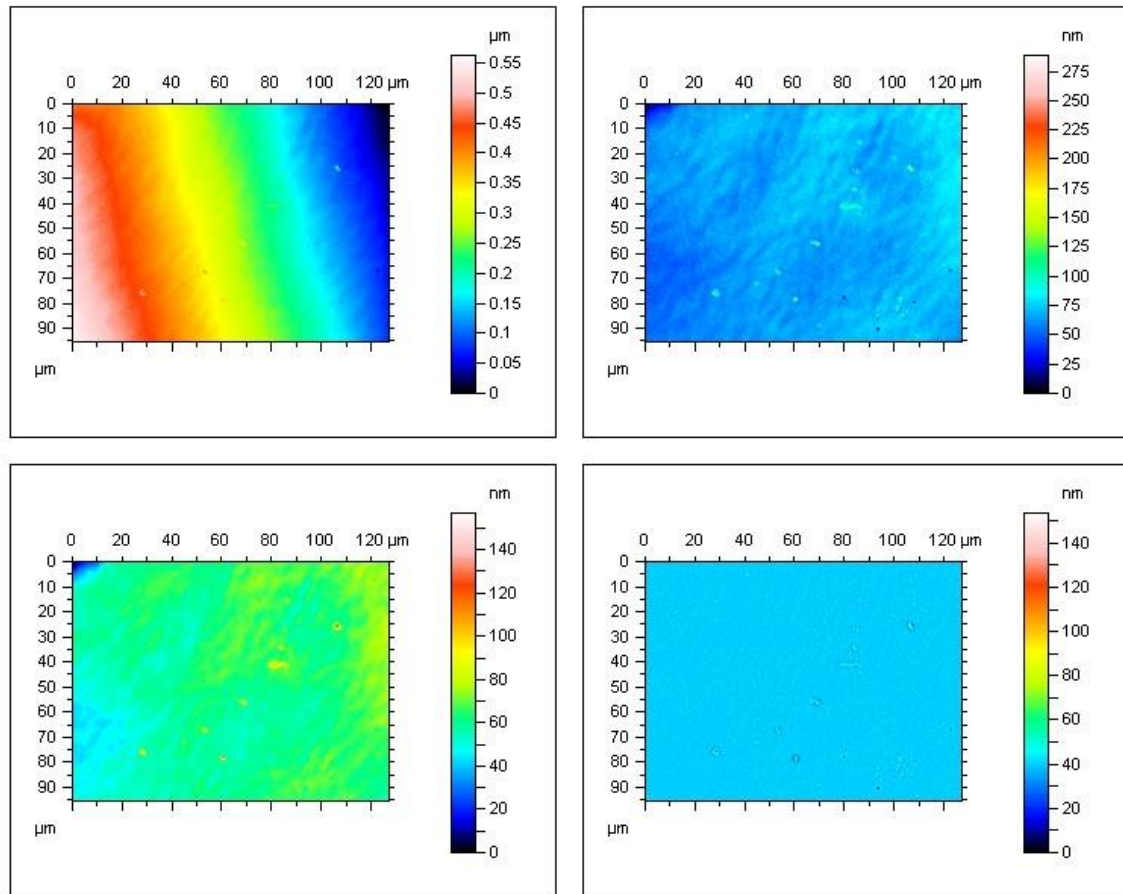
Figura 34 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.40523	nm
Ssk	14.6042	
Sku	790.583	
Sp	102.848	nm
Sv	39.4013	nm
Sz	142.249	nm
Sa	0.713805	nm

Fonte: Produção do próprio autor

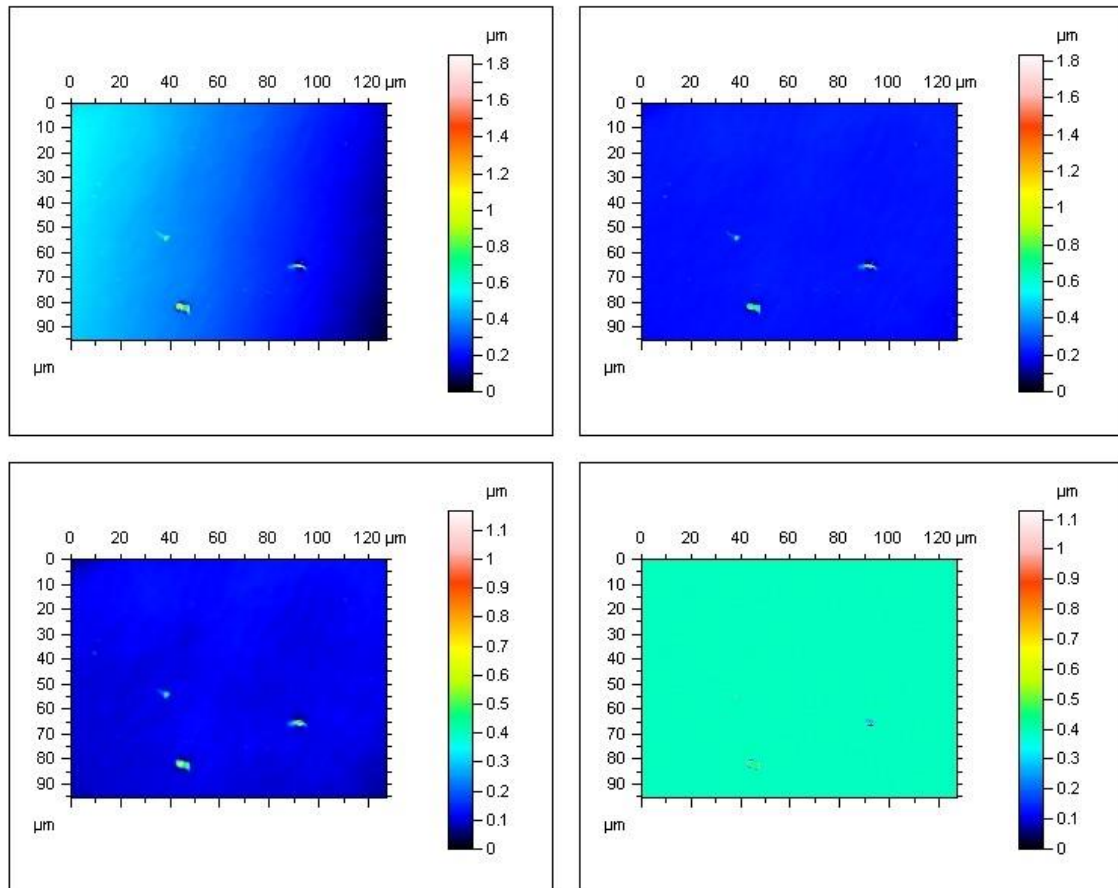
Figura 35 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.21480	nm
Ssk	15.5316	
Sku	1029.12	
Sp	114.145	nm
Sv	39.4220	nm
Sz	153.567	nm
Sa	0.672267	nm

Fonte: Produção do próprio autor

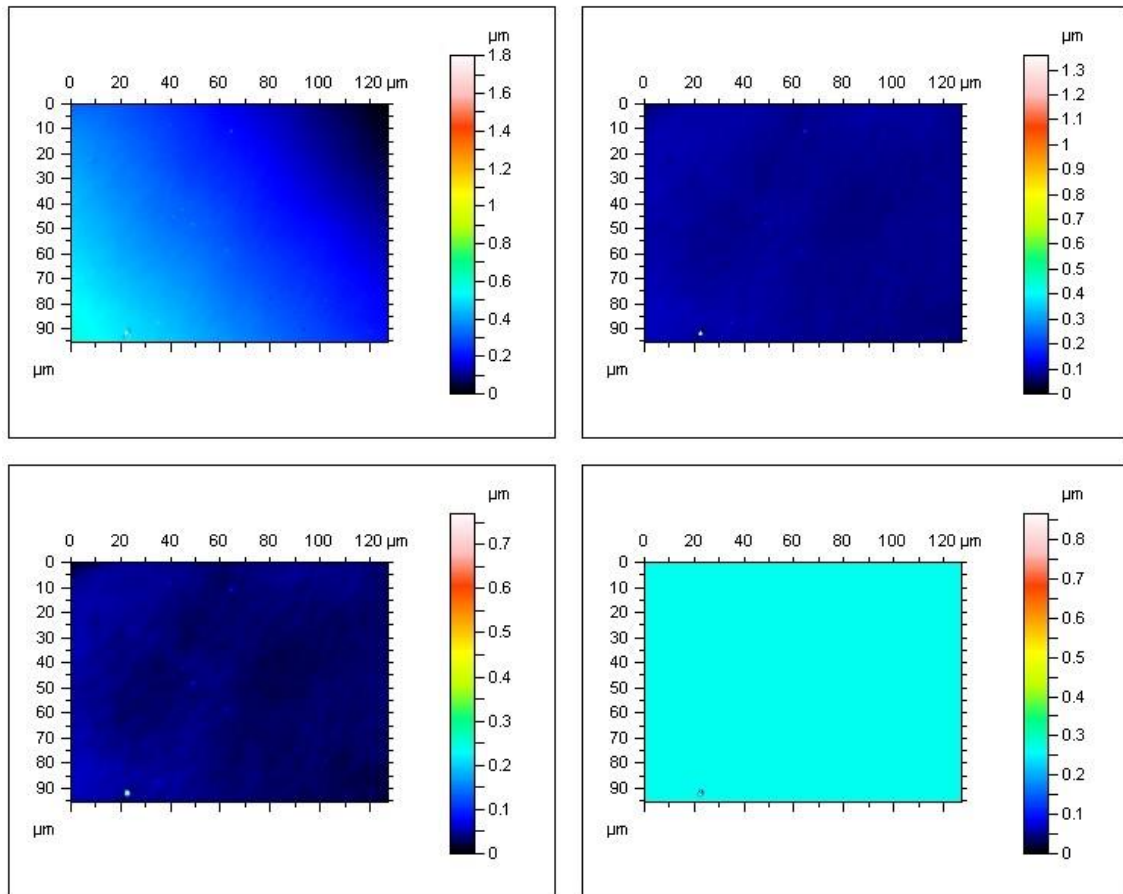
Figura 36 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.0082596	µm
Ssk	26.0052	
Sku	2086.92	
Sp	0.740744	µm
Sv	0.386979	µm
Sz	1.12772	µm
Sa	0.00108802	µm

Fonte: Produção do próprio autor

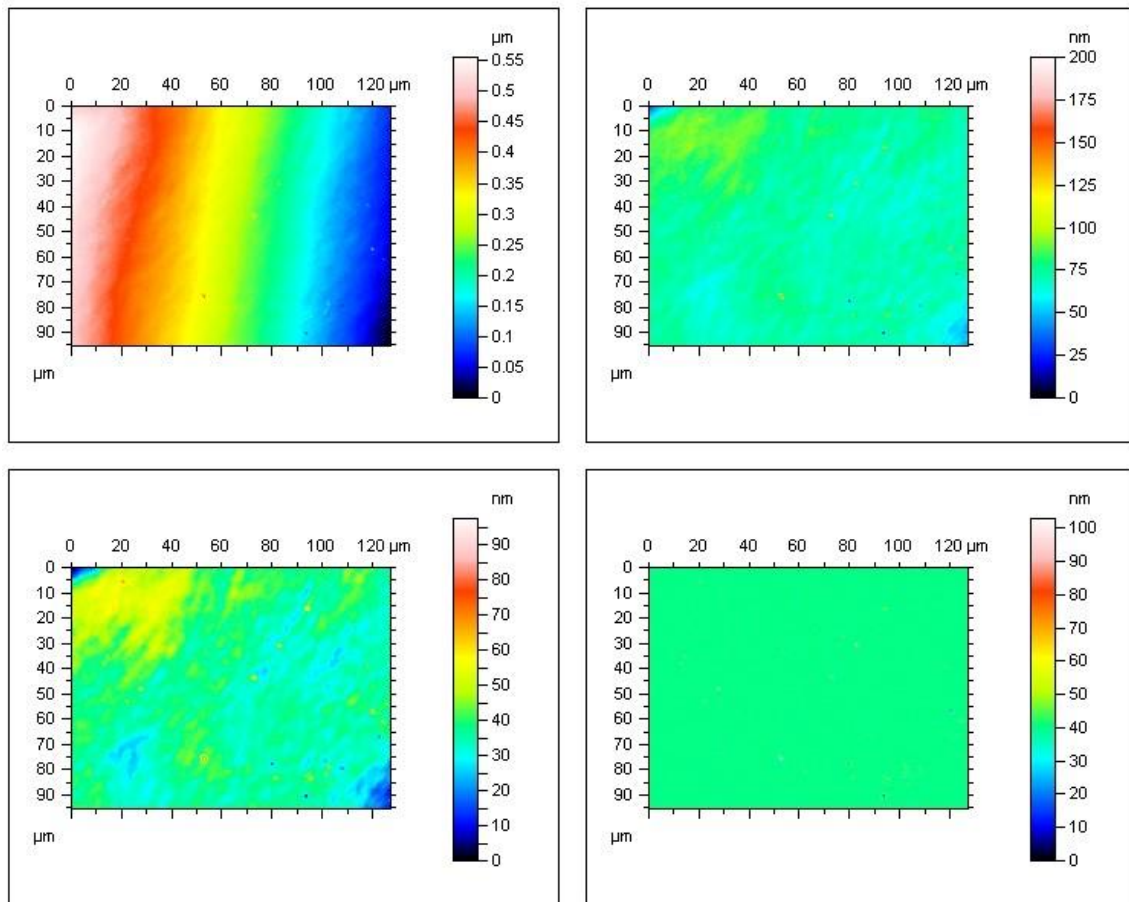
Figura 37 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.00485939	μm
Ssk	62.5139	
Sku	7142.10	
Sp	0.601751	μm
Sv	0.264345	μm
Sz	0.866096	μm
Sa	0.00074518	μm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 38 – Quinto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.00930	nm
Ssk	5.59063	
Sku	322.090	
Sp	62.9520	nm
Sv	39.8852	nm
Sz	102.837	nm
Sa	0.637014	nm

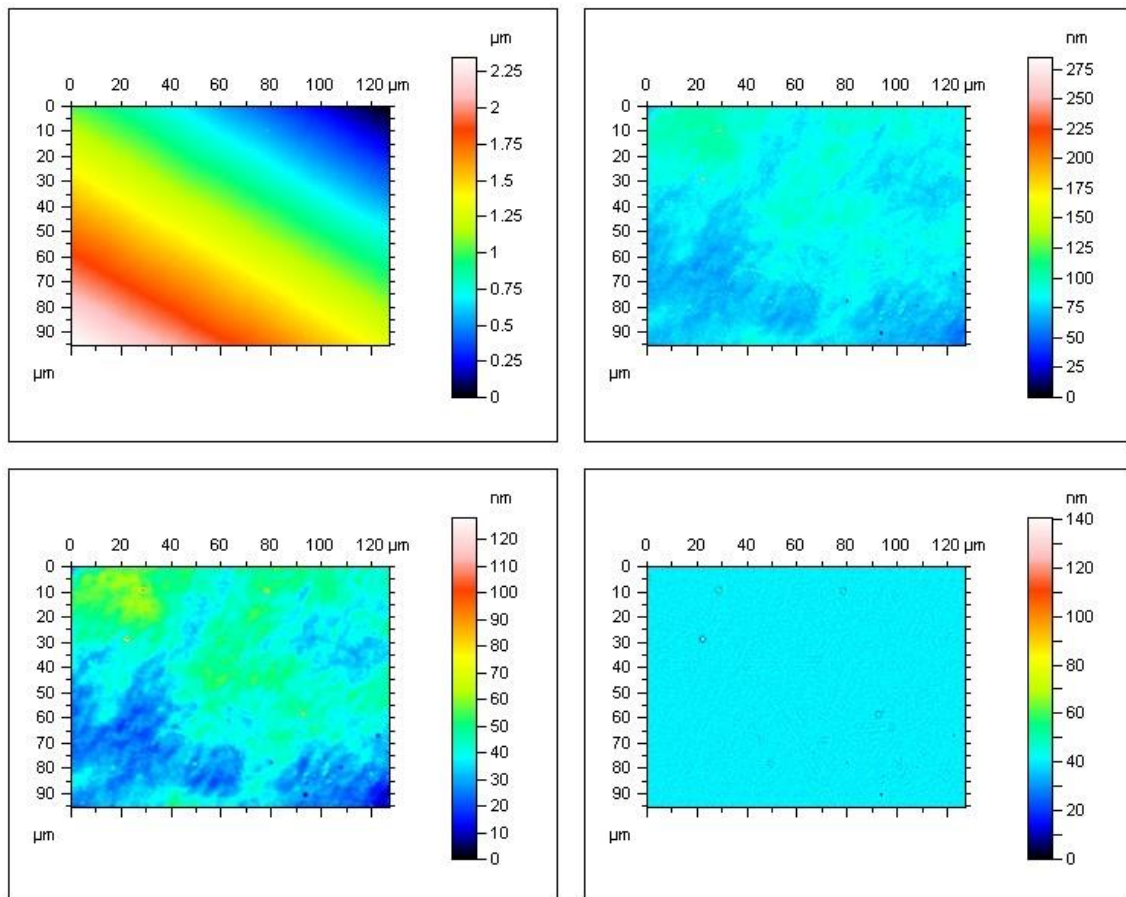
Fonte: Produção do próprio autor

4.2 DEPOIS DA IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA

4.2.1 Amostras tratadas a 496°C

4.2.1.1 Amostra 1

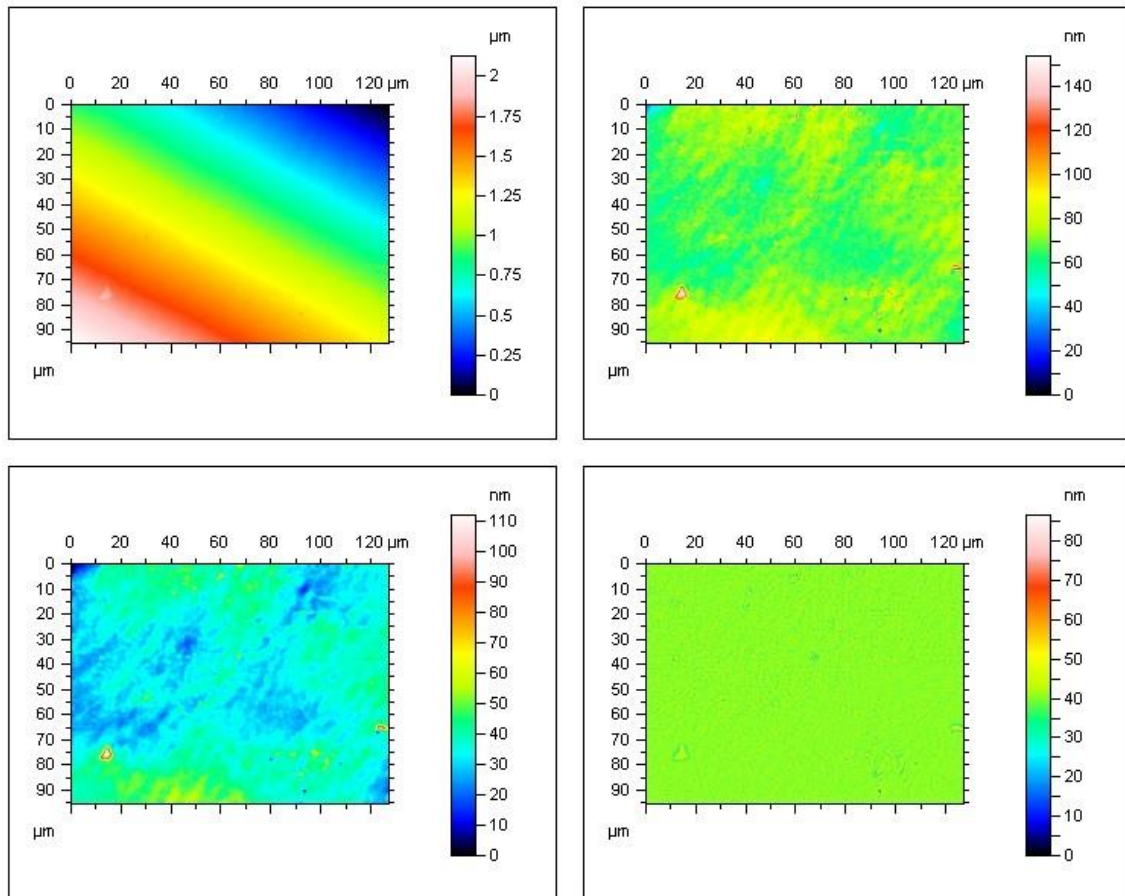
Figura 39 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.46752	nm
Ssk	8.35032	
Sku	410.947	
Sp	100.981	nm
Sv	39.6347	nm
Sz	140.616	nm
Sa	0.944136	nm

Fonte: Produção do próprio autor

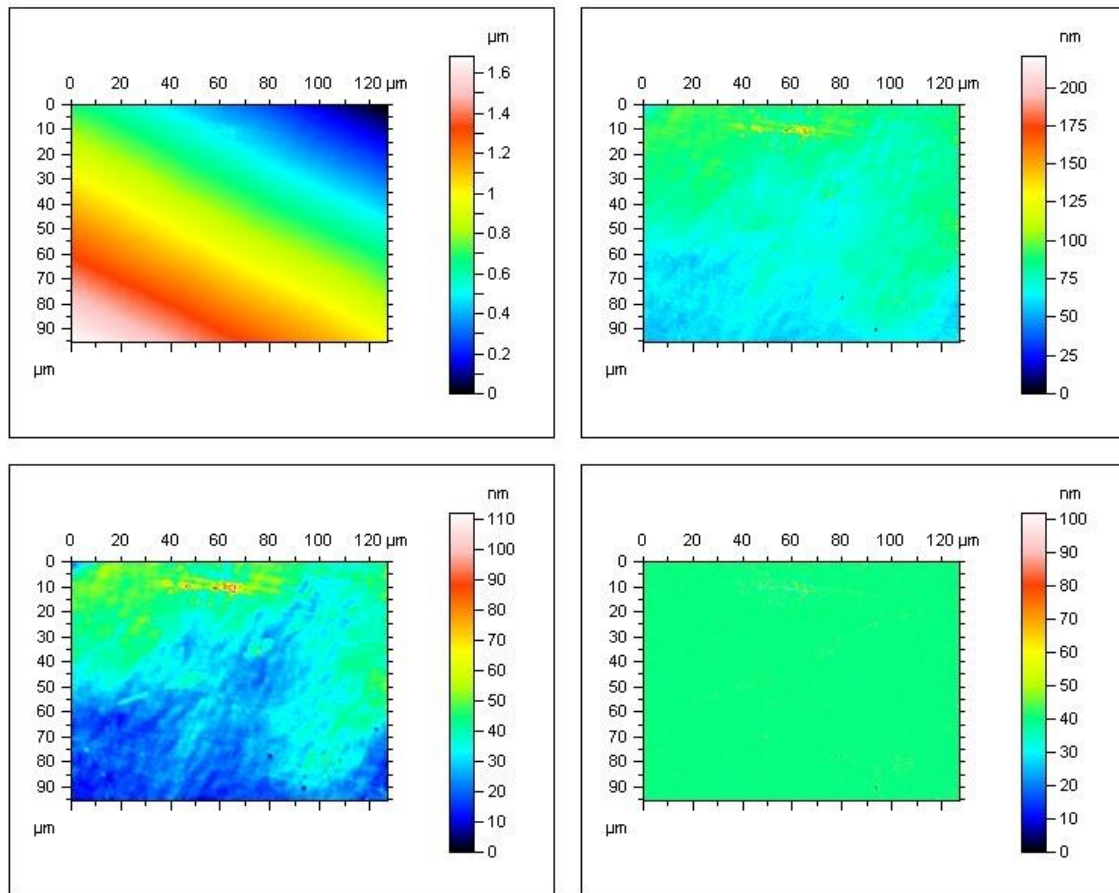
Figura 40 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.40682	nm
Ssk	1.67288	
Sku	49.8506	
Sp	46.5222	nm
Sv	40.1242	nm
Sz	86.6464	nm
Sa	0.964517	nm

Fonte: Produção do próprio autor

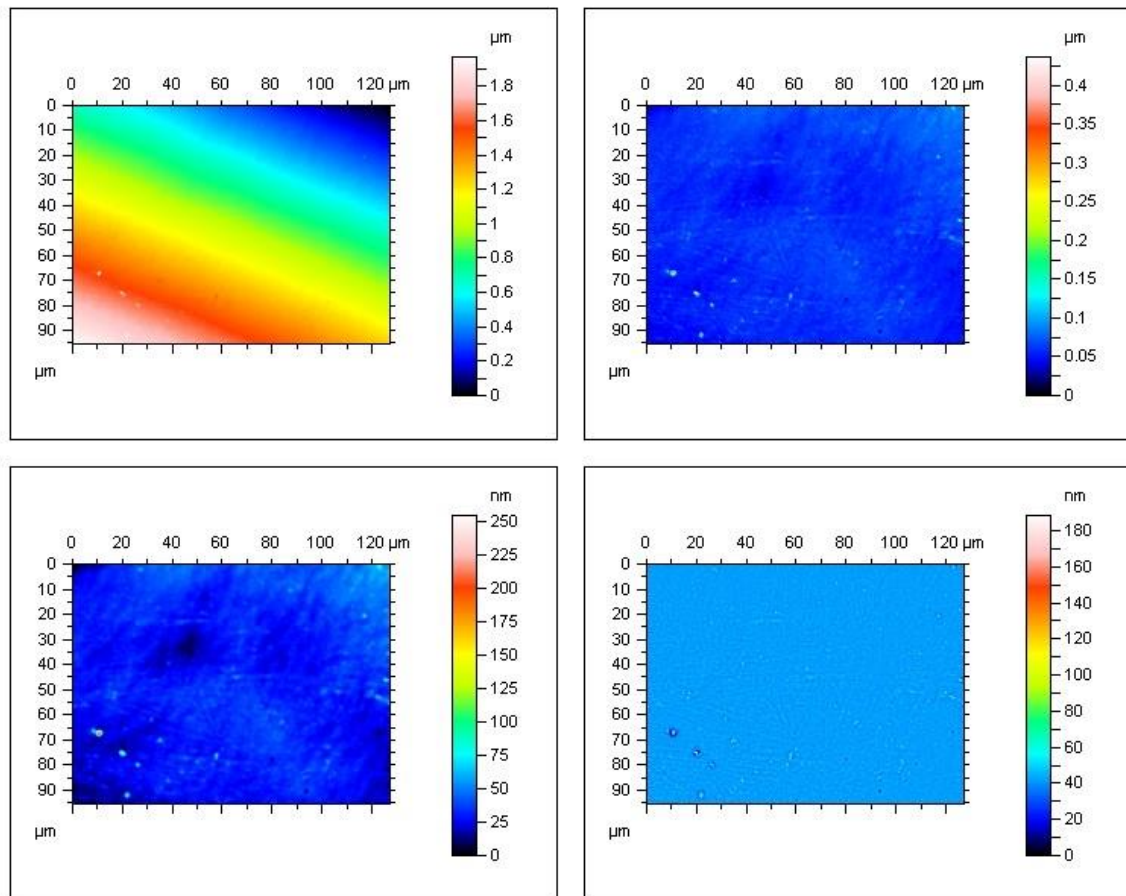
Figura 41 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.38582	nm
Ssk	3.45688	
Sku	113.058	
Sp	61.7858	nm
Sv	39.8632	nm
Sz	101.649	nm
Sa	0.872011	nm

Fonte: Produção do próprio autor

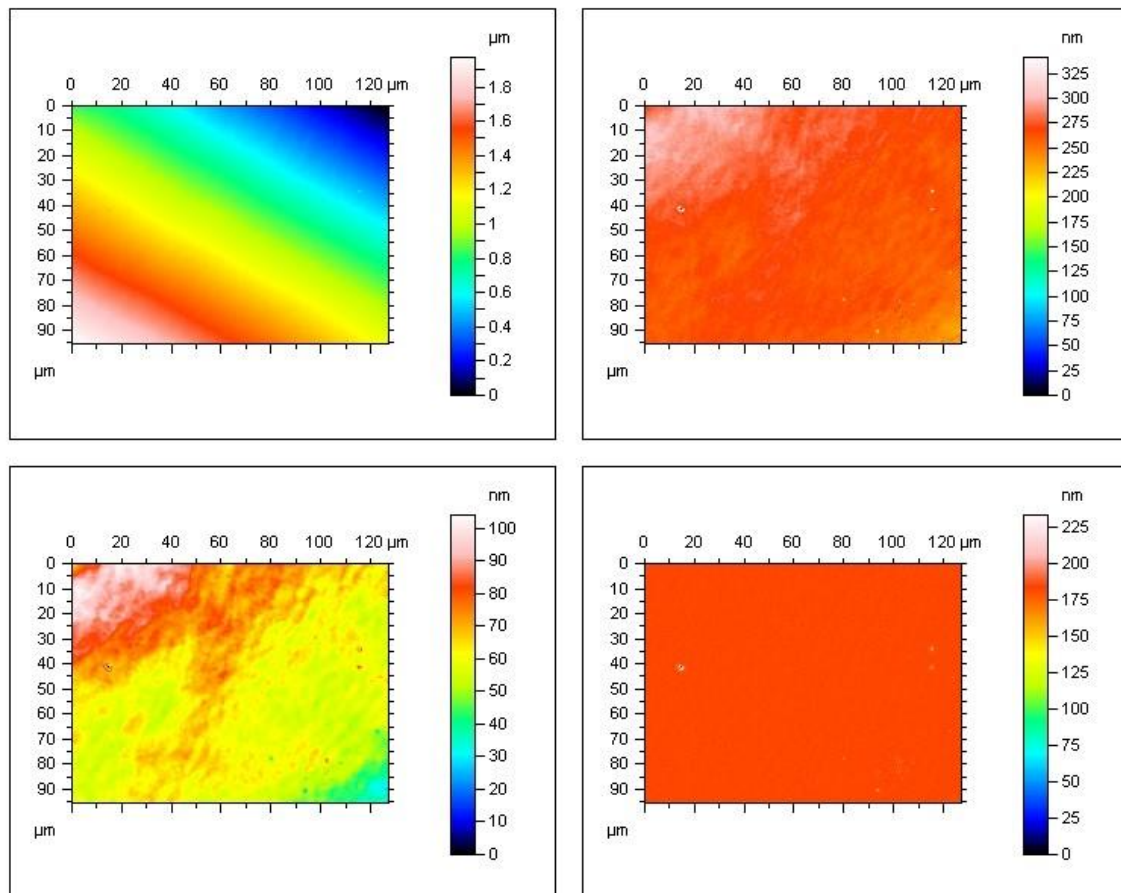
Figura 42 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	2.13555	nm
Ssk	16.4388	
Sku	840.714	
Sp	147.059	nm
Sv	41.3968	nm
Sz	188.456	nm
Sa	1.15574	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 43 – Quinto ponto analisado

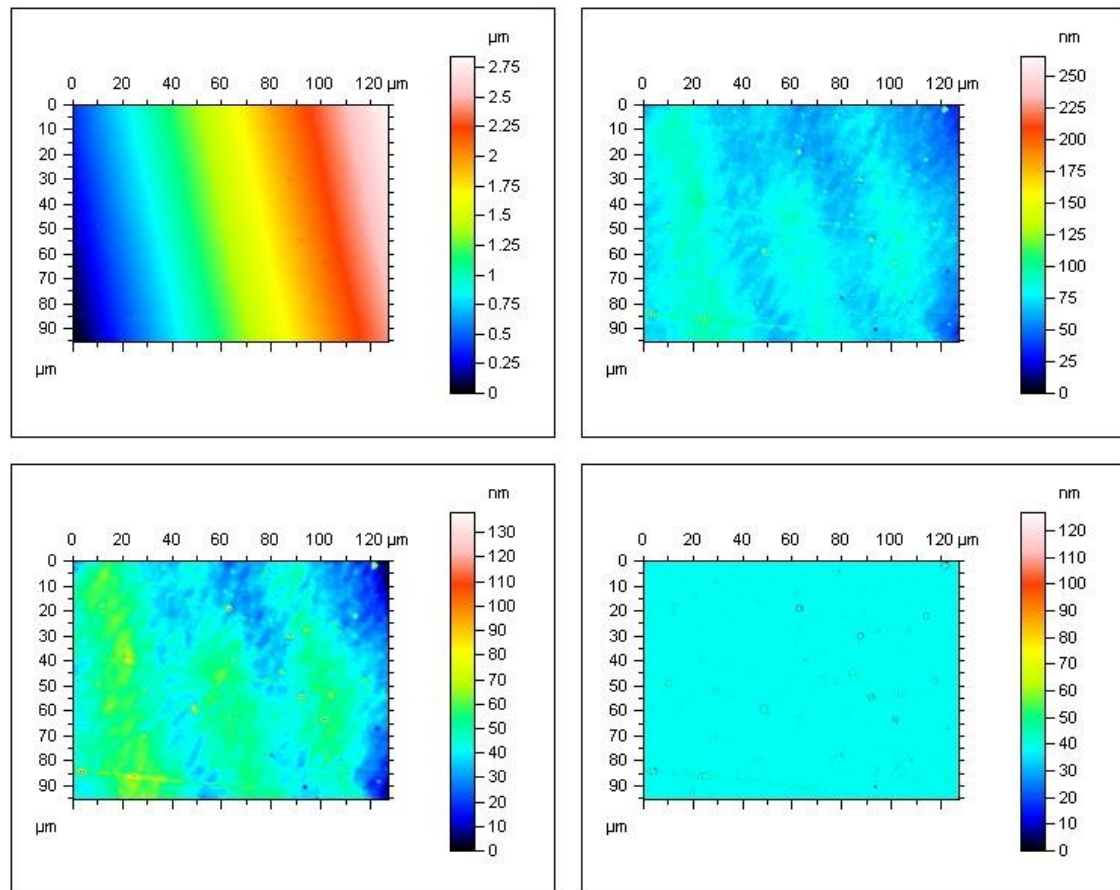


ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.39370	nm
Ssk	-31.5533	
Sku	3709.01	
Sp	51.7484	nm
Sv	181.955	nm
Sz	233.703	nm
Sa	0.736317	nm

Fonte: Produção do próprio autor

4.2.1.2 Amostra 2

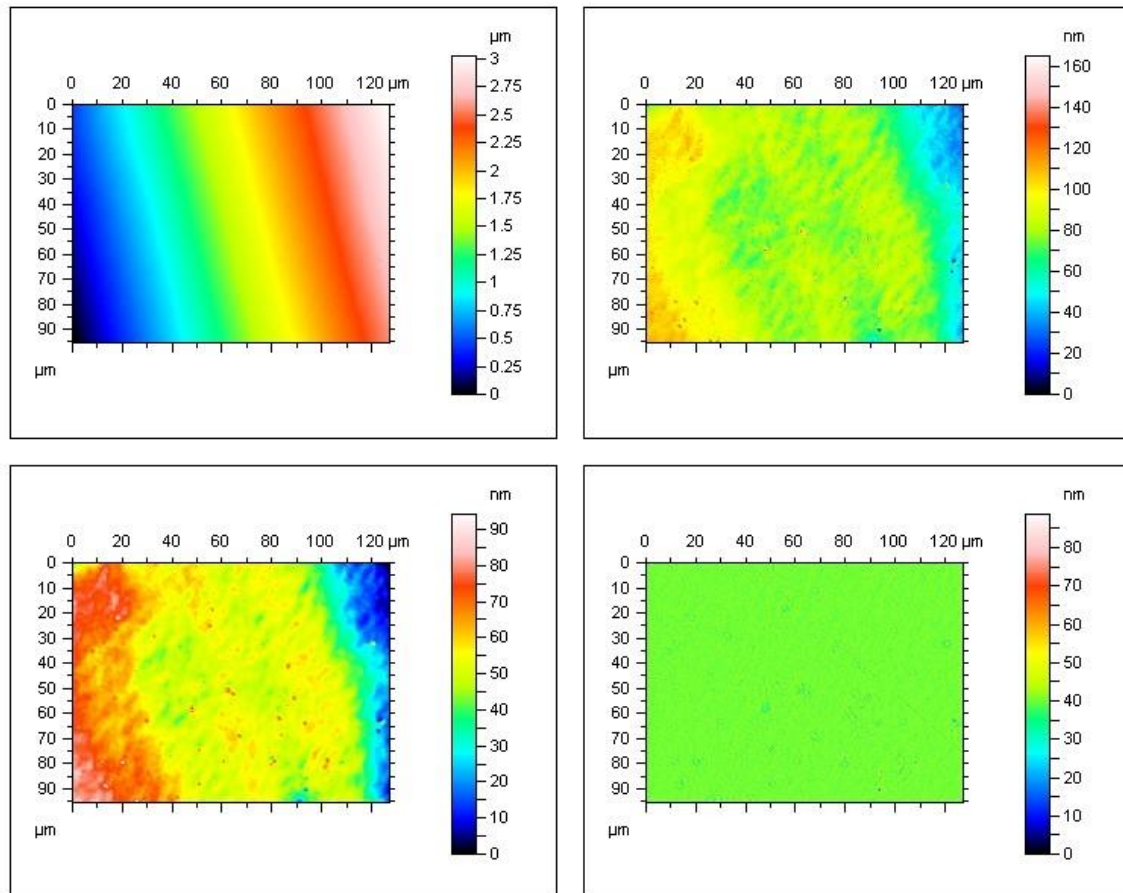
Figura 44 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.83411	nm
Ssk	9.56539	
Sku	297.163	
Sp	88.3327	nm
Sv	38.4185	nm
Sz	126.751	nm
Sa	0.938348	nm

Fonte: Produção do próprio autor

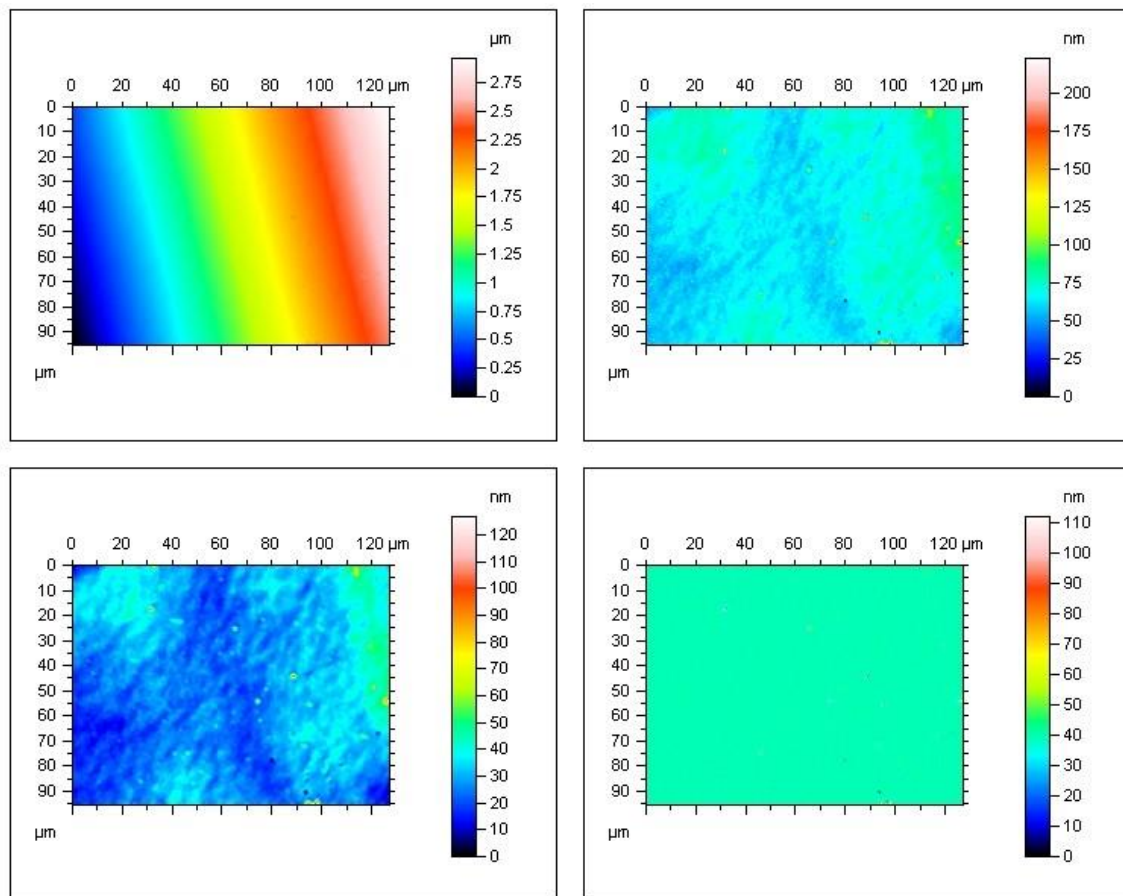
Figura 45 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.34371	nm
Ssk	3.36330	
Sku	91.3244	
Sp	48.7236	nm
Sv	40.0307	nm
Sz	88.7543	nm
Sa	0.841864	nm

Fonte: Produção do próprio autor

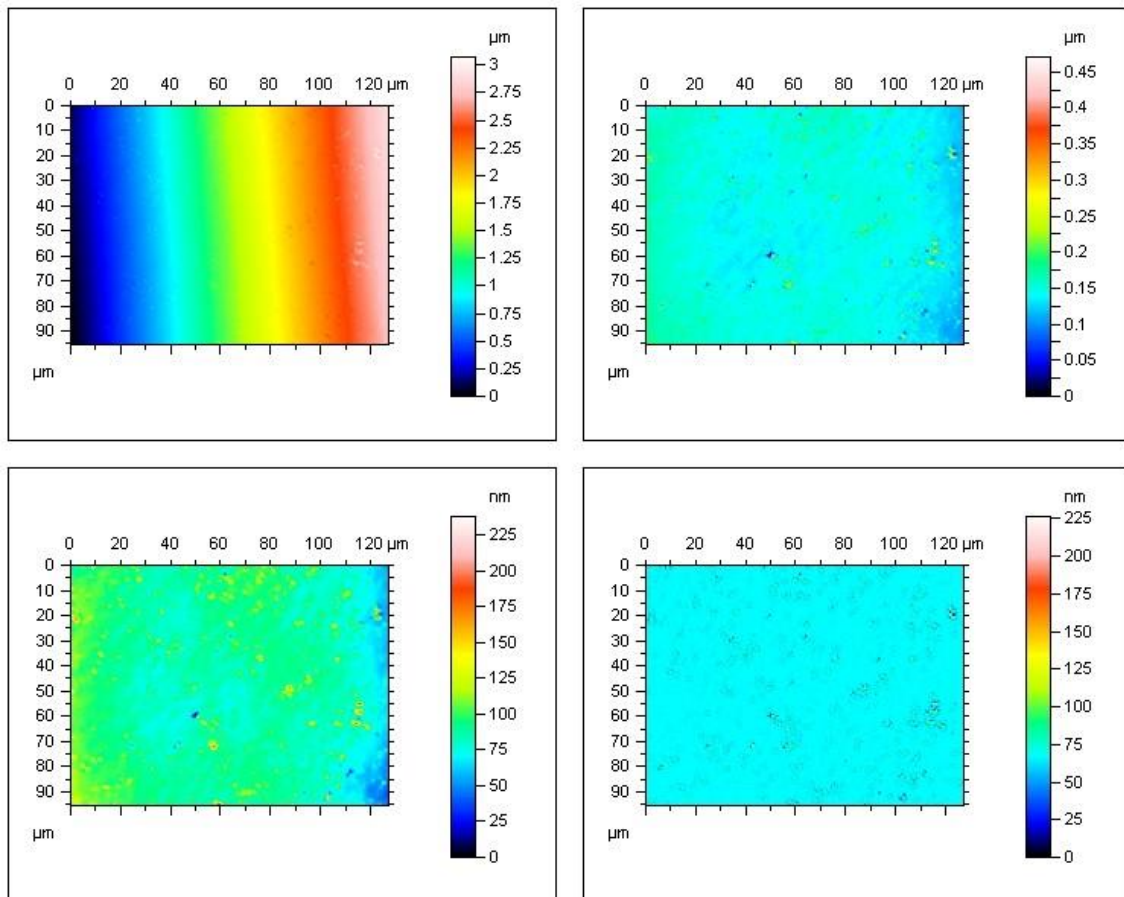
Figura 46 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.41622	nm
Ssk	7.77831	
Sku	273.955	
Sp	72.5860	nm
Sv	39.3319	nm
Sz	111.918	nm
Sa	0.819577	nm

Fonte: Produção do próprio autor

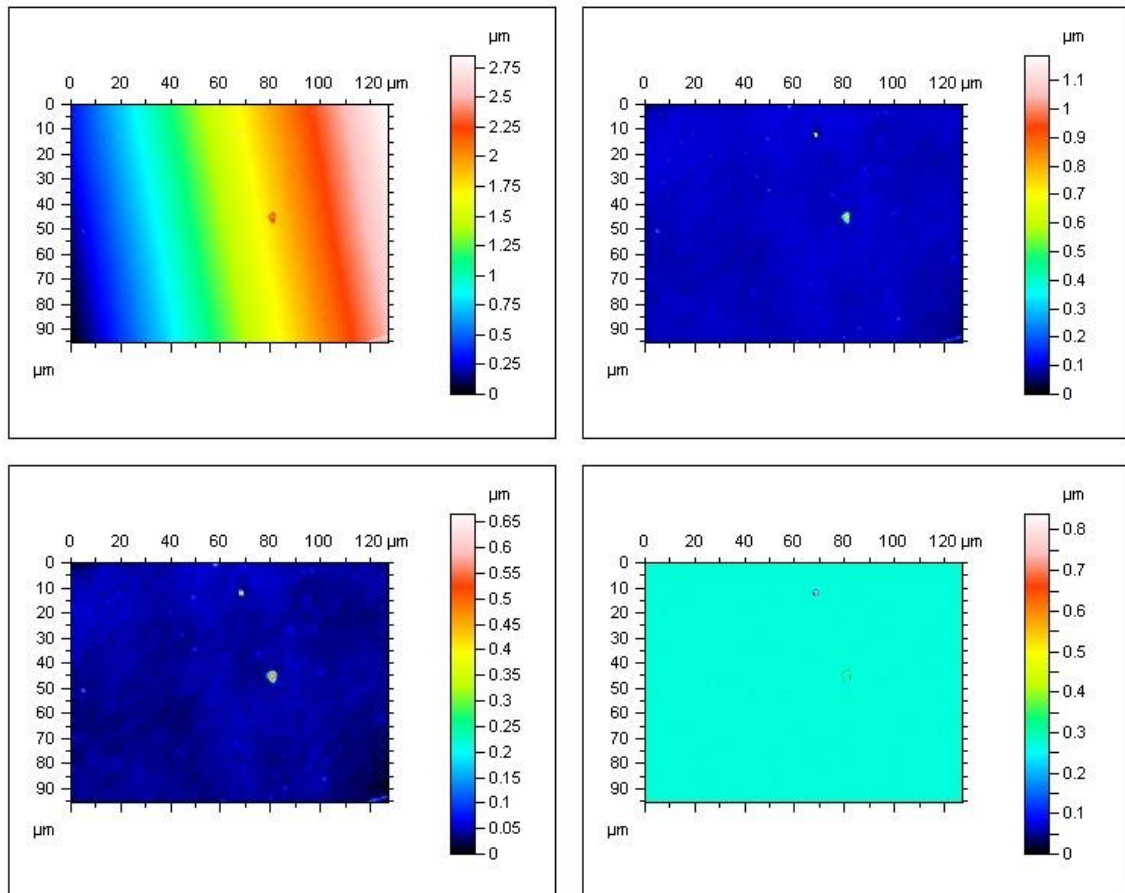
Figura 47 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	4.46533	nm
Ssk	4.10170	
Sku	70.5810	
Sp	159.910	nm
Sv	66.4802	nm
Sz	226.390	nm
Sa	2.05073	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 48 – Quinto ponto analisado



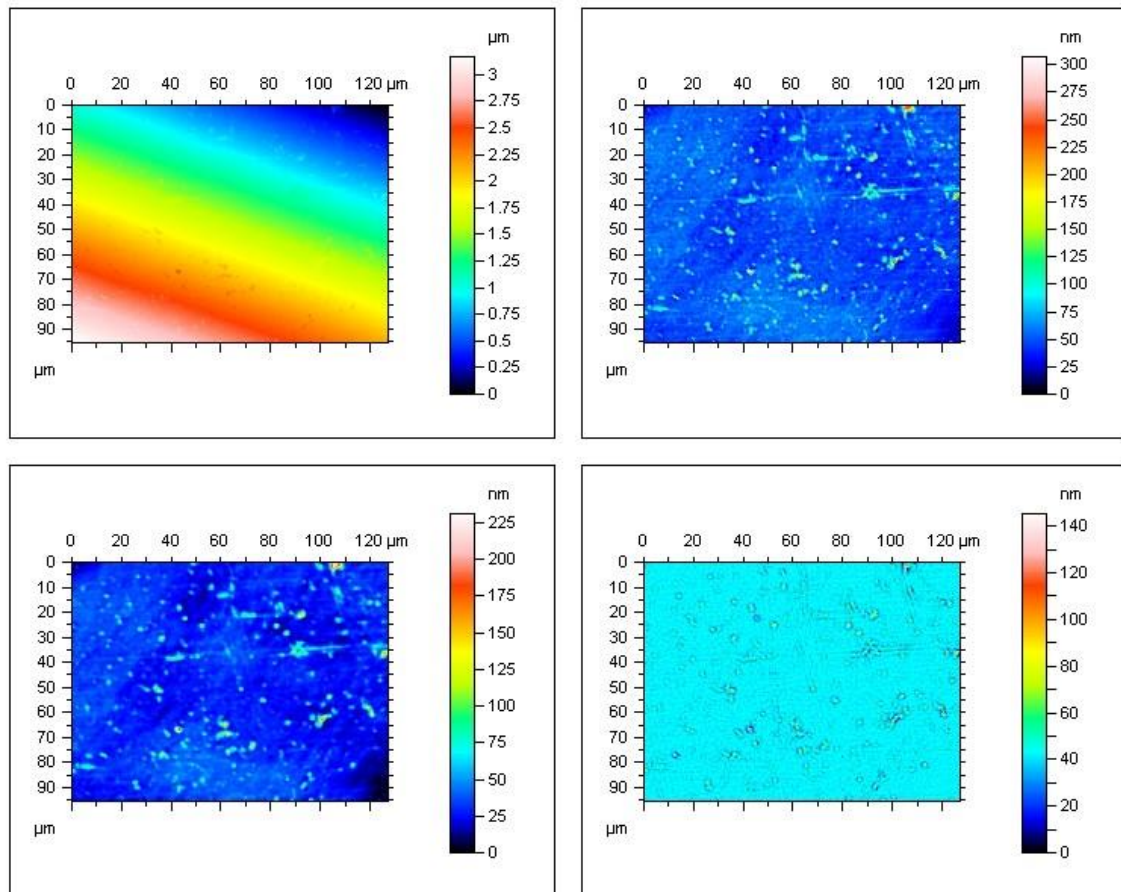
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.00585926	μm
Ssk	37.3329	
Sku	3379.42	
Sp	0.568346	μm
Sv	0.270919	μm
Sz	0.839265	μm
Sa	0.00116384	μm

Fonte: Produção do próprio autor

4.2.2 Amostras tratadas a 579°C

4.2.2.1 Amostra 1

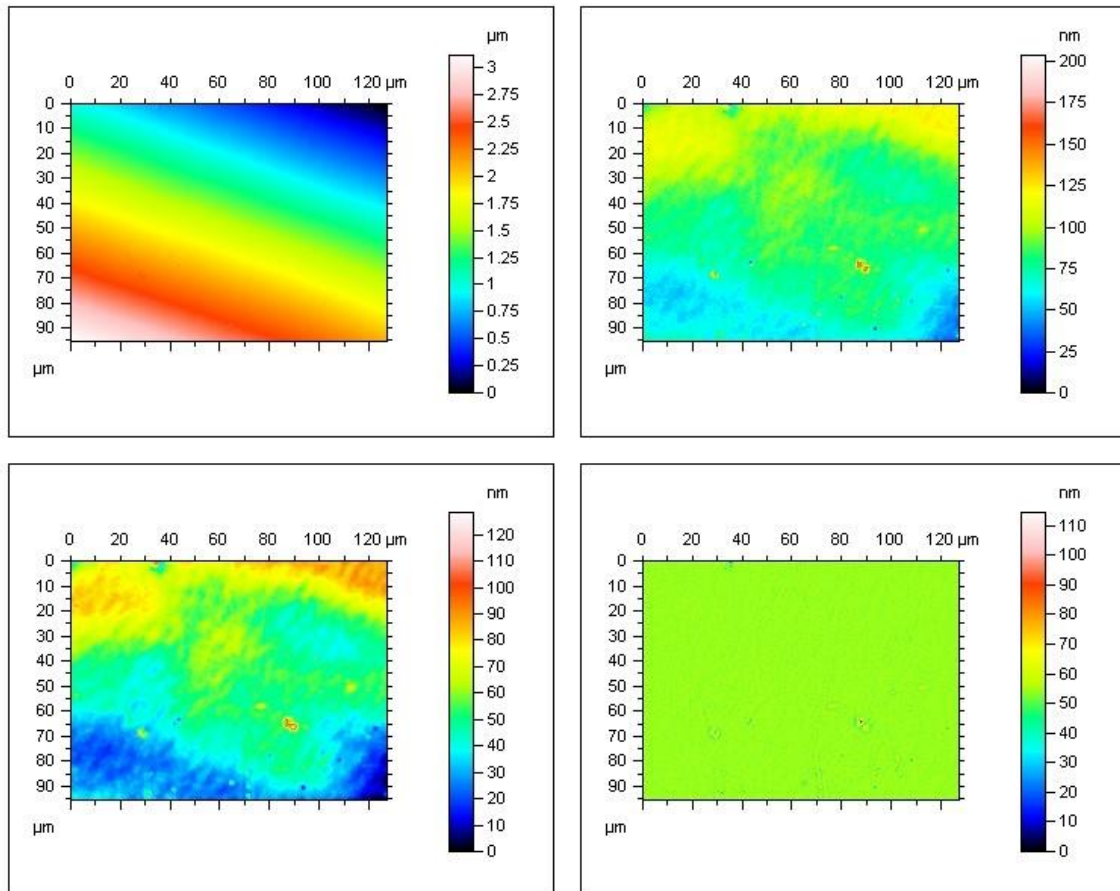
Figura 49 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	4.60792	nm
Ssk	3.98735	
Sku	44.9983	
Sp	103.770	nm
Sv	41.5478	nm
Sz	145.318	nm
Sa	2.48059	nm

Fonte: Produção do próprio autor

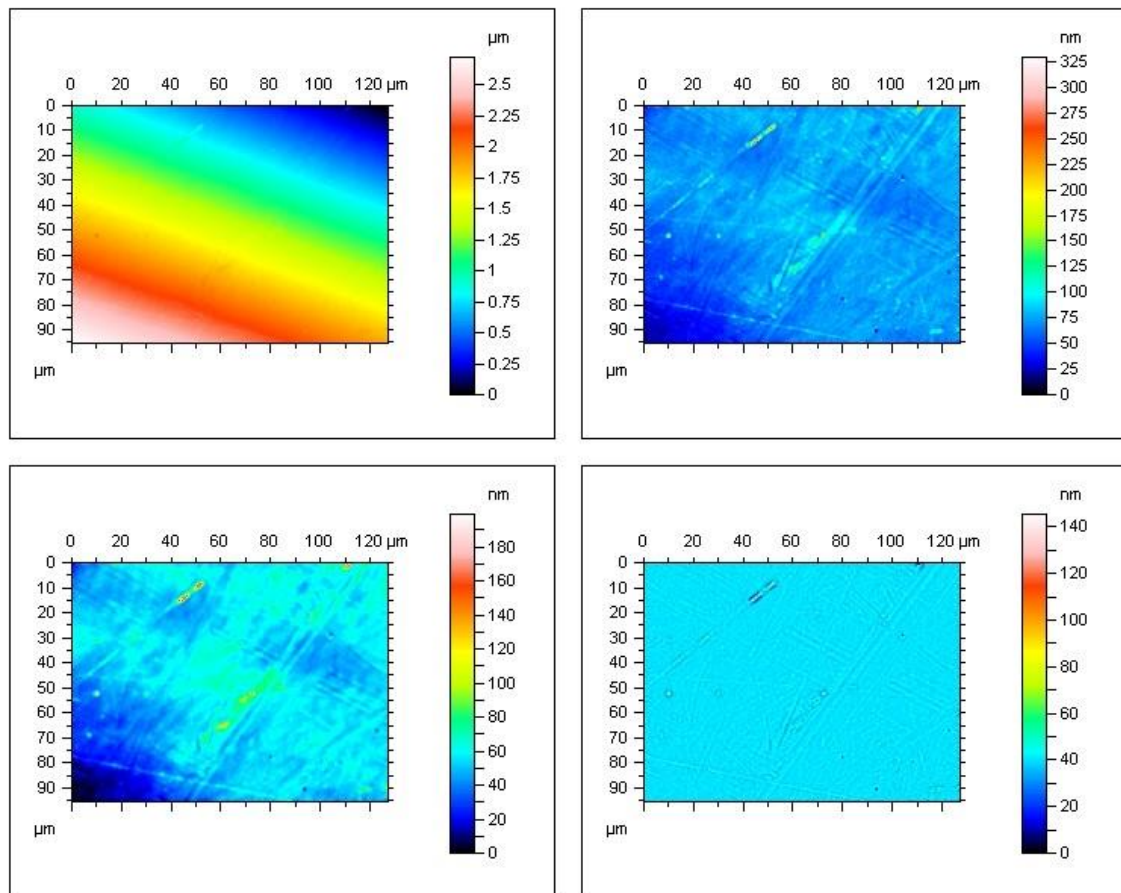
Figura 50 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.37191	nm
Ssk	1.38386	
Sku	174.636	
Sp	60.6394	nm
Sv	53.7639	nm
Sz	114.403	nm
Sa	0.801343	nm

Fonte: Produção do próprio autor

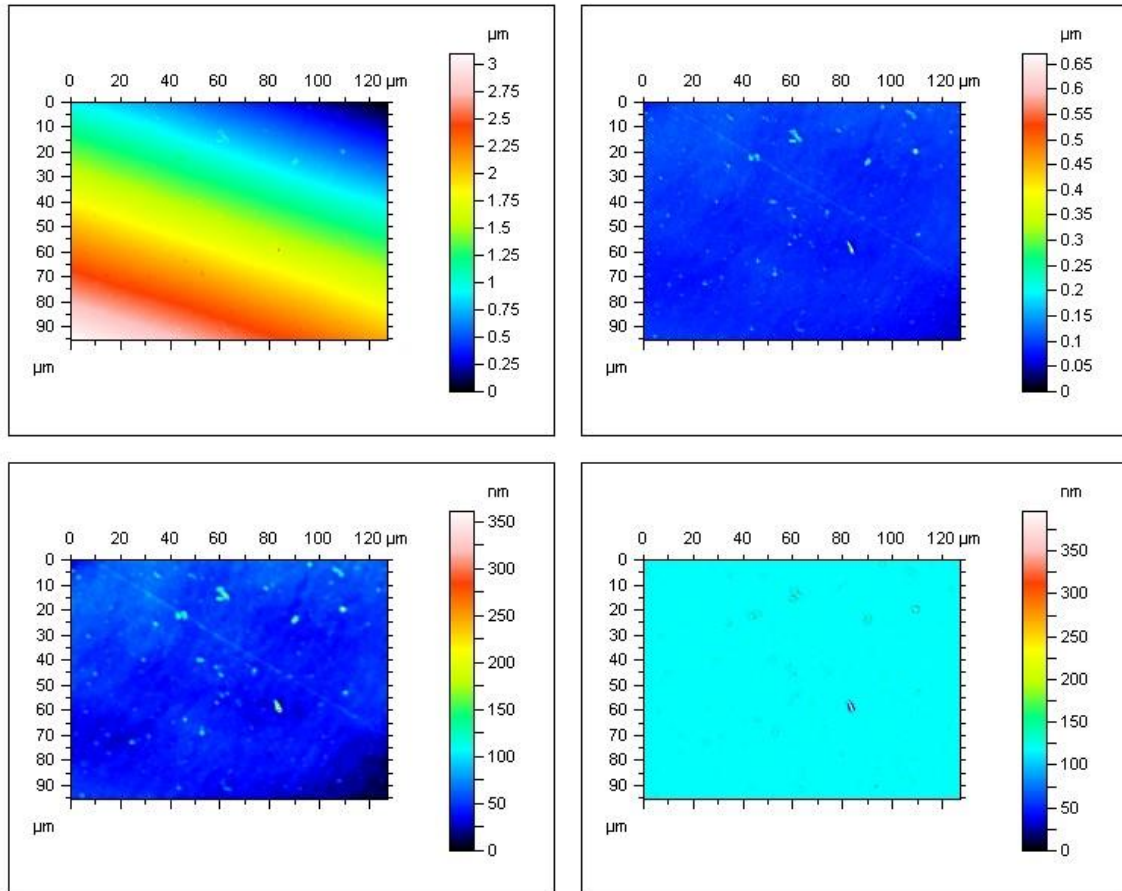
Figura 51 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	2.21066	nm
Ssk	7.40159	
Sku	215.595	
Sp	105.813	nm
Sv	39.6306	nm
Sz	145.444	nm
Sa	1.24109	nm

Fonte: Produção do próprio autor

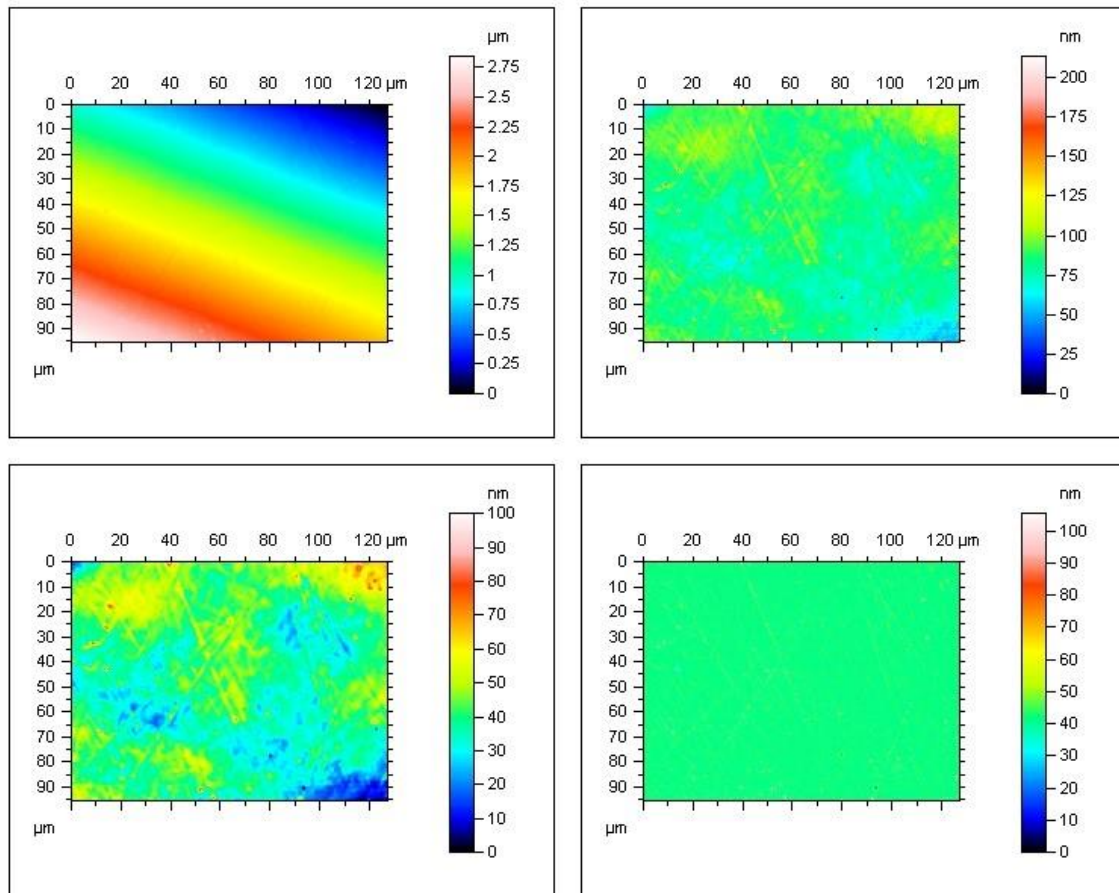
Figura 52 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	4.00937	nm
Ssk	19.5951	
Sku	1115.14	
Sp	278.640	nm
Sv	117.505	nm
Sz	396.144	nm
Sa	1.39446	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 53 – Quinto ponto analisado

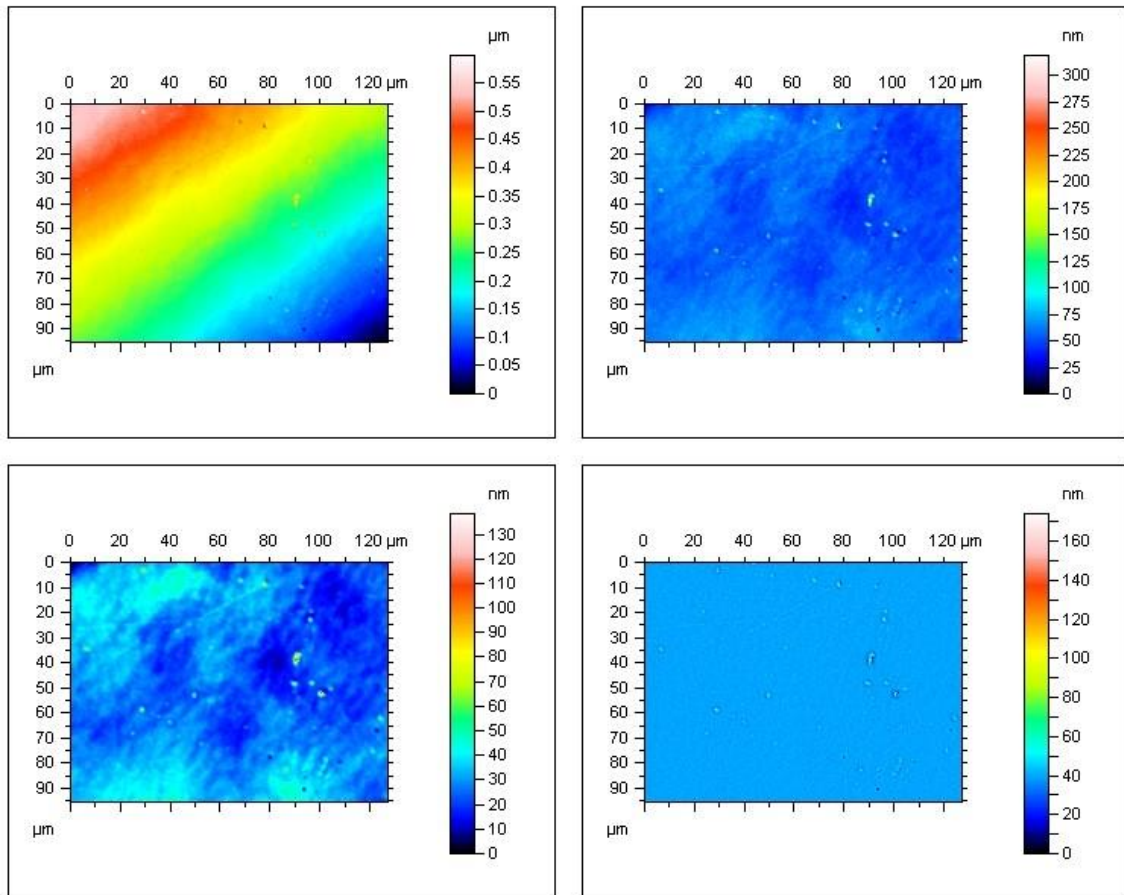


ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.91436	nm
Ssk	2.80572	
Sku	55.5909	
Sp	64.1539	nm
Sv	41.3960	nm
Sz	105.550	nm
Sa	1.28393	nm

Fonte: Produção do próprio autor

4.2.2.2 Amostra 2

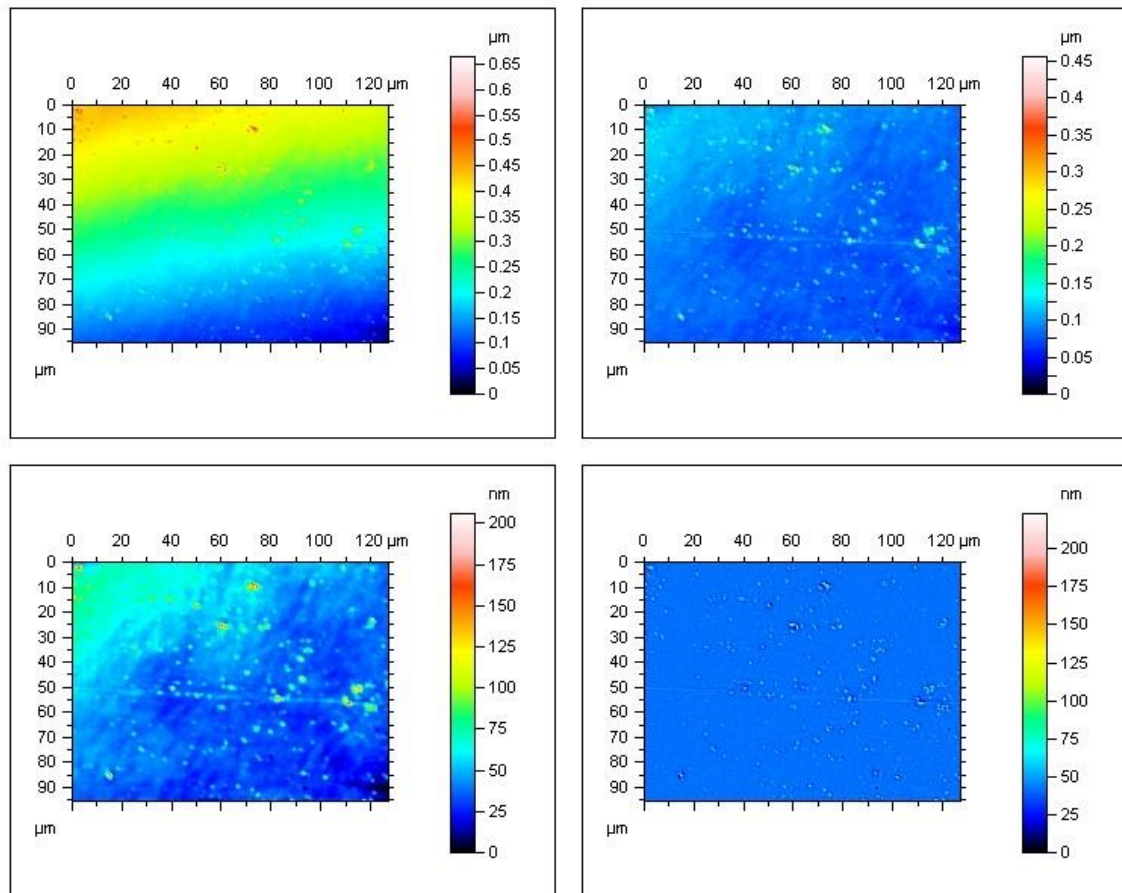
Figura 54 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.57649	nm
Ssk	17.1751	
Sku	986.932	
Sp	134.966	nm
Sv	39.0188	nm
Sz	173.985	nm
Sa	0.764714	nm

Fonte: Produção do próprio autor

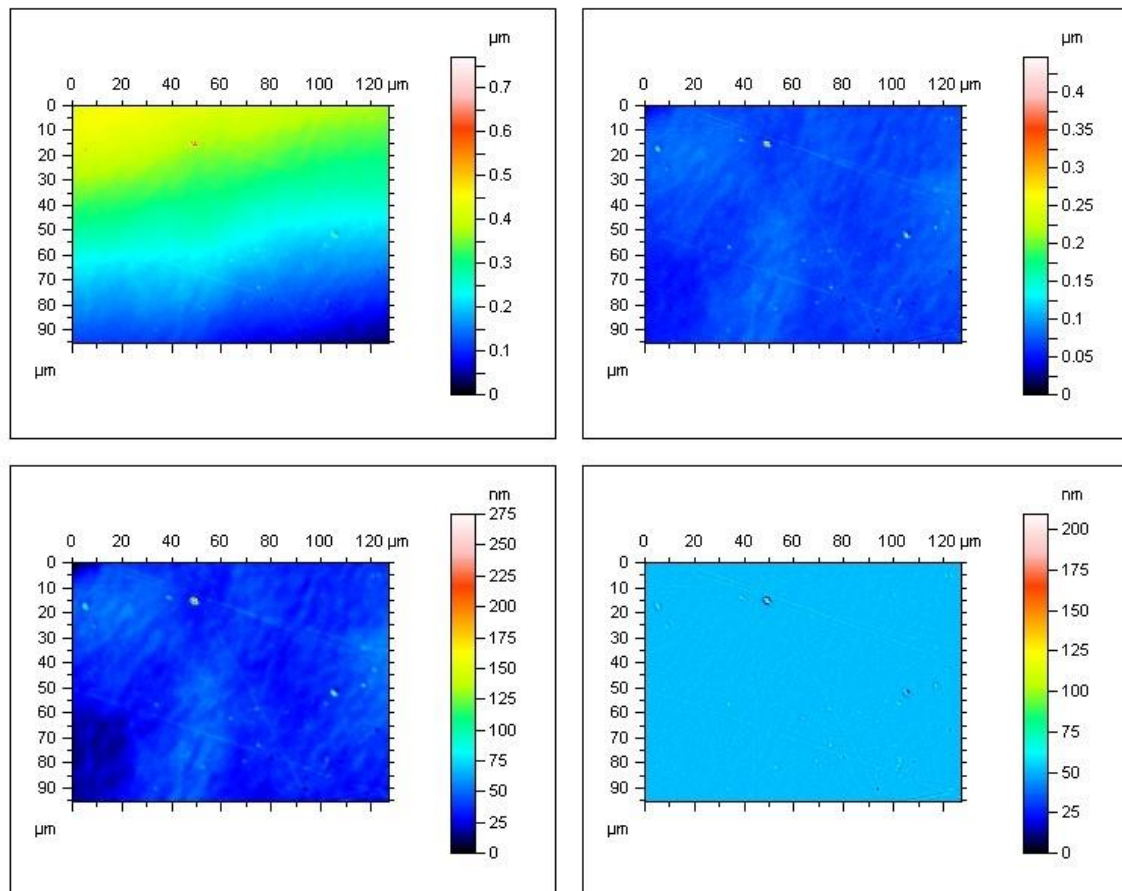
Figura 55 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	3.70075	nm
Ssk	9.62409	
Sku	221.632	
Sp	182.035	nm
Sv	41.1442	nm
Sz	223.180	nm
Sa	1.47479	nm

Fonte: Produção do próprio autor

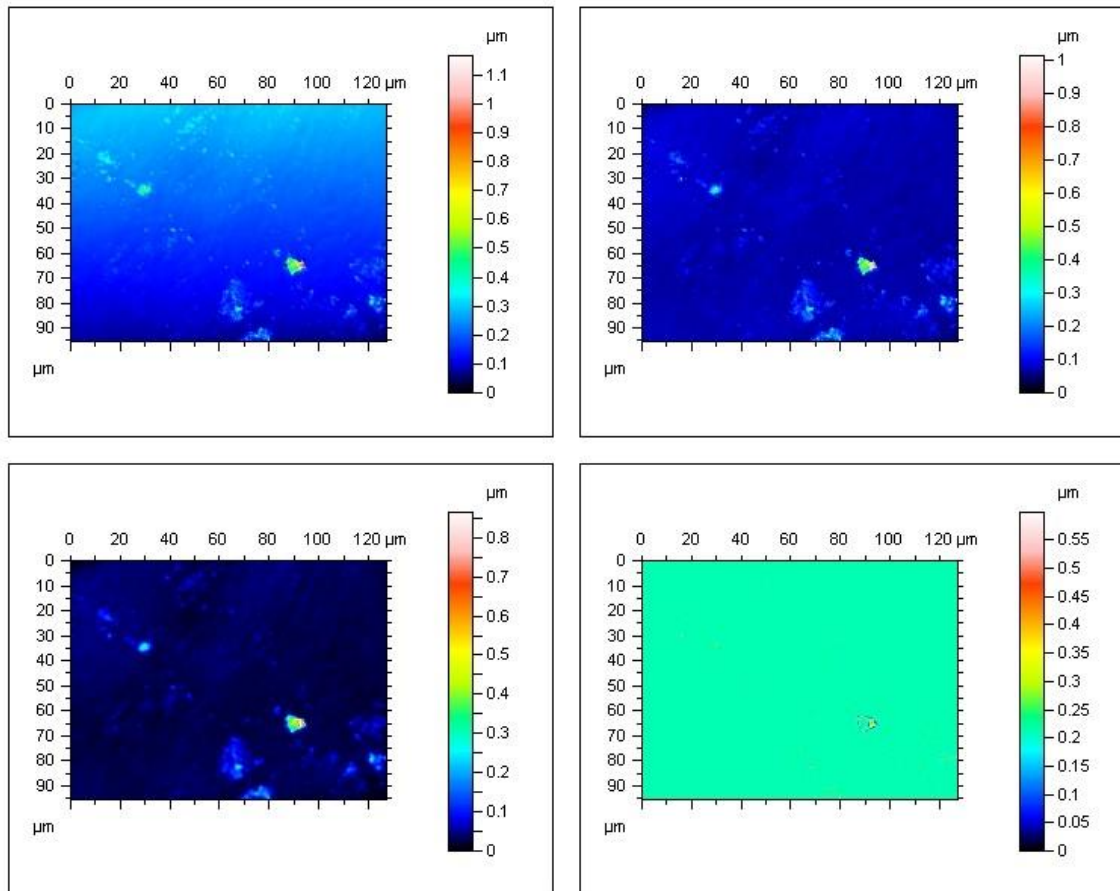
Figura 56 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.77284	nm
Ssk	20.2845	
Sku	1315.72	
Sp	158.466	nm
Sv	51.0084	nm
Sz	209.474	nm
Sa	0.810660	nm

Fonte: Produção do próprio autor

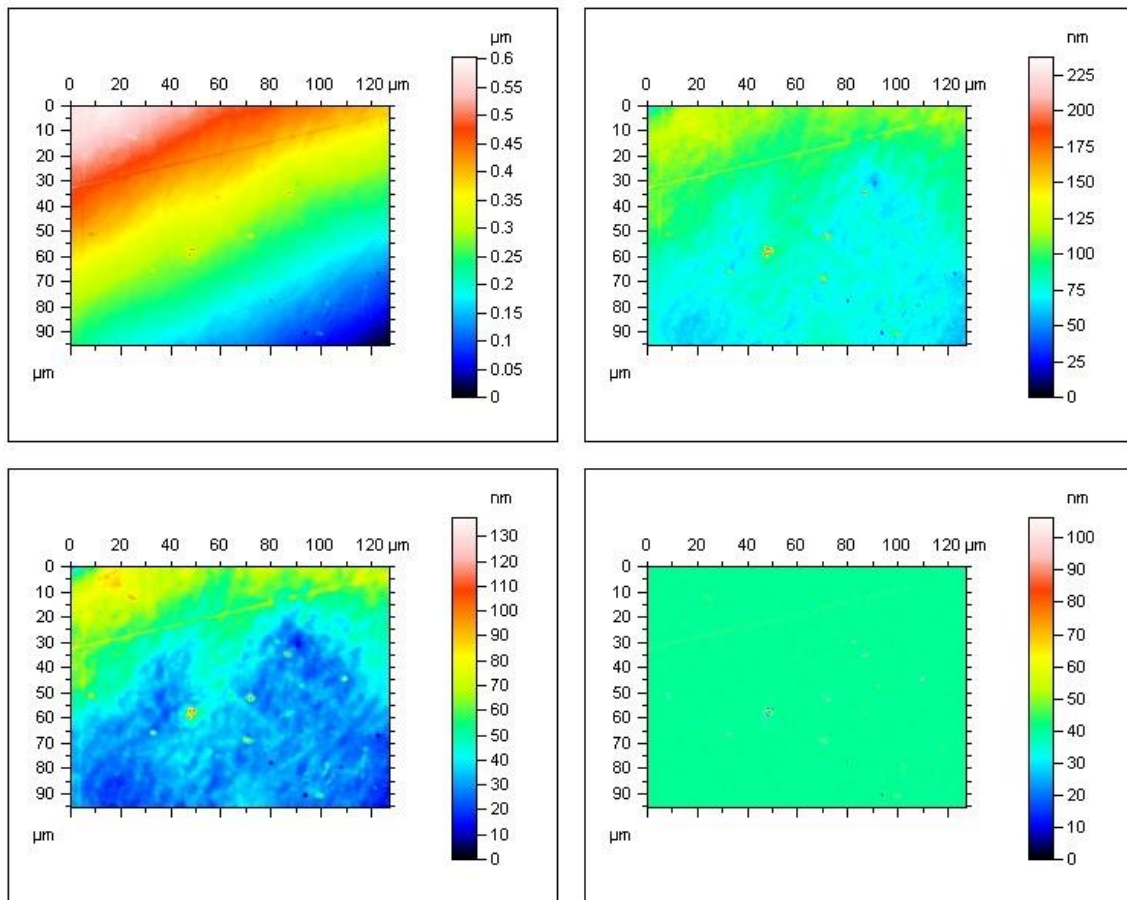
Figura 57 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.00663003	μm
Ssk	7.61280	
Sku	334.405	
Sp	0.386871	μm
Sv	0.212275	μm
Sz	0.599147	μm
Sa	0.00205613	μm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 58 – Quinto ponto analisado



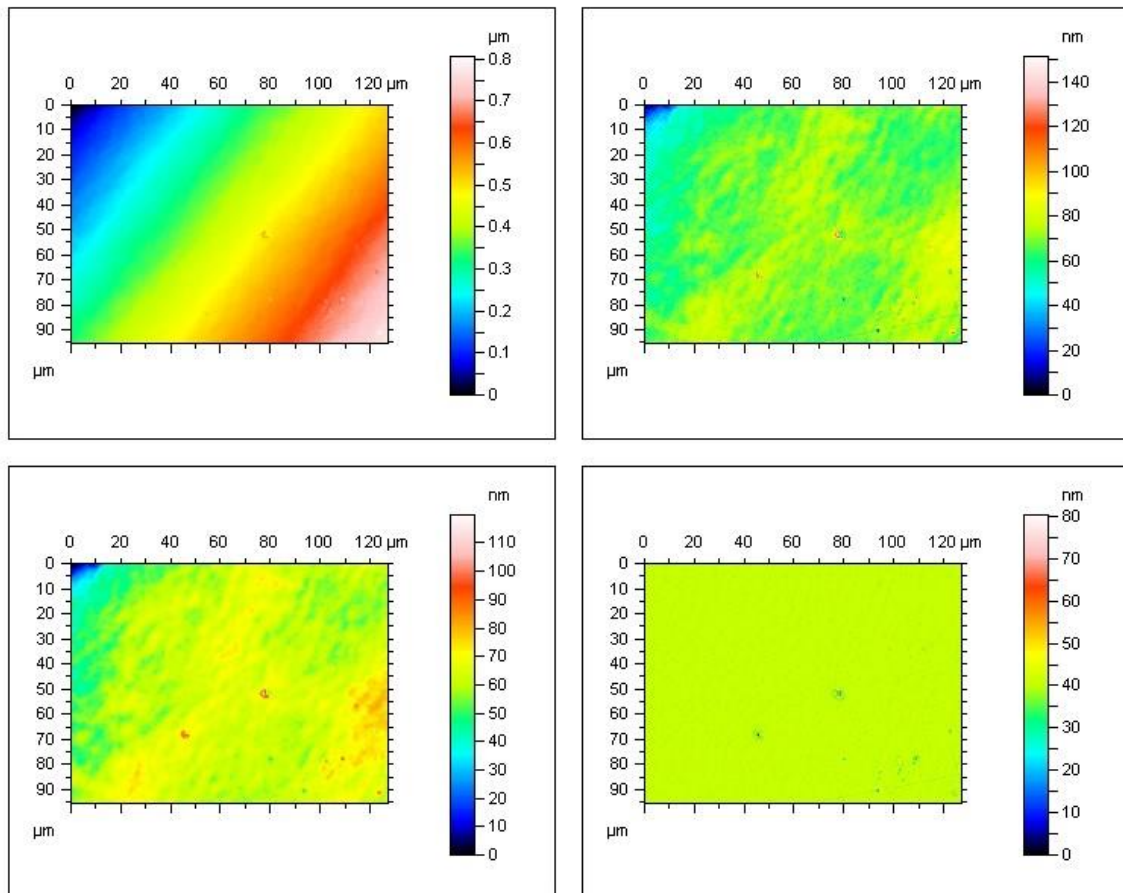
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.49050	nm
Ssk	7.11930	
Sku	233.032	
Sp	66.3369	nm
Sv	39.9984	nm
Sz	106.335	nm
Sa	0.834123	nm

Fonte: Produção do próprio autor

4.2.3 Amostras tratadas a 621°C

4.2.3.1 Amostra 1

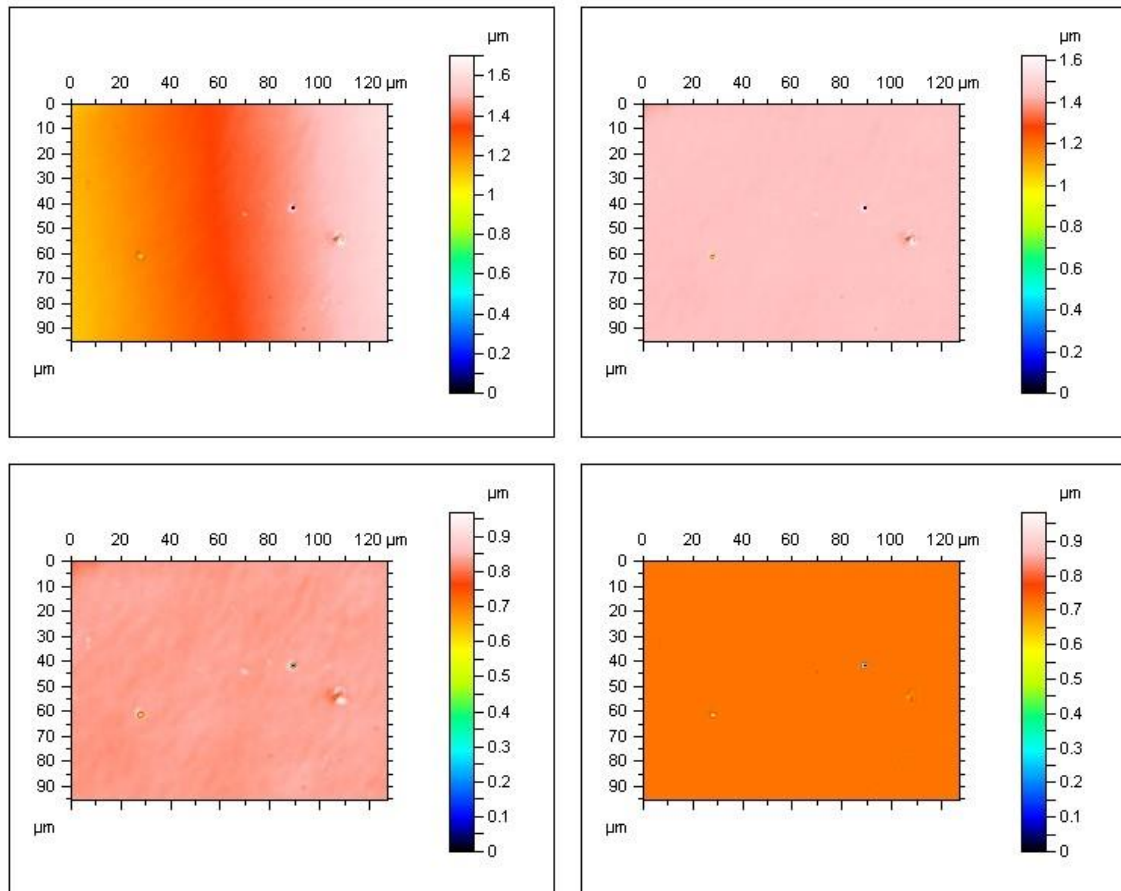
Figura 59 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.04730	nm
Ssk	0.486920	
Sku	121.985	
Sp	40.0403	nm
Sv	40.2796	nm
Sz	80.3199	nm
Sa	0.690991	nm

Fonte: Produção do próprio autor

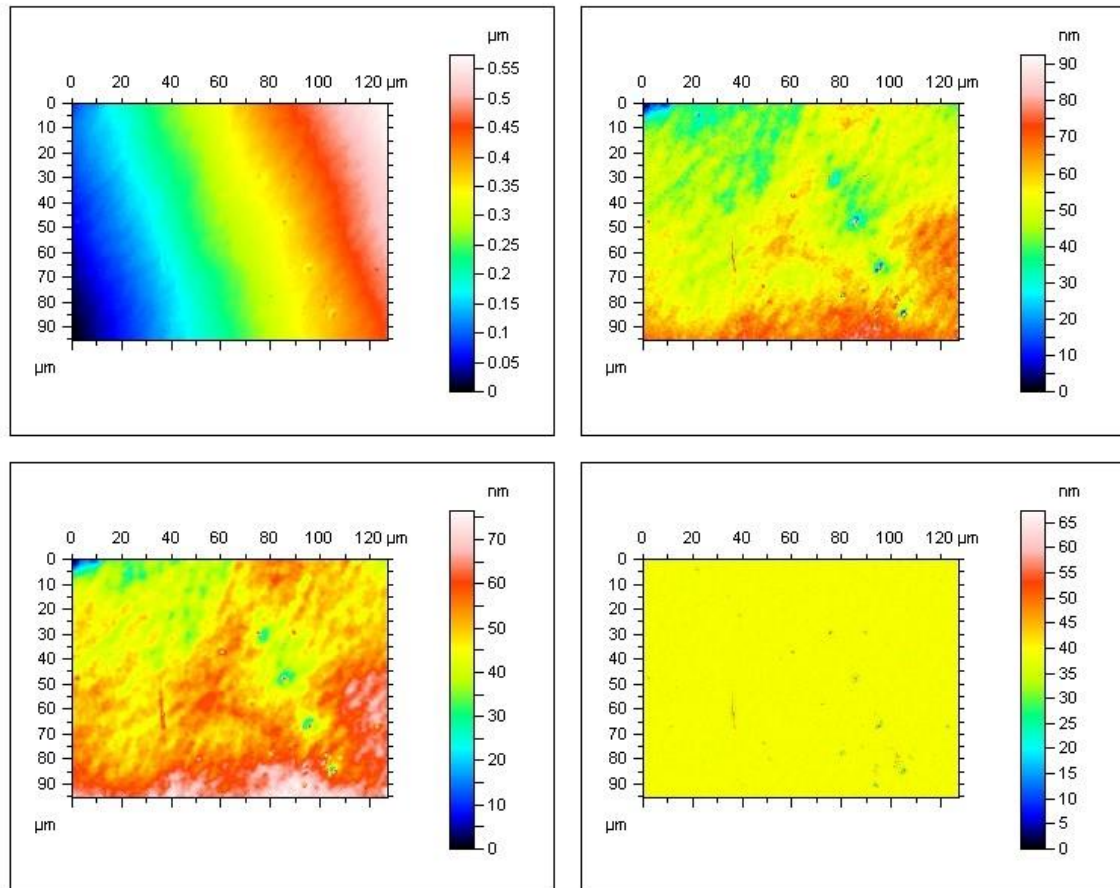
Figura 60 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.00643602	μm
Ssk	-55.3153	
Sku	5593.53	
Sp	0.264607	μm
Sv	0.717428	μm
Sz	0.982035	μm
Sa	0.000919992	μm

Fonte: Produção do próprio autor

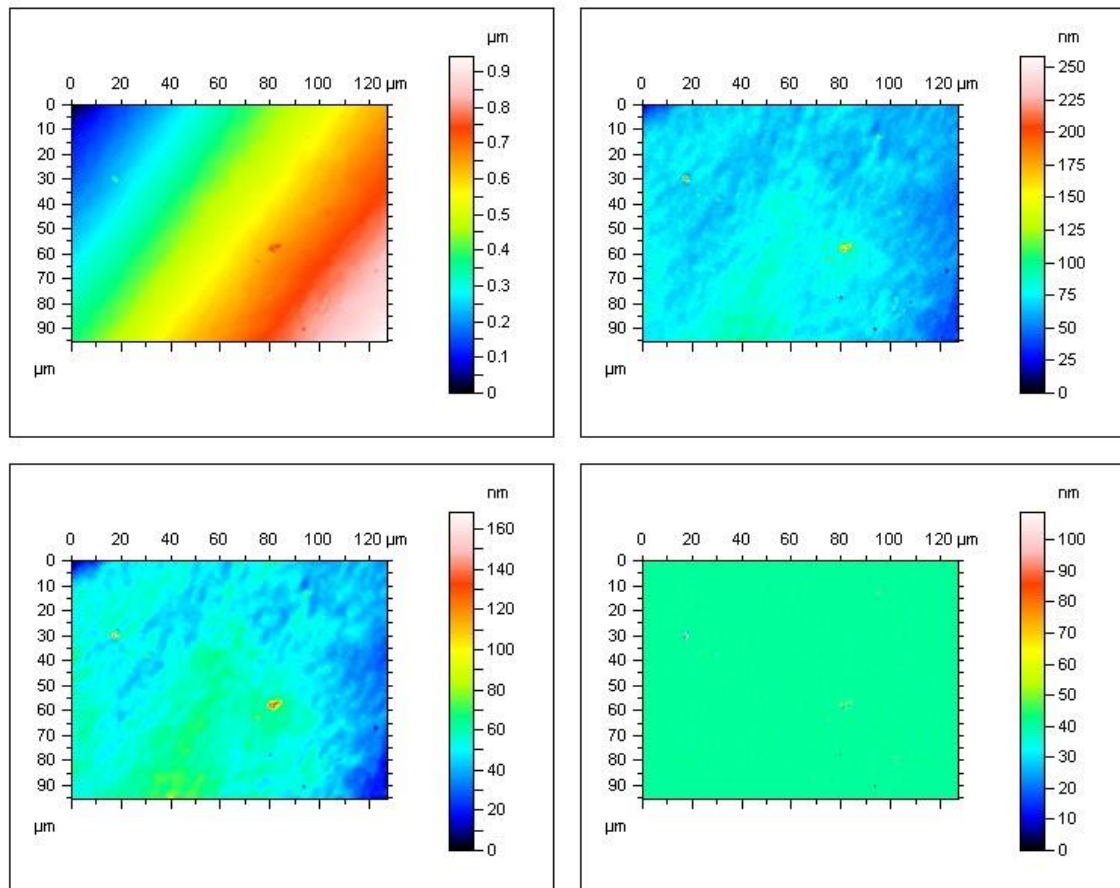
Figura 61 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.01572	nm
Ssk	-0.173629	
Sku	73.4697	
Sp	28.6226	nm
Sv	38.7058	nm
Sz	67.3284	nm
Sa	0.681177	nm

Fonte: Produção do próprio autor

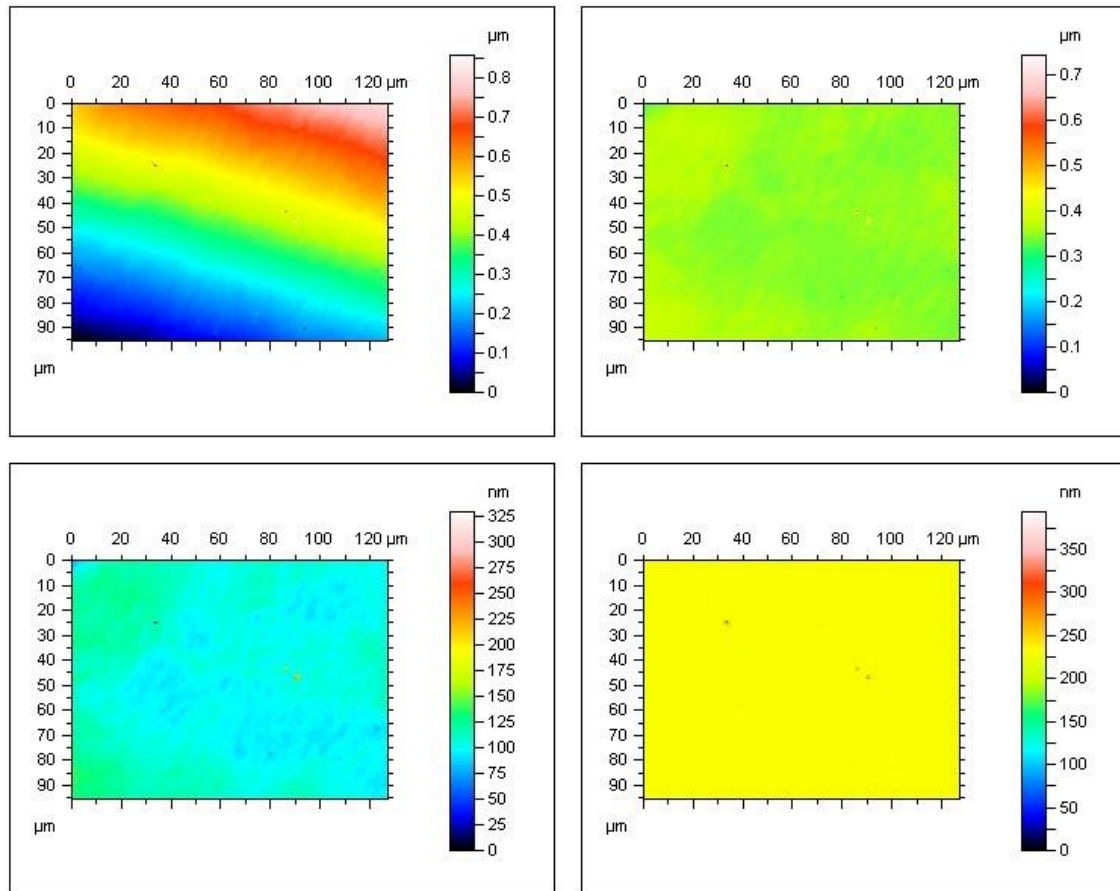
Figura 62 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.23614	nm
Ssk	7.44166	
Sku	339.453	
Sp	68.4392	nm
Sv	40.4097	nm
Sz	108.849	nm
Sa	0.736961	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 63 – Quinto ponto analisado

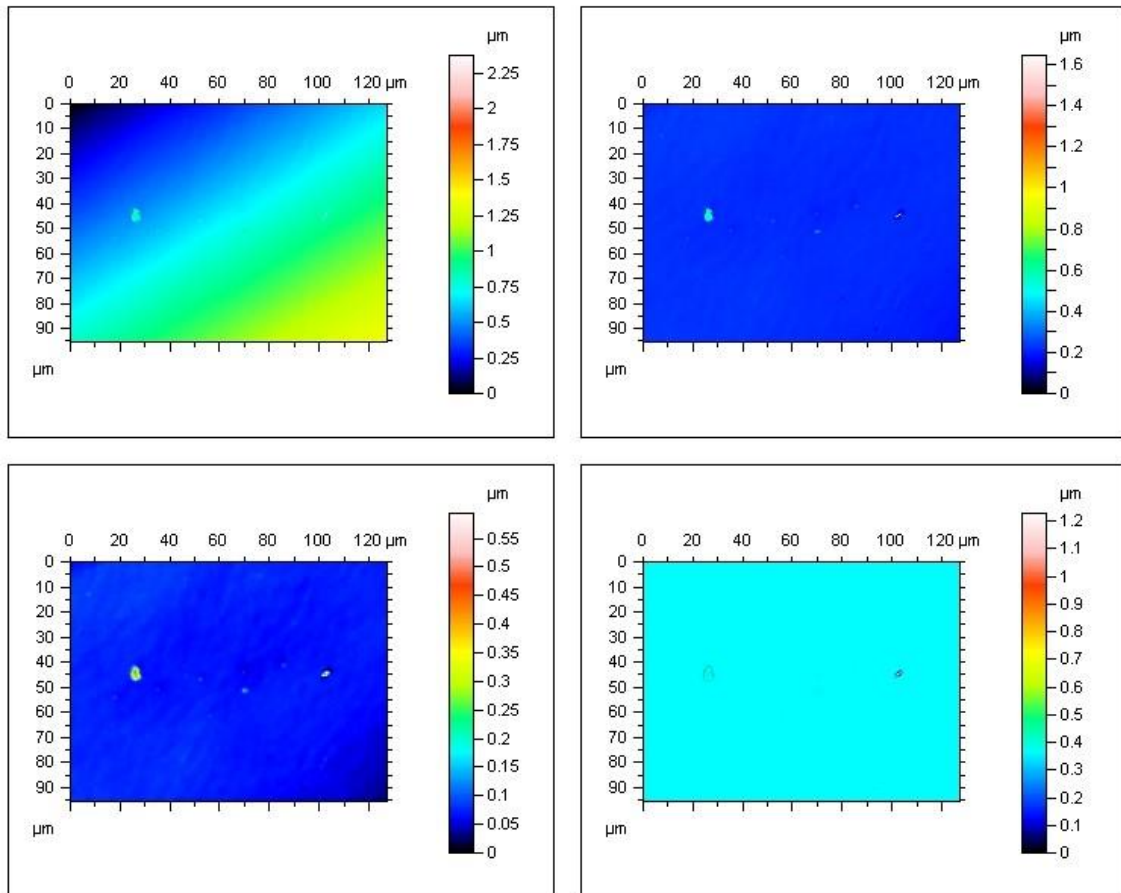


ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	2.15227	nm
Ssk	2.59278	
Sku	3256.53	
Sp	165.464	nm
Sv	228.520	nm
Sz	393.984	nm
Sa	0.781367	nm

Fonte: Produção do próprio autor

4.2.3.2 Amostra 2

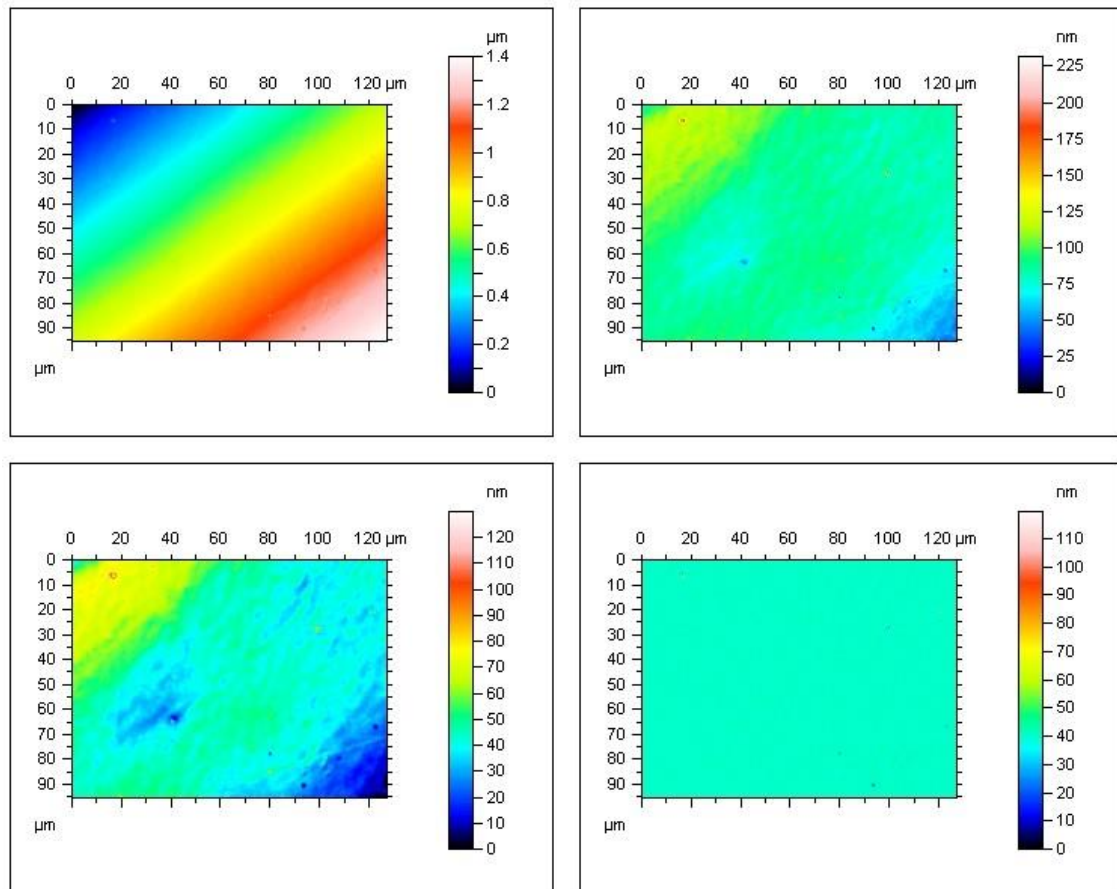
Figura 64 – Primeiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.00691378	μm
Ssk	57.1480	
Sku	6411.24	
Sp	0.868385	μm
Sv	0.359628	μm
Sz	1.22801	μm
Sa	0.000872402	μm

Fonte: Produção do próprio autor

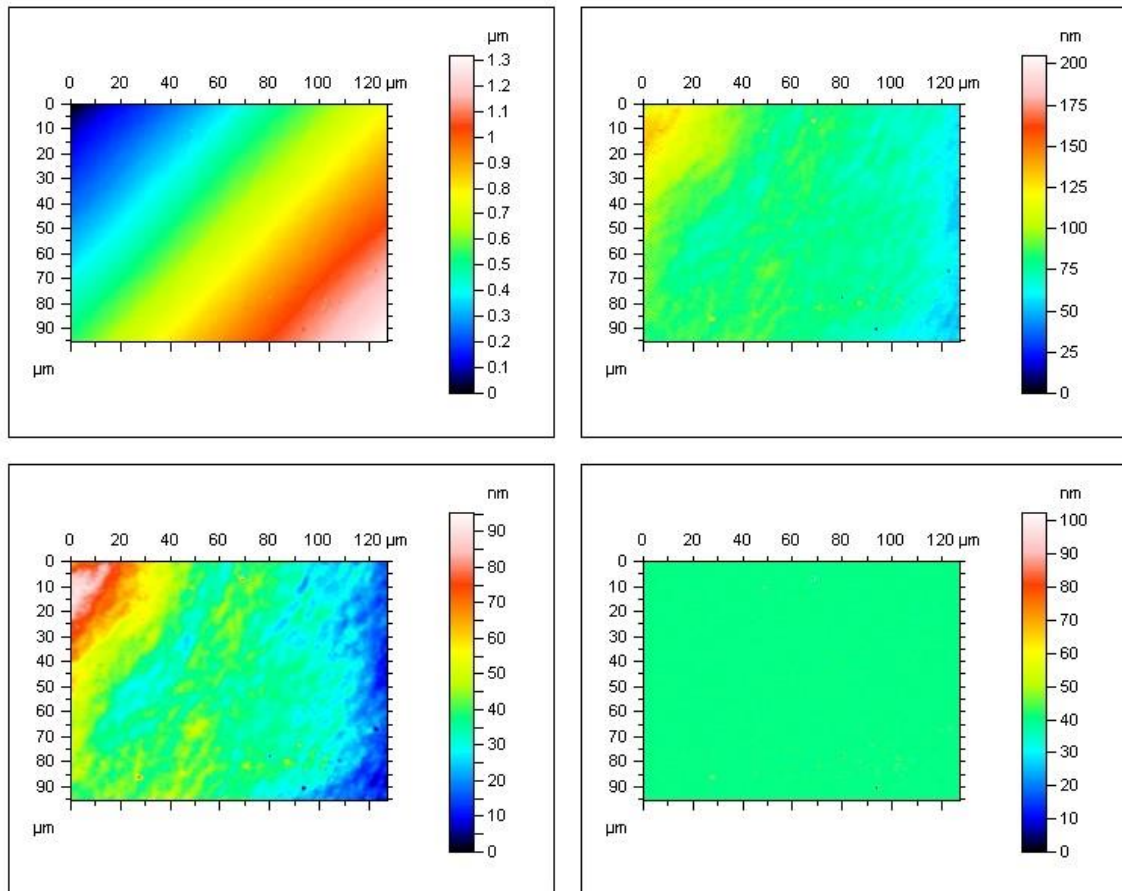
Figura 65 – Segundo ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	1.04869	nm
Ssk	6.47303	
Sku	435.711	
Sp	79.3516	nm
Sv	40.1188	nm
Sz	119.470	nm
Sa	0.664401	nm

Fonte: Produção do próprio autor

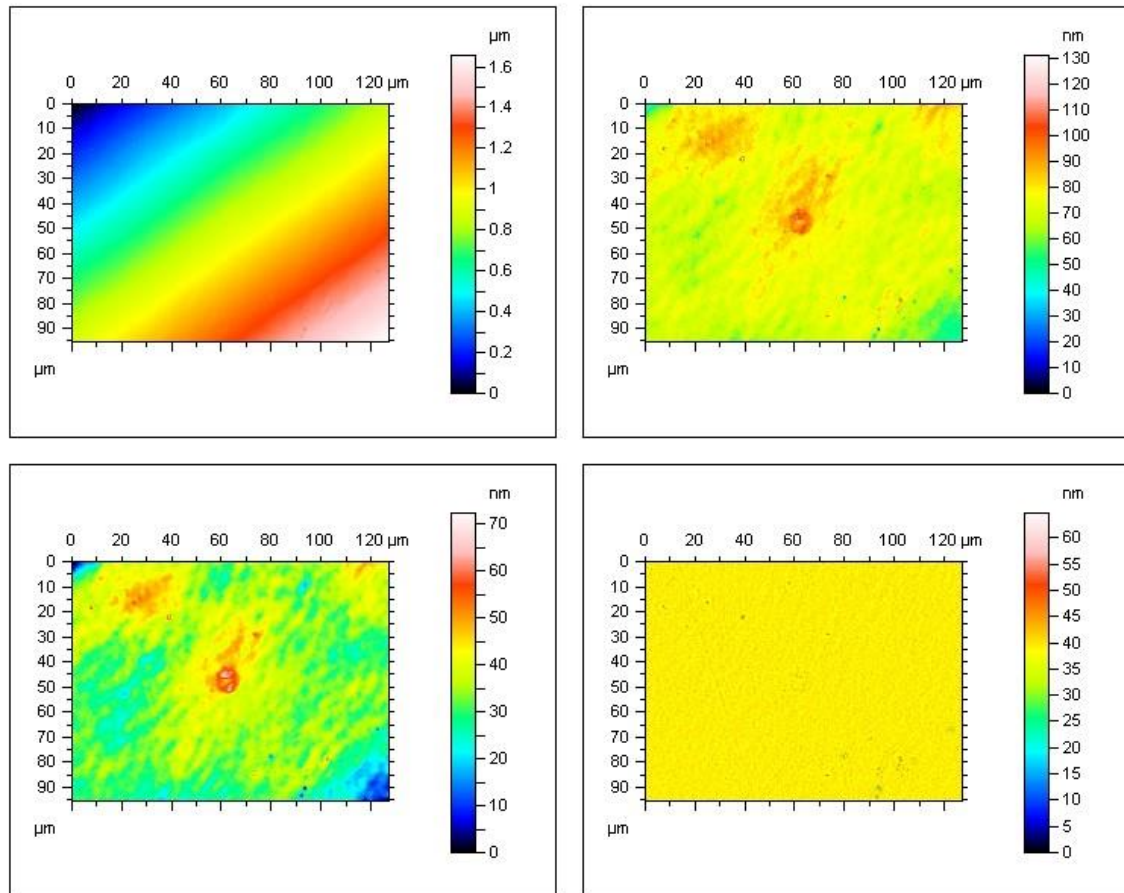
Figura 66 – Terceiro ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.983912	nm
Ssk	3.51488	
Sku	275.821	
Sp	62.6206	nm
Sv	39.8472	nm
Sz	102.468	nm
Sa	0.657287	nm

Fonte: Produção do próprio autor

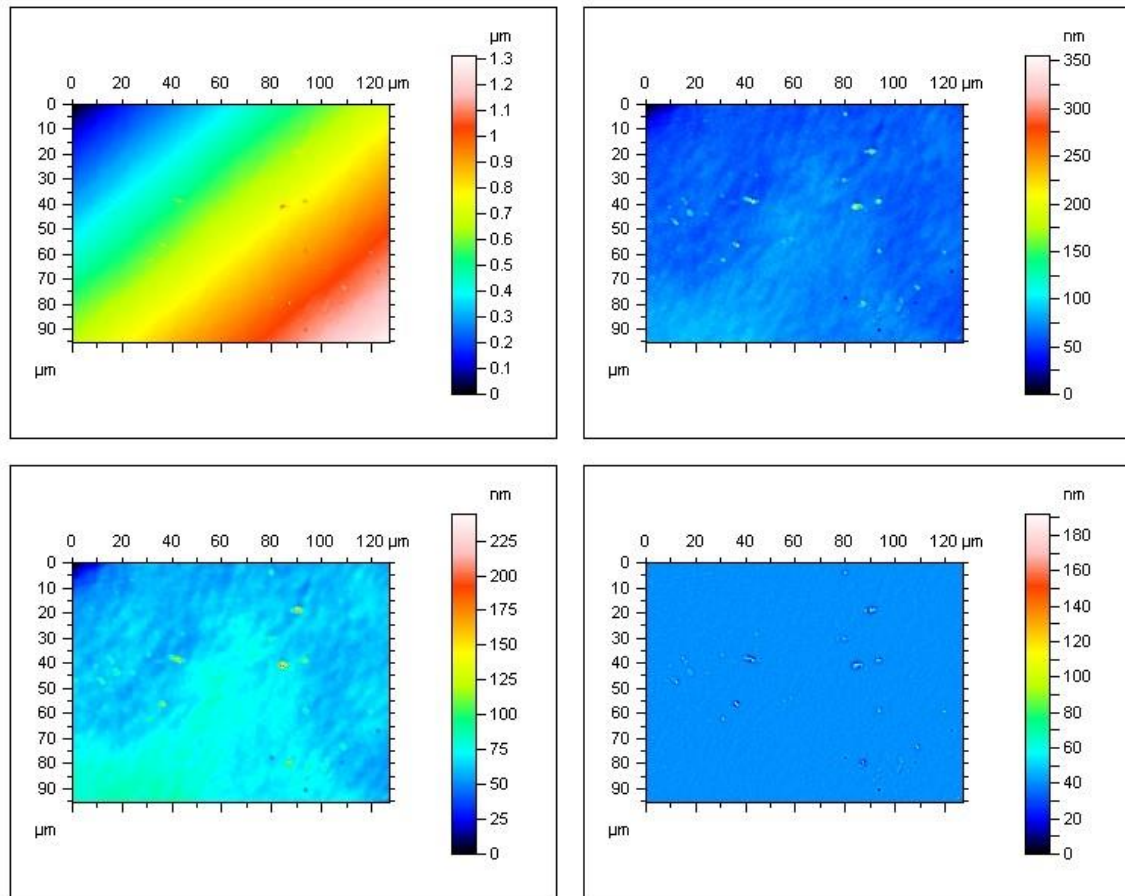
Figura 67 – Quarto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.938493	nm
Ssk	-0.762682	
Sku	67.0011	
Sp	25.5992	nm
Sv	39.1254	nm
Sz	64.7246	nm
Sa	0.670656	nm

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 68 – Quinto ponto analisado



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	2.03932	nm
Ssk	20.3926	
Sku	917.637	
Sp	151.960	nm
Sv	39.9962	nm
Sz	191.956	nm
Sa	0.781141	nm

Fonte: Produção do próprio autor

5 DISCUSSÕES

Ao observar as imagens ilustradas nos resultados e os valores de S_a (rugosidade por média aritmética) e S_q (rugosidade por desvio padrão), que foram reunidos nas tabelas 5 e 6 para melhor visualização, pôde-se notar que na maioria dos casos houve um aumento dos valores de rugosidade após a imersão na solução salina. Houve o surgimento de alguns pites de corrosão na superfície das amostras, porém, o tipo de corrosão predominante foi a por frestas. Esse fato ocorreu por conta da camada de tinta que foi utilizada para proteger as superfícies que não passaram pelo processo de metalografia, de modo que a aderência da tinta com o aço não foi a ideal e levou ao surgimento de pequenos volumes onde a solução salina surtiu efeitos intensos e bastante localizados.

O efeito corrosivo por frestas foi tão severo que, em apenas dois dias observou-se, a olho nu, perda de material nas reentrâncias formadas pela falta de aderência da tinta. Era esperado, conforme observado em experimentos anteriores, que os pites de corrosão se formassem a partir do segundo dia, o que na realidade ocorreu. Entretanto, a corrosão por frestas acabou por interferir na formação dos pites e, por conta da severidade dos efeitos oxidantes daquela corrosão, as amostras foram retiradas no início do terceiro dia para que as análises pudessem ser concluídas.

Quanto aos valores observados na tabela 7, observa-se que as amostras tratadas a 496°C tiveram menores alterações nos valores de rugosidade. As amostras tratadas a 579°C foram bastante afetadas pelo efeito corrosivo, o que foi observado pelos valores elevados encontrados na tabela. Já aquelas tratadas a 621°C tiveram uma variação considerável no S_q , porém, inferiores aos daquelas tratadas a 579°C .

Tabela 5 – Valores de Sa e Sq das amostras antes da imersão

	Sq (ponto 1)	Sq (ponto 2)	Sq (ponto 3)	Sq (ponto 4)	Sq (ponto 5)
Amostra 1	1,8426	0,0029	2,2613	1,3295	1,7409
Amostra 2	1,8332	0,0176	0,0052	2,6848	0,0051
Amostra 1	1,3083	0,9860	1,3818	1,3762	1,0936
Amostra 2	1,3604	1,6100	2,6989	1,0298	1,6355
Amostra 1	1,5289	1,4406	1,1567	1,1787	1,3147
Amostra 2	1,4052	1,2148	0,0082	0,0048	1,0093
	Sa (ponto 1)	Sa (ponto 2)	Sa (ponto 3)	Sa (ponto 4)	Sa (ponto 5)
Amostra 1	0,8307	0,0008	0,8230	0,8041	0,8482
Amostra 2	0,7892	0,0015	0,0010	0,8857	0,0009
Amostra 1	0,7065	0,6944	0,7894	0,7859	0,7539
Amostra 2	0,7256	0,7388	0,8147	0,6859	0,8177
Amostra 1	0,7390	0,7826	0,7289	0,7060	0,7943
Amostra 2	0,7138	0,6722	0,0010	0,0007	0,6370

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 6 – Valores de Sa e Sq das amostras depois da imersão

	Sq (ponto 1)	Sq (ponto 2)	Sq (ponto 3)	Sq (ponto 4)	Sq (ponto 5)
Amostra 1	1,4675	1,4068	1,3858	2,1355	1,3937
Amostra 2	1,8341	1,3437	1,4162	4,4653	0,0058
Amostra 1	4,6079	1,3719	2,2106	4,0093	1,9143
Amostra 2	1,5764	3,7007	1,7728	0,0066	1,4905
Amostra 1	1,0473	0,0064	1,0157	1,2361	2,1522
Amostra 2	0,0069	1,0486	0,9839	0,9384	2,0393
	Sa (ponto 1)	Sa (ponto 2)	Sa (ponto 3)	Sa (ponto 4)	Sa (ponto 5)
Amostra 1	0,9441	0,9645	0,8720	1,1557	0,7363
Amostra 2	0,9383	0,8418	0,8195	2,0507	0,0011
Amostra 1	2,4805	0,8013	1,2410	1,3944	1,2839
Amostra 2	0,7647	1,4748	0,8106	0,0020	0,8341
Amostra 1	0,6909	0,0009	0,6812	0,7369	0,7813
Amostra 2	0,0009	0,6644	0,6572	0,6706	0,7811

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 7 –Variação dos valores de Sa e Sq para cada amostra

			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Sq	496°C	Amostra 1	20,35710409	48410,34483	38,7166674	60,62429485	19,94370728
		Amostra 2	0,04909448	7534,659091	27134,61538	66,31778903	13,7254902
	579°C	Amostra 1	252,2051517	39,13793103	59,97973658	191,3312019	75,04572056
		Amostra 2	15,87768303	129,8571429	34,31397977	99,35909885	8,865790278
	621°C	Amostra 1	31,49977108	99,55574066	12,18985044	4,869771782	63,70274587
		Amostra 2	99,5089667	13,68126441	11898,78049	19450	102,0509264
Sa	496°C	Amostra 1	13,65113759	120462,5	5,953827461	43,72590474	13,19264324
		Amostra 2	18,89254942	56020	81850	131,5343796	22,22222222
	579°C	Amostra 1	251,0969568	15,39458525	57,20800608	77,42715358	70,30110094
		Amostra 2	5,388643881	99,62100704	0,503252731	99,70841231	2,005625535
	621°C	Amostra 1	6,50879567	99,88499872	6,544107559	4,376770538	1,636661211
		Amostra 2	99,87391426	116,0368938	65620	95700	22,62166405

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 8 – Condições ambientais e tempo do experimento

Dia	Hora	Temperatura	Umidade
31/10/2016	15h25min	28°C	50%
01/11/2016	15h00min	25°C	35%
02/11/2016	17h30min	26°C	37%
As amostras permaneceram imersas por 50h e 5min			

Fonte: Produção do próprio autor

6 CONCLUSÕES

Após o experimento, pôde-se notar que houve um aumento substancial dos valores de rugosidade após a imersão em solução salina. Isso ocorreu pelo fato de as superfícies das amostras terem sido atacadas pelo meio salino agressivo que fez surgir os pites e promoveu a corrosão por frestas nos vãos formados das superfícies recobertas das amostras. Esses vãos surgiram por conta de uma baixa aderência da tinta com a amostra.

Quanto a influência das temperaturas de tratamento no grau de corrosão entre as amostras, de modo que o aço 15-5 PH sofreu maior efeitos oxidantes (maior quantidade de pites na superfície e maior severidade na corrosão por frestas) quando submetido a temperatura de 579°C do que quando submetido a tratamento de recozimento a 621°C, e os menores efeitos foram observados nas amostras tratadas a temperatura de 496°C.

REFERÊNCIAS

- AK STEEL. **AK Steel 15-5PH stainless steel data sheet**. 2007. Disponível em: <http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/precipitation/15-5_ph_data_sheet.pdf> Acesso em: 01 jul. 2016.
- BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION. **Valores de PREM para diversos aços**. Disponível em: <<http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=111>> Acesso em: 29 out. 2016.
- CAPELATO, C. M. **Fadiga axial do aço inoxidável 15-5 PH tratado pela implantação iônica por imersão em plasma**. 2014. 49f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia de materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.
- CASTELETTI, L. C.; MARTINS, M. **Aços inoxidáveis duplex e super duplex: obtenção e caracterização**. São Paulo. Revista Fundição e serviços. 2007.
- CHAVES, S. J. **Estudo eletroquímico da influência da energia de soldagem na resistência à corrosão de soldas do aço inoxidável superduplex UNS S32760**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- FERNANDES, J. C. **Desenvolvimento de um dispositivo tipo carga constante para avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão em aço inoxidável austenítico**. 2010. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010
- FINE, M.E. **Precipitation Hardening: the strenthening of materials**. New York: Reinhold P. Corp., 1964. 250p.
- MARTINS, M. **Caracterização microestrutural-mecânica e resistência à corrosão do aço inoxidável super duplex ASTM A890 / A890M Grau 6^a**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- MECANOCHEMIE. **Tipos de corrosão e imagens**. Disponível em: <<http://www.mecanochemie.com.br/servicos/analise-de-problemas-de-corrosao/corrosao-por-frestas/>> Acesso em: 29 out. 2016
- MENGES, Georg; MICHAELI, Walter; MOHREN, Paul. **How to make injection molds**. 3. ed. Munich: Hanser, 2000.
- MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. São Paulo: Senai-Acessita, 2001. (Coleção Tecnologia da soldagem, v. 1).
- MÜRI, P. **Uma breve revisão dos aços martensíticos e supermartensíticos utilizados na indústria do petróleo**. Trabalho de Conclusão de Curso. 2009. (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

NÚCLEO INOX. **Coletânea de informações técnicas: aço inoxidável**. Disponível em: <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/A%E7o%20Inoxid%E1vel_No%E7%F5es%20b%E1licas.pdf>. Acesso em: 12 maio 2016.

OLIVEIRA, A. R. **Corrosão e Tratamento de Superfície**. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2012. (apostila de apoio)

PECKNER, D. et al. **Wrought precipitation-hardenable stainless steel: handbook of Staniless Steel**. Local: Ohio. Mc Graw-Hill Book Company, 1977.

SÁ, J. S. **Estudo de resistência a corrosão e fragilização por hidrogênio em aço 9% Ni**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SENATORE, M. **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis duplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L 2006**. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000100027 . Acesso em: 12 maio 2016

SILVA, A. G. S. G. **Estudo do comportamento eletroquímico do nióbio sob carregamentos e descarregamento de hidrogênio**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007

VILLARES METALS. **Aços inoxidáveis Villares Metals**. 2016. Disponível em:<<http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis/Austeniticos>>. Acesso em: 05 jun. 2016.

VITORIA QUIMICA. **Imagens com os tipos de corrosão**. Disponível em: <<http://vitoriaquimica.com.br/produtos/>>. Acesso em: 12 jun. 2016.

WHITE, K.L. Precipitation-hardening stainless steels. **Machine Design**, Cleveland, v.41, n.2, p. 142-, 1969.