

PAULO LOURENÇO MONTEIRO JUNIOR

**DURABILIDADE E TRANSFERÊNCIA DE TEXTURA SUPERFICIAL
VIA MECT NA LAMINAÇÃO A FRIO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2024

PAULO LOURENÇO MONTEIRO JUNIOR

**DURABILIDADE E TRANSFERÊNCIA DE TEXTURA SUPERFICIAL
VIA MECT NA LAMINAÇÃO A FRIO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientadora: Prof^a. PhD Henara Lillian Costa Murray

Coorientador: Dr. Eng. Wilian da Silva Labiapari

Uberlândia – MG

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M775 Monteiro Júnior, Paulo Lourenço, 1992-
2024 DURABILIDADE E TRANSFERÊNCIA DE TEXTURA SUPERFICIAL
VIA MECT NA LAMINAÇÃO A FRIO [recurso eletrônico] /
Paulo Lourenço Monteiro Júnior. - 2024.

Orientador: Henara Lillian Costa Murray.

Coorientador: Wilian Da Silva Labiapari.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.197>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Murray, Henara Lillian
Costa, 1969-, (Orient.). II. Labiapari, Wilian Da Silva,
1970-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 375, PPGEM				
Data:	29/02/2024	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	13:00
Matrícula do Discente:	11913EMC012				
Nome do Discente:	Paulo Lourenço Monteiro Junior				
Título do Trabalho:	Durabilidade e Transferência de Textura Superficial via MECT na Laminação a Frio				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Tribologia e Materiais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Comportamento Tribológico de Superfícies Texturizadas				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Giuseppe Pintaude - UTFPR; Cristiano Jose Scheuer - UFSM; Wilian da Silva Labiapari - Aperam; Arthur Alves Fiocchi - UFU; Washington Martins da Silva Junior - UFU; e Henara Lillian Costa Murray - UFU, orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Henara Lillian Costa Murray, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/02/2024, às 13:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wilian da Silva Labiapari, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 13:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano José Scheuer, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Giuseppe Pintaude, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **HENARA LILLIAN COSTA MURRAY, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Alves Fiocchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/02/2024, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5182060** e o código CRC **4A5DBD81**.

À minha esposa Flaviane e meu filho Théo.

Agradecimentos

Ao meu Senhor Jesus Cristo que me sustentou ao longo de toda essa jornada.

À minha amada esposa Flaviane pela amizade, companheirismo e fidelidade.

Ao meu amado filho Théo por ressignificar o propósito da minha vida.

À minha avó Maria por todo amor e cuidado.

Aos meus pais pelos sacrifícios realizados ao longo da minha criação.

Ao professor Washington, sem o qual esse trabalho não aconteceria, pela amizade e conversas de laboratório.

À professora Henara pela cooperação, orientação e ensinamentos.

Ao Wilian e Aperam pelo fornecimento de matérias primas e demais contribuições.

Aos amigos do Laboratório de Tribologia e Materiais.

À CAPES pelo apoio financeiro.

MONTEIRO JR, P. L. DURABILIDADE E TRANSFERÊNCIA DE TEXTURA SUPERFICIAL VIA MECT NA LAMINAÇÃO A FRIO 2024. 145f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

O presente estudo analisou a durabilidade e a transferência de texturas superficiais de cilindros utilizados no passe de acabamento da laminação a frio. Texturas determinísticas foram fabricadas utilizando o método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT). No entanto, em ensaios de laminação um desgaste perceptível da superfície do cilindro somente seria observado após tempos de laminação excessivamente longos, o que tornaria os ensaios em escala real inviáveis. Dessa forma, a avaliação da durabilidade das texturas foi realizada em laboratório por meio de ensaios tribológicos de deslizamento alternativo com amostras extraídas de cilindros de laminação. Além disso, nesses ensaios, como potencial substituto para o tradicional e cancerígeno revestimento de cromo duro, foi avaliada a capacidade do revestimento de níquel químico (NiP) de proteger as texturas. A análise de transferência de textura dos cilindros às chapas foi realizada por meio de ensaios de laminação em escala piloto. Para tanto, foi necessário projetar, construir e validar câmaras para texturizar tanto as amostras dos ensaios tribológicos quanto os cilindros para os ensaios de laminação. Os resultados indicaram que a dissolução anódica envolvida na texturização da superfície do cilindro ocorre preferencialmente em torno dos carbonetos primários. Com relação à durabilidade, o coeficiente de atrito dos ensaios das superfícies texturizadas e revestidas com níquel químico (TNiP) foi menor que o correspondente aos ensaios das superfícies somente texturizadas (T) e texturizadas e revestida com cromo duro (TCr). Além disso, os revestimentos de cromo duro e níquel químico atuaram de maneira a retardar o desgaste dos picos mais altos de superfícies texturizadas pelo método MECT. Por fim, os ensaios de laminação mostraram que a superfície do cilindro texturizada com bolsos gerou texturas na forma de pilares na superfície da chapa. Ao que parece, o mecanismo pelo qual os pilares foram formados trata-se predominantemente de extrusão reversa.

Palavras Chave: Laminação a frio; Texturização superficial; Passe de acabamento; Transferência de textura; NiP; Cromo duro.

MONTEIRO JR, P. L. MECT SURFACE TEXTURE TRANSFER AND DURABILITY IN COLD ROLLING. 2024, 145p. Doctorate Thesis. Universidade Federal de Uberlândia.

Abstract

The present study analyzed the durability and topography transfer of the work roll surface textures during skin pass rolling. Deterministic surface textures were manufactured using the maskless electrochemical texturing (MECT) technique. However, in the skin pass, a noticeable wear on the work roll surface would only be observed after very long periods which would make the tests unfeasible. Thus, the evaluation of the durability of the textures was carried out through tribological reciprocating sliding tests with samples extracted from cold rolling work rolls. Furthermore, the ability of electroless NiP coating to protect textures was evaluated in order to verify its potential to replace the carcinogenic hard chrome coating. The analysis of the texture transfer from the work rolls to the sheets were conducted through pilot scale cold rolling tests. Finally, it was necessary to design, build and validate chambers to texture both the samples for the tribological tests and the work rolls for the rolling tests. The results indicated that the anodic dissolution involved in the texturing of the work roll surface occurred preferentially around the primary carbides. Regarding durability, the friction coefficient in tests on the textured surfaces coated with electroless NiP (TNiP) was lower than that corresponding to surfaces only textured (T) and textured and coated with hard chrome (TCr). Furthermore, the hard chrome and electroless NiP coatings acted to delay the wear of the highest peaks of surfaces textured by MECT method. Finally, rolling tests showed that the work roll surface textured with pockets generated a pillar-textured surface on the sheet. It appears that the mechanism by which the pillars were formed is predominantly reverse extrusion.

Keywords: Cold rolling; Surface texturing; Skin pass; Texture transfer; NiP; Hard Chrome.

LISTA DE SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

BSE: elétrons retroespalhados.

Cr: cromo duro.

EDT: texturização por descargas elétricas.

EBT: texturização por feixe de elétrons.

El: espessura inicial da chapa (antes da laminação).

EF: espessura final da chapa (após a laminação).

EDS: espectroscopia de energia dispersiva.

ES: elétrons secundários.

ε_N : alongamento.

Gap: espaço entre a peça e a ferramenta no processo MECT.

LBT: texturização por feixe de laser.

MECT: texturização eletroquímica sem mascaramento.

MEV: microscópio eletrônico de varredura.

MT : método topocrom.

NiP: níquel químico.

PCE: pressão de contato efetiva.

Rq: rugosidade quadrática média.

Rk: profundidade de Rugosidade do núcleo.

Rpk: altura reduzida do pico.

Rvk: altura reduzida do vale.

Rq: rugosidade quadrática média.

Rpc: contagem de picos.

Rdq: Inclinação quadrática média.

SBT: texturização por jateamento de granalha.

Sq: rugosidade quadrática média superficial.

Sdq: inclinação média das irregularidades.

Spd: densidade de picos.

Sbi: índice de apoio superficial.

Svi: índice de retenção de óleo nos vales.

Spk: altura reduzida do pico (superfície).

Sku: assimetria da superfície.

Ssk: curtose da superfície.

T: superfície texturizada.

SUMÁRIO

CAPITULO I - Introdução	1
1.1 Objetivos gerais	3
1.2 Objetivos específicos	3
CAPITULO II - Revisão da literatura.....	5
2.1 Contextualização	5
2.2 Topografia no passe de acabamento da laminação	7
2.2.1 Métodos de texturização de cilindros	7
2.2.2 Controle e transferência de topografia	12
2.2.3 Considerações sobre cilindros texturizados e revestidos.....	20
CAPITULO III - Projeto, Construção e Validação de Câmaras de Texturização .	22
3.1 Câmara de texturização de superfícies planas	22
3.1.1 Resultados de validação da câmara de texturização de amostras planas.....	29
3.2 Câmara de Texturização de Superfícies Cilíndricas	34
3.2.1 Resultados dos testes da câmara de texturização de superfícies cilíndricas.....	43
3.2.2 Observações finais.....	45
CAPITULO IV - Preparação de Amostras para Avaliação da Durabilidade das Texturas	46
4.1 Introdução	46
4.2 Procedimentos Experimentais	47
4.2.1 Obtenção das amostras de cilindros de laminação.....	47
4.2.2 Texturização e Revestimento.....	49
4.2.3 Equipamentos	50

4.3	Resultados e Discussões	51
4.3.1	<i>Caracterização do material do cilindro</i>	<i>51</i>
4.3.2	<i>Texturização das amostras do cilindro de laminação.....</i>	<i>55</i>
4.3.3	<i>Revestimento das amostras do cilindro de laminação</i>	<i>58</i>
4.3.4	<i>Análise da morfologia superficial das amostras</i>	<i>63</i>
4.4	Observações Finais	71
CAPITULO V - Ensaaios Tribológicos para Avaliação da Durabilidade das Texturas		72
5.1	Introdução	72
5.2	Procedimentos Experimentais	73
5.2.1	<i>Ensaaios de deslizamento</i>	<i>73</i>
5.2.2	<i>Equipamentos</i>	<i>77</i>
5.3	Resultados e Discussões	77
5.3.1	<i>Ensaaios de deslizamento</i>	<i>77</i>
5.4	Observações Finais	122
CAPITULO VI - Transferência de Textura Superficial na Laminação a Frio		123
6.1	Introdução	123
6.2	Procedimento Experimental	123
6.3	Resultados e Discussões	127
6.4	Sugestões para Aperfeiçoamento	134
CAPÍTULO VII - Conclusões		136
CAPÍTULO VIII - Sugestões para Trabalhos Futuros		138
CAPITULO IX - Referências		139
CAPÍTULO X - Apêndices		144

CAPITULO I

Introdução

A laminação, na qual um grande volume de material pode ser trabalhado, é um dos mais importantes métodos de processamento de aço no mundo (GONÇALVES; DE MELLO; COSTA, 2019; SPUZIC *et al.*, 1994). RAY (2016) ressalta que 95 % de metais ferrosos e não ferrosos e suas ligas são laminados em alguma etapa do processo de produção para que possam alcançar a forma de produtos utilizáveis; exemplos destes produtos são chapas, perfis estruturais, tubos e barras. O processo de laminação invariavelmente envolve contatos carregados sob movimento relativo entre cilindro de laminação e produto laminado, portanto atrito e desgaste são inerentes à laminação mecânica. Nesse contexto, análises tribológicas são fundamentais, pois podem contribuir, entre outros fatores, para uma melhor eficiência energética do processo.

Segundo HOLMBERG e ERDEMIR (2017), aproximadamente 23 % (119 EJ) da energia total consumida no mundo tem origem em contatos tribológicos. Dessa quantidade de energia, 20 % (103 EJ) é utilizada para superar o atrito e 3 % (16 EJ) para remanufaturar componentes para recomposição em decorrência de desgaste e falhas associadas. Esses dados retratam a relevância das análises tribológicas para o mundo, a qual se estende a processos de laminação.

De acordo com WU *et al.* (2019), o acabamento superficial de materiais logo após o passe de acabamento da laminação a frio (*skin pass*) está intimamente relacionado com a topografia superficial dos cilindros utilizados no processo. Embora no passe de acabamento possa ocorrer no arco de contato uma considerável região plana central, onde teoricamente não há deslizamento relativo entre o cilindro e a chapa (JING-NA *et al.*, 2009), os fenômenos tribológicos particulares que ocorrem nesse processo não são negligenciáveis, sendo então o contato suscetível a desgaste. Portanto, é importante preservar a topografia do cilindro de laminação.

No passe de acabamento da laminação, em que as reduções são de aproximadamente 1 %, as condições de contato são diferentes daquelas encontradas na laminação a frio convencional, a qual envolve altas reduções. Além disso, os cilindros podem ser texturizados intencionalmente para que determinadas características topográficas sejam alcançadas na chapa laminada (KIJIMA, 2019). Espera-se que com a presença de texturas adequadas a chapa laminada adquira um melhor desempenho tribológico em posteriores processos de conformação, como a estampagem (HILGENBERG; STEINHOFF, 2015).

Os métodos de texturização geralmente utilizados na texturização de cilindros empregados no passe de acabamento são os seguintes: método topocrom (MT); texturização por jateamento de granalha (SBT); texturização por descargas elétricas (EDT); texturização por feixe de elétrons (EBT) e texturização por feixe de laser (LBT) (BELOV *et al.*, 2014; HILGENBERG; STEINHOFF, 2015; PAWELSKI *et al.*, 1994).

Alternativamente, o método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT), que tem como base os princípios do processo de usinagem eletroquímica, foi desenvolvido por COSTA e HUTCHINGS (2009). Esse método tem como característica a produção de texturas determinísticas em superfícies metálicas. SILVA (2016) aplicou o método MECT na texturização de cilindros de motor de combustão interna, mas os ensaios tribológicos foram realizados em amostras planas. RODRIGUES *et al.* (2020) empregaram o mesmo método para texturizar blocos que foram ensaiados em um contato lubrificado do tipo bloco-sobre-anel. FERRI (2019) desenvolveu um dispositivo para texturizar superfícies cilíndricas pelo método MECT, após a texturização das superfícies cilíndricas os ensaios tribológicos foram realizados em um esclerômetro pendular que foi adaptado para receber uma esfera como contracorpo. Esses estudos forneceram resultados que parecem indicar que o método MECT pode ser uma boa alternativa para aplicação em escala industrial.

Sabe-se que o método de texturização influencia na razão de transferência de textura do cilindro para a chapa laminada (PAWELSKI *et al.*, 1994) e, até o momento, há poucos ou nenhum trabalho disponível na literatura que aborde especificamente o método MECT como alternativa para a texturização de cilindros de laminação e que analise a influência deste método na transferência de textura para a chapa.

Em função das elevadas pressões de contato envolvidas em processos de laminação, as texturas tendem a se desgastar facilmente (DE MELLO; GONÇALVES JR; COSTA, 2013). Cilindros texturizados podem ser revestidos com o objetivo de

preservar as texturas superficiais fabricadas; nesse contexto o revestimento de níquel químico (NiP) mostrou resultados promissores em relação ao tradicional cromo duro (Cr) (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).

O presente estudo aborda, portanto, a utilização combinada de texturas determinísticas, fabricadas via MECT, e revestimentos, de cromo duro e níquel químico, em cilindros utilizados no passe de acabamento da laminação a frio. O efeito dos revestimentos na durabilidade das texturas foi avaliado por meio de ensaios tribológicos em escala de laboratório. A transferência das texturas às chapas foi avaliada utilizando um laminador em escala piloto.

Diante disso, esse trabalho responde às seguintes questões de pesquisa:

- 1) É possível utilizar o método MECT para texturizar cilindros empregados no passe de acabamento da laminação a frio?
- 2) Como avaliar a durabilidade dessas texturas?
- 3) O revestimento de níquel químico (NiP) é adequado para proteger essas texturas?
- 4) Como ocorre a transferência dessas texturas para a chapa laminada?

1.1 Objetivos gerais

O tema principal desse trabalho trata da durabilidade de texturas superficiais em cilindros de laminação a frio bem como da transferência dessas texturas para chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 430. Objetiva-se o desenvolvimento de uma combinação de modificações superficiais (texturização e revestimento) que aumente a vida desses cilindros e, conseqüentemente, permita um melhor controle sobre a transferência de textura.

1.2 Objetivos específicos

Dessa forma, este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- i. Desenvolver metodologia para a texturização de amostras e de cilindros de laminação;
- ii. Selecionar e depositar revestimentos com comportamentos tribológicos adequado e capazes de aumentar a vida das texturas produzidas;
- iii. Avaliar a durabilidade das texturas fabricadas nas amostras por meio de ensaios tribológicos;
- iv. Avaliar a transferência das texturas dos cilindros de laminação às chapas em ensaios piloto de laminação a frio;

CAPITULO II

Revisão da literatura

2.1 Contextualização

A laminação de metais ocorre passando-se uma parte desse material entre dois cilindros, conforme ilustra a Figura 2.1. A redução na espessura ocorre devido a tensões compressivas que são impostas pelos cilindros sobre o material que está sendo laminado (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

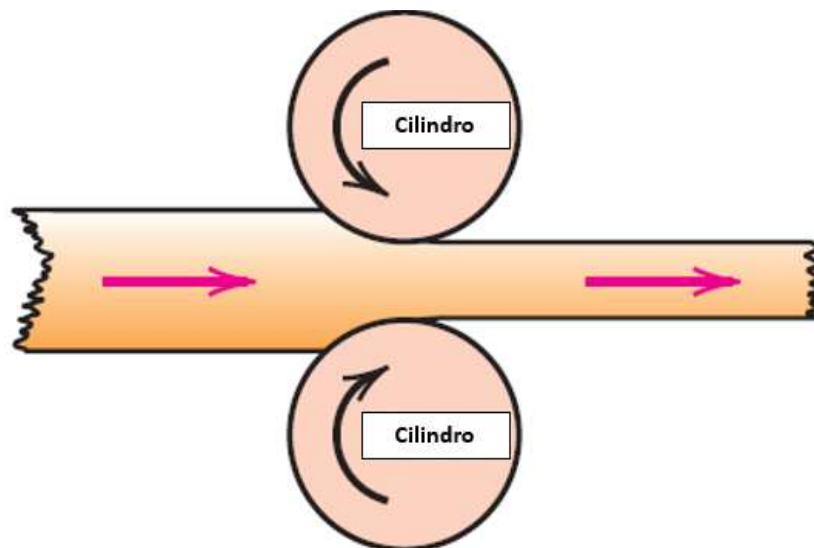


Figura 2.1 – Deformação no processo de laminação. Adaptado de CALLISTER e RETHWISCH (2018).

Quando ocorre abaixo da temperatura de recristalização do material ou à temperatura ambiente, a laminação é denominada a frio. Por outro lado, a laminação a quente ocorre em temperaturas acima da temperatura de recristalização do material (RAY, 2016). Os produtos laminados a frio podem alcançar um acabamento superficial adequado para determinadas finalidades, como a automotiva. Em relação à laminação

a quente, os laminados a frio possuem resistência mecânica aumentada e, ao mesmo tempo, boas tolerâncias dimensionais devido ao melhor controle de geometria (DIETER GEORGE, 1988).

As superfícies do cilindro e da chapa não são perfeitamente lisas. Dessa forma, o contato ocorre somente entre as asperezas mais proeminentes das superfícies; a área total de contato é chamada de área real de contato. O tamanho da área real de contato bem como a deformação das asperezas são fatores importantes para a análise do desempenho tribológico em processos de laminação (LENARD *et al.*, 2000). A Figura 2.2 ilustra o contato entre um cilindro e uma chapa em um processo de laminação lubrificado.



Figura 2.2 – Contato em um processo de laminação lubrificado. Adaptado de LENARD (2002).

Nos processos de laminação a frio de chapas, se os impactos nos cilindros forem negligenciados, a vida desses cilindros é influenciada principalmente pelo desgaste abrasivo nas suas superfícies, e também pelo desgaste adesivo na chapa conformada, que origina uma camada de transferência na superfície do cilindro. O desgaste abrasivo do cilindro pode alterar a sua rugosidade; isso pode afetar o atrito e a qualidade superficial da chapa conformada. A camada de transferência pode preencher os vales da superfície do cilindro, podendo reduzir sua rugosidade. No caso de camadas mais espessas, a superfície do cilindro pode se tornar mais áspera; novamente, o atrito e a qualidade superficial da chapa laminada podem ser modificados (OULD *et al.*, 2013).

O passe de acabamento consiste em uma pequena redução, em torno de 0,5 % a 1,5 %, geralmente em um único passe a frio, da chapa laminada-recozida por um laminador, na maioria das vezes, do tipo duo, com cilindros relativamente grandes. Esse procedimento tem como funções produzir superfícies lisas e brilhantes, obter chapas com espessuras uniformes, conferir um certo grau de endurecimento superficial e evitar a ocorrência das bandas de Luders ou linhas de distensão, o que é importante tendo em vista que o material laminado pode seguir para outros

processos, como a estampagem. A redução pode ocorrer também no intervalo de 1,5 % a 4 %, quando o processo é também conhecido como *temper rolling* (RAY, 2016).

Considerando o importante papel da topografia superficial do cilindro no comportamento tribológico durante a laminação, é prática comum o controle dessa topografia através de processos de texturização. Essa textura superficial é parcialmente transferida para a chapa durante a laminação. Essa texturização da chapa pode ajudar a controlar a retenção de lubrificante em uma posterior estampagem e, portanto, ajudar a reduzir o desgaste tanto na chapa quanto na matriz (HILGENBERG; STEINHOFF, 2015; OGARKOV; ZVYAGINA; ISMAGILOV, 2019; SIMAO *et al.*, 1996). Além disso, a textura transferida do cilindro à chapa no passe de acabamento tem importante papel no aspecto estético das chapas (GONÇALVES, DE MELLO; COSTA, 2021).

Os mecanismos de transferência de textura do cilindro para a chapa no passe de acabamento da laminação ainda não são bem compreendidos. Um fator que contribui para isso consiste no fato de o contato entre o cilindro e a chapa ocorrer entre as asperezas superficiais aleatoriamente distribuídas; além disso a chapa, desde a mordida até a saída, pode sofrer uma contínua evolução da sua topografia superficial. Por fim, a produção da chapa texturizada envolve vários processos, tais como a texturização dos cilindros, o desgaste desses cilindros durante a sua utilização e a transferência de texturas no passe de acabamento; a análise desses processos de forma individual e das suas interações é complexa (WENTINK *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2019).

2.2 Topografia no passe de acabamento da laminação

2.2.1 Métodos de texturização de cilindros

Os métodos de texturização mais comuns relacionados à texturização de cilindros de laminação empregados no passe de acabamento são os seguintes: método topocrom (MT); texturização por jateamento de granalha (*shot-blast texturing*, SBT); texturização por descargas elétricas (*electrical-discharge texturing*, EDT); texturização por feixe de elétrons (*electron-beam texturing*, EBT) e texturização por

feixe de laser (*laser-beam texturing*, LBT) (GORBUNOV; BELOV; BEGLETSOV, 2009; HILGENBERG; STEINHOFF, 2015).

O método topocrom (MT) é um dos métodos mais recentes dentre os citados anteriormente e consiste na eletrodeposição de cromo duro em formato de protuberâncias hemisféricas distribuídas aleatoriamente na superfície do cilindro. Dessa forma, quando a chapa é laminada, o processo imprime uma textura na superfície da mesma caracterizada por pequenas depressões (BENATI, 2003; KÖHLER; KWIATON; BRETSCHEIDER, 2016). Controlando parâmetros de deposição eletrolítica, a altura média e a distribuição por unidade de área (isto é, a amplitude e a frequência) dos hemisférios podem ser alteradas em uma variada faixa e consequentemente a rugosidade e a quantidade de picos (GORBUNOV; BELOV; BEGLETSOV, 2009)

Na texturização por jateamento de granalha (SB) ocorre o jateamento de granalhas, usualmente de metal, contra a superfície do cilindro para criar uma distribuição não organizada de crateras. Assim, o processo ocorre principalmente devido à deformação plástica aleatória, o que pode resultar em um acabamento de pintura não uniforme. Este é um dos processos menos controláveis no que tange ao acabamento superficial. Como a sua eficiência é dependente da dureza relativa entre a granalha e o cilindro, a texturização de cilindros muito duros, por exemplo, de ligas de cromo e molibdênio, pode ser limitada (MCGEOUGH; RASMUSSEN, 1992; SIMAO et al., 1996). Entre as principais vantagens do método SB estão a sua simplicidade e o baixo custo em relação aos outros métodos.

A texturização por descargas elétricas (EDT) tem como base os princípios da usinagem por eletroerosão (EDM) na qual o material é removido por uma descarga de energia elétrica ao longo de um pequeno espaço entre o eletrodo e a peça a ser usinada, que neste caso é o cilindro de laminação. Por meio da vaporização de uma pequena quantidade de metal cada centelha cria minúsculas crateras distribuídas aleatoriamente na superfície do cilindro. Dentre as principais vantagens do método EDT pode-se citar a ampla gama de possíveis valores de frequência de picos e relevo superficial uniforme (ASPINWALL *et al.*, 1992; BELOV *et al.*, 2014; BENATI, 2003; ELKOCA, 2008; MCGEOUGH; RASMUSSEN, 1992; SIMAO *et al.*, 1996)

O método de texturização por feixe de elétrons (EBT) basicamente utiliza um feixe de elétrons para criar pequenas depressões na superfície do cilindro. Uma parte do material é fundida e outra evaporada, sendo que a pressão de vapor contribui para

a formação de um anel de material ao redor das depressões. Na técnica EBT a distribuição de padrões de textura pode ser realizada de maneira organizada, isto é, estruturada periodicamente (texturas determinísticas). Há também a possibilidade de realizar o processo com sobreposição de depressões, neste caso a texturização é pseudodeterminística. Os controles de diversos parâmetros do processo permitem que sejam alcançadas uma variedade de parâmetros topográficos. Como o feixe pode ser controlado eletromagneticamente, o método pode ser usado para produzir padrões topográficos complexos. Entretanto, o equipamento normalmente exige mão de obra extremamente qualificada, o que nem sempre é viável (BENATI, 2003; GORBUNOV; BELOV; BEGLETISOV, 2009; SIMAO et al., 1996).

No método de texturização por feixe de laser (LBT) um feixe é direcionado para a superfície do cilindro para texturizá-la através da ablação de um pequeno volume de material. A topografia da superfície texturizada pode ser controlada com as convenientes manipulações de parâmetros do processo, por exemplo: energia e pulso do feixe de laser (GORBUNOV; BELOV; BEGLETISOV, 2009; SIMAO et al., 1996). Segundo YUAN *et al.* (2019), essa técnica não é prejudicial ao meio ambiente e possui alta precisão. Esse processo pode ser aplicado em diversos tipos de materiais. A complexidade do equipamento e o consumo de energia em lasers potentes devem ser levados em consideração na escolha deste método. Dessa forma, tratando-se de cilindros de laminação, esse método não tem sido amplamente adotado, embora ofereça uma significativa margem de possibilidade para controle. Semelhantemente ao método EBT, no método LBT a texturização pode ser realizada de forma determinística ou pseudodeterminística (GORBUNOV; BELOV; BEGLETISOV, 2009; SIMAO et al., 1996).

Segundo COSTA e HUTCHINGS (2015), de acordo com os correspondentes princípios físicos, os métodos de texturização podem ser divididos da seguinte maneira:

- i. Adição de material: a modificação de topografia é realizada por meio da adição de material à superfície desejada, ou seja, origina regiões de elevações na superfície; esse é o caso da tecnologia topocrom;
- ii. Remoção de material: neste caso, há a remoção de material da superfície dando origem a pequenas áreas de reentrâncias; nessa categoria estão os métodos EBT, LBT e EDT;

- iii. Movimentação de material: ocorre a redistribuição de material de algumas regiões da superfície para outras através de deformação plástica; nesse grupo está o método SBT;
- iv. Autoformação: a alteração da topografia superficial ocorre devido ao desgaste de certas regiões menos resistentes de forma que as regiões mais resistentes ficam projetadas acima das menos resistentes.

A escolha de um ou outro método de texturização vai depender de variáveis como a finalidade da chapa laminada no passe de acabamento, aspectos econômicos, características do método, entre outros.

Com relação à durabilidade da superfície texturizada do cilindro, há estudos que indicam que os métodos topocrom e LBT correspondem a uma durabilidade muito alta, quando comparados aos métodos EBT e EDT, que correspondem a uma durabilidade intermediária, por outro lado, o método SBT corresponde a uma durabilidade muito baixa (BELOV et al., 2014; GORBUNOV; BELOV; BEGLETISOV, 2009).

Mas há controvérsias, por exemplo, HILGENBERG e STEINHOFF (2015) ressaltam que um motivo pelo qual cilindros com textura determinística não são largamente utilizados em aplicações industriais pode estar no tempo de vida não convincente das estruturas criadas. O desgaste provoca um contínuo alisamento da topografia do cilindro, levando a uma redução gradual na criação de volume de bolsos na chapa. Embora esse seja um problema geral de todas as técnicas de texturização, o caso das estruturas determinísticas geralmente é ainda pior. Além disso, no que tange à indústria automotiva, pode haver também uma razão estética para a não utilização em larga escala de texturas determinísticas em componentes automotivos externos; de acordo com BENATI (2003), os padrões de textura determinísticos são mais fáceis de serem percebidos com os olhos humanos, e isso pode ser uma causa de rejeição pelos clientes. Por fim, o aumento da vida de cilindros de laminação a frio ainda é uma questão a ser aperfeiçoada, sendo que a utilização de cromo duro é uma prática comum para tal finalidade; a utilização de cromo como revestimento também pode ser eficiente em cilindros para o passe de acabamento da laminação (UENO et al., 2016).

Até agora os métodos de texturização abordados foram aqueles que, de acordo com a literatura, são os mais empregados em cilindros de laminação. Entretanto, o

método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT) possui características que o tornam promissor na indústria de texturização de cilindros.

O método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT) tem como base os princípios do processo de usinagem eletroquímica. Neste método há uma única ferramenta catódica perfurada e revestida com material isolante, a qual define, através desses padrões de perfurações, a região da amostra anódica que será texturizada (usinada). Neste caso, a ferramenta pode ser utilizada em vários processos, ou seja, não há necessidade do mascaramento individual das peças a cada processo de texturização proposto. O método MECT está ilustrado na Figura 2.3. O eletrólito, forçado por uma bomba peristáltica, passa através dos furos da ferramenta, que tem uma máscara isolante também perfurada aderida sobre a sua superfície. Em seguida escoar através de um pequeno espaço (*gap*) entre a máscara e a superfície do ânodo (peça). Dessa forma ocorre a texturização com estrutura determinística conforme os padrões perfurados na ferramenta. Utiliza-se um circuito eletrônico com corrente pulsada para que ocorra a limpeza dos produtos provenientes da dissolução anódica, como óxidos, nos intervalos de descanso dos pulsos (COSTA; HUTCHINGS, 2009; SILVA, 2016). A Figura 2.4 mostra uma superfície texturizada por esse método contendo um padrão de cavidades em formato de “V”.

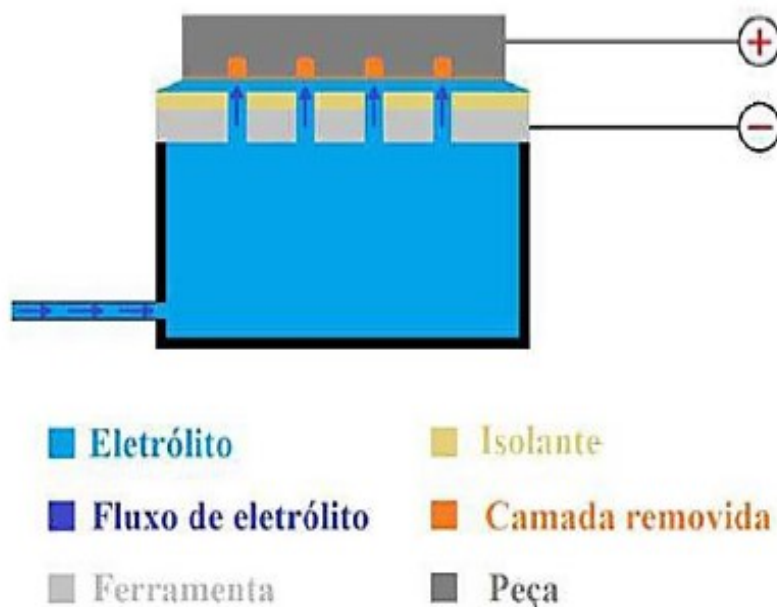


Figura 2.3 – Método de texturização por usinagem eletroquímica sem mascaramento com fluxo de eletrólito perpendicular à peça (SILVA, 2016).

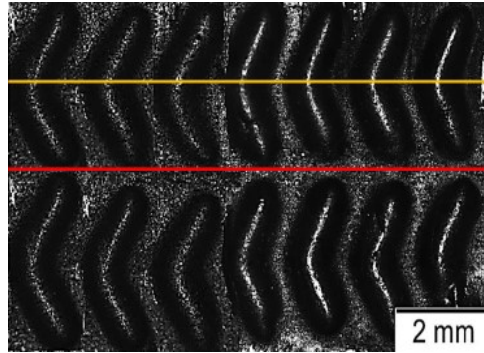


Figura 2.4 – Superfície texturizada pelo método MECT (RODRIGUES, 2018).

Como vantagem do método MECT, que é geralmente estudado no tratamento de superfícies metálicas, pode-se citar sua simplicidade e o baixo custo. Além disso, o mesmo é adequado para áreas relativamente grandes, normalmente cm^2 ou dm^2 (COSTA; HUTCHINGS, 2015). Uma desvantagem da técnica no seu estágio atual de desenvolvimento é a resolução dos motivos que compõem a textura, ou bolsos, uma vez que existe certa quantidade de sobremetal dissolvido eletroquimicamente. Por exemplo, no trabalho de DA SILVA e COSTA (2017) as menores dimensões dos bolsos obtidos eram da ordem de $200\ \mu\text{m}$. Porém, como a área de contato em processos de conformação é grande, em geral as texturas não precisam ser constituídas de bolsos muito pequenos, de forma que a técnica deve ser adequada. Finalmente, é importante citar que o tempo de texturização é curto o suficiente para ser utilizado em escala industrial. Entretanto, estudos preliminares precisam ser realizados para definir parâmetros adequados para o processo. Por exemplo, é possível que valores de *gap* diferentes, os quais resultam em uma variação da queda ôhmica na célula, possam requerer tensões diferentes, o que necessita ser investigado (COSTA; HUTCHINGS, 2009).

2.2.2 Controle e transferência de topografia

A topografia superficial pode ser descrita por um conjunto de dados com as coordenadas dos pontos que se encontram na superfície (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). A seguir serão abordados alguns tópicos que são fundamentais no entendimento dos processos envolvidos na transferência da topografia do cilindro texturizado para a chapa, bem como no controle dessa transferência.

Um processo pelo qual a transferência da topografia do cilindro para a chapa pode ocorrer consiste na penetração das asperidades do cilindro na chapa. Outro possível processo é a extrusão reversa; por exemplo, em cilindros texturizados pelo método EBT pode acontecer a extrusão reversa do material sendo laminado para dentro dos anéis que são formados nas bordas dos bolsos superficiais do cilindro. A predominância de um ou outro processo depende, dentre outros fatores, do método de texturização do cilindro. Assim, por exemplo, quando se trata de cilindros texturizados pelo método EDT, é provável que a extrusão reversa não seja o processo de transferência predominante devido às geometrias das texturas formadas no cilindro (WENTINK et al., 2015). No entanto, revelar completamente os mecanismos de transferência de textura que ocorrem no passe de acabamento da laminação tem sido um desafio devido à complexidade dos eventos que ocorrem na interface entre o cilindro e a chapa. Na laminação, o contato ocorre entre as asperidades aleatoriamente distribuídas, tanto na superfície do cilindro quanto da chapa. Enquanto a deformação plástica das asperidades superficiais da chapa é usualmente significativa, as asperidades da superfície do cilindro estão sujeitas normalmente a deformações elásticas muito menores; isso ocorre devido ao fato de o material do cilindro possuir uma dureza muito maior que a do material da chapa. Além disso, a chapa está sujeita a diferentes zonas de deformação no arco de contato e também há uma parcela de deslizamento relativo, o que contribui para que aconteça uma contínua evolução topográfica da chapa ao longo do processo (WU et al., 2019).

No passe de acabamento da laminação, o desgaste do cilindro pode ser caracterizado como microdesgaste, pois a profundidade inicial das texturas não é superada pela perda superficial de material; assim, empiricamente, o desgaste do cilindro é usualmente descrito como uma perda de rugosidade. Uma metodologia adequada para descrever o microdesgaste de uma superfície consiste na análise da relação de apoio (*BA*), a qual é independente do material (WENTINK et al., 2015).

WENTINK et al. (2015) realizaram análises experimentais que dão suporte à citada metodologia de análise de desgaste no passe de acabamento. A Figura 2.5-a representa perfis de linhas registrados em áreas idênticas da superfície de um cilindro novo e após a laminação de 2 500 m e 4 000 m de chapa em um laminador piloto; nota-se que os picos são desgastados, enquanto os vales permanecem inalterados. A Figura 2.5-b sugere que os picos mais proeminentes são removidos no estágio inicial do processo, a partir do qual o desgaste ocorre lentamente. Além disso,

simulações numéricas mostraram que, nas condições avaliadas, a rugosidade Ra e a contagem de picos R_{Pc} do cilindro tendem a diminuir à medida em que o microdesgaste dos picos da superfície do cilindro aumenta.

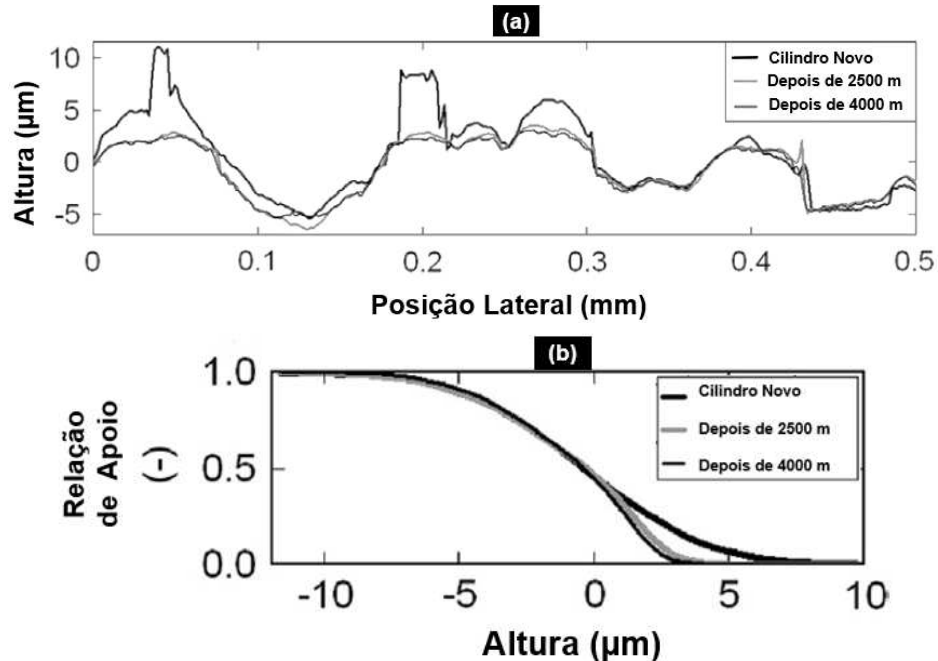


Figura 2.5 – Análise de desgaste para um cilindro novo e para cilindros usados após a laminação de 2 500 m e 4 000 m de chapas: (a) perfil 2D de uma seção da superfície de um cilindro; (b) relação de apoio. Material da chapa: aço galvanizado por imersão a quente (hot dip galvanized HDG), livre de elementos intersticiais (interstitial free, IF). Alongamento: entre 1,3 % e 2,5 %. Adaptado de WENTINK et al. (2015).

Normalmente, no passe de acabamento, ocorre uma região central plana no arco de contato, ou uma zona neutra, onde não ocorre deslizamento. Alguns estudos sugerem que essa zona pode ocupar uma região considerável do contato entre o cilindro e a chapa. Nessa região, a pressão normal de contato tende a permanecer em um valor máximo, aproximadamente constante, e a tensão de cisalhamento tende a permanecer nula (JING-NA et al., 2009; KIJIMA; BAY, 2006). A influência dessa região é tão pronunciada que alguns autores realizaram ensaios de compressão, com carga normal, com uma ferramenta sobre uma chapa a fim de estudar as deformações localizadas (KIJIMA; BAY, 2007) e a transferência de texturas determinísticas obtidas por feixes de laser (RODRIGUEZ-VIDAL *et al.*, 2020), no passe de acabamento da laminação.

RODRIGUEZ-VIDAL *et al.* (2020) avaliaram a transferência de rugosidade no passe de acabamento através de testes de compressão nos quais a chapa foi comprimida entre duas matrizes, uma delas polida e a outra texturizada por um feixe

de laser. Os padrões selecionados de microtexturas foram microbolsos distribuídos como está ilustrado na Figura 2.6.

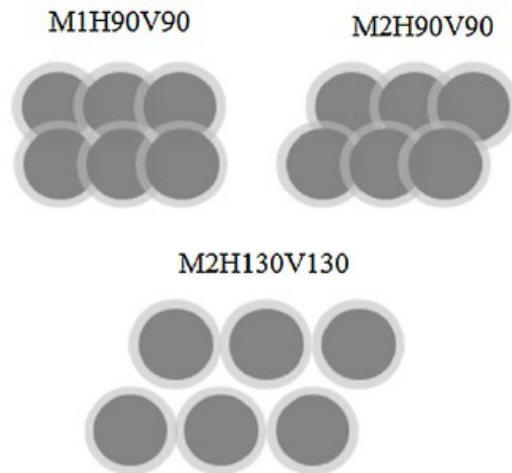


Figura 2.6 – Padrões de textura (RODRIGUEZ-VIDAL et al., 2020).

A Figura 2.7 mostra as superfícies das matrizes de impressão (a, c, e) e das chapas impressas (b, d, f). Nota-se que a transferência de textura ocorreu de forma razoavelmente homogênea. A Figura 2.7-b e a Figura 2.7-d revelam a transferência do centro do bolso e também das áreas sobrepostas entre bolsos consecutivos. Na textura em que não há sobreposição de bolsos, a Figura 2.7-e e a Figura 2.7-f revelam que a transferência ocorre como sucros regulares em torno dos bolsos. Além disso, uma região não processada é observada tanto na matriz quanto na chapa (RODRIGUEZ-VIDAL et al., 2020).

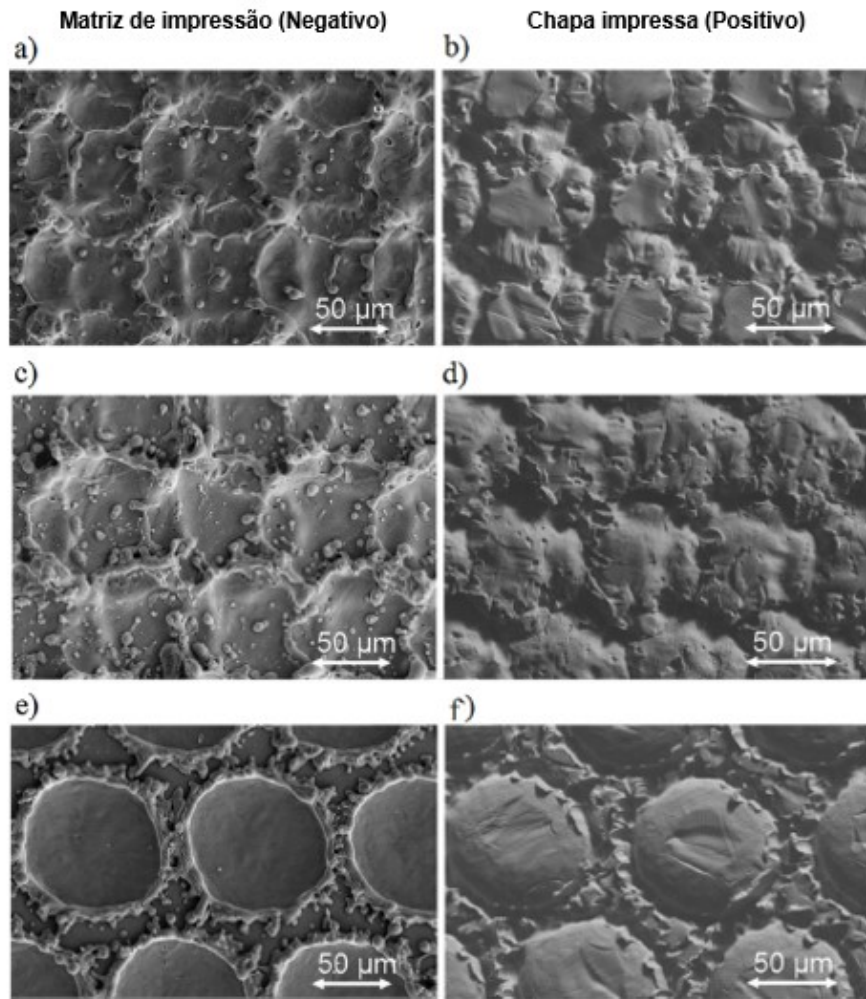


Figura 2.7 – Matriz de impressão (esquerda) e chapa impressa (direita) correspondente às seguintes superfícies texturizadas: (a) e (b), M1H90V90; (c) e (d), M2H90V90; (e) e (f), M1H130V130. Material da ferramenta: aço ferramenta disponível comercialmente, Uddeholm Rigor®; material da chapa: aço galvanizado de baixa resistência e alta conformabilidade, livre de elementos intersticiais IF-DX56. Adaptado de RODRIGUEZ-VIDAL *et al.* (2020).

A Figura 2.8, mostra a transferência de rugosidade R_a (a) e a transferência de contagem de picos R_{pc} (b) em função de um parâmetro chamado pressão de contato efetiva, PCE, o qual é definido como a razão entre a pressão nominal de contato e a resistência ao escoamento média do substrato. Esse parâmetro tenta levar em conta a influência das propriedades mecânicas do substrato na capacidade de transferência de textura. De acordo com a Figura 2.8-a, para as texturas consideradas, as funções de transferência de R_a indicam um aumento aproximadamente linear ao aumentar a PCE, atingindo percentuais máximos de transferência (no caso de M2H90V90) de quase 50 %. Por outro lado, a Figura 2.8-b mostra que a transferência de R_{pc} chega a aproximadamente 94 % para texturas com sobreposição (M1H90V90 e M2H90V90) e a cerca de 130 % (seguida por uma queda) para a textura sem sobreposição (M1H130V130) quando a PCE é maior 300 %. Os autores não explicam o

comportamento dos gráficos, mas supõem que essas diferenças estão associadas às diferentes funções de transferência de R_{pc} que ocorrem quando texturas abertas (M1H90V90 e M2H90V90) e fechadas (M1H130V130) são consideradas. Além disso, eles cogitam que isso pode ser explicado pelas diferenças na relação de apoio entre a matriz de impressão e a chapa impressa quando texturas abertas e fechadas são consideradas.

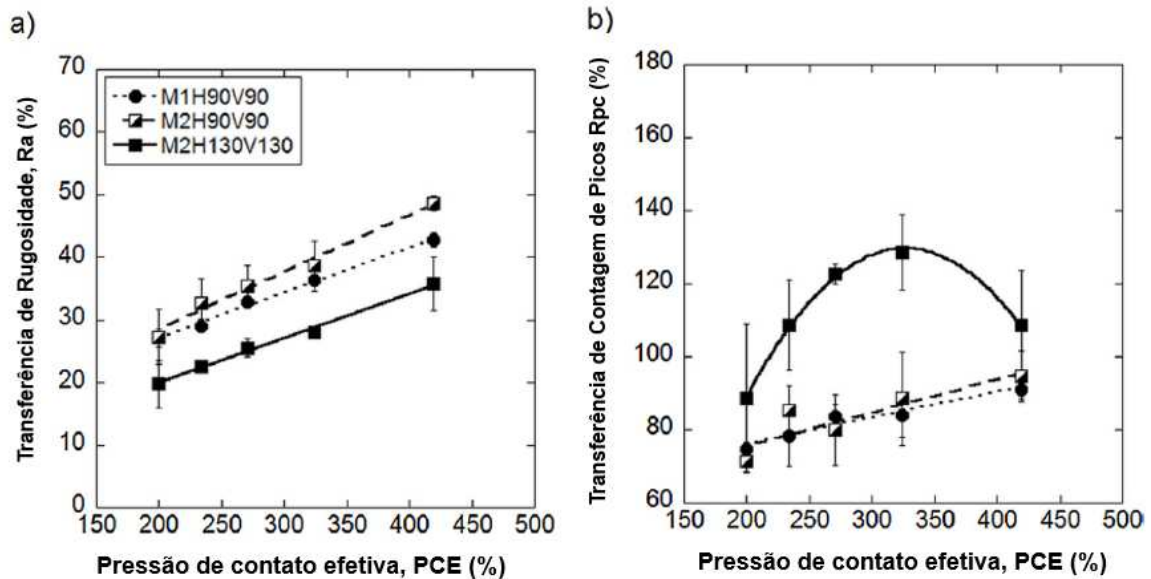


Figura 2.8 – Transferência de parâmetros de rugosidade em função da pressão de contato efetiva, PCE, para diferentes superfícies texturizadas: (a) transferência de rugosidade Ra, (b) transferência de contagem de picos R_{pc}. Material da ferramenta: aço ferramenta disponível comercialmente, Uddeholm Rigor®; material da chapa: aço galvanizado de baixa resistência e alta conformabilidade, livre de elementos intersticiais IF-DX56. Adaptado de RODRIGUEZ-VIDAL et al. (2020).

Uma observação importante é que usualmente, na literatura, os parâmetros analisados na transferência de topografia, de cilindros texturizados para a chapa são aqueles que descrevem a rugosidade média aritmética e a contagem picos (EVIN; TOMÁŠ; KMEC, 2020; GORBUNOV; BELOV; BEGLETSOV, 2009; RODRIGUEZ-VIDAL et al., 2020; WENTINK et al., 2015).

PAWELSKI et al. (1994) realizaram um estudo comparativo entre sistemas de texturização de cilindros para o passe de acabamento que utilizam os métodos SBT, EDT, EBT e LBT (os autores chamam este último método de LT). O objetivo foi avaliar as características de transferência de cada método. Para isso foi utilizado um parâmetro que os autores chamaram de grau de transferência, sendo que os valores do referido parâmetro variam entre 0 e 1 e seu cálculo leva em conta a estrutura da superfície do material processado antes e após a laminação e também a superfície do próprio cilindro. Quanto maior for o grau de transferência, mais bem sucedida será a

transferência de topografia. A Figura 2.9 mostra gráficos do grau de transferência em função do alongamento (ϵ_N) e representações de análise que ilustram as características de impressão nos testes a seco e lubrificados. O alongamento foi definido em cada ensaio e os ensaios foram realizados em um laminador industrial de acabamento. Foram realizados testes a seco e lubrificados. Os testes a seco (Figura 2.9-a) e lubrificados (Figura 2.9-b) mostram claramente que o método de texturização do cilindro e o alongamento, este último associado à redução da chapa, influenciam na transferência da textura superficial do cilindro para chapa. É evidente que essa transferência é mais acentuada quanto maior for o alongamento, o que também está claro na Figura 2.10. Isso pode estar associado com a maior intensidade da penetração da topografia do cilindro na superfície da chapa em maiores alongamentos. Os resultados também mostram que no caso dos testes lubrificados, a transferência de textura foi menos pronunciada se tratando das texturas determinísticas (EBT e LBT), o que pode ser explicado pela formação de bolsos fechados de lubrificação hidrostática, principalmente na superfície do cilindro, dos quais o lubrificante é impedido de escapar; este fenômeno dificulta a penetração. A formação desses bolsos depende da homogeneidade da distribuição no caso das texturas estocásticas (EDT e SBT), mas no caso das determinísticas eles são induzidos pela própria natureza do processo. A Figura 2.9-c e a Figura 2.9-d ilustram as características de transferência dos testes a seco e lubrificados. Finalmente, a texturização por LBT correspondeu a um desempenho muito ruim. Os autores explicam que isso ocorreu devido às protuberâncias que se formaram nas bordas das cavidades resultantes do processo. Essas elevações tinham baixa adesão à superfície do cilindro e foram desgastadas durante o passe de acabamento, o que contribuiu para uma transferência de textura limitada.

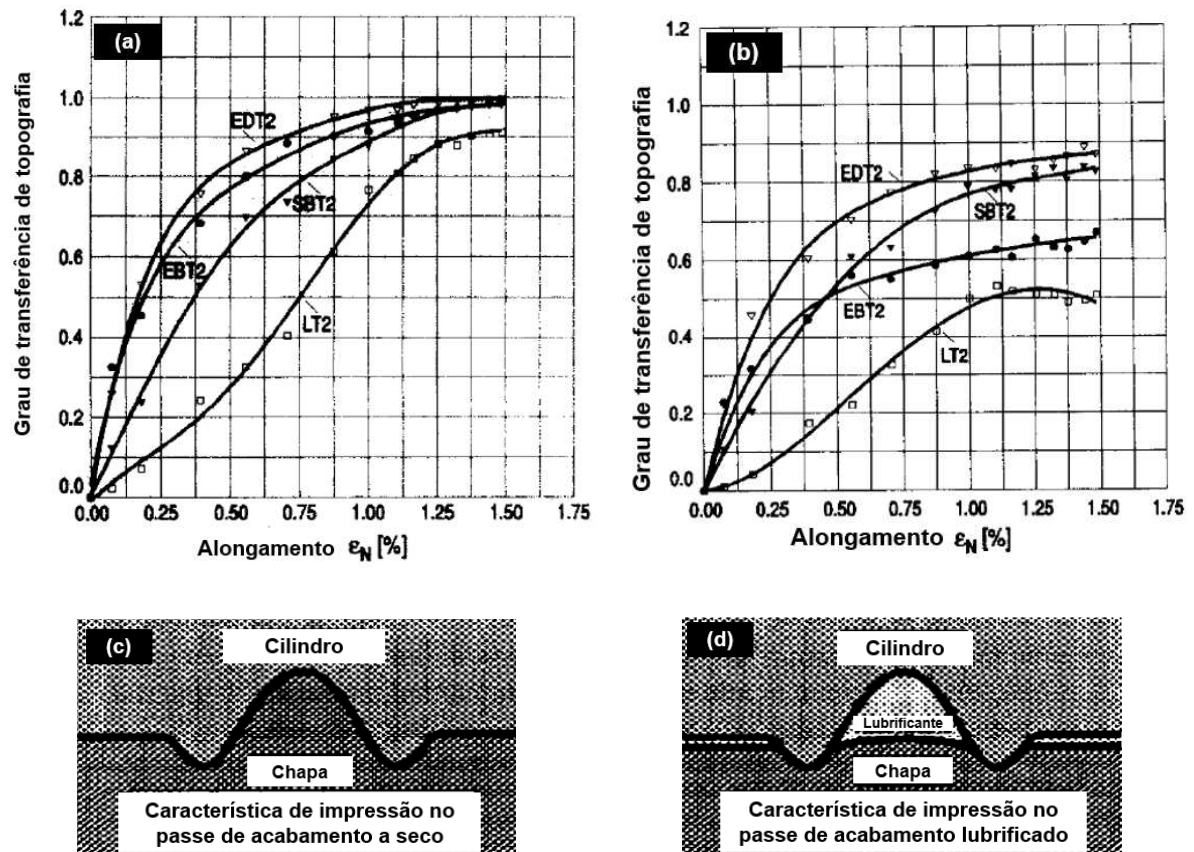


Figura 2.9 – Resultados e análises: (a) testes a seco, (b) testes lubrificados, (c) características de transferência nos testes a seco e (d) características de transferência nos testes lubrificados . Adaptado de PAWELSKI *et al.* (1994).

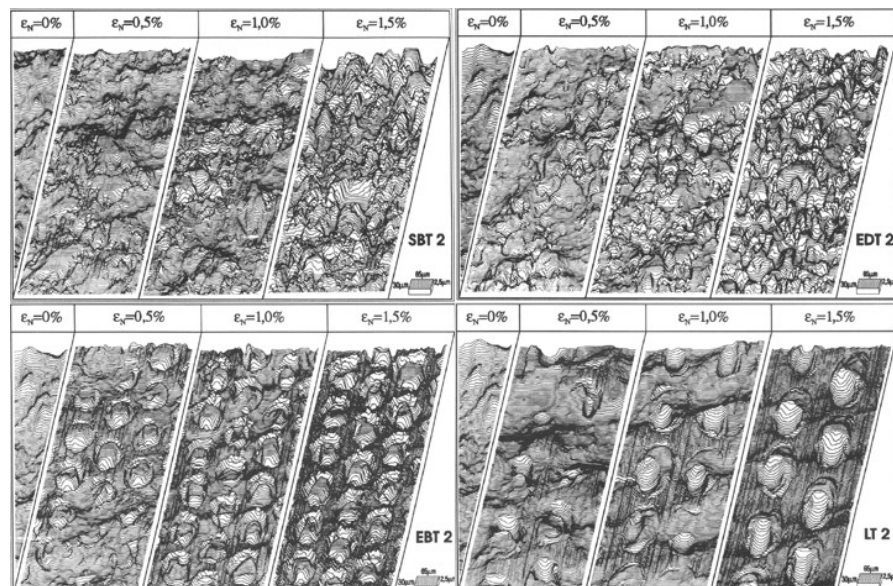


Figura 2.10 – Influência do método de texturização e do alongamento na transferência de textura (PAWELSKI *et al.*, 1994).

A falta de evidência visual das interações tribológicas entre superfícies reais dificulta a obtenção de um entendimento claro sobre os eventos que ocorrem na interface do cilindro com a chapa laminada, o que torna inevitável o desenvolvimento

de hipóteses. É necessário observar evidências essencialmente circunstanciais e interpretar vários fenômenos interconectados. Isso inclui o aumento ou queda das cargas, o deslizamento frontal (*forward slip*) à medida que a velocidade de laminação aumenta, a evolução da rugosidade da chapa laminada e a aparência das superfícies laminadas e do cilindro (DICK; LENARD, 2005).

2.2.3 Considerações sobre cilindros texturizados e revestidos

Sabe-se que o revestimento de cromo duro eletrodepositado em superfícies de cilindros de laminação com superfícies texturizadas com estruturas estocásticas, por exemplo, pelo método de texturização por descarga elétrica (EDT) ou pela técnica de texturização por jateamento de granalha (SBT), aumenta a vida útil e o desempenho destes componentes (SIMÃO; ASPINWALL, 1999). Para que alguns benefícios esperados ocorram em chapas com superfícies texturizadas são necessários alguns requisitos topográficos, por exemplo, a superfície deve exibir bolsos vazios, os chamados bolsos de lubrificação, que possam ser fechados pela superfície da matriz em um posterior processo de conformação. Se isso não ocorrer o lubrificante escapa prematuramente sem que ocorra o aumento da capacidade de carga. Dessa forma, uma vantagem de utilizar texturas determinísticas em vez de texturas estocásticas consiste em evitar a sobreposição de bolsos, o que inibiria os efeitos de aumento de pressão no lubrificante. Entretanto, o desgaste dessas texturas deve ser atenuado para que a sua aplicação possa ter êxito na produção industrial (HILGENBERG; STEINHOFF, 2015).

A utilização de cromo duro eletrodepositado pode aumentar a vida do cilindro, mas é criticada em termos de impacto ambiental e de saúde de operadores (HILGENBERG; STEINHOFF, 2015). Há sérias preocupações uma vez que o processo de deposição envolve cromo hexavalente, o qual é um conhecido cancerígeno. Devido a isso, e também a questões legais, como em alguns países europeus, o meio industrial tem considerado possíveis substitutos para o cromo duro (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

GONÇALVES JÚNIOR (2016) avaliou o níquel químico (NiP, baixo fósforo) e o cromo duro como revestimentos para cilindros de laminação a frio texturizados pelo método EDT, o qual produz texturas estocásticas. Por meio de ensaios em um tribômetro, os mecanismos de desgaste observados nos cilindros, após as

campanhas de laminação, foram reproduzidos com sucesso em laboratório. Tal metodologia já está ratificada na literatura (GONÇALVES; DE MELLO; COSTA, 2019). Foi constatado que a utilização de NiP contribuiu para a formação de uma tribocamada protetora no corpo e no contracorpo, contribuindo para a redução do coeficiente de atrito e para a redução da taxa de desgaste do sistema. As superfícies texturizadas e revestidas com NiP também mostraram as menores mudanças de parâmetros topográficos ao longo dos ensaios tribológicos, o que pode significar que os cilindros com essas modificações superficiais podem ter uma vida maior em relação aos cilindros revestidos cromo duro.

CAPITULO III

Projeto, Construção e Validação de Câmaras de Texturização

O objetivo deste capítulo é desenvolver duas câmaras de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT): uma para amostras planas extraídas de cilindros de laminação a frio e outra para cilindros de laminação em escala piloto. As amostras texturizadas com superfícies planas serão utilizadas em ensaios de deslizamento alternativo para avaliação da durabilidade das texturas. Os cilindros texturizados serão utilizados em ensaios de laminação a frio para avaliação de transferência de textura para a chapa.

Um único tipo de padrão, em forma de bolsos circulares, foi selecionado para os cilindros. O motivo da escolha foi que este tipo de padrão tem a vantagem de ser não direcional, o que deve resultar em características de reflexão ótica adequadas e, portanto, com boa qualidade estética. Padrões com aspectos geométricos semelhantes a esse que foi escolhido são frequentes na literatura relacionada ao presente estudo (BENATI, 2003; PAWELSKI et al., 1994; RODRIGUEZ-VIDAL et al., 2020).

3.1 Câmara de texturização de superfícies planas

Inicialmente foi desenvolvida uma câmara para texturizar superfícies planas pelo método MECT. Deve-se salientar que o método não envolve mascaramento das peças a serem texturizadas (anodo), mas de qualquer forma o padrão a ser transferido à peça é obtido por mascaramento do catodo. Porém, esse mascaramento é feito uma

única vez, sendo que o mesmo catodo mascarado pode ser usado para texturizar um grande número de peças.

Dentre os critérios para o projeto da câmara de texturização pode-se citar o material, o qual deve ser um isolante elétrico, além de não sofrer corrosão significativa quando em contato com o eletrólito. Dessa forma, polímeros foram selecionados para a construção da câmara.

Neste trabalho, optou-se por projetar a câmara de tal maneira que fluxo de eletrólito ocorresse paralelamente à superfície da peça, conforme ilustrado na Figura 3.1, pois isso pode contribuir para a redução da perda de carga e aumento da vazão em relação às câmaras que utilizam fluxo de eletrólito perpendicular à superfície da peça a ser texturizada. Uma outra vantagem, neste caso, consiste no mascaramento do catodo através da perfuração de um polímero adesivo que é colado na superfície da ferramenta, ou seja, um adesivo polimérico é perfurado a laser com furos com os diâmetros próximos daqueles que se desejam obter nos bolsos fabricados na superfície da peça. Portanto, neste caso, não ocorre a perfuração a laser de uma ferramenta de metal como se observa em alguns estudos disponíveis na literatura (RODRIGUES *et al.*, 2020), o que poderia elevar os custos do processo, sobretudo nas análises realizadas em laboratório em que se deseja avaliar mais de um padrão de textura.

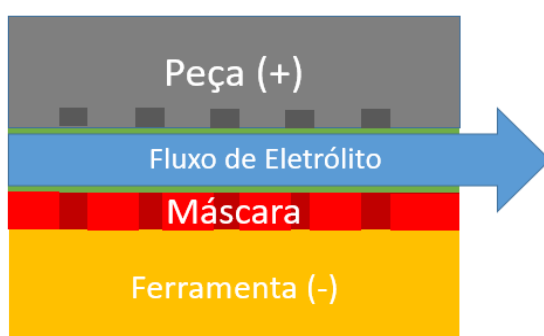


Figura 3.1 – Representação esquemática do fluxo de eletrólito paralelo às superfícies da ferramenta (polo negativo) e da peça (polo positivo). A máscara destacada em vermelho contém regiões mais escuras que representam as perfurações a laser; a peça destacada na cor cinza contém regiões mais escuras que representam as texturas produzidas na superfície da peça.

A Figura 3.2 ilustra a câmara de texturização de superfícies planas. Há uma entrada para o eletrólito e uma abertura para que o mesmo seja direcionado paralelamente à superfície da máscara, que está colada sobre a superfície da ferramenta metálica.

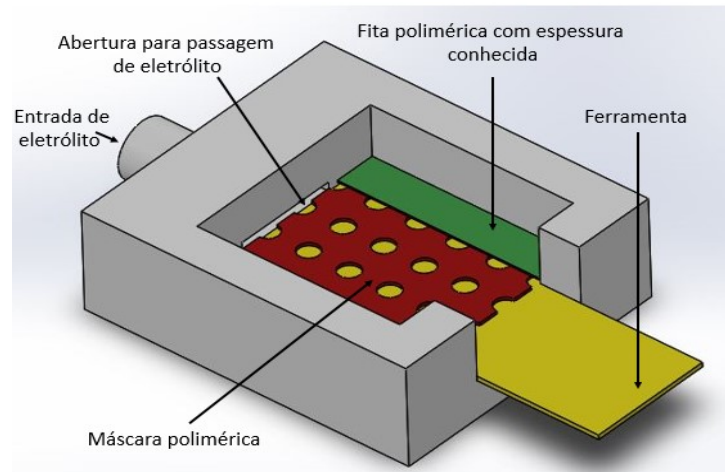


Figura 3.2 – Representação da câmara de texturização de superfícies planas.

Sobre as extremidades da máscara há uma fita polimérica com espessura conhecida, de maneira que quando a peça é colocada sobre a máscara exista uma distância (*gap*) entre a peça e a ferramenta para a passagem de eletrólito, como mostra a Figura 3.3. Além disso, é possível observar nessa imagem a presença de um objeto azul; o mesmo consiste em uma borracha que foi inserida sobre a parede da câmara a fim de evitar vazamentos de eletrólito durante o processo de texturização, como mostra a Figura 3.4. Esta figura também mostra a peça inserida na câmara, bem como os polos elétricos correspondentes à peça e à ferramenta.

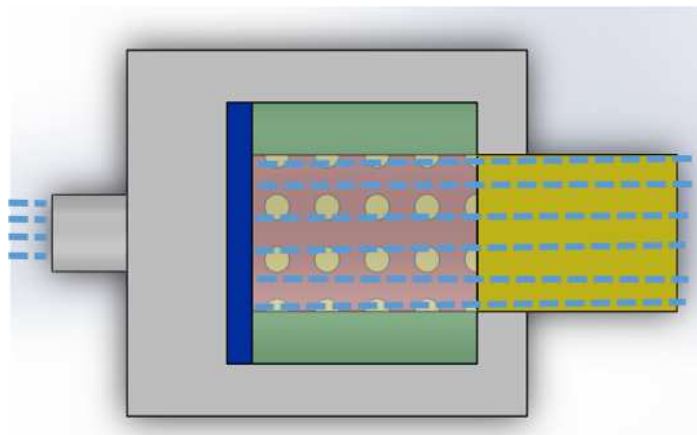


Figura 3.3 – O posicionamento da fita polimérica (em verde) permite o controle do *gap* para que ocorra o fluxo de eletrólito (linhas descontínuas em azul).

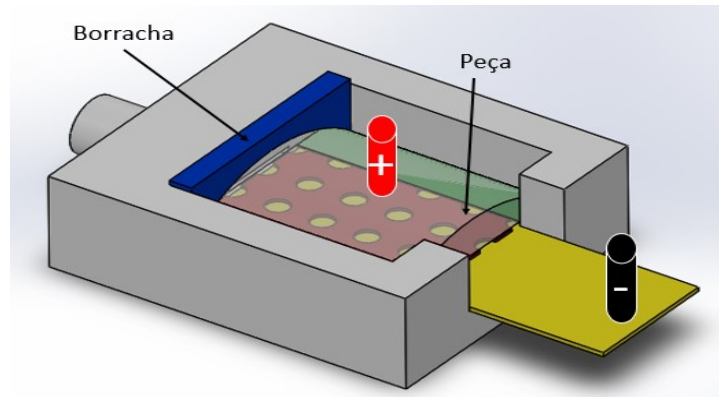


Figura 3.4 – Peça (transparente) e ferramenta (em amarelo) conectadas aos seus polos elétricos correspondentes. A borracha (azul) evita vazamento de eletrólito.

Por fim, a Figura 3.5 mostra uma vista em corte da câmara de texturização, onde é possível observar o caminho que o eletrólito percorre dentro da câmara.

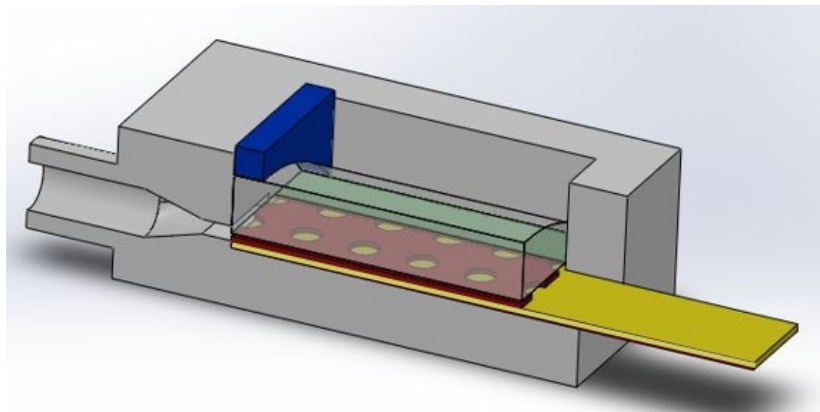


Figura 3.5 – Vista em corte da câmara de texturização.

A Figura 3.6 representa as dimensões da peça e da ferramenta. É importante ressaltar que a texturização não ocorre em toda a superfície da peça (50 mm x 50 mm), pois as regiões da peça que ficam sobre a fita polimérica (colada sobre a superfície da máscara) não são texturizadas. Os desenhos planos com as dimensões da câmara se encontram no apêndice A.

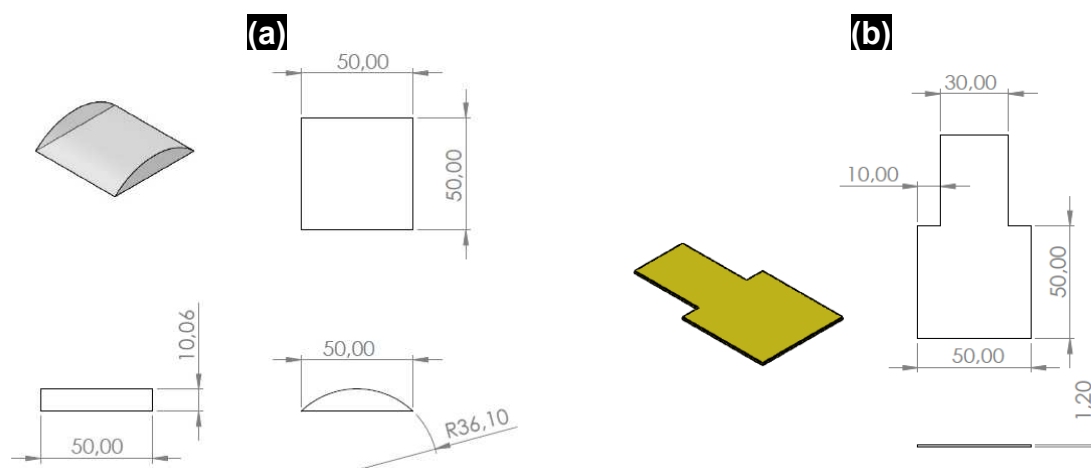


Figura 3.6 – Dimensões da (a) peça e (b) ferramenta. Escala em mm.

Após a concepção do projeto da câmara, sucedeu-se então a etapa de fabricação. As paredes da câmara foram fabricadas através de impressão 3D em uma empresa privada. A Tabela 3.1 elenca os materiais que foram selecionados para fabricação dos componentes da câmara de texturização de superfícies planas.

Tabela 3.1 – Materiais selecionados para a fabricação da câmara de texturização de superfícies planas.

Componente	Material
Paredes da câmara	ABS
Máscara	Adesivo Vinil
Fita polimérica	PVC
Borracha	Látex
Ferramenta	Aço AISI 430

A Figura 3.7-a mostra uma foto da câmara fabricada com uma peça que passará pelo processo de texturização eletroquímica sem mascaramento. Nota-se que o conector elétrico positivo, vermelho, está conectado à peça através de um parafuso que é rosqueado para fixar a peça e impedir a movimentação da mesma durante o processo de texturização. O conector negativo, preto, está conectado à ferramenta. A Figura 3.7-b mostra outra vista da câmara.

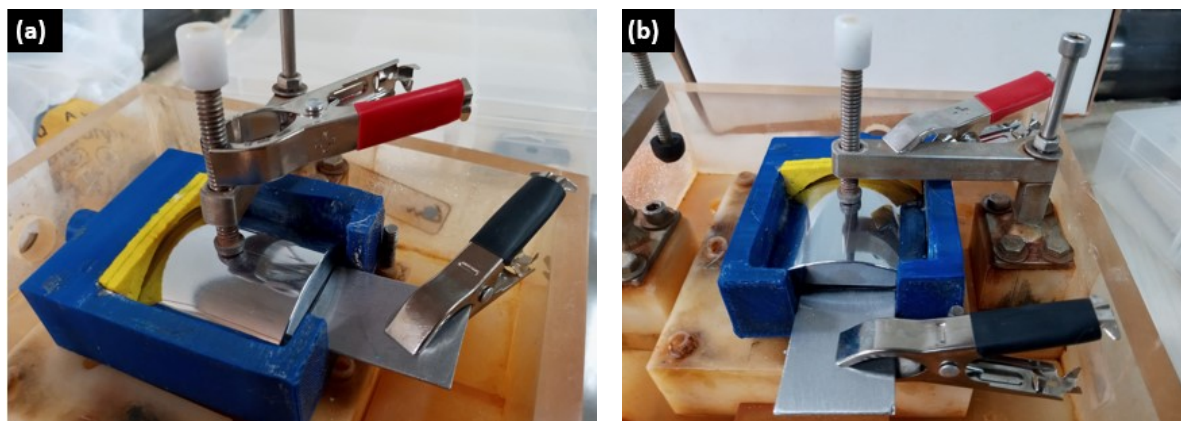


Figura 3.7 – Câmara de texturização montada para ensaio: (a) vista1; (b) vista 2.

Inicialmente, foi necessário realizar testes preliminares para verificar se a câmara projetada seria capaz de texturizar amostras com superfícies planas, isto é, testes para validação da câmara. Com objetivo de reservar as amostras extraídas de cilindros de laminação somente para as análises tribológicas, a validação da câmara de texturização de planos foi realizada utilizando-se amostras de aço AISI 1010. A região texturizada foi de aproximadamente 20 mm x 30 mm. Os componentes do circuito e a bomba de eletrólito utilizados nesta etapa são os mesmos descritos e utilizados por outros trabalhos já publicados (PARREIRA ; COSTA, 2012; RODRIGUES et al., 2020). A ferramenta foi lixada manualmente com lixas d'água com granulações de 80 mesh, 120 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh, 600 mesh e 1 200 mesh.

Após a fabricação da câmara procedeu-se com os ensaios preliminares para verificar o funcionamento da mesma. A perfuração a laser das máscaras de vinil foi terceirizada em uma empresa privada. As máscaras foram analisadas em um microscópio óptico (Olympos BX51m) para medição dos diâmetros dos furos e dos espaçamentos entre eles. As medições resultaram em um diâmetro médio de 0,722 mm ou 722 μm e um lado médio de 1,225 mm ou 1225 μm , como ilustrado na Figura 3.8.

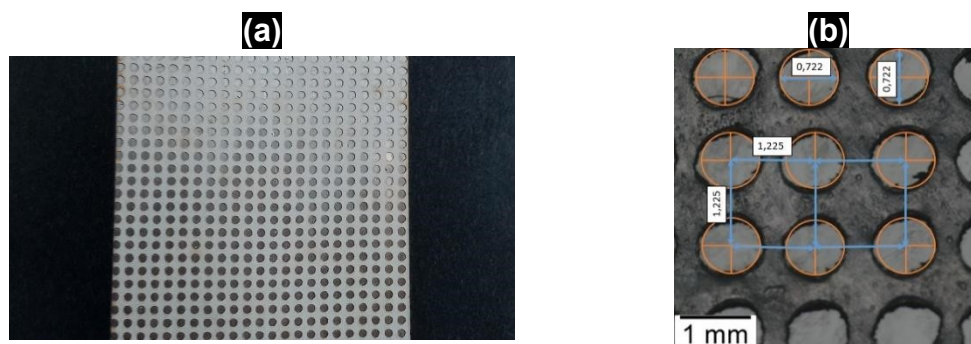


Figura 3.8 – Máscara: (a) sobre a ferramenta e com fitas poliméricas pretas nas extremidades e (b) sobre uma superfície de vidro, analisada no microscópio óptico.

Diversos parâmetros podem influenciar no processo de texturização eletroquímica como o material a ser usinado (texturizado), o tempo de usinagem, a tensão aplicada, a distância entre os eletrodos, a concentração, o fluxo de eletrólito, entre outros. Em estudos anteriores (PARREIRA, 2011; RODRIGUES, 2018), que utilizaram fluxo perpendicular de eletrólito, bons resultados foram obtidos para a texturização de amostras de aço ABNT 1010 e aço ABNT 1045 com as seguintes condições:

- *gap*: 100 μm ;
- eletrólito (concentração): NaCl dissolvido em água (200 g/L);
- vazão: 20 mL/s;
- tensão: 30 V.

Dessa forma, nos testes de texturização preliminares, optou-se por avaliar o efeito do tempo de usinagem e do *gap* na obtenção das texturas, mantendo-se os demais parâmetros citados anteriormente constantes. Assim, inicialmente, para o material em questão (Aço AISI 1010), como ponto de partida, foram realizados testes de texturização nas condições mostradas na Tabela 3.2. Cada ensaio foi repetido três vezes.

Tabela 3.2 – Testes de texturização em amostras planas de aço AISI 1010.

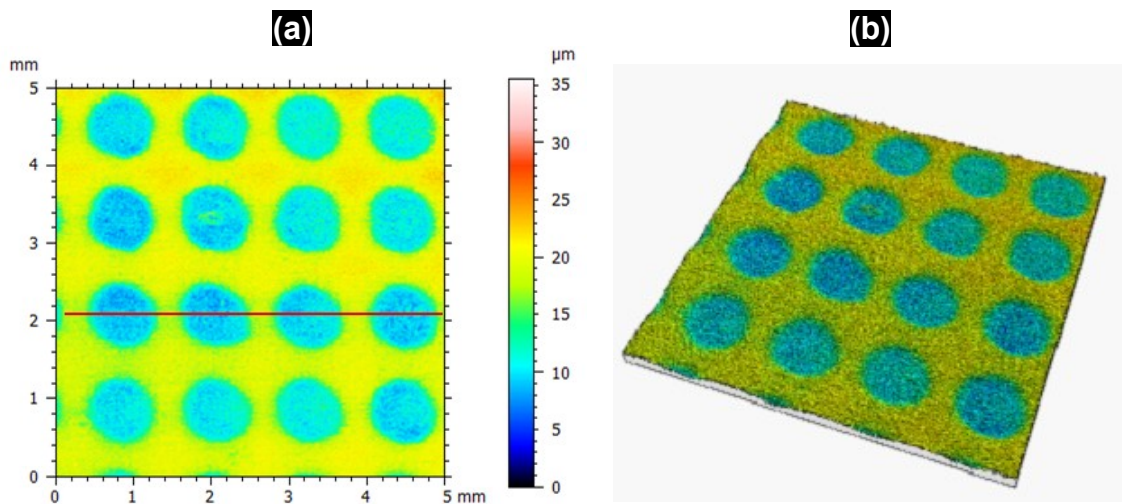
Teste	<i>Gap</i> (μm)	Concentração de NaCl (g/L)	Vazão (mL/s)	Tensão (V)	Tempo (s)
1	100	200	20	30	60
2	200	200	20	30	60
3	100	200	20	30	300
4	200	200	20	30	300

Após a texturização das amostras, prosseguiu-se com as análises das texturas em um interferômetro da Marca OPM - Hyperion System (sensor confocal KF3), com densidade de 500 pontos/mm, área analisada de 5 mm x 5 mm, velocidade de 2,3

mm/s e frequência de 805 Hz. Para a análise dos dados gerados utilizou-se o programa Mountains Map Universal®, versão 3.0.11. Essas análises realizadas via interferometria a laser são mostradas a seguir.

3.1.1 Resultados de validação da câmara de texturização de amostras planas

A Figura 3.9 e a Figura 3.10 mostram, respectivamente, os resultados correspondentes aos testes 1 ($gap = 100 \mu\text{m}$ e tempo de usinagem = 60 segundos) e 2 ($gap = 200 \mu\text{m}$ e tempo de usinagem = 60 segundos), conforme denominado na Tabela 3.2. A Figura 3.9-a e a Figura 3.10-a mostram interferometrias superficiais típicas desses ensaios; aparentemente, para o mesmo tempo de usinagem (60 segundos), as texturas produzidas no ensaio com gap igual a $100 \mu\text{m}$ possuem um melhor acabamento geométrico em relação às aquelas produzidas nos ensaios com gap igual a $200 \mu\text{m}$, o que fica mais evidente quando se observa as representações 3D dessas superfícies (Figura 3.9-b e a Figura 3.10-b). Avaliando a Figura 3.9-c e a Figura 3.10-c é possível notar que as regiões dos perfis correspondentes aos fundos dos bolsos são mais planas no caso em que o gap é igual a $100 \mu\text{m}$ e mais “pontiagudos” quando o gap é igual $200 \mu\text{m}$. Ao que tudo indica, o menor gap resultou em uma maior remoção de material que, neste caso, melhorou o acabamento das texturas.



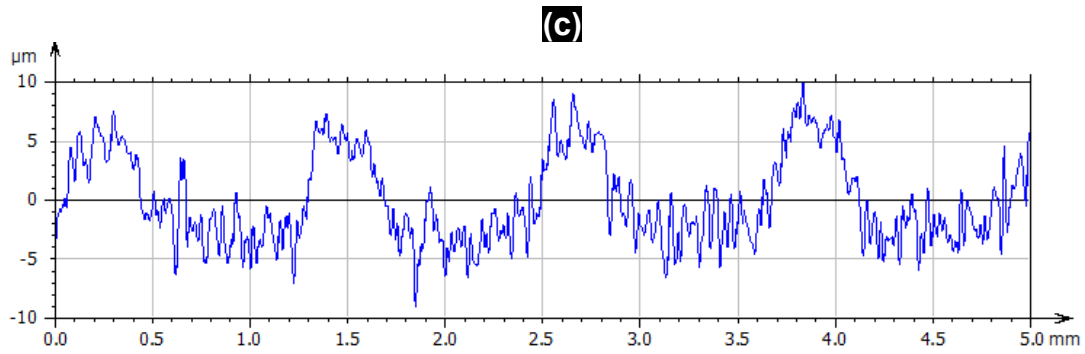


Figura 3.9 – Superfície texturizada com tempo de usinagem igual a 60 segundos e *gap* igual 100 μm : (a) interferometria, (b) representação 3D da superfície texturizada e (c) perfil de superfície correspondente à linha vermelha traçada em “a”.

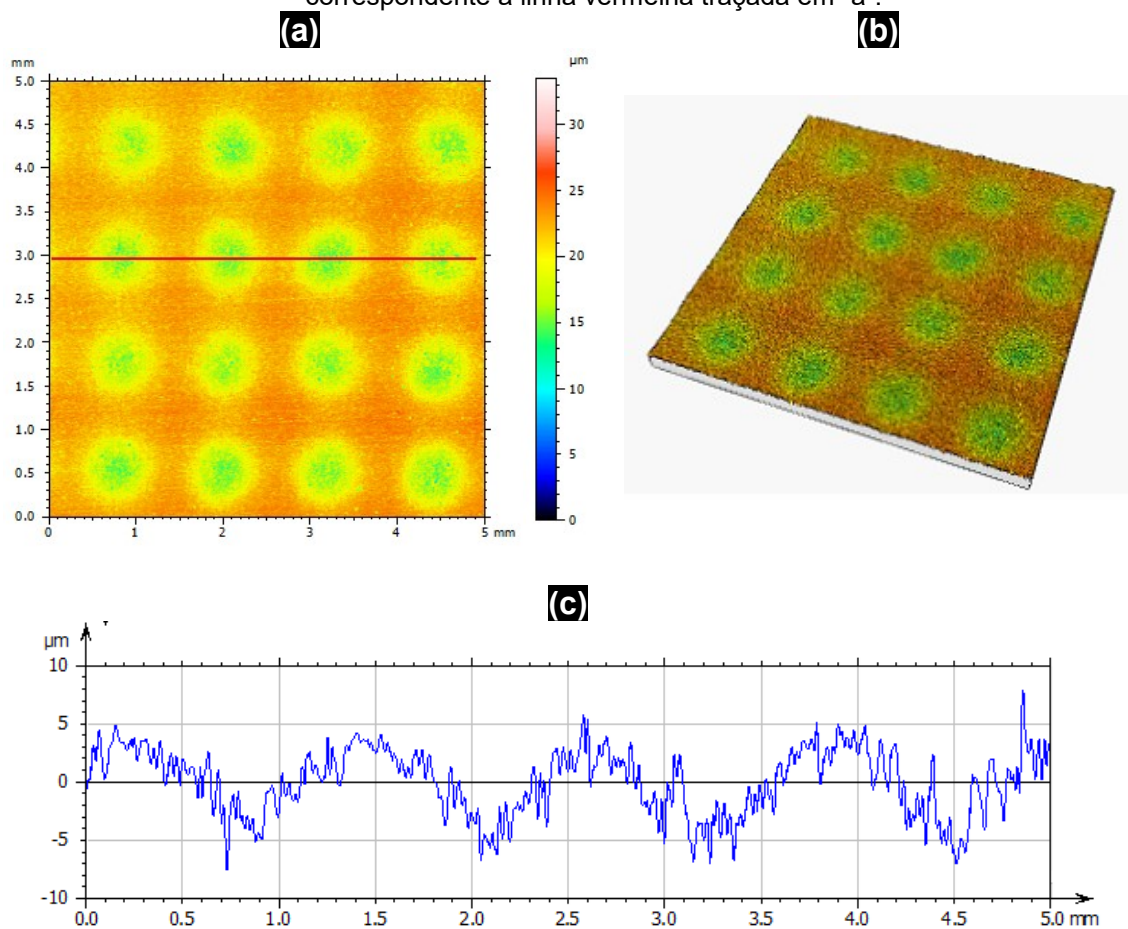


Figura 3.10 – Superfície texturizada com tempo de usinagem igual a 60 segundos e *gap* igual 200 μm : (a) interferometria, (b) representação 3D da superfície texturizada e (c) perfil de superfície correspondente à linha vermelha traçada em “a”.

A Figura 3.11 e a Figura 3.12 mostram, respectivamente, os resultados correspondentes aos testes 3 (*gap* = 100 μm e tempo de usinagem = 300 segundos) e 4 (*gap* = 200 μm e tempo de usinagem = 300 segundos), conforme denominado na Tabela 3.2. A Figura 3.11-a e a Figura 3.12-a mostram interferometrias superficiais típicas desses ensaios. Para o tempo de usinagem de 300 segundos, as texturas

produzidas nos ensaios com *gap* igual a 100 μm e igual a 200 μm possuem acabamentos geométricos semelhantes, o que fica mais evidente quando se observa as representações 3D dessas superfícies (Figura 3.11-b e Figura 3.12-b). Avaliando a Figura 3.11-c e a Figura 3.12-c é possível notar que os perfis superficiais também possuem um comportamento semelhante.

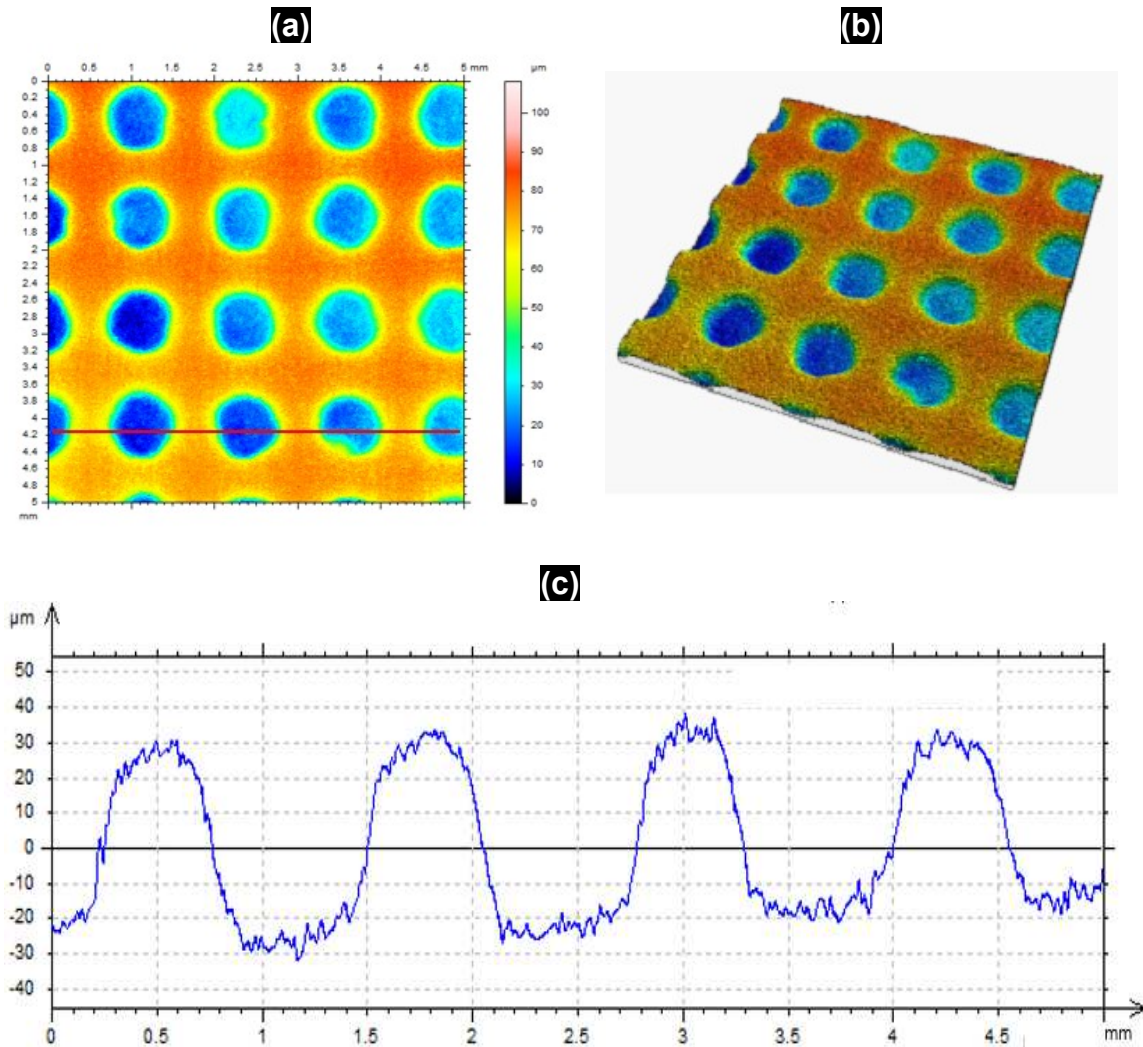


Figura 3.11 – Superfície texturizada com tempo de usinagem igual a 300 segundos e *gap* igual 100 μm : (a) interferometria, (b) representação 3D e (c) perfil de superfície correspondente à linha vermelha traçada em “a”.

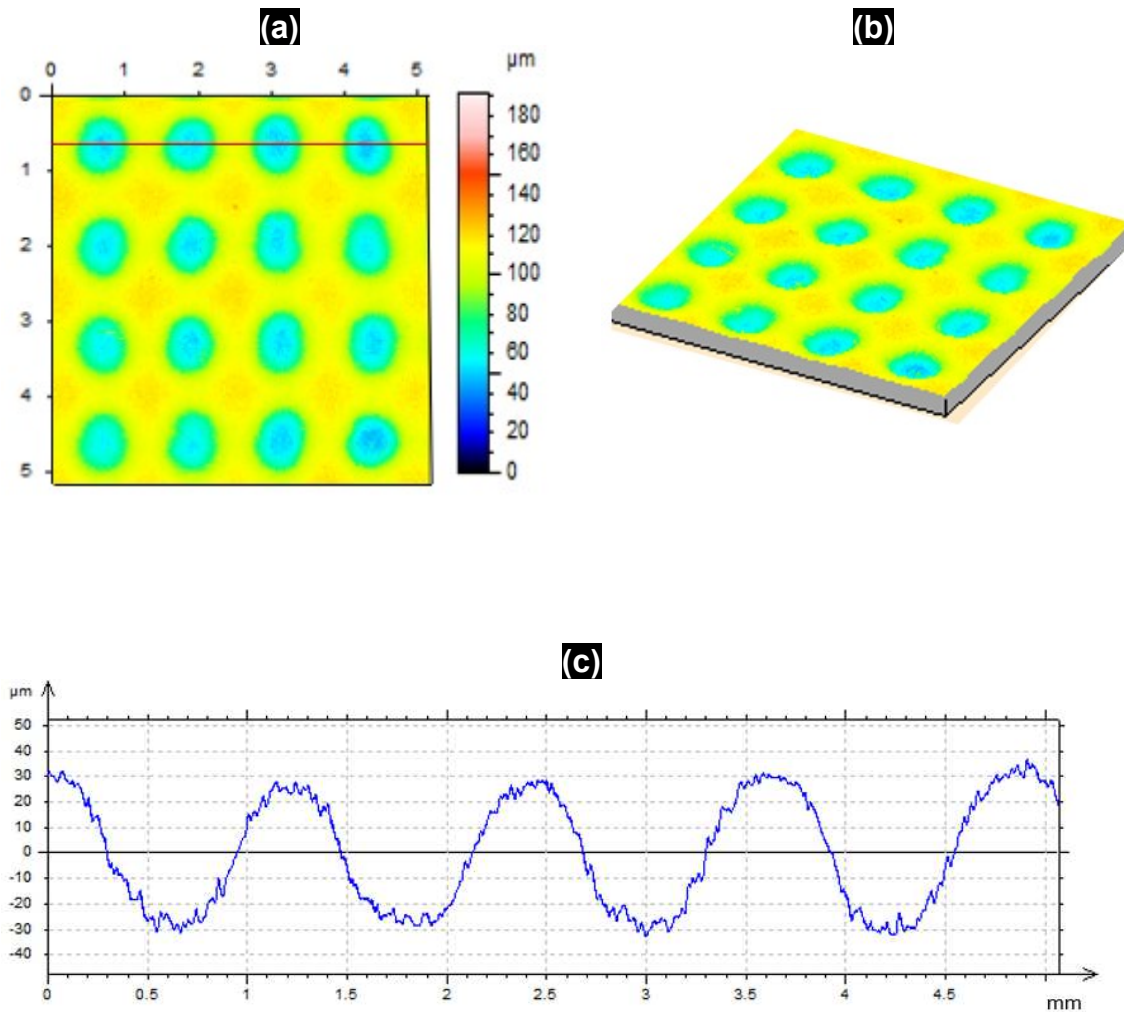


Figura 3.12 – Superfície texturizada com tempo de usinagem igual a 300 segundos e *gap* igual 200 μm: (a) interferometria, (b) representação 3D e (c) perfil de superfície correspondente à linha vermelha traçada em “a”.

Uma vez que as texturas fabricadas com *gap* igual a 100 μm apresentaram um acabamento satisfatório tanto com o tempo de 60 segundos quanto com o tempo de 300 segundos, optou-se por prosseguir a análise avaliando somente os ensaios realizados com *gap* de 100 μm.

A Figura 3.13 mostra os valores dos diâmetros médios dos bolsos superficiais texturizados nas amostras de aço AISI 1010 em função do tempo de usinagem. Há uma leve tendência de elevação do diâmetro em função do tempo.

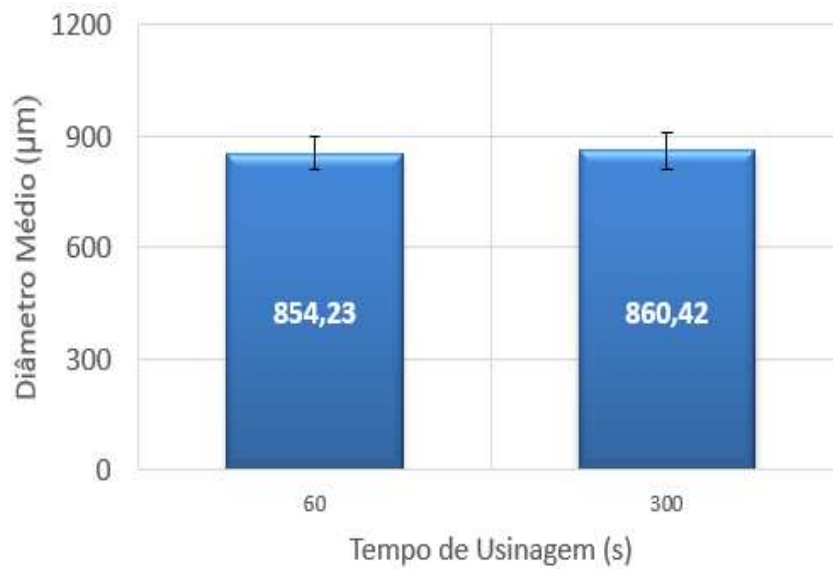


Figura 3.13 – Diâmetro médio em função do tempo de usinagem. *Gap* = 100 µm.

A Figura 3.14 mostra os valores das profundidades máximas médias dos bolsos superficiais texturizados nas amostras de aço AISI 1010 em função do tempo de usinagem. Como esperado, a profundidade máxima média correspondente ao ensaio de 300 segundos é maior (quase o triplo) da profundidade dos bolsos correspondentes a 60 segundos.

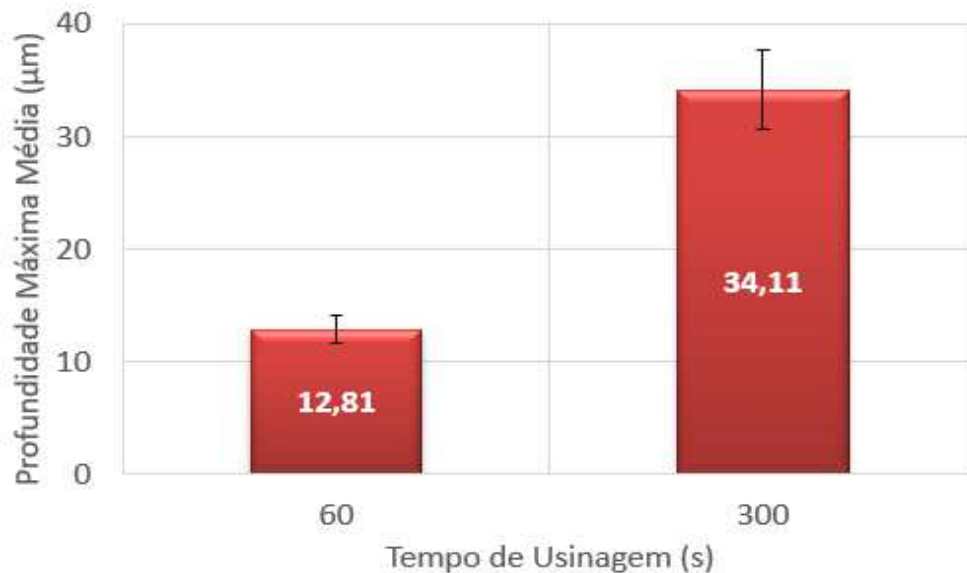


Figura 3.14 – Profundidade máxima média e tempo de usinagem. *Gap* = 100 µm.

A Figura 3.15 mostra a superfície texturizada de uma das amostras de aço AISI1010.

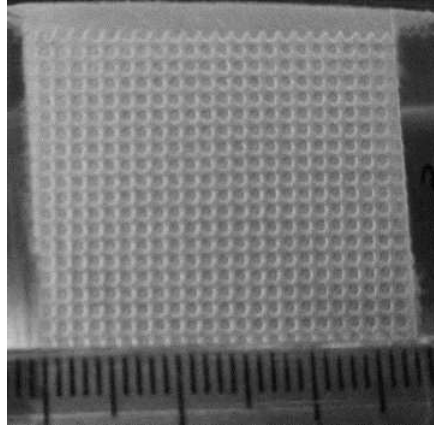


Figura 3.15 – Amostra de aço AISI 1010 texturizada com tempo de usinagem igual a 300 s e *gap* igual a 100 μm (escala da imagem em mm).

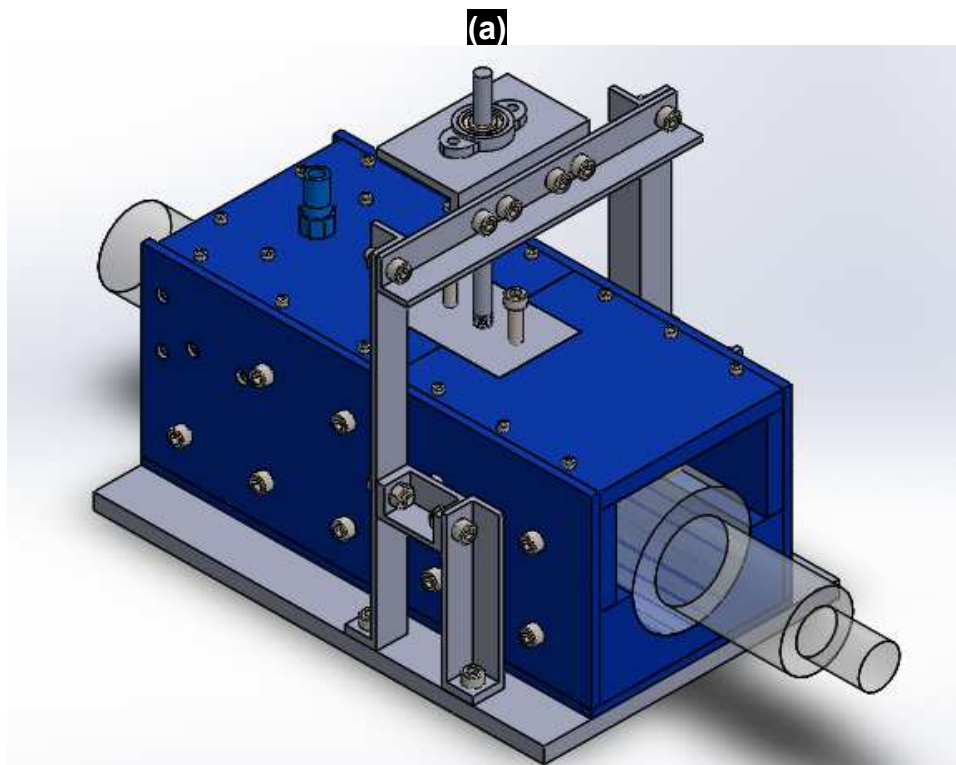
Conclui-se, portanto, que a câmara de texturização de superfícies planas desenvolvida neste trabalho se mostrou funcional nos testes preliminares e pode ser utilizada para a texturização das amostras extraídas dos cilindros de laminação a frio.

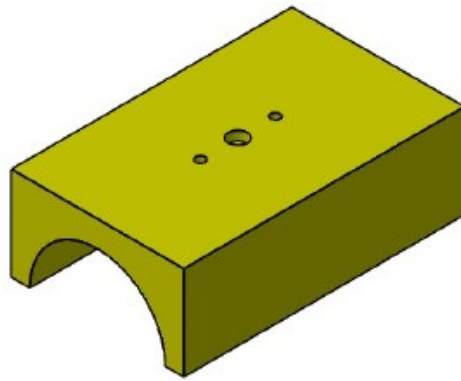
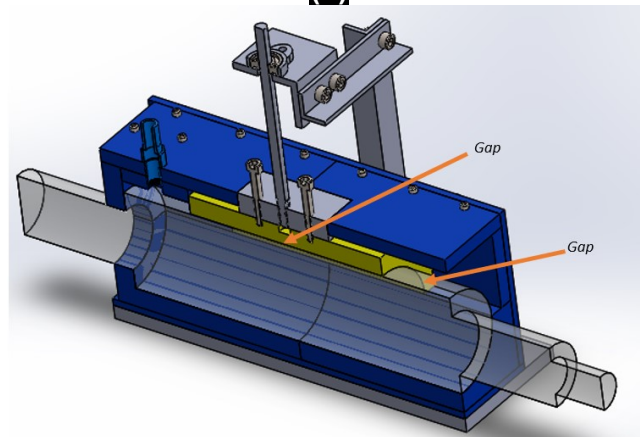
3.2 Câmara de Texturização de Superfícies Cilíndricas

O objetivo desta etapa foi construir uma câmara para texturizar, pelo método MECT, cilindros de laminação em escala piloto. A área do cilindro a ser texturizada corresponde à superfície externa de um cilindro com diâmetro de 72,2 mm e aproximadamente 150 mm de comprimento; essas são dimensões bastante superiores às utilizadas no trabalho de FERRI; DIAS; COSTA (2019). Inicialmente foi desenhado um dispositivo de texturização baseado nos trabalhos de FERRI; DIAS; COSTA (2019); entretanto no trabalho desses autores o dispositivo projetado não permite variação de *gap*, o que, neste trabalho, poderia ser necessário caso o *gap* escolhido não fosse adequado para texturizar o cilindro. Assim, um novo dispositivo de texturização de cilindro de laminação que permitisse a variação de *gap* foi idealizado. Dessa forma, para a execução desta etapa foi necessário:

- Desenvolver o projeto de uma câmara de texturização de cilindros;
- Executar a construção da câmara;
- Realizar a texturização de cilindro de aço ferramenta (validação do funcionamento).

O projeto de uma câmara de texturização para uma determinada superfície parte da ideia de que é necessário direcionar o fluxo de eletrólito para o *gap*. Além disso, é importante que durante o processo de texturização o fluxo permaneça contínuo sobre as regiões superficiais que se pretende texturizar. Levando-se em conta tais premissas, uma câmara foi idealizada, conforme ilustra a Figura 3.16. A Figura 3.16-a mostra a câmara montada. Com o objetivo de minimizar a perda de carga do fluxo de eletrólito e diminuir a área onde ocorre a dissolução anódica, decidiu-se projetar a câmara de modo que a área texturizada não compreendesse a totalidade da circunferência do cilindro. Dessa forma, a Figura 3.16-b mostra a ferramenta (amarela) e o cilindro (cinza) que são encaixados por pressão na câmara de texturização, como está ilustrado na Figura 3.16-c. Assim, forma-se o *gap* que consiste no espaço sobre a superfície do cilindro delimitado pela área da superfície côncava da ferramenta. Após a entrada na câmara, o eletrólito flui na direção horizontal pelo *gap* como mostra a Figura 3.16-d.



(b)**(c)****(d)**

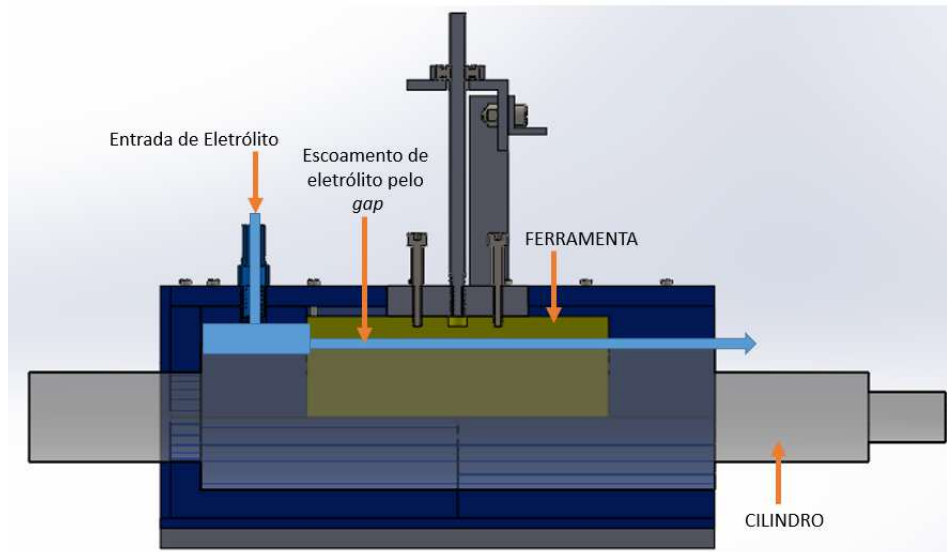


Figura 3.16 – Câmara projetada para texturização de cilindro de laminação: (a) câmara de texturização montada, (b) ferramenta (amarela) e cilindro (cinza, escala em mm), (c) vista em corte da câmara montada, (d) fluxo de eletrólito (azul claro) durante o processo de texturização.

Variar o *gap* entre uma ferramenta e uma peça com superfícies planas é relativamente simples, uma vez que é necessário apenas movimentar a ferramenta ou a peça perpendicularmente à direção do “plano” do *gap*. Desde que a superfície a ser texturizada não esteja inclinada em relação à superfície da ferramenta e não se tenha desvios de formas significativos, a ponto de influenciar na uniformidade do *gap*, é possível controlar a passagem de eletrólito, sobretudo em áreas pequenas, por exemplo, até 50 mm x 50 mm, como foi o caso da outra câmara projetada neste estudo. Entretanto, se tratando de uma ferramenta com superfície côncava e de uma peça com superfície convexa, variar o *gap* se torna uma tarefa mais complexa. Nesse caso, a ferramenta e a peça só seriam concêntricas para um determinado valor de *gap*, pois no caso de se movimentar ou a peça ou a ferramenta, na direção perpendicular à direção do fluxo de eletrólito, o conjunto não seria mais concêntrico, e, portanto, ocorreria uma variação não uniforme do *gap*, o que poderia resultar na obtenção de texturas com profundidades significativamente diferentes. Mesmo assim, a câmara foi projetada de maneira que a ferramenta pudesse ser movimentada na direção vertical, dessa forma é possível se obter pequenas variações de *gap* desde que essas variações não causem diferenças significativas nas profundidades das texturas.

O sistema de deslocamento da ferramenta está na Figura 3.17.

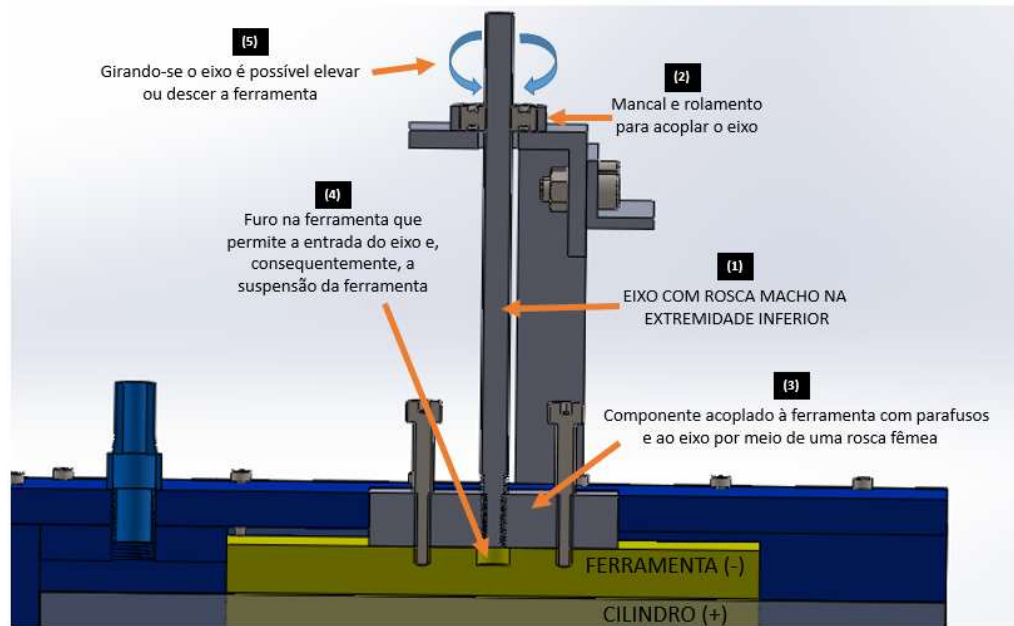


Figura 3.17 – Sistema de deslocamento da ferramenta para variação de *gap*: a parte superior de um eixo (1) é acoplada a um mancal de rolamento (2), enquanto a parte inferior do mesmo é acoplada a um componente preso à ferramenta por meio de parafusos (3). Quando o eixo (5) é girado a ferramenta é deslocada; se for deslocada para cima a extremidade inferior do eixo entra em um furo (4) presente na ferramenta para que seja possível ocorrer esse deslocamento.

Além disso, uma estrutura em aço inoxidável foi fabricada a fim de servir de base estrutural para câmara e para o sistema de deslocamento (Figura 3.18).

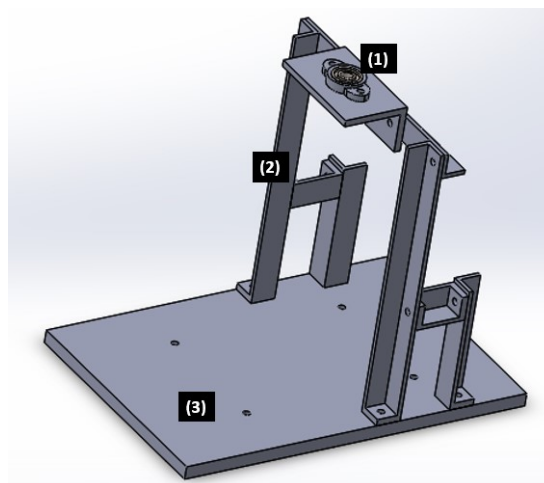


Figura 3.18 – Base estrutural: o mancal e o rolamento (1) são suportados por uma estrutura metálica (2), a qual está sobre uma chapa metálica (3) que serve de base para todo o conjunto da câmara de texturização.

Além das premissas referentes ao processo de texturização, o projeto da câmara deve levar em conta a fabricação da mesma. Dessa forma, a câmara foi dividida em quatro partes, a fim de viabilizar a sua fabricação em máquinas

convencionais de usinagem. Foram utilizadas chapas nas laterais e na parte inferior para reforçar a estrutura e evitar vazamentos (Figura 3.19)

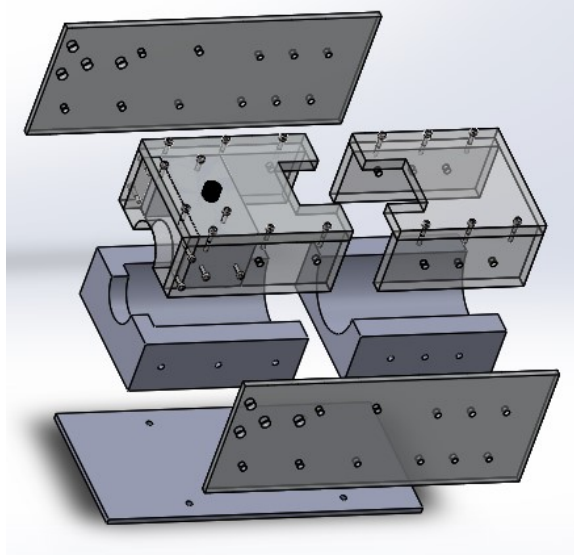


Figura 3.19 – Vista explodida da câmara de texturização de cilindros.

Os desenhos planos do cilindro e da ferramenta são mostrados na Figura 3.20. As dimensões da câmara e desenhos planos adicionais são mostrados no Apêndice B.

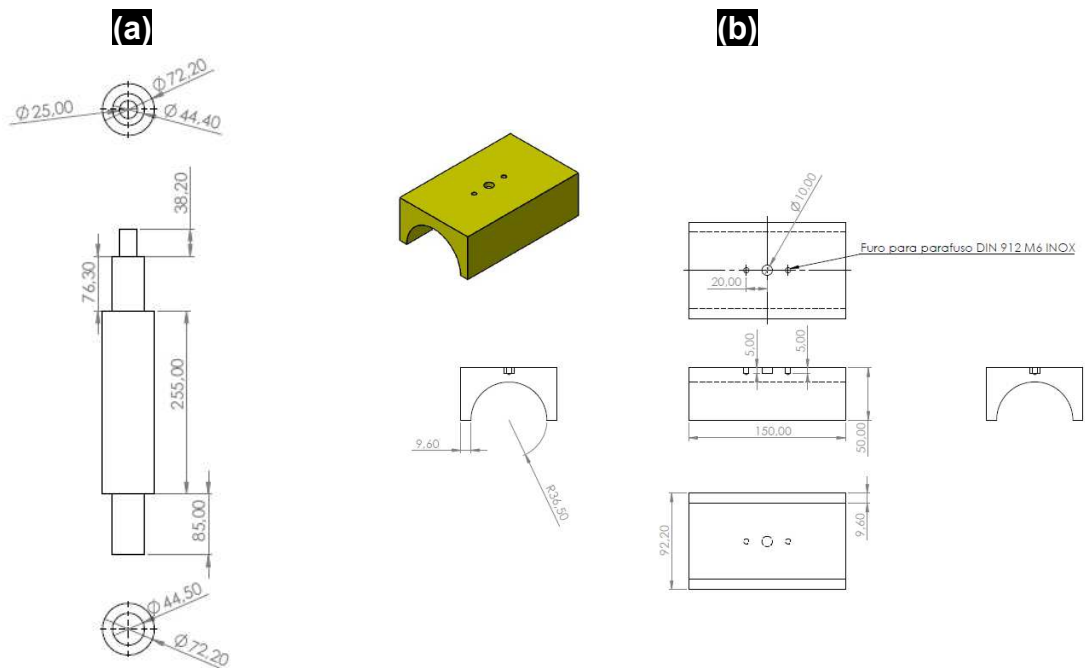


Figura 3.20 – Desenhos planos: (a) cilindro piloto de laminação e (b) ferramenta. Escala em mm.

A câmara foi fabricada através de processos convencionais de usinagem em uma empresa privada. A Tabela 3.3 mostra os materiais utilizados em cada componente.

Tabela 3.3 – Materiais selecionados para a fabricação da câmara de texturização de superfícies cilíndricas.

Componente	Material
Paredes da Câmara	Náilon (tecnil)
Máscara	Adesivo Vinil
Base Estrutural	Aço AISI 304
Ferramenta	Aço AISI 304

Após a idealização da câmara, procedeu-se com a construção da mesma. A Figura 3.21-a mostra a ferramenta fabricada. O processo de texturização ocorre somente na superfície do cilindro que está sob a região da ferramenta que contém a máscara. Somente uma parte da superfície da ferramenta é coberta por máscara; o restante é coberto com adesivo polimérico a fim de evitar o processo de texturização nessas regiões. Nesse caso, a área texturizada tem comprimento de 120 mm e largura de 60 mm. A Figura 3.21-b mostra a ferramenta e o cilindro, bem como uma escala de aproximadamente 300 mm apenas para se ter uma ideia do tamanho da ferramenta e do cilindro.

(a)



(b)

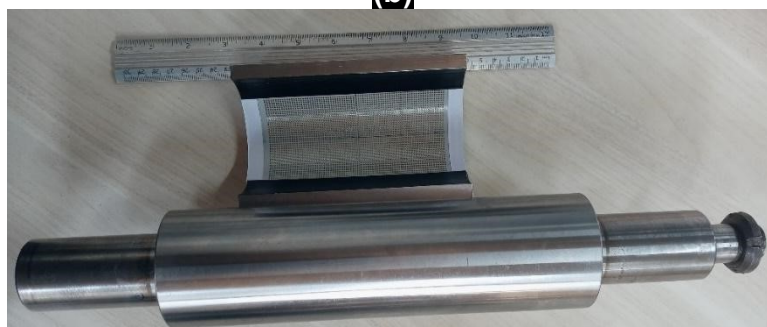


Figura 3.21 – Etapa de construção: (a) ferramenta com máscara sobre a sua superfície côncava e (b) ferramenta, cilindro e escala de 300 mm.

A Figura 3.22 mostra a ferramenta sobre o cilindro e a indicação da região onde se formará o *gap* quando esses dois componentes forem encaixados na câmara. O espaço inicial entre ferramenta e cilindro após o encaixe da ferramenta e do cilindro na câmara está definido como 400 μm . Como a máscara a ser colada na superfície da ferramenta tem aproximadamente 100 μm tem-se um *gap* de 300 μm .

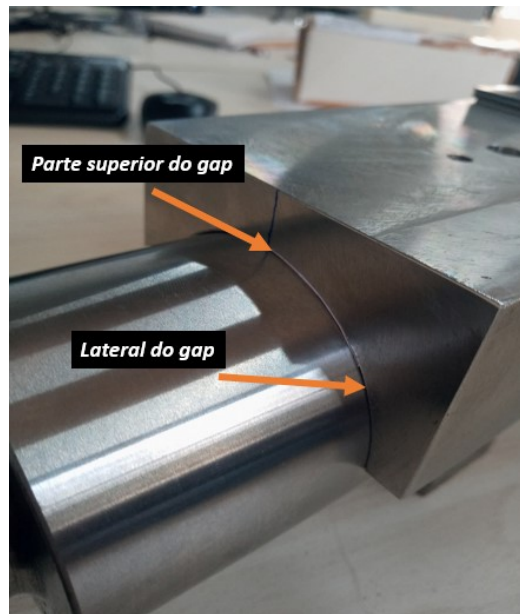


Figura 3.22 – Ferramenta sobre o cilindro e formação do *gap*.

A Figura 3.23-a mostra a ferramenta encaixada na câmara e a Figura 3.23-b mostra a ferramenta e o cilindro encaixados na câmara.

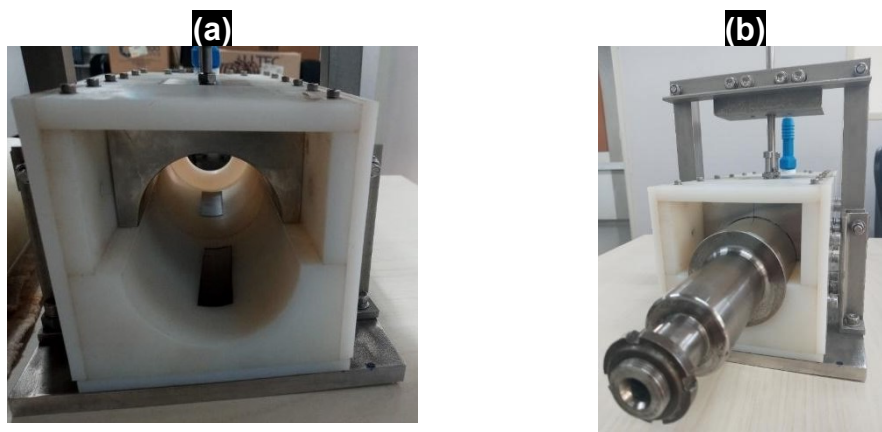


Figura 3.23 – Etapa de construção: (a) Ferramenta encaixada na câmara e (b) ferramenta e cilindro encaixados na câmara.

Durante a montagem da câmara notou-se que, em relação a como está no projeto, seria melhor inverter a chapa em “L”, indicada na Figura 3.24, que serve como base do mancal. Inverter a posição dessa base aproxima o mancal da ferramenta, dando mais estabilidade ao sistema de deslocamento da ferramenta.

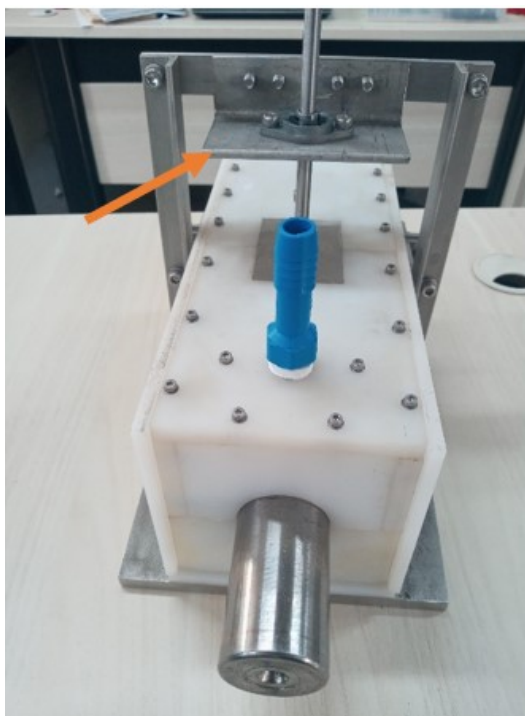


Figura 3.24 – Vista frontal da câmara com seta indicando a base do mancal de rolamento.

Após as etapas de idealização e construção da câmara, sucederam-se testes de texturização de cilindros metálicos. Neste caso, se torna muito oneroso realizar diversos testes preliminares como no caso das amostras planas, pois as dimensões dos cilindros utilizados em cada teste são consideravelmente maiores que aquelas das amostras com superfícies planas. O cilindro piloto utilizado nestes testes trata-se de um cilindro de laminação a frio de aço rápido fornecido pela Aperam South America e que será caracterizado no capítulo 4.

Com base nas texturas obtidas nas amostras planas de aço AISI 1010, inicialmente foram realizados ensaios com os seguintes parâmetros: tempo de usinagem de 300 segundos, tensão elétrica de 30 V e *gap* de 300 μm ; os outros parâmetros bem como a máscara, o sistema elétrico e a bomba de eletrólito foram os mesmos utilizados na texturização das superfícies planas. Esses parâmetros dos testes de texturização de cilindros são elencados na Tabela 3.4.

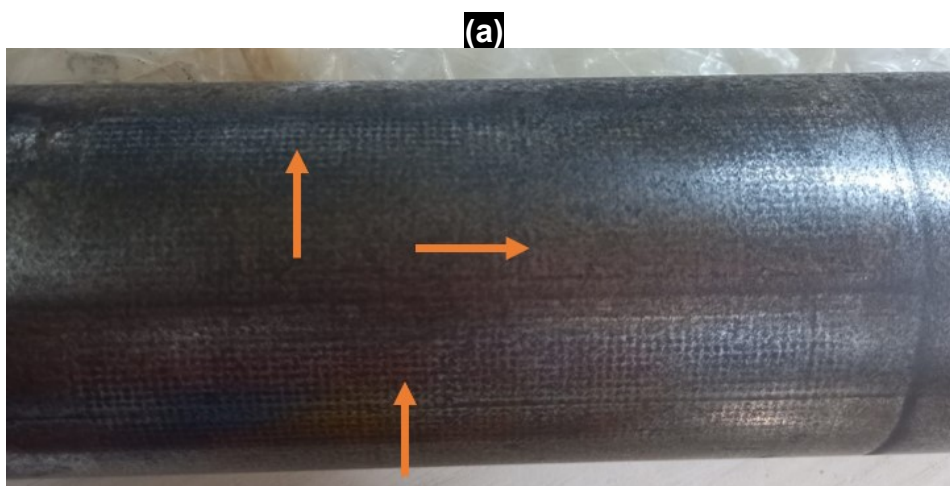
Tabela 3.4 – Testes de texturização em cilindro de laminação a frio.

Teste	<i>Gap</i> (μm)	Concentração de NaCl (g/L)	Vazão (mL/s)	Tensão (V)	Tempo (s)
	300	200	20	30	300

Após a texturização do cilindro, prosseguiu-se com as análises das texturas através da técnica de réplicas superficiais, uma vez que, devido às dimensões do cilindro, não foi possível analisar a superfície do mesmo diretamente no interferômetro. No processo de replicação de superfície foi utilizada uma resina de peróxido de dibenzoila e um catalisador de metacrilato de metila. Posteriormente utilizou-se um perfilômetro de contato Hommel Etamic, modelo T8000, para obtenção de perfis superficiais, os quais foram analisados no programa Mountains Map Universal®, versão 9, para a obtenção da representação da superfície cilíndrica texturizada.

3.2.1 Resultados dos testes da câmara de texturização de superfícies cilíndricas

A Figura 3.25-a mostra uma região de ensaio de 120 mm x 60 mm. A seta horizontal indica a região da superfície correspondente a parte superior do *gap*. As setas verticais indicam as regiões correspondentes a parte lateral do *gap*. Nota-se que na parte superior a texturização aparentemente não ocorreu ao passo que nas regiões laterais a remoção de material é mais evidente. A Figura 3.25-b mostra uma região texturizada com os mesmos parâmetros correspondentes a Figura 3.25-a, mas em uma área de 60 mm x 60 mm, a fim de melhorar a eficiência do processo de texturização, entretanto obteve-se resultados semelhantes ao primeiro caso, conforme indicado pelas setas.



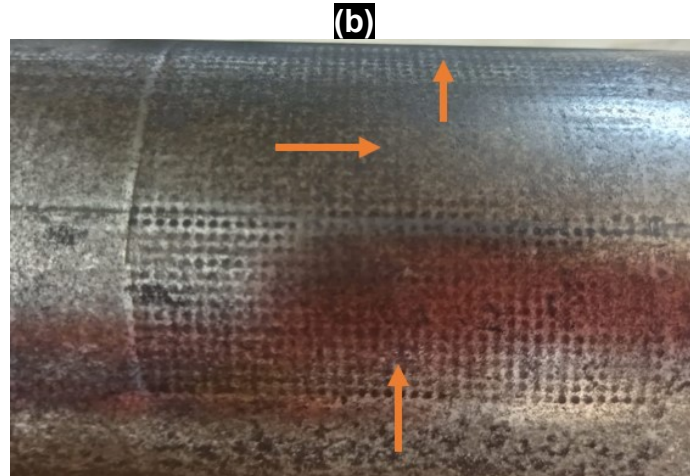


Figura 3.25 – Superfícies de cilindro texturizada: (a) área de 120 mm x 60 mm e (b) área de 60 mm x 60 mm. O sentido de escoamento do eletrólito é da esquerda para direita.

Variando parâmetros como tempo de texturização e concentração de eletrólito, FERRI (2019), através do método MECT, conseguiu fabricar com sucesso bolsos razoavelmente uniformes em superfícies cilíndricas, mas essas superfícies tinham dimensões bastante inferiores às utilizadas no presente trabalho. A Figura 3.26 mostra uma região da superfície texturizada do cilindro. Foi necessário inverter o eixo de altura da superfície por meio de uma função do programa de análise de dados topográficos para que a superfície replicada representasse a superfície do cilindro. Conforme foi observado anteriormente, não há uma formação uniforme de bolsos. As setas na imagem mostram dois bolsos claramente mais rasos que os demais. Maiores detalhes sobre as análises das superfícies das réplicas serão mostrados no capítulo 6.

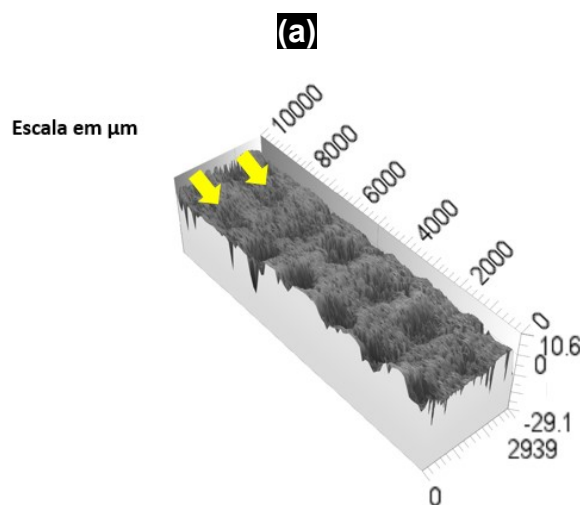


Figura 3.26 – Interferometria: réplica da superfície texturizada do cilindro de laminação.

3.2.2 Observações finais

As texturas produzidas na superfície do cilindro não apresentam aspecto geométrico uniforme. Há regiões que são texturizadas com profundidades mais rasas que outras, há ainda regiões que nem mesmo são texturizadas. Foram observados dois principais motivos para esses resultados. Em primeiro lugar, a elevada área a ser texturizada, em relação à área texturizada na câmara de superfícies planas, torna o controle do *gap* difícil, pois o comprimento da área que o eletrólito percorre no *gap* em cada ensaio é de 150 000 μm (comprimento da ferramenta) e desejou-se manter um *gap* uniforme de aproximadamente 300 μm ao longo desse comprimento. Os fatos de a superfície a ser texturizada ser cilíndrica e o fluxo de eletrólito entrar na câmara na direção horizontal fizeram com que houvesse um fluxo significativo não somente na direção axial do eixo do cilindro como se esperava, pois observou-se que parte desse eletrólito que entrava no *gap* na parte superior também escoava para as laterais, provavelmente gerando uma insuficiência de eletrólito na parte superior do *gap* em algum momento.

Concluiu-se, portanto, que é possível texturizar o cilindro. Entretanto, para a obtenção de texturas com um melhor acabamento é necessário corrigir tanto o fluxo de eletrólito, talvez com mais pontos de entradas no *gap*. Foram ainda realizados ensaios aumentando-se o *gap* para até 3 mm, o que melhorou o fluxo de eletrólito ao longo do *gap*, entretanto isso prejudicou a remoção de material do cilindro e não ocorreu texturização.

CAPITULO IV

Preparação de Amostras para Avaliação da Durabilidade das Texturas

4.1 Introdução

Um dos objetivos deste estudo é avaliar a durabilidade de texturas produzidas pelo método MECT em cilindros de laminação a frio. Porém, nos ensaios de laminação piloto um desgaste perceptível somente seria observado após tempos de laminação excessivamente longos, o que tornaria os ensaios inviáveis. Assim, para a avaliação da durabilidade das texturas é razoável utilizar ensaios realizados em laboratório que reproduzam os fenômenos tribológicos que ocorrem em processos de laminação a frio. Esse capítulo mostra o processo de obtenção e caracterização das amostras de cilindro de laminação para análise, via ensaios tribológicos em escala de laboratório, da durabilidade das texturas.

Neste trabalho o ensaio de deslizamento alternativo, com configuração cilindro sobre plano, foi utilizado para a avaliação da durabilidade das texturas. Esse cilindro do ensaio de deslizamento é um contracorpo de aço AISI 52100. As amostras de cilindro de laminação a frio, objeto de discussão deste capítulo, são os corpos dos ensaios de deslizamento e possuem superfícies planas.

Cilindros de laminação em escala piloto foram fornecidos pela Aperam South America (Brasil). A Figura 4.1, mostra as etapas que foram realizadas.

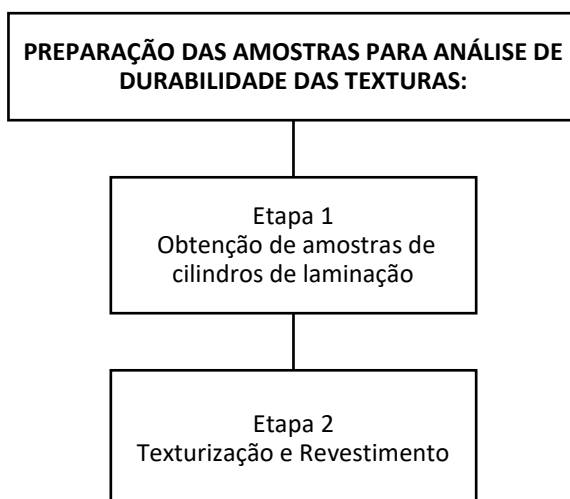


Figura 4.1 – Representação genérica das atividades que foram realizadas.

4.2 Procedimentos Experimentais

4.2.1 Obtenção das amostras de cilindros de laminação

A obtenção das amostras seguiu os passos mostrados na Figura 4.2.

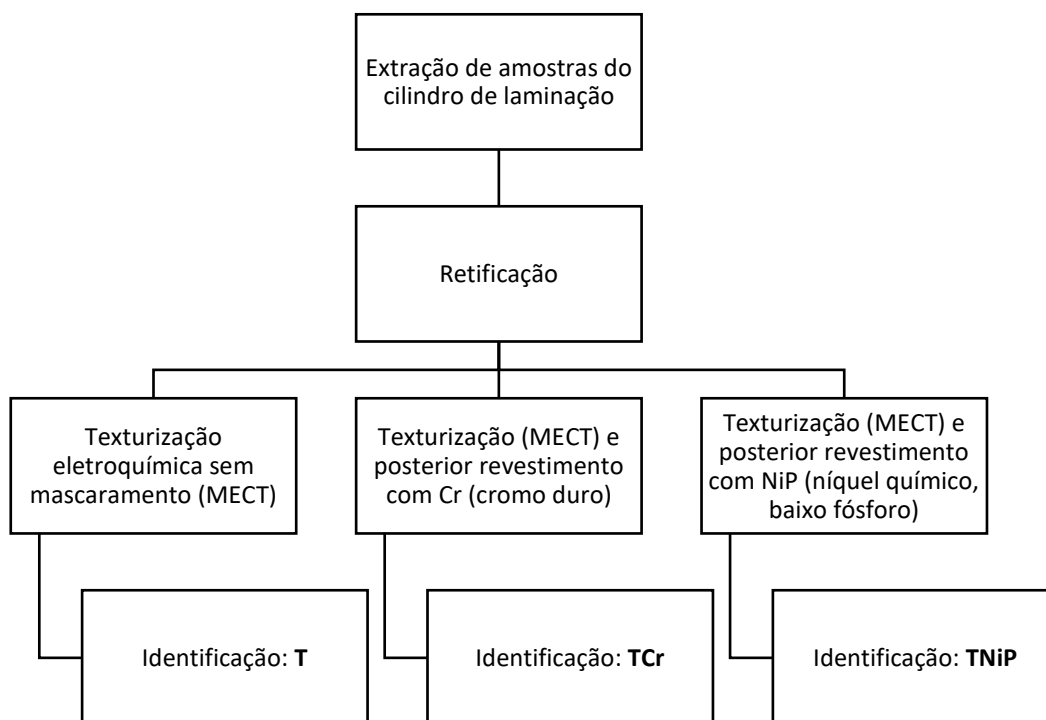


Figura 4.2 – Etapas de preparação e identificação das amostras.

Foi realizado o corte de um cilindro em amostras menores para análises em laboratório. A superfície de trabalho do cilindro possui comprimento de 255 mm, como está ilustrado na Figura 4.3-a. Dessa forma, optou-se por extrair regiões próximas a essa superfície a fim de realizar as devidas análises. Assim, os rebaixos das extremidades do cilindro foram removidos e, através de um equipamento de eletroerosão a fio do modelo FW 2U da marca GF AgieCgharmiles, foram removidas quatro peças da parte externa do cilindro, como ilustra a Figura 4.3-b. Posteriormente, as amostras foram obtidas através de cortes nessas quatro peças com uma cortadora metalográfica TECLAGO CM120. O disco de corte utilizado, com 350 mm de diâmetro externo e 2,5 mm de espessura, tinha como abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3). Portanto, foram obtidas amostras com uma das superfícies aproximadamente quadrada com lado de 50 mm, como mostra a Figura 4.3-c. A superfície de cada amostra a ser analisada é a plana.

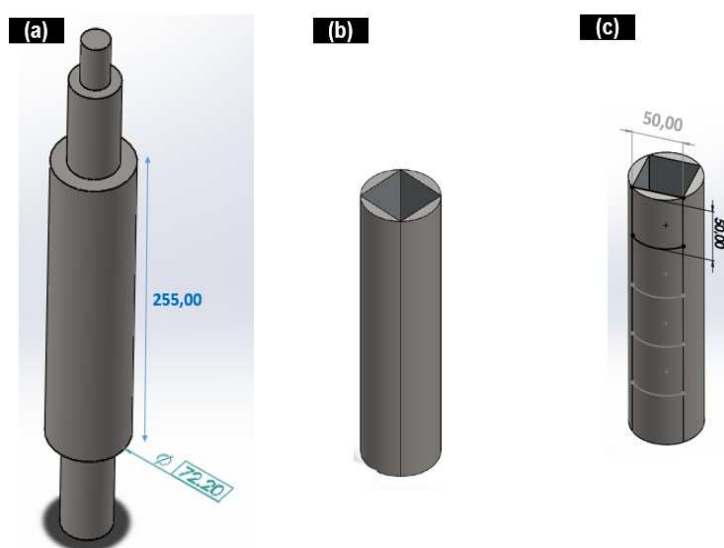


Figura 4.3 – Corte do cilindro em amostras menores: (a) cilindro, (b) remoção de peças da parte externa do cilindro, (c) indicação de corte de amostra (50 mm x 50 mm) para análise metalográfica e ensaios tribológicos.

A análise química do material do cilindro de laminação foi realizada por espectrometria de emissão óptica em um equipamento da marca Oxford Instruments modelo Foundry Master Pro. Seguindo o método de preparo padrão especificado pelo fabricante do equipamento, foi aplicado um lixamento leve, em lixa de abrasivo de zircônia com granulometria #80. Foram observadas três queimas com resultados apresentando boa repetibilidade e aspecto de ponto de queima excelente.

Como a superfície de trabalho dos cilindros é retificada, a superfície plana da amostra também foi retificada em uma retífica plana Tos BPH-20NA, com a rotação de 2875 RPM, utilizando óxido de alumínio como abrasivo e com diâmetro externo do rebolo de 254 mm. A Figura 4.4, obtida em um microscópio óptico, mostra a superfície retificada de uma amostra.

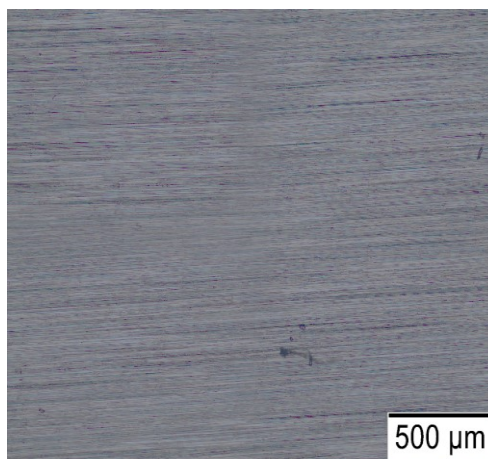


Figura 4.4 – Superfície retificada.

Posteriormente, procedeu-se com a caracterização metalográfica do material do cilindro. A preparação consistiu em lixar manualmente a amostra analisada com lixas d'água com granulometria de 80 mesh, 120 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh, 600 mesh e 1200 mesh. O polimento foi realizado em uma politriz Arotec APL-4 com pasta de óxido de alumínio (Al_2O_3) com granulação de 1 μm . Logo em seguida realizou-se um ataque, por imersão, com Nital 2 % durante 120 s.

4.2.2 Texturização e Revestimento

Nos testes de validação da câmara de texturização de superfícies planas (capítulo 3), a condição de ensaio correspondente ao tempo de usinagem de 300 segundos e o *gap* de 100 μm resultaram em texturas obtidas com aspecto geométrico satisfatório em amostras de aço AISI 1010. Assim, optou-se por utilizar essa mesma condição de ensaio (Tabela 4.1) para texturizar as amostras extraídas de cilindros de laminação a frio. A máscara também é a mesma (diâmetro médio dos furos = 722 μm ; lado médio ou distância entre o centro dos furos = 1 225 μm).

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados na texturização das amostras de cilindro de laminação a frio.

Gap (μm)	Concentração de NaCl (g/L)	Vazão (mL/s)	Tensão (V)	Tempo (s)
100	200	20	30	300

As deposições dos revestimentos de cromo duro e de níquel químico, baixo fósforo, foram realizadas pela empresa COATINGTEC REVESTIMENTOS TÉCNICOS DE METAIS LTDA M. Essa empresa está localizada em São Bernardo do Campo (SP-Brasil) e possui certificação ISO 9001. A espessura do revestimento de cromo duro foi definida para ficar na faixa de 5 a 10 μm . A espessura do revestimento de níquel químico foi definida para ficar na faixa de 15 a 20 μm . Esses valores de espessura foram selecionados com base no trabalho de GONÇALVES JUNIOR (2016).

Avaliar parâmetros topográficos bidimensionais nas superfícies não ensaiadas é importante para observar como os revestimentos afetaram os perfis superficiais das amostras somente texturizadas. Além disso, é útil também para verificar como a texturização afetou as amostras somente retificadas. Dessa forma, a quantificação da topografia das superfícies não ensaiadas foi realizada utilizando-se parâmetros topográficos bidimensionais. Esses parâmetros estão elencados na Tabela 4.2. Maiores detalhes sobre eles podem ser encontrados na ABNT NBR ISO 4287: 2002 e em GADELMAWLA *et al.* (2002).

Tabela 4.2 – Parâmetros topográficos utilizados para avaliação das superfícies não ensaiadas.

Símbolo	Nome do Parâmetro	Família	Descrição	Unidade
Rq	Rugosidade quadrática média	Amplitude	Correspondente ao desvio padrão da distribuição de altura	μm
Rk	Profundidade de Rugosidade do núcleo	Funcional	Associado à porção da superfície que suporta o carregamento	μm
Rpk	Altura reduzida do pico	Funcional	Relacionado à região superficial que se desgastará durante a carga inicial	μm
Rvk	Altura reduzida do vale	Funcional	Associado à superfície que absorverá a maior parte do lubrificante	μm

Parâmetros tridimensionais são utilizados no capítulo 5, na análise das amostras ensaiadas via ensaio de deslizamento alternativo.

4.2.3 Equipamentos

Um microscópio óptico Olympus BX51m foi utilizado para obtenção das micrografias.

As análises metalográficas do material do cilindro de laminação foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um equipamento Vega3

da marca Tescan. As análises metalográficas utilizando espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram executadas em um equipamento da marca Oxford.

A avaliação da morfologia das superfícies texturizadas e revestidas, bem como as análises de EDS das mesmas, foram realizadas em um MEV da Hitachi High-Technologies, modelo TM3000.

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados em um microdurômetro HVM Micro Hardness Tester da Shimadzu, sendo a carga de 100 g com o tempo de 15 segundos.

As interferometrias foram feitas em um Interferômetro Taylor Hobson Talysurf CLI 2000®, com taxa de medição de 500 $\mu\text{m/s}$, usando modo de medição contínua, com espaçamento de 1 μm x 10 μm , sendo que a maior densidade de pontos por μm ocorre na direção perpendicular em que acontecerá o deslizamento nos ensaios tribológicos.

As análises das topografias obtidas por interferometria foram realizadas através do software Digital Surf MountainsLab Premium 9®. Antes das medições de geometria dos bolsos e parâmetros de topografia foi realizado o nivelamento da superfície e nenhum filtro de ondulação foi aplicado. As medições dos diâmetros e profundidades dos bolsos fabricados foram realizadas por meio da ferramenta “análise de partículas” que é fornecida no MountainsLab.

4.3 Resultados e Discussões

4.3.1 Caracterização do material do cilindro

A Tabela 4.3, mostra a composição química do material do cilindro piloto de laminação. A microdureza Vickers medida do material apresentou o seguinte valor: $802,75 \pm 29,15 \text{ HV}_{0,1}$.

Tabela 4.3 – Composição do material do cilindro (porcentagem em peso).

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
0,851	0,245	0,375	4,16	8,13	0,199	2,24

As micrografias do material do cilindro (Figura 4.5) mostraram que a microestrutura do material é constituída por uma matriz com grãos nos quais, no

interior, há a presença de pequenas fases dispersas que parecem ser precipitados (Figura 4.5-a). Além disso, é possível notar que aparentemente há regiões totalmente brancas caracterizando a presença de outra fase (Figura 4.5-b). A Figura 4.5-c evidencia melhor os precipitados dispersos no interior dos grãos.

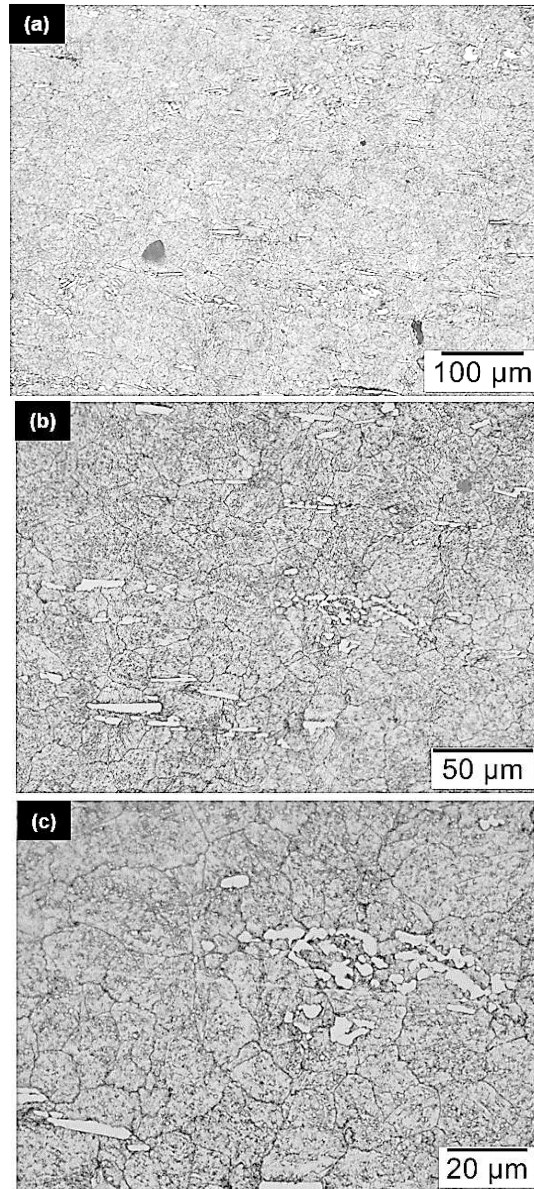


Figura 4.5 – Micrografias da superfície das amostras de cilindro de laminação em diferentes aumentos: (a) 200X, (b) 500X, (c) 1000X.

A Figura 4.6 mostra a imagem da superfície de uma amostra obtida através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando elétrons retroespalhados (BSE). Nota-se que, de fato, os grãos claros maiores observados por microscopia ótica possuem composição química diferente da matriz e que são ricos em elementos de número atômico maior que a matriz.

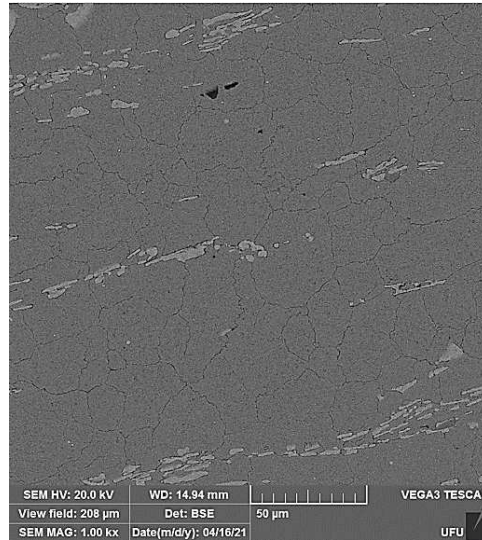
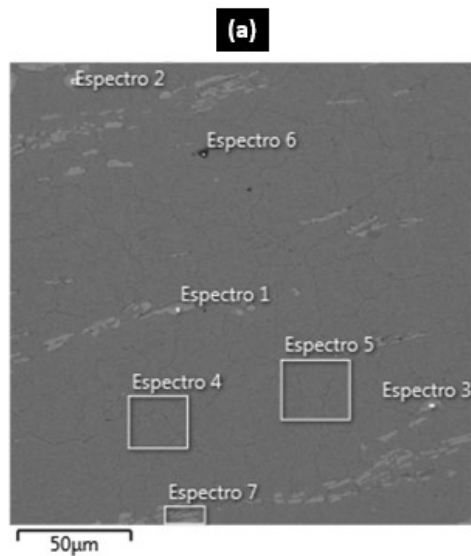


Figura 4.6 – Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, de uma região da superfície de uma amostra de cilindro.

A Figura 4.7-a mostra uma imagem obtida por MEV (BSE) com os pontos e áreas onde foram realizadas as análises de EDS. Todas as análises realizadas apresentaram a presença de Cr, V e Mo, além de Fe e C. Para exemplificar, as Figura 4.7-b, Figura 4.7-c e Figura 4.7-d mostram as análises dos pontos 1 e 2 e da área 4, respectivamente. Dessa forma, prosseguiu-se com obtenção dos mapas composicionais por EDS a fim de que informações mais conclusivas fossem extraídas.



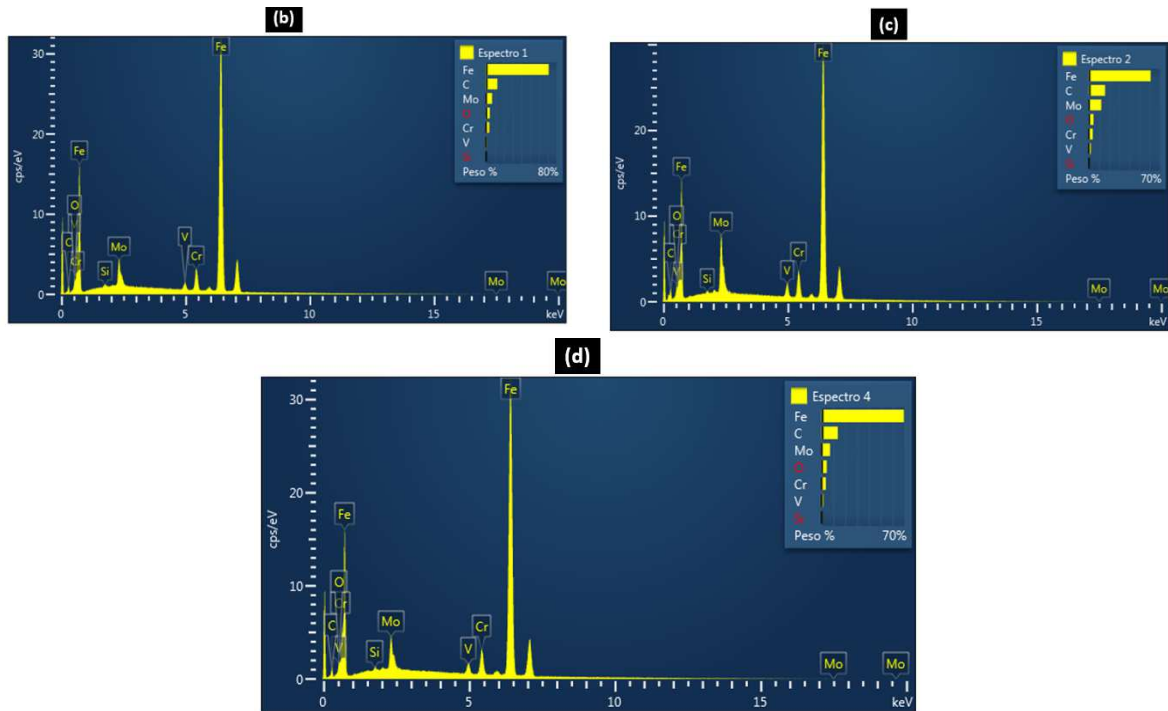
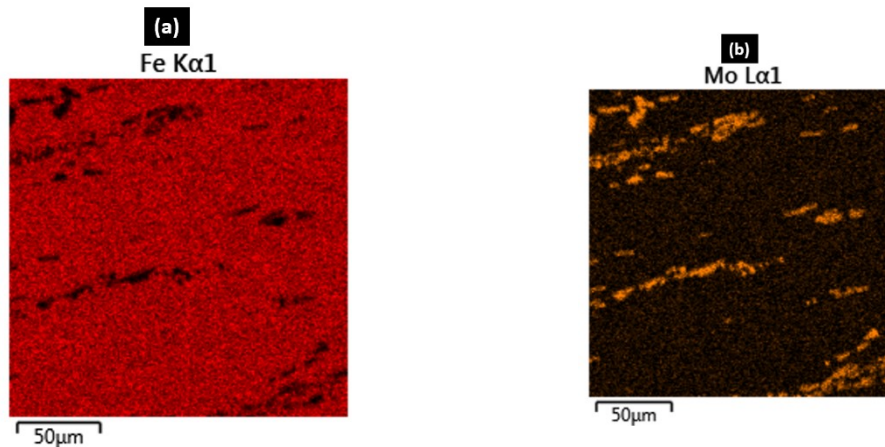


Figura 4.7 – Análises de EDS: (a) Microscopia eletrônica de varredura (BSE) com a indicação dos pontos e áreas onde foram realizadas as análises, (b) análise de EDS para o ponto 1, (c) análise de EDS para o ponto 2, (d) análise de EDS para a área 4.

A Figura 4.8 mostra os mapas composicionais obtidos através de EDS referentes à Figura 4.6. Observa-se que o Cr, O e C estão dispersos de forma quase homogênea ao longo da região analisada. Nas fases visualizadas como claras na microscopia ótica observa-se o empobrecimento de Fe, mostrando que são fases ricas em Mo (Figura 4.8-b) e V (Figura 4.8-d). Isso sugere que se tratam de carbonetos primários de molibdênio e vanádio, o que poderia explicar a dureza relativamente alta do material.



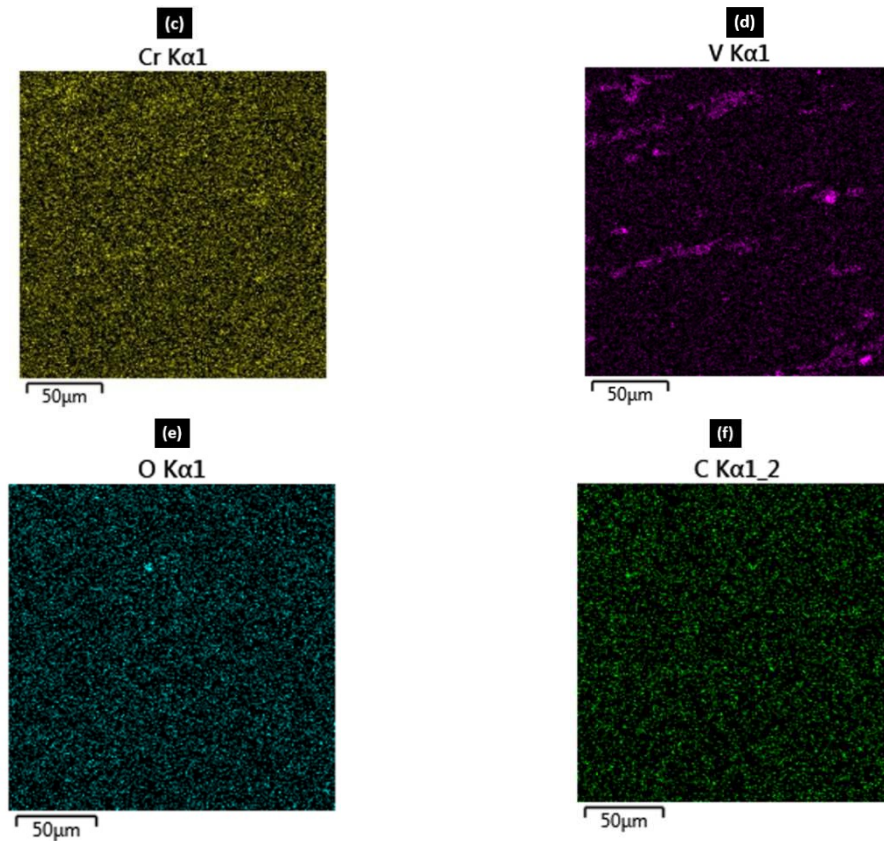


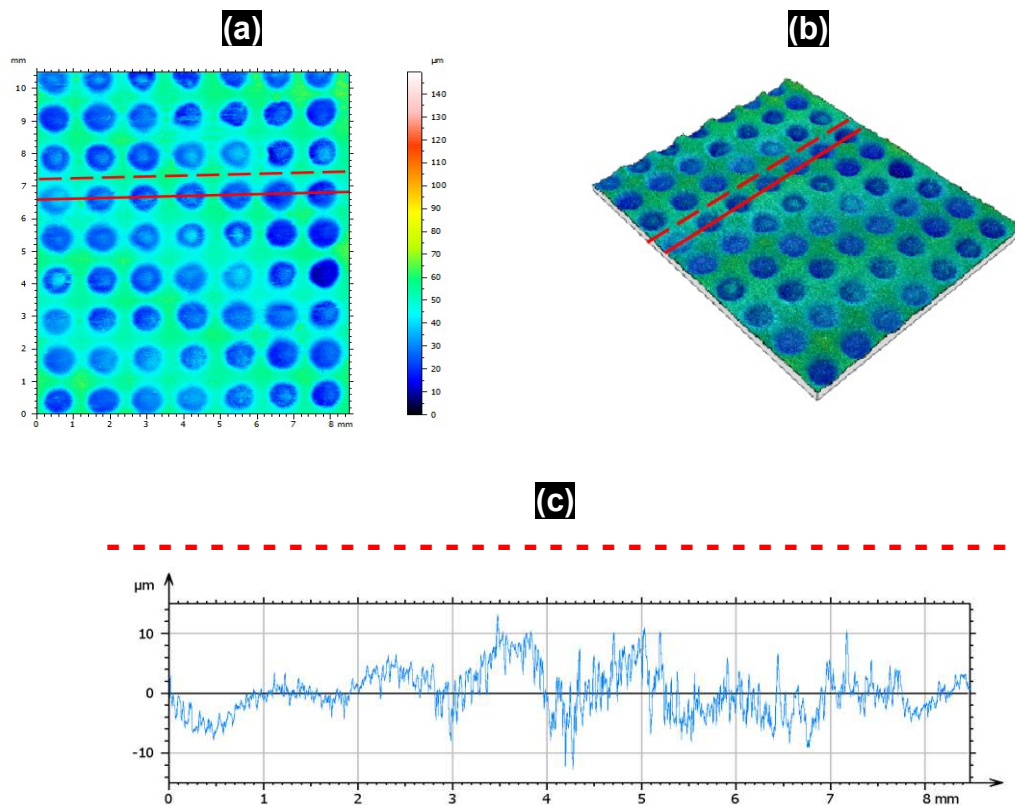
Figura 4.8 – Análises de EDS com mapas composicionais referentes à Figura 5.2: (a) Fe, (b) Mo, (c) Cr, (d) V, (e) O e (f) C.

A análise da microestrutura sugere que o material do cilindro de laminação fornecido pela Aperam South América trata-se de um aço rápido rico em molibdênio. Aparentemente o material foi temperado e revenido e possui em sua microestrutura carbonetos primários e talvez também contenha carbonetos secundários precipitados durante as etapas de revenimento (FRAGOSO, 2015).

4.3.2 Texturização das amostras do cilindro de laminação

A Figura 4.9-a mostra a interferometria de uma amostra de cilindro de laminação texturizada. Nota-se que os padrões de textura reproduziram as características presentes na máscara, ou seja, foram fabricadas texturas com geometria de bolsos regularmente espaçados. Pode-se concluir, portanto, que a superfície foi texturizada com sucesso. A linha contínua e a tracejada indicam onde foram extraídos perfis de superfícies para análise.

Ainda com relação à Figura 9-a, nota-se que alguns bolsos possuem uma espécie de ressalto no fundo e outros não, o que pode estar associado a uma deficiência de eletrólito nessas regiões durante o processo de texturização, talvez devido a um *gap* não uniforme, isto é, um *gap* com regiões com diferentes distâncias entre a peça e a ferramenta. A Figura 4.9-b mostra uma vista em 3D da Figura 4.9-a. A Figura 4.9-c e a Figura 4.9-d mostram, respectivamente, um perfil de superfície de uma região entre bolsos e um perfil de superfície que intercepta uma fileira de bolsos, conforme indicado pelas linhas presentes na Figura 4.9-a. Nota-se que o perfil da região entre bolsos não ficou intacto ao processo de texturização, pois, aparentemente, ainda que de forma pouco acentuada, esse perfil reproduz características do perfil correspondente à fileira de bolsos. Isso demonstra que a remoção de material que efetivamente é convertida em texturas, no processo de texturização eletroquímica sem mascaramento, ocorre não somente nas regiões da peça não protegidas pela máscara, mas também naquelas protegidas, ainda que de forma menos intensa. Esse fenômeno é típico do processo MECT, conforme relatado na literatura (RODRIGUES *et al.*, 2020)



(d)

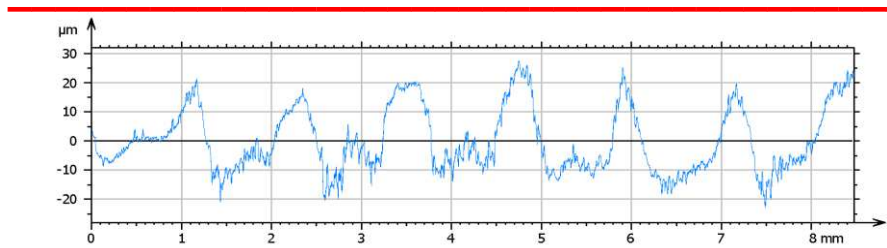


Figura 4.9 – Amostra texturizada de cilindro de laminação: (a) interferometria, (b) interferometria em 3D, (c) perfil de superfície de uma região entre bolsos e (d) perfil de superfície que intercepta uma fileira de bolsos.

Na Tabela 4.4 são mostrados o diâmetro médio ($849,31 \pm 21,95 \mu\text{m}$) e a profundidade máxima média das texturas ($25,36 \pm 3,43 \mu\text{m}$), isto é, a média aritmética das máximas profundidades dos bolsos analisados. Como esperado, o diâmetro médio dos bolsos é mais elevado que o diâmetro médio dos furos na máscara ($722 \mu\text{m}$). A profundidade máxima média é menor que no caso da texturização de aço AISI 1010 ($34,11 \mu\text{m}$), o que já era esperado, uma vez que o material do cilindro de laminação possui elementos de liga como cromo e níquel.

Tabela 4.4 – Dimensões das texturas produzidas na superfície somente texturizada (T).

Diâmetro Médio (μm)	Profundidade Máxima Média (μm)
$849,31 \pm 21,95$	$25,36 \pm 3,43$

Na Figura 4.10 são mostrados os parâmetros de rugosidade R_q , R_k , R_{pk} e R_{vk} nas regiões entre bolsos de uma superfície somente texturizada e também em uma superfície não texturizada, isto é, apenas retificada. Após o processo de texturização o parâmetro R_q se torna 18 vezes maior, o que mostra que a remoção eletroquímica de material tornou a superfície mais rugosa. Os parâmetros R_k , R_{pk} e R_{vk} também aumentam pelo menos 18 vezes em relação à superfície não texturizada.

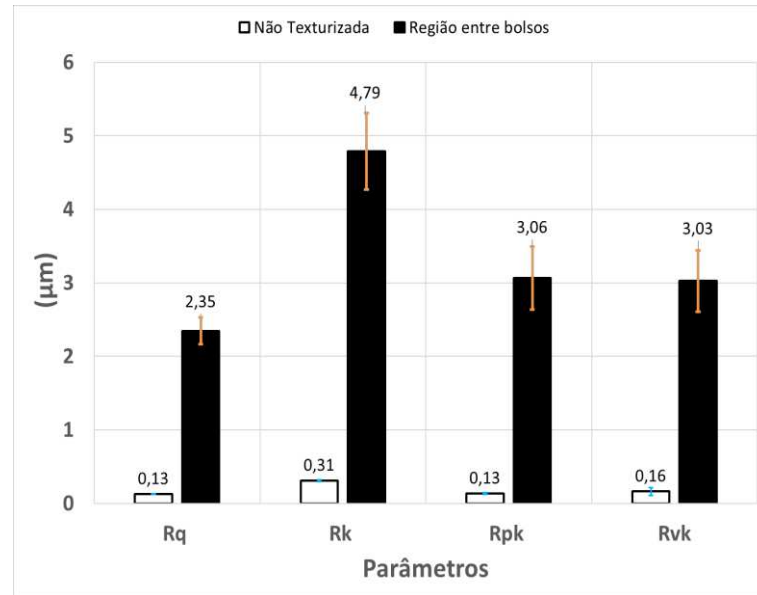


Figura 4.10 – Parâmetros de Rugosidade Rq, Rk, Rpk e Rvk nas regiões entre bolsos em uma superfície somente texturizada e também em uma superfície não texturizada.

4.3.3 Revestimento das amostras do cilindro de laminação

A medição da microdureza Vickers da superfície revestida com cromo duro resultou em $869,1 \pm 30,71 \text{ HV}_{0,1}$. Esse valor de microdureza está de acordo com o observado na literatura (GONÇALVES JÚNIOR, 2016). Além disso, quando utilizado na indústria metal mecânica, usualmente o revestimento de cromo duro eletrodepositado possui uma dureza entre de 800 a 1000 $\text{HV}_{0,1}$ (SIMÃO; ASPINWALL, 1999).

A Figura 4.11-a mostra a interferometria de uma amostra de cilindro de laminação texturizada e revestida com cromo duro. A Figura 4.11-b mostra uma vista em 3D da Figura 4.11-a. A linha contínua e a tracejada indicam onde foram extraídos perfis de superfícies para análise.

A Figura 4.11-c e a Figura 4.11-d mostram, respectivamente, um perfil de superfície de uma região entre bolsos e um perfil de superfície que intercepta uma fileira de bolsos, conforme indicado pelas linhas presentes na Figura 4.11-a. Nota-se que o perfil da região entre bolsos possui picos mais largos que aqueles presentes no perfil da região entre bolsos da superfície sem revestimento (Figura 4.9-c). Talvez a deposição de cromo duro tenha sido tal que uma porção de revestimento tenha coberto um ou mais picos e se tornado um só pico maior e mais largo. Com relação ao perfil de superfície que intercepta uma fileira de bolsos, percebe-se que o

revestimento de cromo duro acompanhou a geometria das texturas durante a sua deposição.

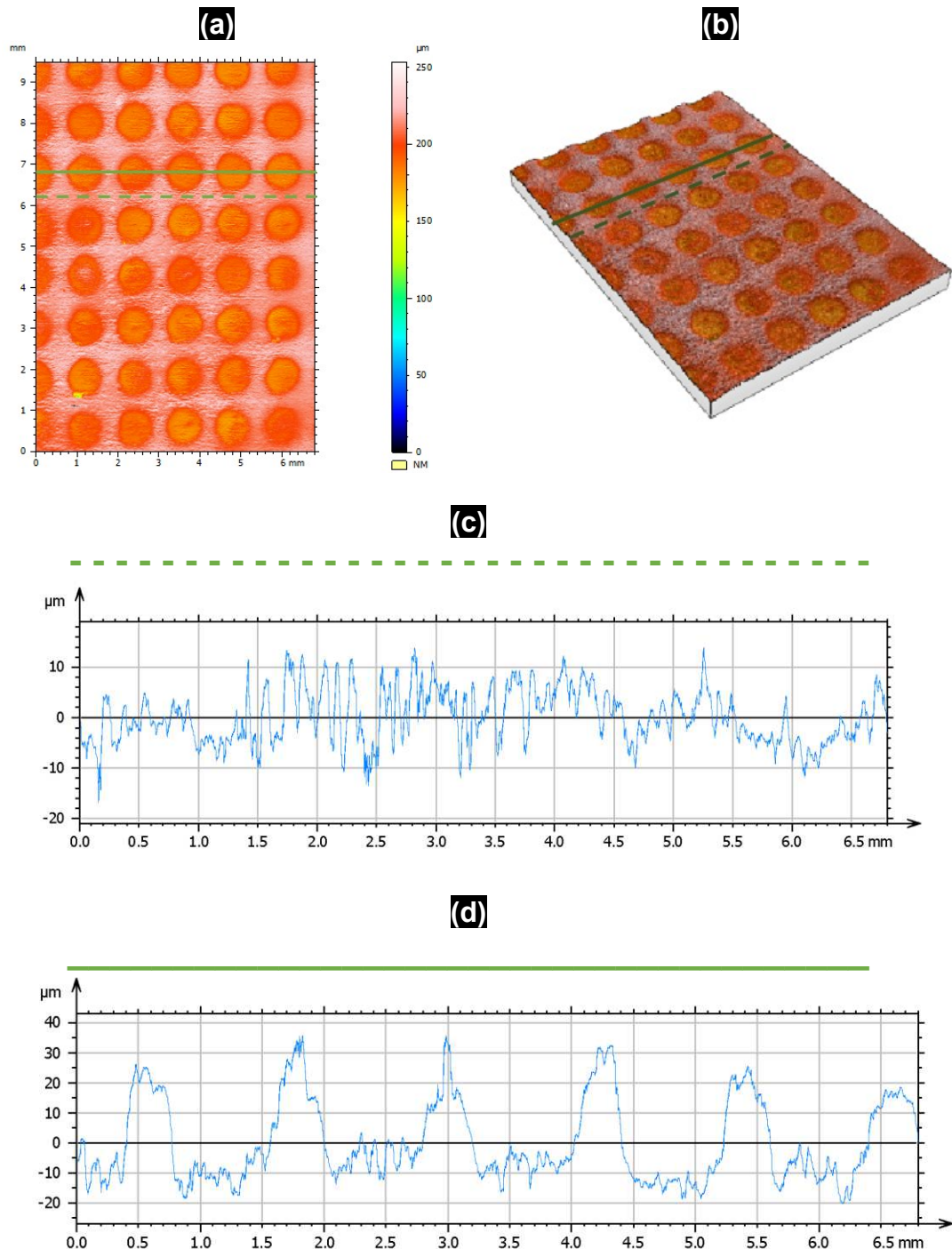


Figura 4.11 – Amostra de cilindro de laminação texturizada e revestida com cromo duro: (a) interferometria, (b) interferometria em 3D, (c) perfil de superfície de uma região entre bolsos e (d) perfil de superfície que intercepta uma fileira de bolsos.

Na Tabela 4.5 são mostrados o diâmetro médio ($758,12 \pm 7,02 \mu\text{m}$) e a profundidade máxima média das texturas ($29,73 \pm 2,15 \mu\text{m}$). O diâmetro médio dos bolsos é menor que o diâmetro médio dos bolsos na superfície sem revestimento ($849,31 \mu\text{m} \pm 21,95$). É possível que durante a deposição a camada de revestimento

depositada nas paredes dos bolsos tenha ficado um pouco mais espessa e, portanto, reduzido o diâmetro dos bolsos. Este comportamento provavelmente resulta do efeito de borda comum em processos eletroquímicos, onde a densidade de corrente é maior nas irregularidades da superfície. A profundidade máxima média não é muito diferente daquela encontrada quando a superfície não é revestida ($25,36 \mu\text{m} \pm 3,43$), o que indica que o revestimento de cromo duro não alterou de maneira significativa a profundidade dos bolsos.

Tabela 4.5 – Dimensões das texturas produzidas na superfície texturizada e revestida com cromo duro (TCr).

Diâmetro Médio (μm)	Profundidade Máxima Média (μm)
$758,12 \pm 7,02$	$29,73 \pm 2,15$

Na Figura 4.12 são mostrados os parâmetros de rugosidade R_q , R_k , R_{pk} e R_{vk} nas regiões entre bolsos de uma superfície texturizada e revestida com cromo duro. Todos os parâmetros são maiores que aqueles observados na superfície somente texturizada (Figura 4.10). Um maior valor de R_q indica que o revestimento de cromo duro deixou a superfície mais rugosa. Por outro lado, um maior valor de R_k sugere um aumento da capacidade de apoio na região entre os bolsos.

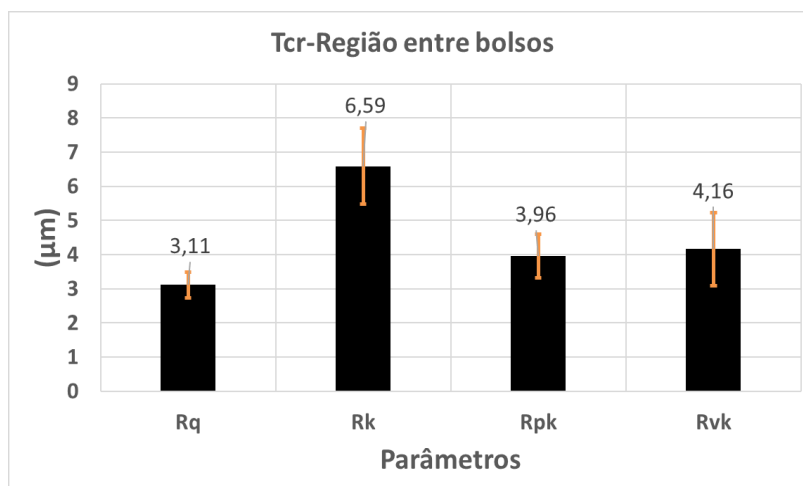
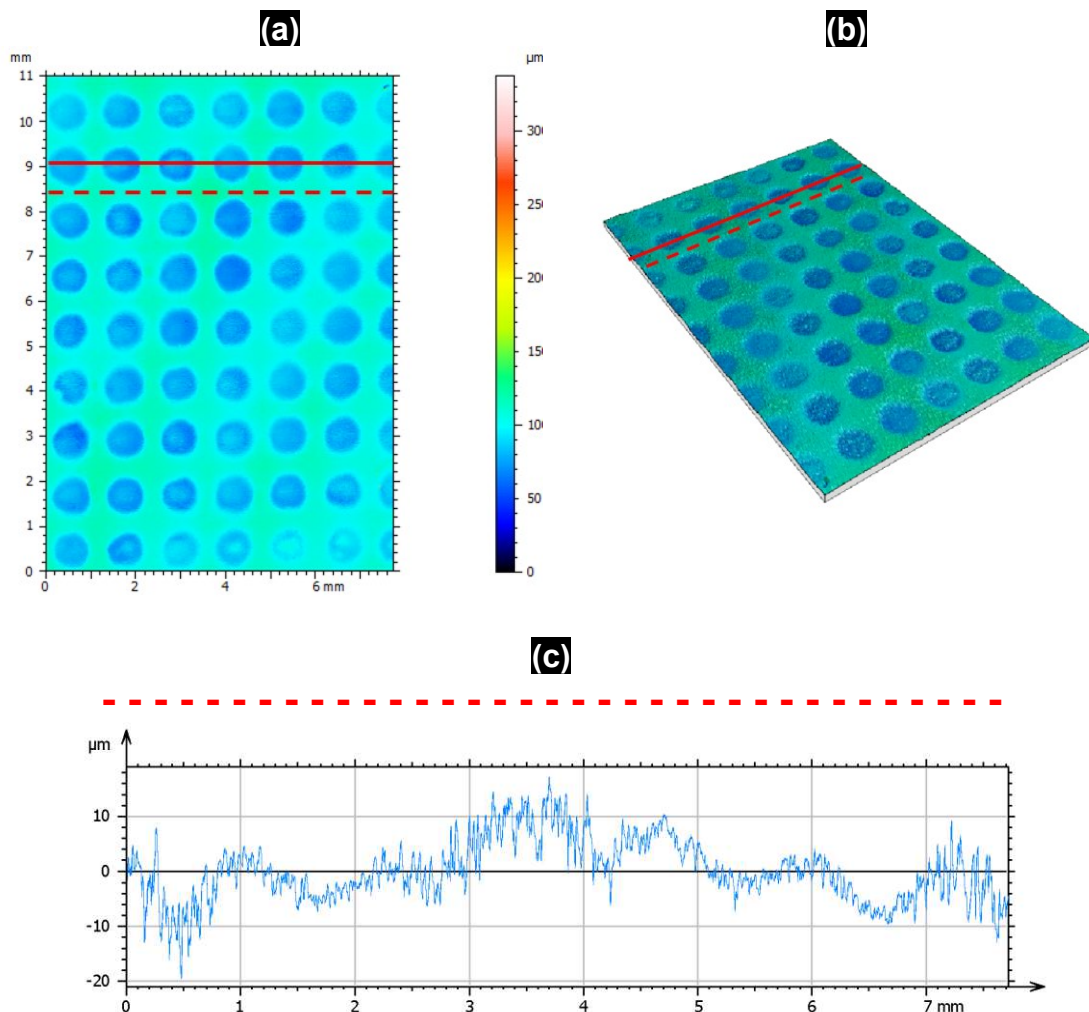


Figura 4.12 – Parâmetros de rugosidade R_q , R_k , R_{pk} e R_{vk} nas regiões entre bolsos de uma superfície texturizada e revestida com cromo duro.

A microdureza Vickers da superfície revestida com níquel químico resultou em $877,9 \pm 39,75 \text{ HV}_{0,1}$. Esse valor é semelhante ao que foi observado na literatura relacionada a esse trabalho (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).

A Figura 4.13-a mostra uma interferometria de uma amostra de cilindro de laminação texturizada e revestida com níquel químico. A Figura 4.13-b mostra uma vista em 3D da Figura 4.13-a. A linha contínua e a tracejada indicam onde foram extraídos perfis de superfícies para análise. A Figura 4.13-c e a Figura 4.13-d mostram, respectivamente, um perfil de superfície de uma região entre bolsos e um perfil de superfície que intercepta uma fileira de bolsos, conforme indicado pelas linhas presentes na Figura 4.13-a. Nota-se que o perfil da região entre bolsos possui picos com frequência e tamanho semelhantes aqueles presentes no perfil da região entre bolsos da superfície sem revestimento (Figura 4.9-c), o que sugere que a deposição de níquel químico não tenha alterado a topografia da superfície não revestida (somente texturizada) da maneira como aconteceu no caso do cromo duro. Com relação ao perfil de superfície que intercepta uma fileira de bolsos, percebe-se que o revestimento de níquel químico acompanhou a geometria das texturas durante a sua deposição.



(d)

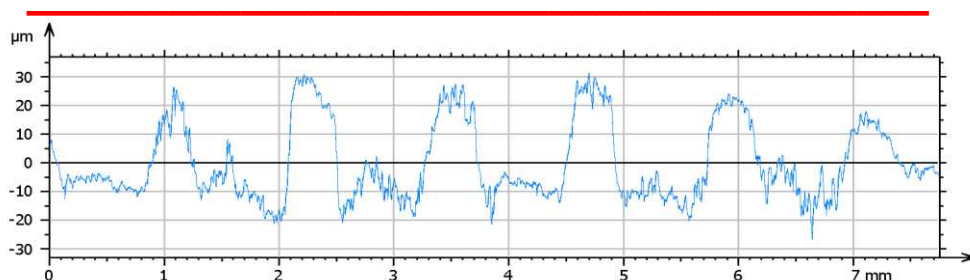


Figura 4.13 – Amostra de cilindro de laminação texturizada e revestida com níquel químico: (a) interferometria, (b) interferometria em 3D, (c) perfil de superfície de uma região entre bolsos e (d) perfil de superfície que intercepta uma fileira de bolsos.

Na Tabela 4.6 são mostrados o diâmetro médio ($880,46 \pm 10,22 \mu\text{m}$) e a profundidade máxima média das texturas ($28,31 \pm 1,14 \mu\text{m}$). O diâmetro médio dos bolsos é semelhante ao diâmetro médio dos bolsos na superfície sem revestimento ($849,31 \mu\text{m} \pm 21,95$). A profundidade máxima média também é semelhante àquela encontrada quando a superfície não é revestida ($25,36 \mu\text{m} \pm 3,43$). Aparentemente o revestimento de níquel químico não alterou de maneira significativa nem o diâmetro e nem a profundidade dos bolsos. Como o revestimento de níquel químico não envolve passagem de corrente elétrica externa (“electroless”), é razoável que efeitos de borda (deposição aumentada nas bordas dos bolsos) sejam negligenciáveis para as amostras TNiP.

Tabela 4.6 – Dimensões das texturas produzidas na superfície texturizada e revestida com níquel químico (TNiP).

Diâmetro Médio (μm)	Profundidade Máxima Média (μm)
$880,46 \pm 10,22$	$28,31 \pm 1,14$

Na Figura 4.14 são mostrados os parâmetros de rugosidade R_q , R_k , R_{pk} e R_{vk} nas regiões entre bolsos de uma superfície texturizada e revestida com níquel químico. A diferença entre os parâmetros da superfície sem revestimento e os parâmetros da superfície revestida com níquel químico é menor do que a diferença entre os parâmetros da superfície sem revestimento e os parâmetros da superfície revestida com cromo duro. Isso mostra que em termos de R_q , R_k , R_{pk} e R_{vk} , o revestimento de níquel químico alterou menos a rugosidade da superfície texturizada que o revestimento de cromo duro. Os parâmetros R_q , R_{pk} e R_{vk} na superfície revestida com níquel químico são menores em relação àqueles encontrados na

superfície não revestida (Figura 4.10), com exceção de R_k . Por fim, semelhantemente ao caso de cromo duro, o revestimento da superfície texturizada com níquel químico elevou o parâmetro R_k em relação à superfície não revestida, o que mostra que os revestimentos aumentaram a capacidade de suporte mecânico da superfície nas regiões entre bolsos.

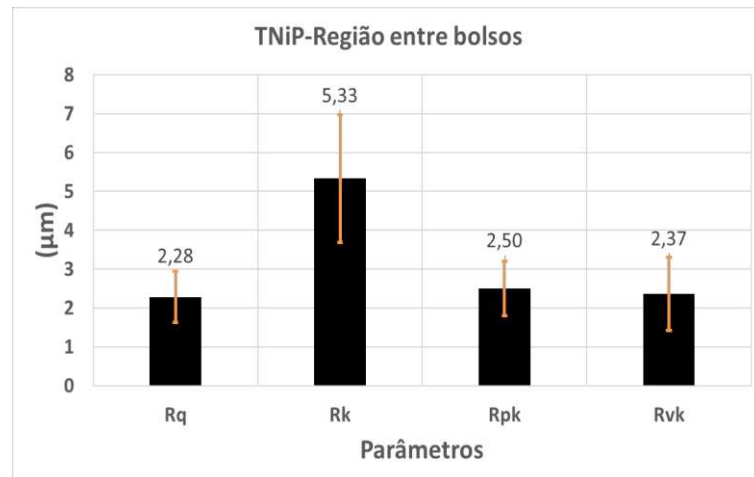


Figura 4.14 – Parâmetros de rugosidade R_q , R_k , R_{pk} e R_{vk} nas regiões entre bolsos de uma superfície texturizada e revestida com níquel químico.

4.3.4 Análise da morfologia superficial das amostras

A Figura 4.15, obtida no MEV, mostra uma superfície somente texturizada. Nota-se na Figura 4.15-a, obtida via SE, que a disposição espacial dos bolsos está uniforme, conforme a máscara utilizada no processo de texturização. A Figura 4.15-b, obtida via BSE, mostra que a superfície texturizada aparentemente apresenta uma fase que no contraste aparece escura e outra que aparece branca, ambas na forma de pequenas partículas, dispersas sobre a matriz cinza.

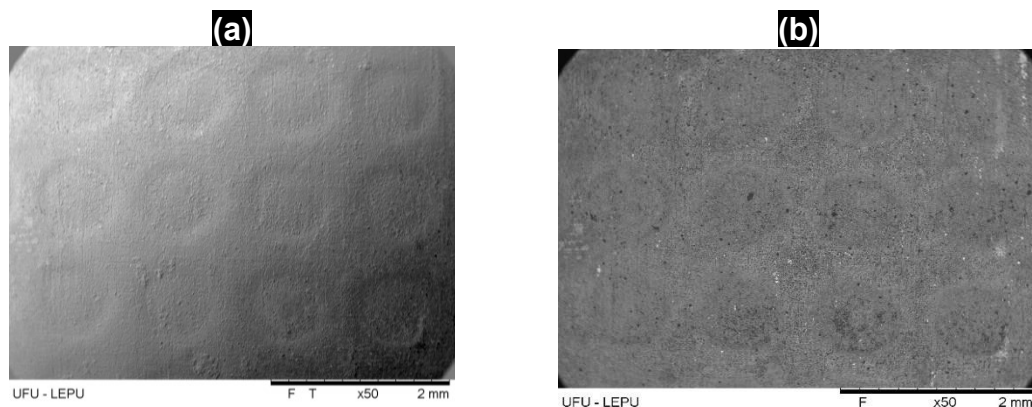


Figura 4.15 – Microscopia eletrônica de varredura de uma superfície somente texturizada: (a) SE, (b) BSE.

Na Figura 4.16 as setas inclinadas apontam para marcas que provavelmente são originadas pelo fluxo de eletrólito do processo MECT, pois essas marcas estão na mesma direção desse fluxo e estão presentes fora e dentro do bolso (o qual está delimitado por um semicírculo na imagem). É possível também ver marcas, indicadas por setas verticais, que estão na direção do processo de retificação e que aparecem somente fora do bolso, onde a remoção eletroquímica de material é menor, o que sugere que são marcas residuais da retificação à qual a superfície foi submetida antes da texturização.

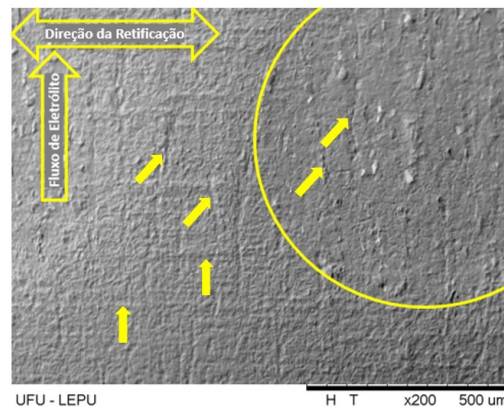


Figura 4.16 – Microscopia eletrônica de varredura via elétrons secundários.

A Figura 4.17, obtida via BSE, mostra uma análise de EDS realizada em uma superfície somente texturizada. Foram analisados dois pontos na matriz (pontos 1 e 2). Tanto dentro quanto fora dos bolsos nota-se a presença de cromo, ferro, carbono e oxigênio, que são elementos presentes no mapa composicional apresentado na Figura 4.8 referente à superfície antes do processo de texturização.

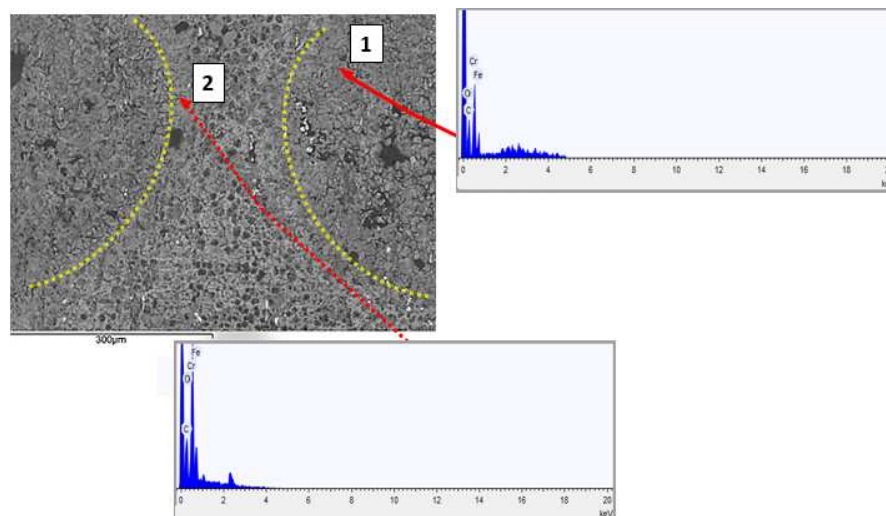


Figura 4.17 – Microscopia eletrônica de varredura (BSE) de uma superfície somente texturizada com análise de EDS. Os semicírculos indicam os bolsos fabricados.

A Figura 4.18, obtida via BSE, mostra outra análise de EDS realizada em uma superfície somente texturizada. Assim como havia sido observado nas análises EDS pontuais para o material do cilindro antes da texturização (Figura 4.7), não foi possível detectar pelos espectros EDS diferenças significativas entre as diferentes regiões. Comparando-se com os mapas EDS obtidos antes da texturização (Figura 4.8), acredita-se que a fase branca rica em elementos mais pesados seja um carboneto de Mo,V. Além disso, nota-se que esse provável carboneto está circundado por uma região mais escura, cuja análise de EDS está indicada no ponto 2. Ao que parece, a dissolução anódica envolvida na texturização ocorre preferencialmente em torno dos carbonetos primários, provavelmente pelo empobrecimento local de elementos de liga (Mo, V, Cr) para a formação dos carbonetos primários, sendo regiões que podem sofrer oxidação mais intensa. Adicionalmente, uma perda de suporte mecânico da matriz em decorrência da remoção preferencial de Fe, característica do processo de texturização eletroquímica, pode favorecer o arrancamento de parte destes carbonetos. Isso se confirma pela ausência na Figura 4.17 do pico mais proeminente ($K\alpha$) do Fe que havia sido observado em aproximadamente 6,4 keV na Figura 4.7 antes da texturização. Provavelmente, as regiões que aparecem escuras no contraste correspondem a regiões oxidadas em função de intensa dissolução eletroquímica e/ou a regiões onde parte dos carbonetos foram removidos pela perda de suporte mecânico da matriz, ou seja, uma vez que os carbonetos "sequestram" elementos de liga das suas adjacências as vizinhanças desses carbonetos ficam mais empobrecidas e passíveis de oxidação.

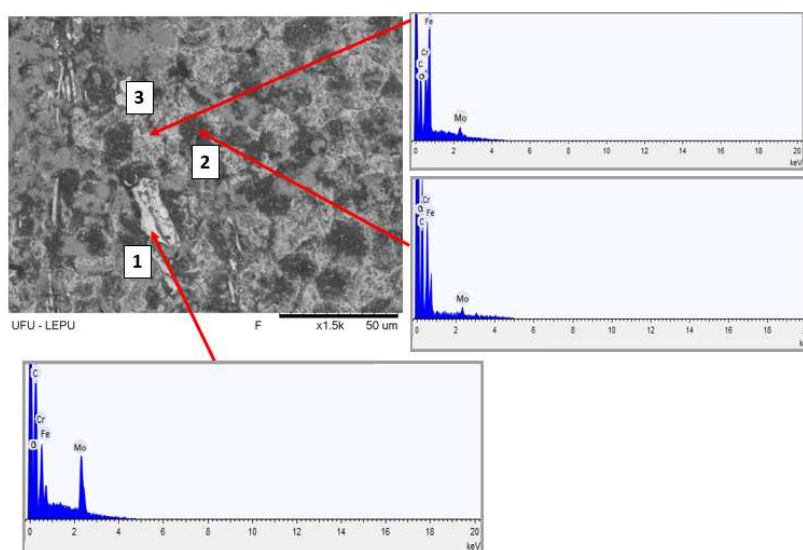


Figura 4.18 – Microscopias eletrônicas de varredura de uma região fora dos bolsos, via BSE, de uma superfície somente texturizada com análise de EDS.

A Figura 4.19, obtida no MEV, mostra uma superfície texturizada via elétrons secundários (Figura 4.19-a) e elétrons retroespalhados (Figura 4.19-b). Os semicírculos com linhas tracejadas indicam as bordas dos bolsos. Foram utilizados retângulos numerados para destacar algumas regiões cujas características se repetem ao longo da superfície. O retângulo 1 mostra uma região fora dos bolsos onde uma partícula da fase branca (Figura 4.19-b), aparentemente protuberante (Figura 4.19-a), está sobre uma região mais escura. O retângulo 2 mostra uma região fora dos bolsos que contém microcavidades (Figura 4.19-a) com coloração escura (Figura 4.19-b). O retângulo 3 mostra uma região dentro de um bolso que aparentemente contém uma porção de superfície protuberante (Figura 4.19-a) também de coloração mais escura (Figura 4.19-b), onde provavelmente ao invés de dissolução houve intensa oxidação. O retângulo 4 mostra uma região dentro de um bolso que aparentemente contém uma cavidade (Figura 4.19-a), novamente de coloração escura (Figura 4.19-b). Fora dos bolsos, onde a remoção eletroquímica de material é menos severa, é possível ver regiões escuras na forma de microcavidades, como no retângulo 2 na Figura 4.19, onde provavelmente antes havia carbonetos (fase branca) protuberantes, como no retângulo 1 na mesma imagem.

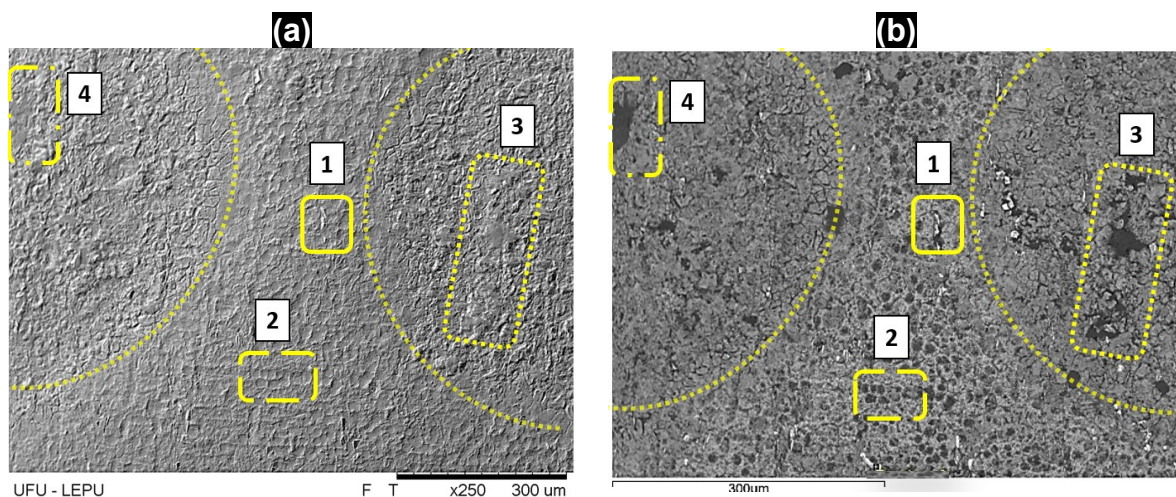


Figura 4.19 – Microscopias eletrônicas de varredura de uma superfície somente texturizada: (a) SE e (b) BSE.

A Figura 4.20, obtida no MEV, mostra uma superfície não ensaiada, texturizada e revestida com cromo duro. A Figura 4.20-a, obtida via SE, mostra que a deposição de revestimento de cromo duro, fase branca na Figura 4.20-b, cobriu uniformemente as regiões entre bolsos. Dentro dos bolsos ainda é possível notar as marcas do fluxo de eletrólito, isso indica que a deposição de revestimento é mais acentuada fora do que dentro dos bolsos. Isso, no entanto, não prejudica a análise em questão, pois o

contato tribológico nos ensaios de deslizamento ocorrerá principalmente nas regiões entre bolsos.

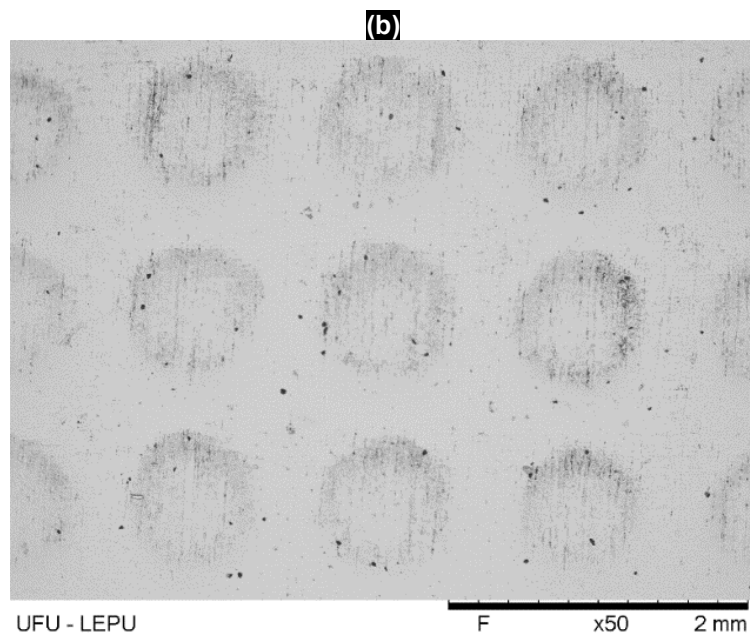
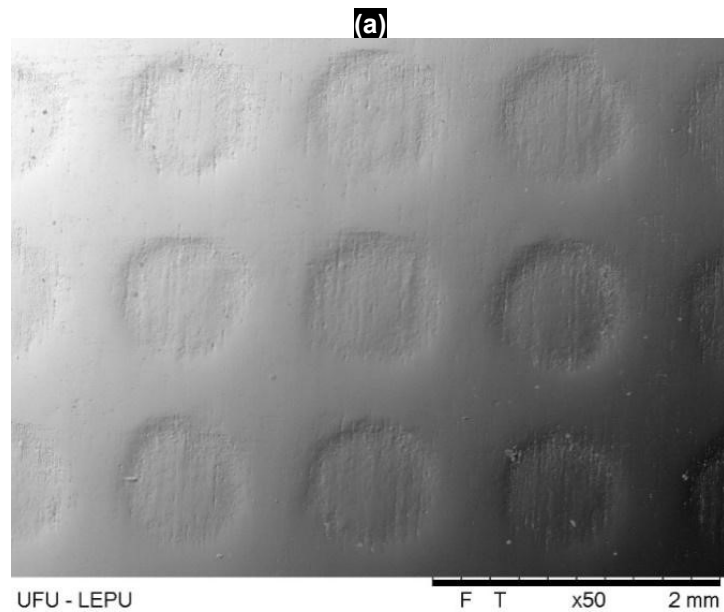


Figura 4.20 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com cromo duro e não ensaiada (TCr): (a) via SE, (b) via BSE.

A Figura 4.21, obtida no MEV, mostra uma superfície não ensaiada, texturizada e revestida com cromo duro. Nota-se na Figura 4.21-a, obtida via SE, a presença de várias microcavidades fora dos bolsos. Na Figura 4.21-b, obtida via BSE, nota-se que essas microcavidades possuem a coloração mais escura observada na Figura 4.20-

b, provavelmente resultantes da dissolução preferencial e oxidação descrita para as amostras texturizadas antes da deposição, sendo que a camada de revestimento de cromo duro, conforme mostra a análise de EDS na Figura 4.21-c, foi depositada sobre essa superfície, provavelmente acentuando as microcavidades presentes no substrato.

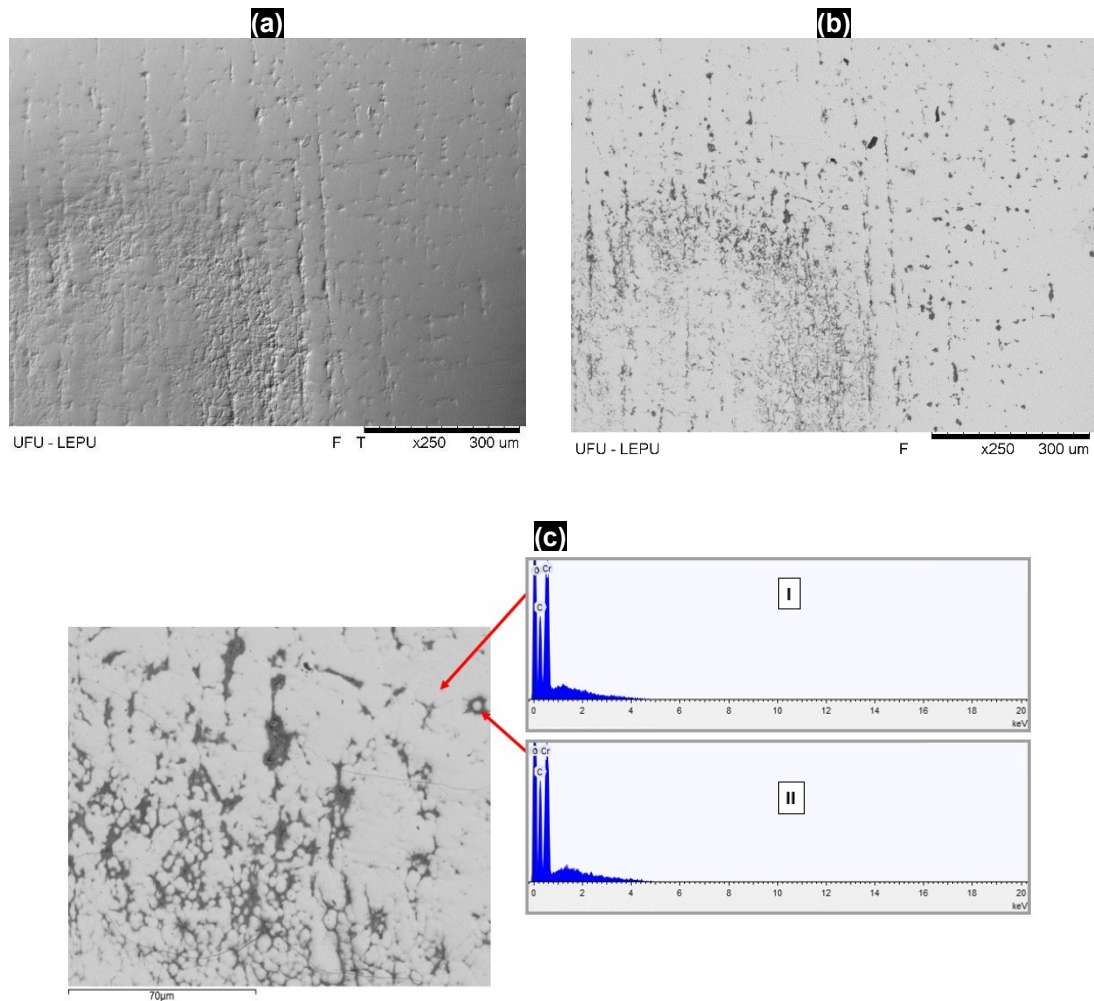


Figura 4.21 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com cromo duro e não ensaiada (TCr): (a) via SE, (b) via BSE, (c) análise de EDS.

A Figura 4.22, obtida via MEV, mostra uma superfície não ensaiada, texturizada e revestida com níquel químico. O contraste de relevo na Figura 4.22-a, obtida via SE, mostra que o revestimento (branco no contraste da Figura 4.22-b, obtida via BSE) foi uniformemente depositado nas regiões entre bolsos; semelhantemente ao que aconteceu nas amostras revestidas com cromo duro, dentro dos bolsos ainda é possível notar as marcas do fluxo de eletrólito, isso indica que a deposição de revestimento de níquel químico é mais acentuada fora do que dentro dos bolsos.

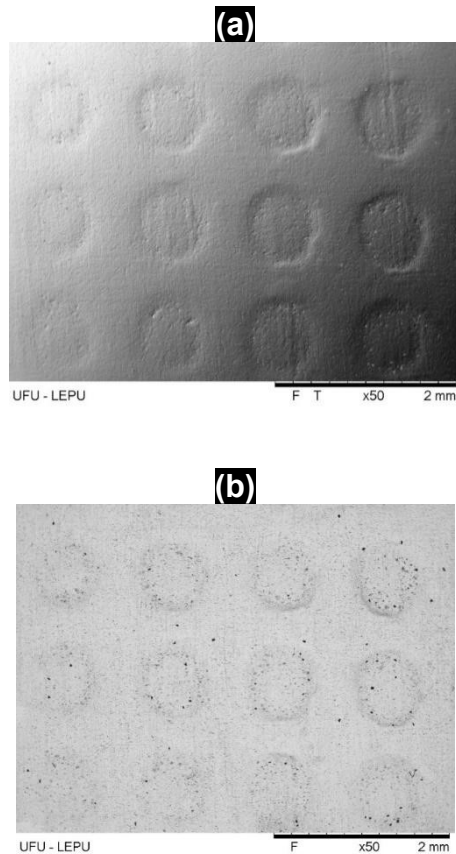


Figura 4.22 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e não ensaiada (TNiP): (a) via SE, (b) via BSE.

A Figura 4.23 mostra a superfície revestida com níquel químico com maior aumento. É possível notar que as partículas, indicadas por retângulos nas imagens, aparecem escuras no contraste da Figura 4.23-b e são protuberantes, conforme indica o contraste de relevo da Figura 4.23-a. Provavelmente trata-se de carbonetos de Fe,Cr presentes no substrato e que foram recorbertos pelo revestimento.

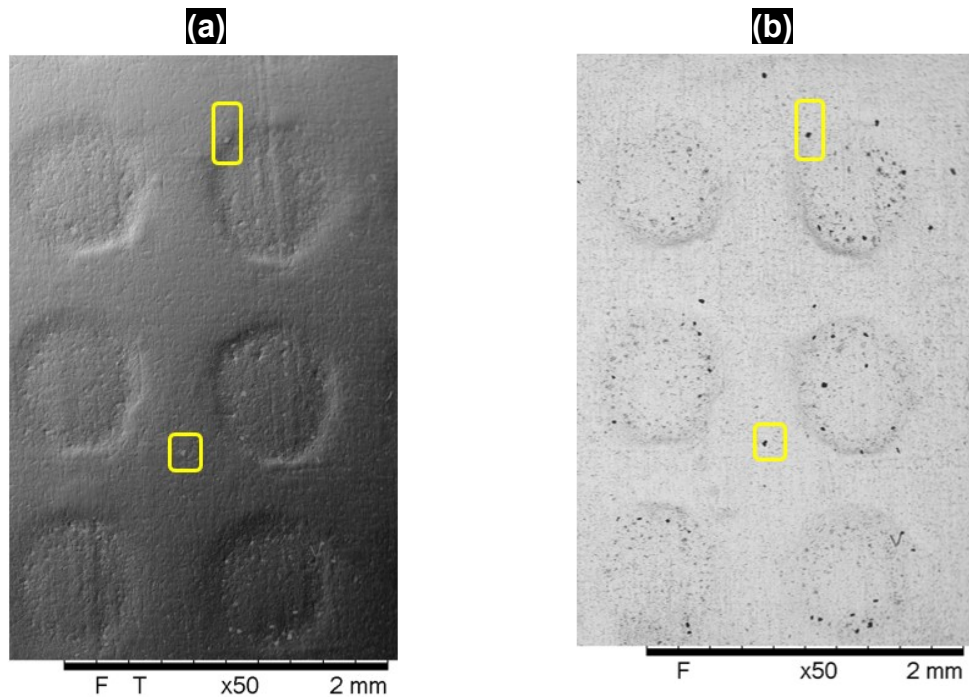


Figura 4.23 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e não ensaiada (TNiP): (a) via SE, (b) análise de EDS em uma imagem obtida via BSE.

A Figura 4.24 mostra análises de EDS em uma imagem obtida via BSE, confirmando a presença dos carbonetos de Fe,Cr no substrato. A outra análise de EDS na região mais clara da superfície, isto é, rica em elementos mais pesados, mostra a predominância de níquel que constitui o revestimento.

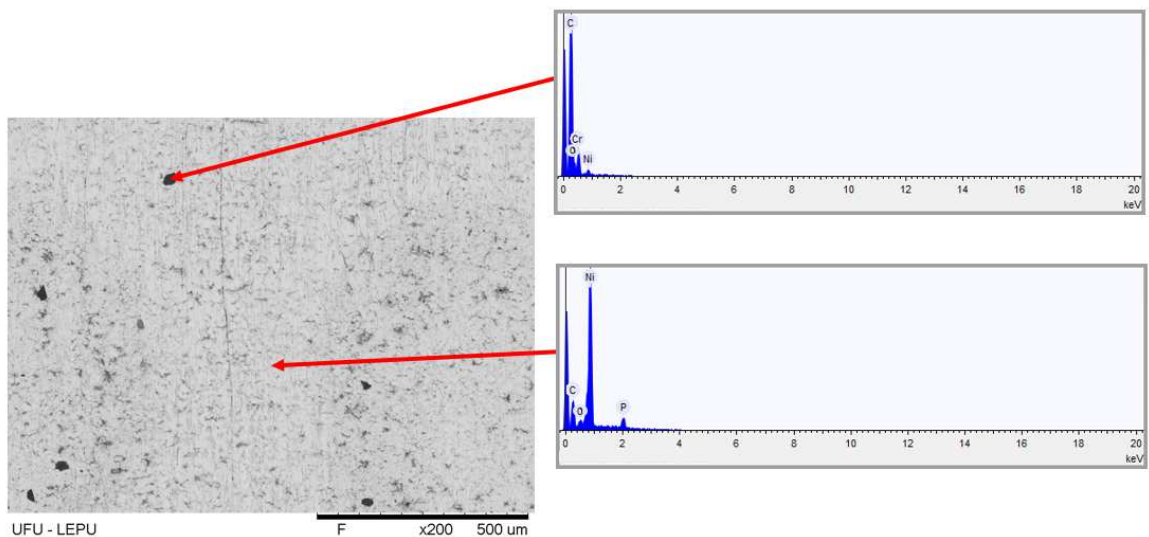


Figura 4.24 – Microscopia Eletrônica de Varredura (BSE) de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e não ensaiada: análise de EDS.

4.4 Observações Finais

Nesse capítulo foi possível entender como ocorreu o processo de texturização eletroquímica sem mascaramento na superfície das amostras extraídas de cilindros de laminação a frio. Além disso, as análises nas superfícies texturizadas com posterior revestimento mostraram que as deposições ocorreram de maneira razoavelmente uniforme. A microdureza do material do cilindro bem como a das superfícies revestidas está de acordo com o observado na literatura relacionada a este trabalho (GONÇALVES JÚNIOR, 2016).

CAPITULO V

Ensaio Tribológicos para Avaliação da Durabilidade das Texturas

5.1 Introdução

No capítulo 4 foi mostrado o procedimento para texturização e revestimento das amostras de cilindro de laminação. O objetivo do presente capítulo foi avaliar a durabilidade das texturas superficiais dessas amostras.

O ensaio de deslizamento alternativo com configuração cilindro sobre plano, devido ao movimento alternativo, pode representar satisfatoriamente a mudança no sentido da força de atrito que ocorre no processo real de laminação; entretanto, os deslizamentos frontais (*forward slip*) e para trás (*backward slip*) normalmente ocorrem em proporções iguais nessa configuração de ensaio, o que não condiz com a realidade industrial. Apesar disso, este tipo de teste se mostrou adequado para analisar o comportamento tribológico de cilindros de laminação a frio convencional onde amostras, com superfícies planas, feitas de material de cilindro de laminação foram ensaiadas contra um contracorpo cilíndrico (GONÇALVES; DE MELLO; COSTA, 2019).

Portanto, neste trabalho o citado ensaio deslizamento foi utilizado para a avaliação da durabilidade das texturas. Além disso, como potencial substituto para o tradicional e cancerígeno revestimento de cromo duro foi avaliado o revestimento de níquel químico (baixo fósforo).

5.2 Procedimentos Experimentais

5.2.1 Ensaios de deslizamento

Os ensaios tribológicos foram realizados em um tribômetro universal da marca Plint and Partners modelo TE 67. Como corpos foram utilizadas as amostras com superfícies planas extraídas de cilindros de laminação a frio. Como contracorpos foram utilizados cilindros de aço AISI 52100 (com microdureza de aproximadamente 750 HV) com comprimento de 9 mm e diâmetro de 9 mm. Foram realizadas três repetições para cada condição ensaiada. Antes de iniciarem-se os testes, os corpos e contracorpos foram limpos com álcool etílico absoluto 99,8% PA ACS em ultrassom por 10 minutos e após a limpeza verificou-se a massa tanto do corpo quanto do contracorpo utilizando uma balança com resolução de 10^{-4} g.

Nos ensaios tribológicos tem-se o movimento alternativo de um cilindro, que é o contracorpo de aço AISI 52100, perpendicular ao seu eixo, sobre uma amostra com superfície plana, de material de cilindro de laminação a frio; portanto, o ensaio possui configuração cilindro sobre plano (contato em linha). Neste tribômetro foi adaptado um sensor LVDT (modelo RS 646-511) para medição da posição do cilindro em relação à amostra em cada ciclo do movimento alternado ao longo do teste. A obtenção de dados é executada por uma placa de aquisição modelo NI BNC-2110 conectada um microcomputador com o software LabView, no qual foi elaborado um software para aquisição dos dados (DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015). Parâmetros como força normal, frequência do movimento e tempo de ensaio podem ser variados. A Figura 5.1-a mostra a configuração dos ensaios de deslizamento. A Figura 5.1-b mostra uma triboscopia obtida em um ensaio. Uma triboscopia trata-se de um mapa tridimensional de uma grandeza monitorada (nesse caso é o coeficiente de atrito, o qual está variando no eixo vertical) em função dos ciclos de ensaio (cada ida e volta do cilindro é um ciclo) e da posição sobre a amostra. A Figura 5.1-c mostra o porta cilindro, o qual foi projetado de forma que ocorra o autoalinhamento do cilindro sobre a peça quando a força normal é imposta. O objetivo é que durante o ensaio se tenha uma pressão de contato uniforme ao longo da linha de contato. Ainda sobre a Figura 5.1-c, o cilindro (1) é acoplado e preso no componente 2 por meio de parafusos (3).

Por fim o componente 2 é encaixado no componente 4 por meio de dois semicilindros que têm liberdade para girar em torno dos seus eixos, permitindo, portanto, o autoalinhamento do contracorpo sobre a amostra.

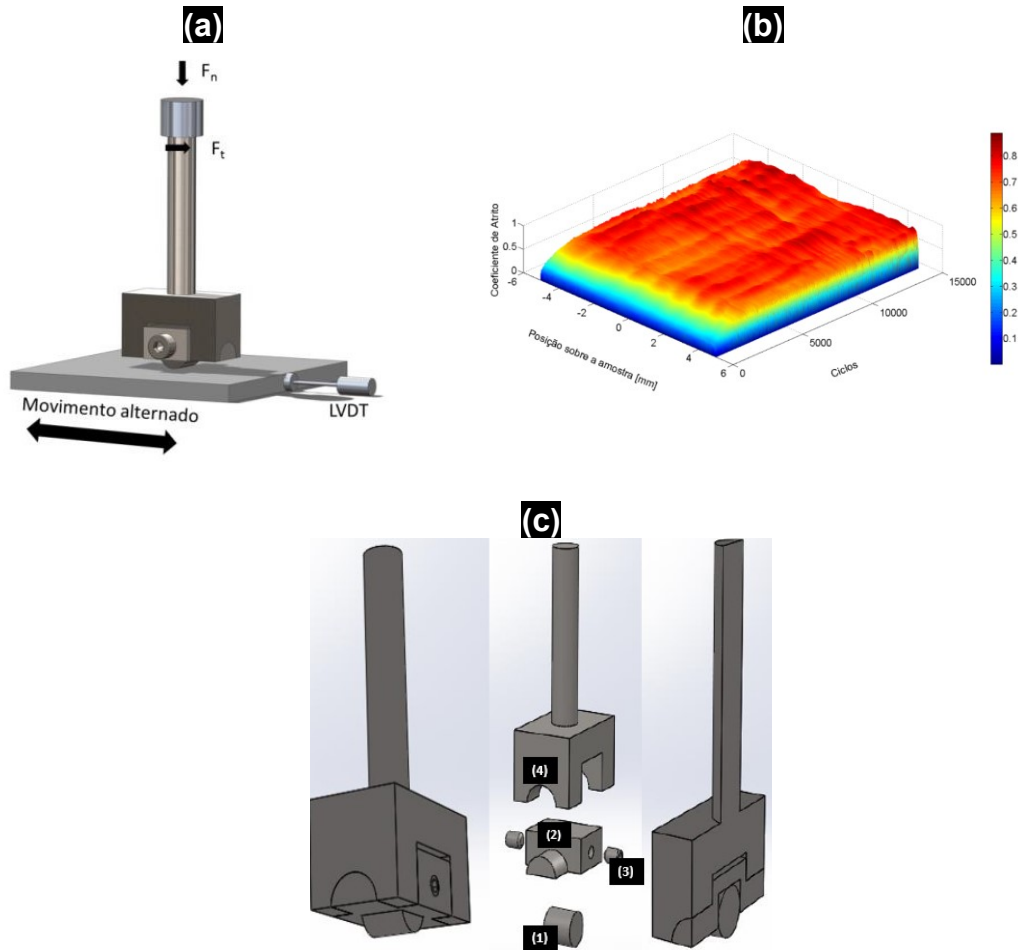


Figura 5.1 – Ensaio de deslizamento: (a) configuração, (b) triboscopia e (c) porta cilindro.

Esses ensaios foram realizados a seco, uma vez que assim é normalmente realizado o passe de acabamento, pois a ausência de óleo lubrificante pode contribuir para uma maior razão de transferência de rugosidade do cilindro para a chapa laminada (ÇOLAK; KURGAN, 2018).

Para avaliar a durabilidade de texturas estocásticas (EDT) com revestimentos (NiP ou Cr) GONÇALVES JÚNIOR (2016) utilizou os seguintes parâmetros: carga normal igual a 100 N, resultando em uma tensão de Hertz inicialmente de 0,17 GPa, amplitude de deslizamento de 10 mm, frequência do movimento alternativo igual a 2 Hz e tempos de 60 min e 360 min.

No presente trabalho inicialmente foram realizados testes de 60 minutos em amostras de cilindro somente texturizadas; os outros parâmetros foram mantidos

iguais aqueles utilizados por GONÇALVES JÚNIOR (2016). Os resultados obtidos naquele trabalho mostraram que para um tempo de ensaio de 60 min já era possível notar uma perda de massa em relação às amostras não ensaiadas, bem como alterações nos aspectos visuais das superfícies das amostras. Variações de parâmetros de rugosidade nos tempos iniciais podem não ser significativas no processo de laminação a frio convencional, em que se deseja uma redução de espessura da chapa, mas no caso do passe de acabamento, em que se deseja transferir uma topografia controlada do cilindro para a chapa sem reduzir significativamente a espessura da mesma, essas variações podem influenciar nos resultados esperados. Dessa forma, com o objetivo de avaliar alterações ainda mais precoces nas superfícies das amostras de cilindro de laminação do que aquelas correspondentes ao tempo de 60 minutos, os tempos de 10 e 30 minutos também foram selecionados para os ensaios de deslizamento. A Figura 5.2 ilustra as condições de realização dos ensaios de deslizamento alternativo com configuração cilindro sobre plano. A identificação de cada condição de ensaio foi feita mencionando-se a identificação da condição da superfície da amostra ensaiada (T, TCr ou TNiP) seguida do tempo do ensaio (10, 30 ou 60 minutos), assim, por exemplo, um ensaio de 10 minutos de uma amostra texturizada e revestida com Cr duro foi denominado TCr10.

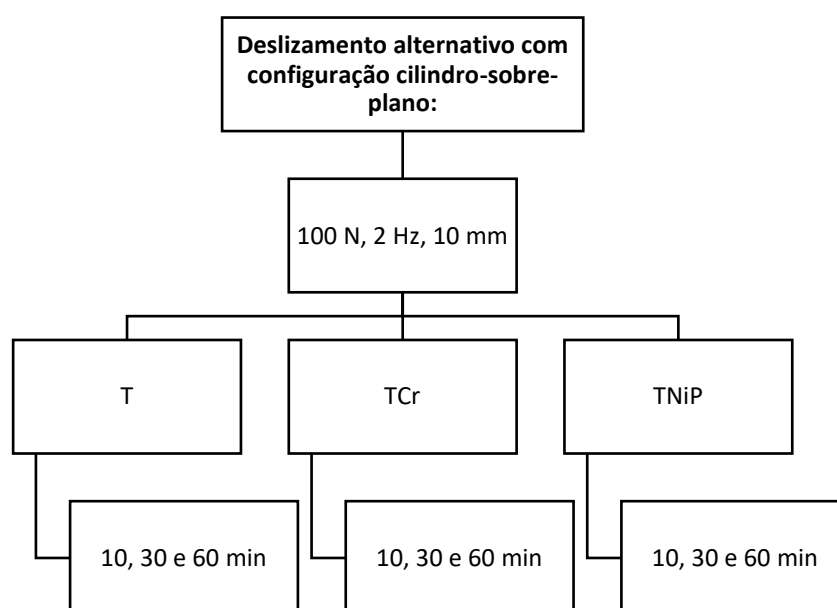


Figura 5.2 – Condições de realização dos ensaios de deslizamento alternativo com configuração cilindro sobre plano.

GONÇALVES ; DE MELLO e COSTA (2019), ao analisar desgaste de texturas estocásticas em cilindros de laminação a frio, utilizaram parâmetros topográficos tridimensionais. Dessa forma, no presente estudo a quantificação da topografia das superfícies ensaiadas (desgastadas) foi realizada utilizando-se parâmetros topográficos bidimensionais e tridimensionais. Esses parâmetros estão elencados na Tabela 5.1. Maiores detalhes sobre eles, bem como as normas técnicas relacionadas, podem ser encontrados em GADELMAWLA et al. (2002), em STOUT et al. (2002) e em LEACH (2013).

Tabela 5.1 – Parâmetros de topografia utilizados na análise das superfícies ensaiadas.

Símbolo	Nome do Parâmetro	Família	Descrição	Unidade
Rq	Rugosidade quadrática média	Amplitude	Correspondente ao desvio padrão da distribuição de altura	μm
Rpc	Contagem de picos	Espacial	Associado com a quantidade de picos ao longo de um comprimento	1/mm
Rdq	Inclinação quadrática média	Híbrido	Inclinação média das irregularidades	°
Sq	Rugosidade quadrática média superficial	Amplitude	Corresponde a uma expansão do parâmetro Rq para três dimensões	μm
Sdq	Inclinação média das irregularidades	Híbrido	Corresponde a uma expansão do parâmetro Rdq para três dimensões	sem unidade
Spd	Densidade de Picos	Espacial	Associado com o número de picos por unidade de área	1/mm ²
Sbi	Índice de apoio superficial	Funcional	Representa a capacidade de suporte mecânico da superfície	sem unidade
Svi	Índice de retenção de óleo nos vales	Funcional	Representa a capacidade de retenção de óleo na região dos vales	sem unidade
Spk	Altura reduzida do pico (superfície)	Funcional	Corresponde a uma expansão do parâmetro Rpk para três dimensões	μm
Sku	Curtose da superfície	Amplitude	Medida do achatamento ou agudez da distribuição de alturas da superfície.	sem unidade
Ssk	Assimetria da superfície	Amplitude	Medida da assimetria dos desvios de superfície em relação a um plano médio.	sem unidade

5.2.2 Equipamentos

Um microscópio óptico Olympus BX51m foi utilizado para as análises por meio de microscopia óptica.

A avaliação das superfícies ensaiadas, bem como as análises de EDS das mesmas, foram realizadas em um MEV da Hitachi High-Technologies, modelo TM3000.

Conforme descrito no capítulo 4, as interferometrias foram feitas em um Interferômetro Taylor Hobson Talysurf CLI 2000®, com taxa de medição de 500 $\mu\text{m/s}$, usando modo de medição contínua, com espaçamento de 1 μm x 10 μm , sendo que a maior densidade de pontos por μm ocorre na direção perpendicular ao deslizamento dos ensaios tribológicos.

As análises das topografias obtidas por interferometria foram realizadas através do software Digital Surf MountainsLab Premium 9®. Antes das medições de geometria dos bolsos e parâmetros de topografia foi realizado o nivelamento da superfície e nenhum filtro de ondulação foi aplicado. As medições dos diâmetros e profundidades dos bolsos fabricados foram realizadas por meio da ferramenta “análise de partículas” que é fornecida no MountainsLab. Embora a trilhas de desgaste não tenham sido percebidas com clareza nas interferometrias das amostras ensaiadas, as mesmas foram facilmente visualizadas por observação visual direta, assim, salienta-se que a área analisada foi sempre suficiente para varrer toda a trilha de desgaste.

5.3 Resultados e Discussões

5.3.1 Ensaios de deslizamento

Levando-se em conta os parâmetros definidos anteriormente, foram realizados os ensaios de deslizamento. Os parâmetros de rugosidade foram avaliados através de interferometrias. Entre os três tempos de ensaio (10, 30 e 60 min.), apenas nos ensaios de 60 minutos foi possível medir satisfatoriamente variação de massa no par tribológico, visto que em tempos menores o revestimento dificultou o desgaste das amostras, portanto a taxa de desgaste foi medida somente nos ensaios de 60 minutos.

No entanto, esse era o objetivo desde o início: avaliar modificações superficiais mais sutis, isto é, sem que as texturas fossem severamente desgastadas. Também foi analisado o coeficiente de atrito em função do número de ciclos para cada condição superficial estudada. Por fim, foram realizadas análises por MEV e EDS das trilhas de desgaste nos corpos e contracorpos para investigar os fenômenos tribológicos.

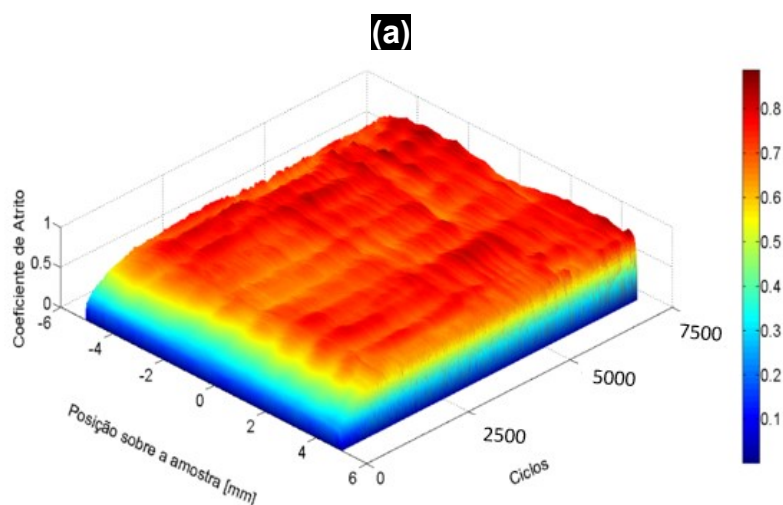
A seguir são apresentadas as triboscopias resultantes dos ensaios de deslizamento.

Partindo-se do princípio de que os ensaios de 60 minutos já contêm os fenômenos ocorridos nos ensaios com tempos de 10 e 30 minutos, apenas as triboscopias correspondentes aos ensaios de 60 minutos são apresentadas. Para cada condição superficial estudada, a triboscopia escolhida para ser apresentada consistiu naquela que representasse um comportamento intermediário levando-se em conta as demais repetições.

A Figura 5.3-a mostra a evolução do coeficiente de atrito em função da posição e do número de ciclos para uma amostra texturizada e não revestida. Nota-se que há uma tendência de elevação do coeficiente de atrito nas bordas da trilha de desgaste. Uma possível explicação para isso seria o fato de ocorrer acúmulo de debris nessas regiões (DE MELLO et al., 2014; GONÇALVES JÚNIOR, 2016). Em relação à evolução do coeficiente de atrito com o número de ciclos, nota-se que inicialmente esse coeficiente se mantém em valores baixos; por volta 1 250 ciclos ocorre um aumento repentino, o que parece ser apenas uma transição inicial. Após esse aumento, percebe-se que o coeficiente de atrito passa a variar em forma de ondulações ao longo da posição sobre a amostra. Esse comportamento parece estar associado à presença das fileiras de bolsos que estão dispostas perpendicularmente à direção do deslizamento. A partir de um determinado momento, em torno de 5 000 ciclos, esse comportamento de ondulação se torna menos evidente. Uma explicação plausível para isso seria ou ocorrência de algum fenômeno tribológico ou simplesmente o preenchimento de bolsos devido ao aumento da quantidade de partículas de desgaste acumuladas na trilha, principalmente nas suas bordas.

A Figura 5.3-b apresenta o mapa triboscópico do potencial de contato para o ensaio representado na Figura 5.3-a. Não foi observado um padrão de variação do potencial de contato próximo às extremidades da trilha de desgaste como ocorreu com o coeficiente de atrito. Após o início do ensaio o potencial de contato apresentou um rápido pico de crescimento nos primeiros ciclos, mas posteriormente os valores

decrecem para próximo de zero, o que indica uma situação de contato metálico entre o corpo e o contracorpo, ou seja, não há presença, por exemplo, de uma tribocamada isolante entre as duas superfícies. Essa região da triboscopia com predominância de baixo potencial de contato corresponde ao baixo coeficiente de atrito inicial observado na Figura 5.3-a, que aparentemente trata-se apenas de uma transição inicial. Em torno do ciclo 1 500 nota-se que o potencial de contato começa a oscilar aumentando e diminuindo. Isso indica que continuamente uma tribocamada pode estar se formando, mas que ela é retirada com a mesma taxa. Então, posteriormente, parece que o potencial de contato passa a ficar sensível às fileiras de bolsos, pois é observado a sua variação em forma de ondulações ao longo da posição sobre amostra, esse comportamento ocorre até um pouco antes do ciclo 5000. Provavelmente na região dos bolsos não ocorria contato direto entre amostra e contracorpo, justificando a oscilação do potencial de contato que acompanhou a presença dos bolsos. Um pouco antes do ciclo 5 000 o potencial de contato passar ter um comportamento mais uniforme, nesse momento parece que já há a predominância de uma tribocamada isolante de eletricidade no contato, então oscilações pouco significativas ocorrem até o final do ensaio. Novamente, é possível que com o decorrer do ensaio as partículas de desgaste tenham preenchido parte dos bolsos e assim tenham atenuado o efeito dos vazios presentes na superfície da amostra sobre a variação do potencial de contato.



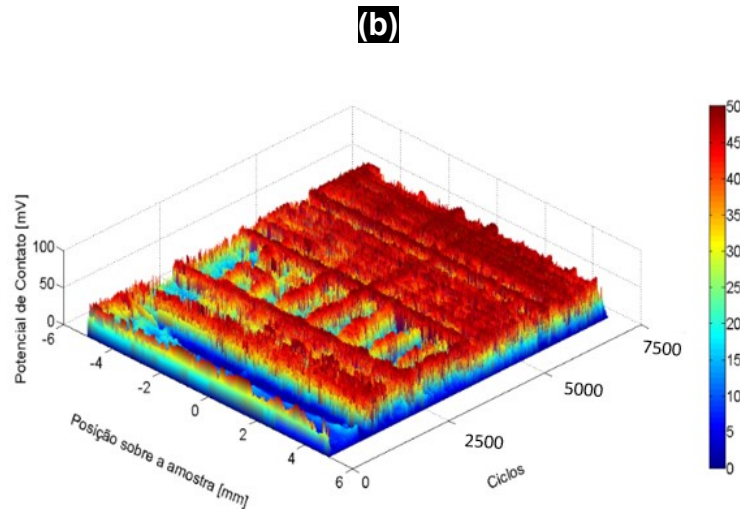


Figura 5.3 – Amostra texturizada e não revestida ensaiada por 60 minutos (T60): (a) triboscopia típica, (b) evolução típica do potencial de contato.

A Figura 5.4-a mostra a evolução do coeficiente de atrito em função da posição e do número de ciclos para uma amostra texturizada e revestida com cromo duro (TCr60). Semelhantemente ao caso da superfície texturizada e não revestida (T60), nota-se que há uma tendência de elevação do coeficiente de atrito nas bordas da trilha de desgaste, o que pode estar associado ao acúmulo de debris nessas regiões. Novamente, após uma transição inicial (por volta de 1 250 ciclos), a variação em forma de ondulação começa a ocorrer, no entanto, agora nota-se que esse comportamento é evidente até o final do ensaio. Isso sugere que o revestimento de cromo duro atuou reduzindo o desgaste da superfície, o que gerou um menor acúmulo de partículas ao longo da trilha, insuficiente para preencher os bolsos, como no caso da superfície T60.

A Figura 5.4-b apresenta o mapa triboscópico do potencial de contato para o ensaio representado na Figura 5.4-a. Não foi observado um padrão de variação do potencial de contato próximo às extremidades da trilha de desgaste, como ocorreu com o coeficiente de atrito. Após o início do contato, o potencial de contato permanece próximo de zero até aproximadamente 2 500 ciclos, o que indica uma situação de contato metálico entre o corpo e o contracorpo. Posteriormente essa grandeza começa a aumentar até que por volta do ciclo 5 000 o ensaio já se encontra em um patamar mais elevado de potencial de contato, o que permanece até o final do ensaio. Isso indica que a partir do ciclo 2 500 começa a ocorrer a formação de uma tribocamada isolante que só vai começar a predominar no contato a partir do ciclo 5000.

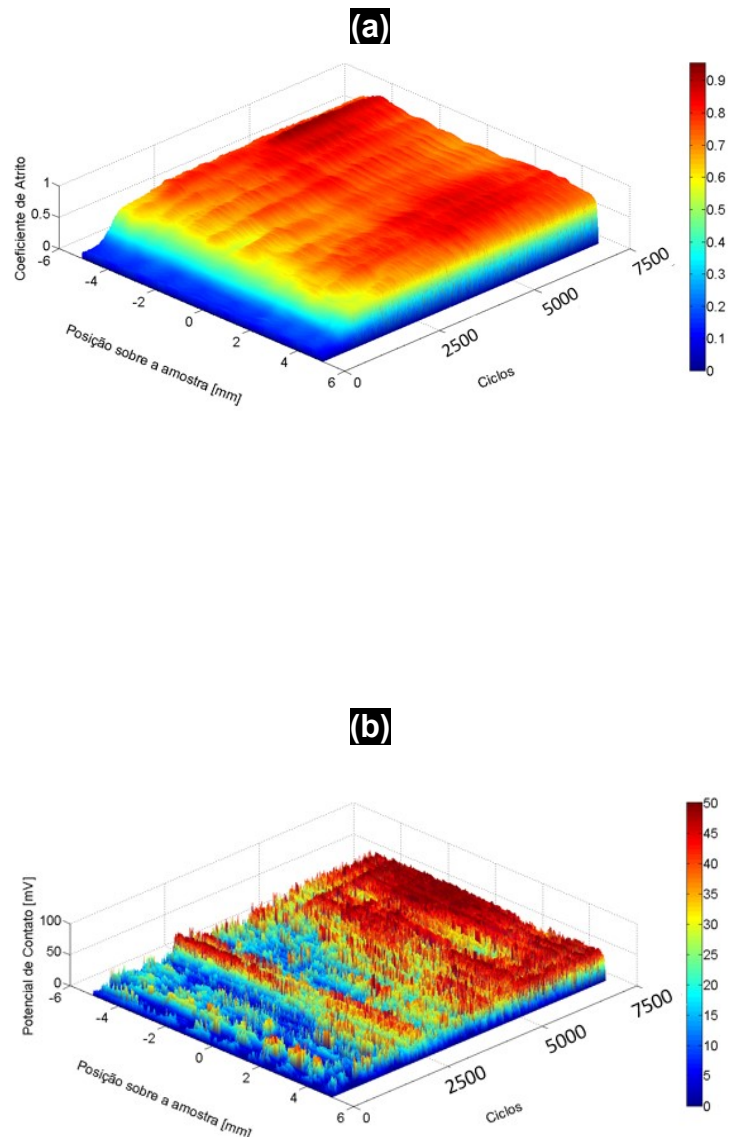


Figura 5.4 – Amostra texturizada e revestida com cromo duro ensaiada por 60 minutos (TCr60):
(a) triboscopia típica, (b) evolução típica do potencial de contato.

A Figura 5.5-a mostra a evolução do coeficiente de atrito em função da posição e do número de ciclos para uma amostra texturizada e revestida com níquel químico. Diferentemente dos casos das superfícies T60 e TCr60, nota-se que não há uma tendência de elevação do coeficiente de atrito nas bordas da trilha de desgaste. Após uma transição inicial, a variação do coeficiente de atrito em forma de ondulação começa a ocorrer e esse comportamento é evidente até o final do ensaio. É possível também observar que, de uma maneira geral, a triboscopia correspondente a TNiP60 apresenta menores valores de coeficiente de atrito que aquelas correspondentes a T60 (Figura 5.3-a) e TCr60 (Figura 5.4-a). Isso sugere que o revestimento de níquel químico atuou reduzindo o coeficiente de atrito em relação a T60 e TCr60 e também

o desgaste da superfície em relação a T60, o que gerou um menor acúmulo de partículas ao longo da trilha, insuficiente para preencher os bolsos.

A Figura 5.5-b apresenta o mapa triboscópico do potencial de contato para o ensaio representado na Figura 5.5-a. Não foi observado um padrão de variação do potencial de contato próximo às extremidades da trilha de desgaste, como ocorreu com o coeficiente de atrito. Após o início do contato, de uma maneira geral, o potencial de contato permanece próximo de zero. Posteriormente, por volta do ciclo 5 000, nota-se que essa grandeza começa a oscilar aumentando e diminuindo. Isso indica que continuamente uma tribocamada pode estar se formando, mas que ela é retirada com a mesma taxa. Esse comportamento permanece até o final do ensaio.

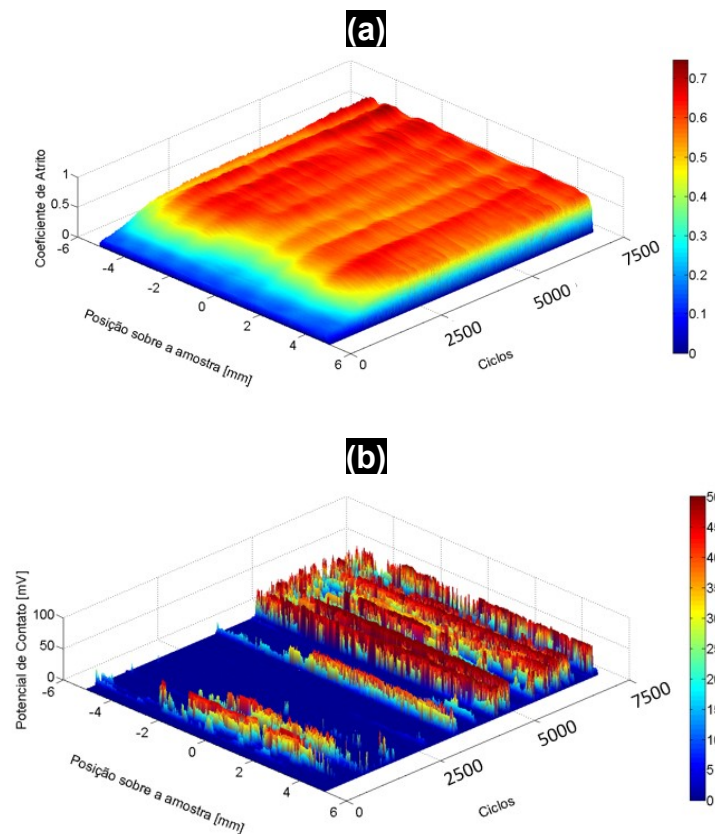
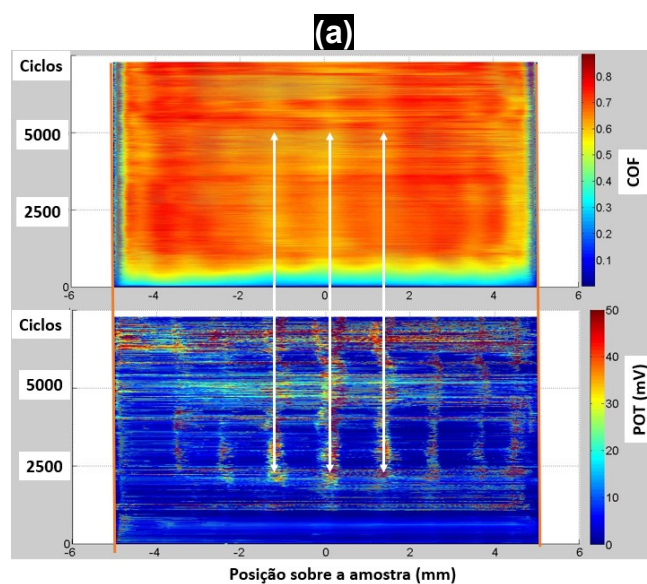


Figura 5.5 – Amostra texturizada e revestida com níquel químico ensaiada por 60 minutos (TNiP60): (a) triboscopia típica, (b) evolução típica do potencial de contato.

Anteriormente, nas análises das triboscopias dos ensaios correspondentes a T60, TCr60 e TNiP60 foi verificado uma variação em forma de ondulação, principalmente do coeficiente de atrito com a variação da posição do contracorpo sobre a amostra. As vistas das superfícies triboscópicas tridimensionais daquelas

análises (Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5), apesar de expressarem com clareza os níveis máximos tanto de coeficiente de atrito quanto de potencial de contato, não evidenciam a totalidade das variações que ocorrem durante o ensaio, pois para isso seria necessário observar essas superfícies a partir de diversas vistas. Assim, com o objetivo de investigar se há alguma correspondência entre a mencionada variação em forma de ondulação do coeficiente de atrito com a variação de potencial de contato, triboscopias típicas de ensaios T60, TCr60 e TNiP60 foram plotadas em uma vista 2D, conforme a Figura 5.6.

Nota-se no ensaio T60 (Figura 5.6-a) que as regiões onde ocorre uma redução do coeficiente de atrito correspondem a regiões de elevação do potencial de contato, as setas brancas traçadas sobre ambas as imagens reforçam essa correspondência. Ao que tudo indica, no momento em que o contracorpo cilíndrico está sobre uma fileira de bolsos, o tamanho do contato metal-metal é reduzido, como consequência o potencial de contato é elevado e o coeficiente de atrito é reduzido. Por outro lado, quando o contato ocorre sobre uma região entre bolsos o tamanho do contato metal-metal é elevado e, provavelmente, como consequência o potencial de contato é reduzido e o coeficiente de atrito é elevado. Nos ensaios TCr60 (Figura 5.6-b) e TNiP60 (Figura 5.6-c), as regiões onde ocorrem reduções do coeficiente de atrito aparentemente também correspondem às regiões de uma leve elevação do potencial de contato, conforme indicam as setas brancas traçadas sobre as imagens.



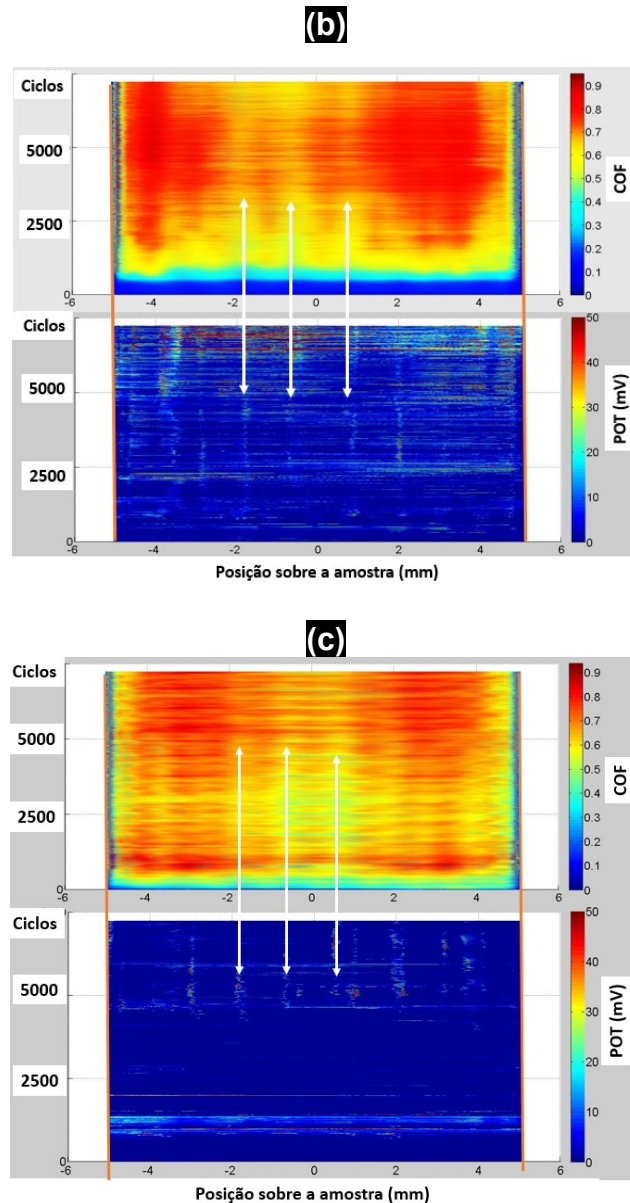


Figura 5.6 – Representação 2D das triboscopias típicas referentes ao coeficiente de atrito (COF) e ao potencial de contato (POT) de amostras ensaiadas por 60 minutos: (a) T60, (b) TCr60 e (c) TNiP60.

A Figura 5.7 mostra a taxa de desgaste tanto das amostras quanto dos contracorpos dos ensaios realizados com 60 minutos. Com relação às amostras, aparentemente, o desgaste na superfície não revestida é maior que nas revestidas. Entretanto as diferenças observadas não são estatisticamente significativas, pois os valores dos desvios padrões são elevados comparados aos valores das médias das taxas de desgaste nos três casos. Provavelmente os desgastes foram pequenos ao ponto de não serem detectados com precisão pela balança de 4 dígitos significativos utilizada para pesagem das amostras antes e após os ensaios. Os valores negativos de taxa de desgaste correspondentes às amostras revestidas que são observados na Figura 5.7 provavelmente estão associados à adesão de material proveniente dos

contracorpos. Nesse caso, uma possível maneira de avaliar a durabilidade é através da análise de parâmetros de rugosidade que forneçam informações a respeito da conservação da topografia original da superfície. Por outro lado, ficou evidente que nos contracorpos correspondentes aos ensaios T60 e TCr60 ocorreu remoção de material com taxas de desgaste semelhantes, diferentemente do ensaio TNiP60 em que a taxa de desgaste do contracorpo foi nula. Esses resultados estão de acordo com as análises das triboscopias apresentadas anteriormente (Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5) onde inferiu-se que no ensaio T60 foi gerado uma maior quantidade de partículas de desgaste que nos ensaios TCr60 e TNiP60.

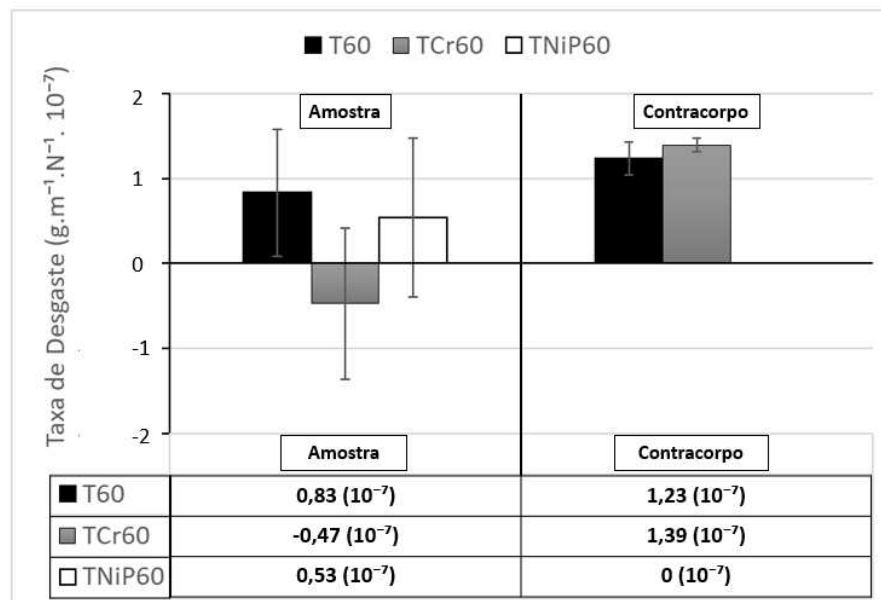


Figura 5.7 – Taxas de desgaste correspondentes aos ensaios T60, TCr60 e TNiP60.

A Figura 5.8 mostra imagens obtidas em microscópio óptico referentes a um contracorpo não ensaiado e a contracorpos ensaiados. A Figura 5.8-a mostra a superfície de um contracorpo não ensaiado, é possível ver as marcas verticais do processo de fabricação. A Figura 5.8-b e a Figura 5.8-c mostram, respectivamente, as regiões ensaiadas dos contracorpos de ensaios T60 e TCr60; percebe-se que as marcas do processo de fabricação já não estão presentes de forma clara. A Figura 5.8-d mostra a região ensaiada do contracorpo de um ensaio TNiP60; aparentemente o desgaste é menor que nos outros dois casos, pois visualmente é possível notar que a largura da trilha, cujas bordas são delimitadas pelas linhas onduladas escuras, é menor que para os contracorpos dos ensaios T60 e TCr60.

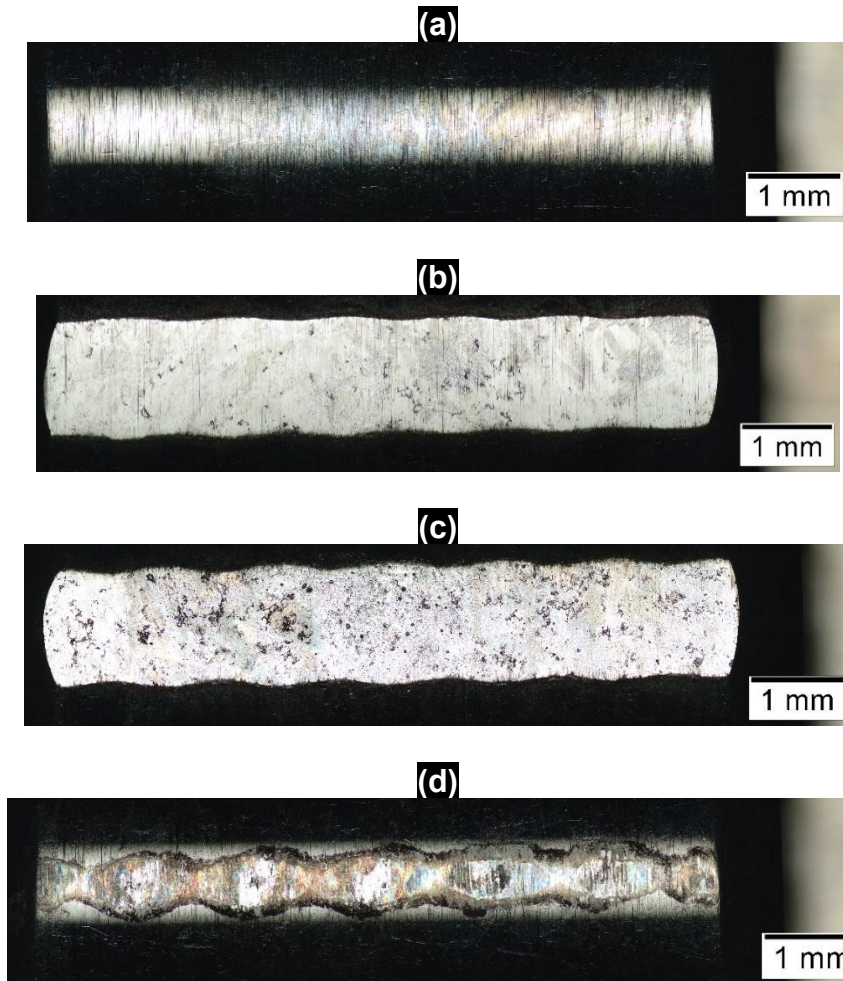


Figura 5.8 – Imagens obtidas em microscópio óptico referentes a (a) um contracorpo não ensaiado, a um (b) contracorpo de um ensaio T60, a um (c) contracorpo de um ensaio TCr60 e a um (d) contracorpo de um ensaio TNiP60.

A Figura 5.9 mostra a evolução típica do coeficiente de atrito em função do número de ciclos para os ensaios realizados. Na Figura 5.9-a nota-se que nos ensaios com 10 minutos o coeficiente de atrito correspondente a TNiP10 se mantém sempre inferior ao coeficiente de atrito de T10 e TCr10, sendo que esses dois últimos permanecem com valores de coeficiente de atrito semelhantes, apesar de aparentemente o coeficiente de atrito de T10 se tornar levemente inferior ao de TCr10 um pouco antes do ciclo 500. Na Figura 5.9-b nota-se que nos ensaios com 30 minutos o coeficiente de atrito correspondente a TNiP30 se mantém sempre inferior ao coeficiente de atrito dos outros dois ensaios, T30 e TCr30, sendo que nesses dois últimos ensaios o coeficiente de atrito permanece com valores semelhantes até um determinado momento, mas antes do ciclo 2 000 o coeficiente de atrito de T30 se torna claramente menor que o de TCr30 e permanece assim até o final do ensaio. Na Figura 5.9-c nota-se que nos ensaios com 60 minutos o coeficiente de atrito correspondente a TNiP60 se mantém sempre inferior ao coeficiente de atrito dos

outros dois ensaios, T60 e TCr60, sendo que nesses dois últimos ensaios o coeficiente de atrito permanece com valores semelhantes até um determinado momento, mas antes do ciclo 3 000 o coeficiente de atrito de T60 se torna menor que o de TCr60 e permanece assim até o final do ensaio. A Figura 5.9 mostra que com o decorrer dos ciclos o coeficiente de atrito dos ensaios TNiP tende a ser sempre menor que o coeficiente de atrito dos ensaios T e TCr e esses dois últimos ensaios tendem a apresentar valores semelhantes. Apesar disso, o coeficiente de atrito de T, algum momento do ensaio, se torna levemente inferior ao de TCr; no entanto, aparentemente, a Figura 5.9-c parece indicar também que os valores do coeficiente de atrito correspondentes a cada um dos ensaios tendem a convergir para o mesmo patamar com a realização de ensaios mais longos.

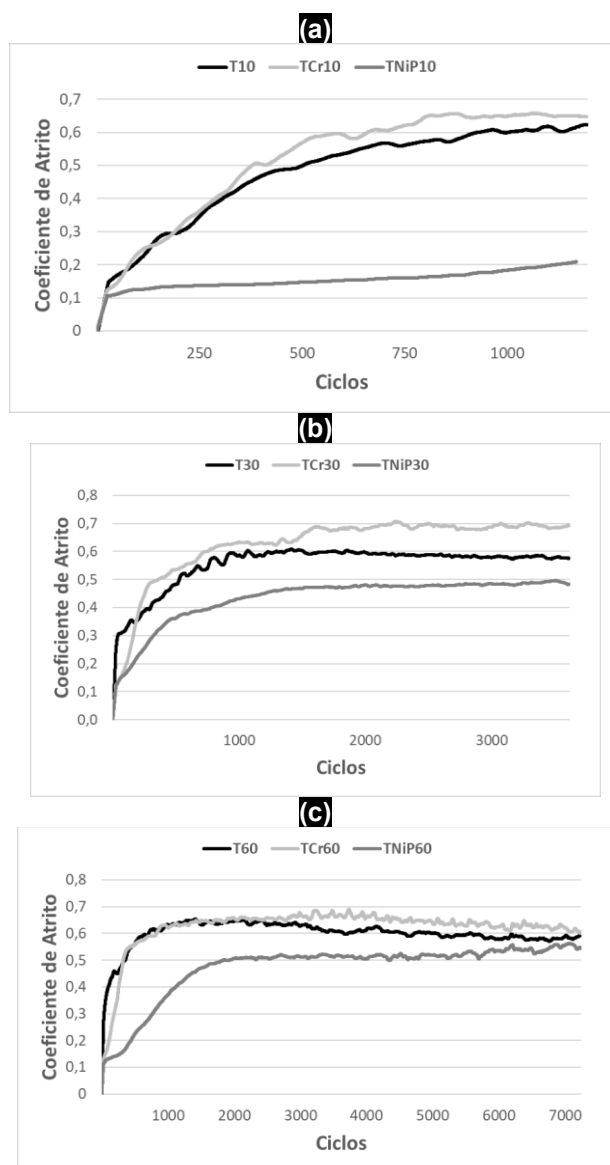


Figura 5.9 – Evolução típica do coeficiente de atrito em função do número de ciclos para ensaios de (a) 10, (b) 30 e (c) 60 minutos.

A Figura 5.10 mostra os coeficientes de atrito médios correspondentes aos ensaios realizados. Semelhantemente ao que foi observado na Figura 5.9, em todos os tempos de ensaio (Figura 5.10-a, Figura 5.10-b e Figura 5.10-c), o coeficiente de atrito médio dos ensaios TNiP permanece menor que o coeficiente de atrito médio correspondente aos ensaios T e TCr, sendo que esses dois ensaios possuem valores de coeficiente de atrito médio mais semelhantes entre si quando se leva em conta o coeficiente médio do ensaio TNiP. Por fim, na Figura 5.10-c o coeficiente de atrito médio dos ensaios de 60 minutos (T60, TCr60 e TNiP60) parecem mais semelhantes entre si em relação a quando se realiza essa mesma na análise dos ensaios nos outros dois tempos (Figura 5.10-a, Figura 5.10-b).

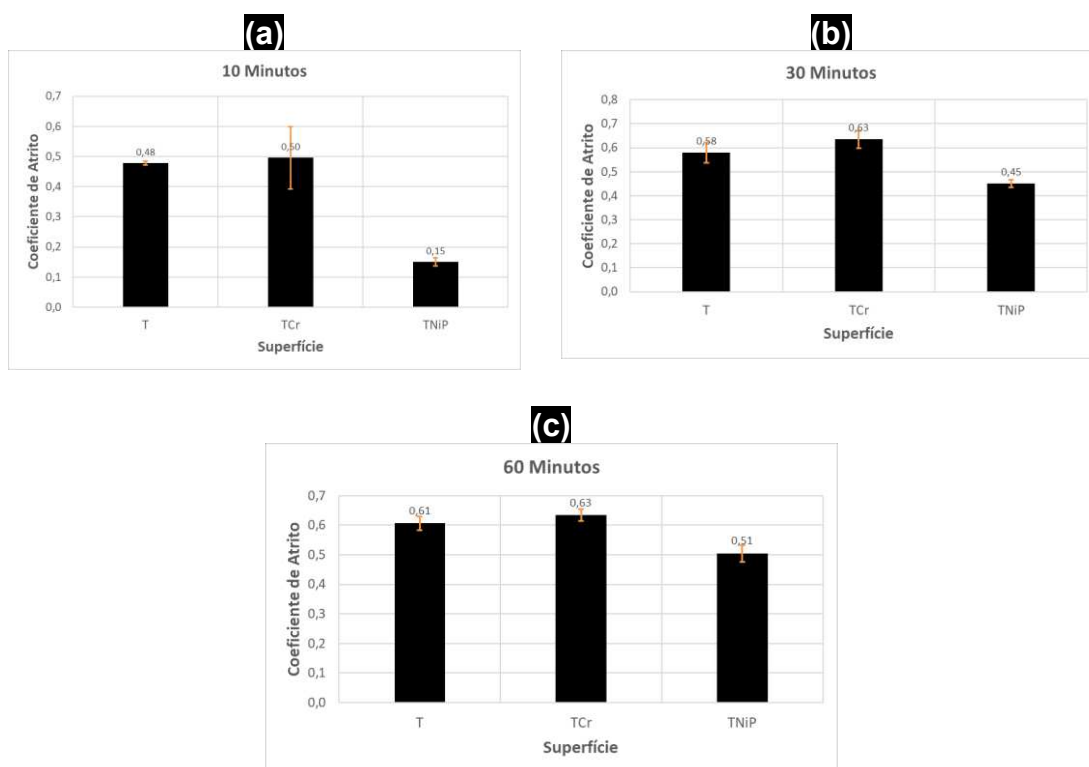


Figura 5.10 – Coeficientes de atrito médios correspondente aos ensaios de (a) 10, (b) 30 e (c) 60 minutos.

A Figura 5.11, mostra interferometrias típicas das amostras T, TCr e TNiP ensaiadas por 10, 30 e 60 minutos. Ao que parece, em nenhum dos ensaios as texturas foram desgastadas de forma significativa, pois não se percebe alteração na geometria inicial dos bolsos. Este resultado está de acordo com a Figura 5.7, em que aparentemente nem mesmo nos ensaios realizados com 60 minutos foi possível medir a taxa de desgaste das amostras com exatidão.

No passe de acabamento da laminação, o desgaste do cilindro pode ser caracterizado como microdesgaste, pois a profundidade inicial das texturas não é

superada pela perda superficial de material. Assim, empiricamente, o desgaste do cilindro é usualmente descrito como uma perda de rugosidade (WENTINK et al., 2015). Portanto, as análises a seguir consistem em avaliar parâmetros de rugosidade das superfícies ensaiadas a fim de se obter resultados que indiquem o que ocorreu ou que indiquem diferenças na durabilidade das texturas revestidas e não revestidas.

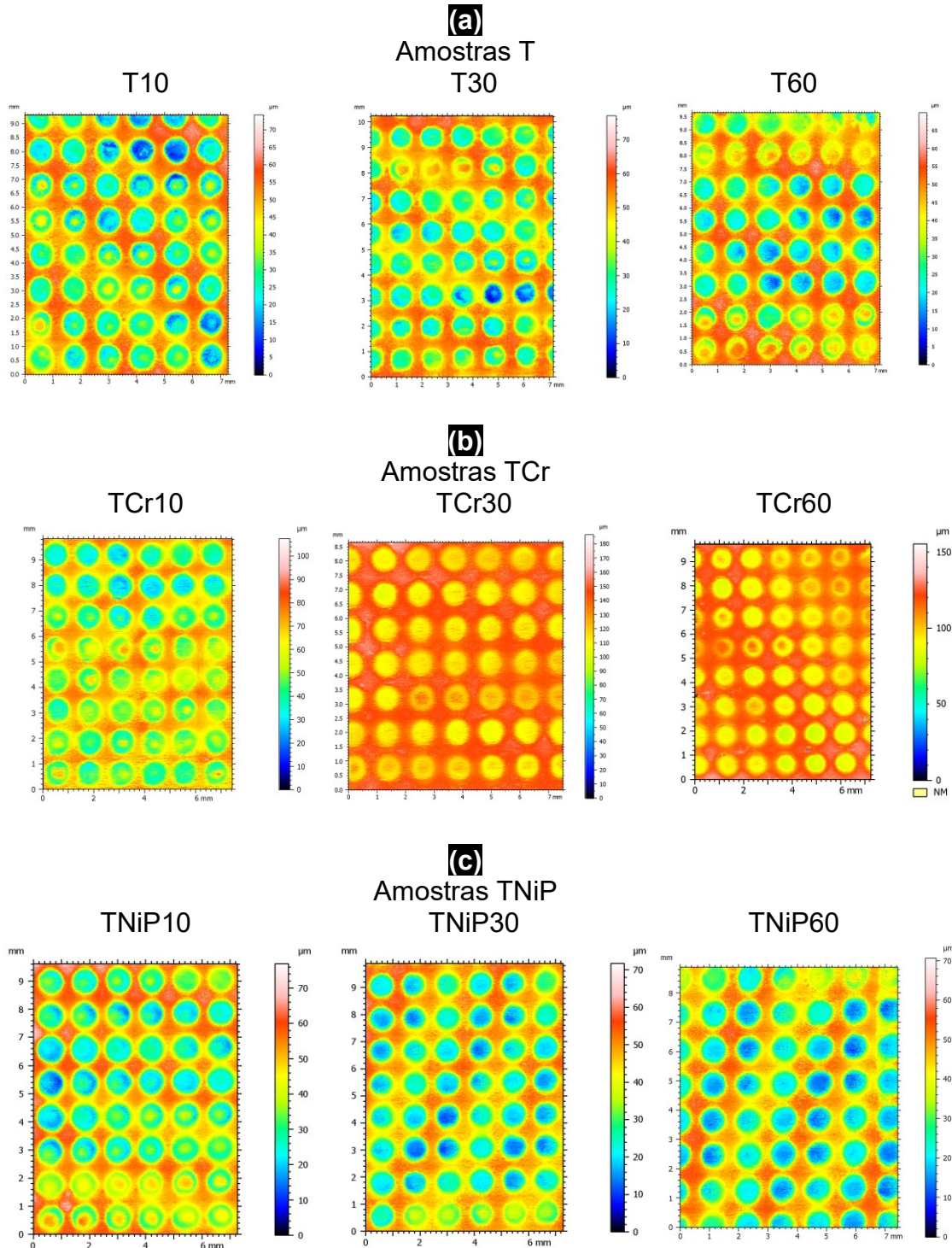


Figura 5.11 – Interferometrias típicas de amostras submetidas a ensaios de deslizamento por 10, 30 e 60 minutos: (a) amostras T, (b) amostras TCr e (c) amostras TNiP. Direção de deslizamento: da esquerda para direita.

A Figura 5.12 mostra os parâmetros bidimensionais R_q , R_{pc} e R_{dq} nas regiões entre bolsos das superfícies T, TCr e TNiP não ensaiadas, bem como após ensaios de 10, 30 e 60 minutos. As medições foram realizadas na direção perpendicular ao deslizamento. Essa análise somente nas regiões entre bolsos, e não na superfície completa, foi realizada porque no passe de acabamento da laminação não se espera que ocorra desgaste severo das texturas produzidas. Assim, essas áreas fora dos bolsos seriam as mais afetadas antes de o cilindro de laminação precisar ser trocado, isto é, quando as características topográficas do cilindro forem modificadas devido ao uso de tal maneira que a chapa laminada não adquira mais as características topográficas desejadas.

Na Figura 5.12-a estão as amostras somente texturizadas; nota-se que o parâmetro R_q não apresentou variações significativas. Por outro lado, há uma leve tendência de redução nos parâmetros R_{pc} e R_{dq} à medida que o tempo de ensaio aumenta. Isso indica que embora o parâmetro R_q não tenha apresentado tendência de variação, a elevação do tempo de ensaio resultou em uma remoção dos picos mais proeminentes das superfícies das amostras. A Figura 5.12-b e a Figura 5.12-c correspondentes, respectivamente, às amostras revestidas com cromo duro e com níquel químico, mostram que não ocorreu uma tendência clara de aumento ou redução nos valores de R_q , R_{pc} e R_{dq} com a elevação do tempo de ensaio, o que indica que os revestimentos atuaram protegendo os picos mais proeminentes das superfícies.

De acordo com a Figura 5.12, aparentemente as superfícies texturizadas pelo método MECT com bolsos e revestidas com cromo duro ou níquel químico podem elevar a vida útil do cilindro utilizado no passe de acabamento da laminação a frio.

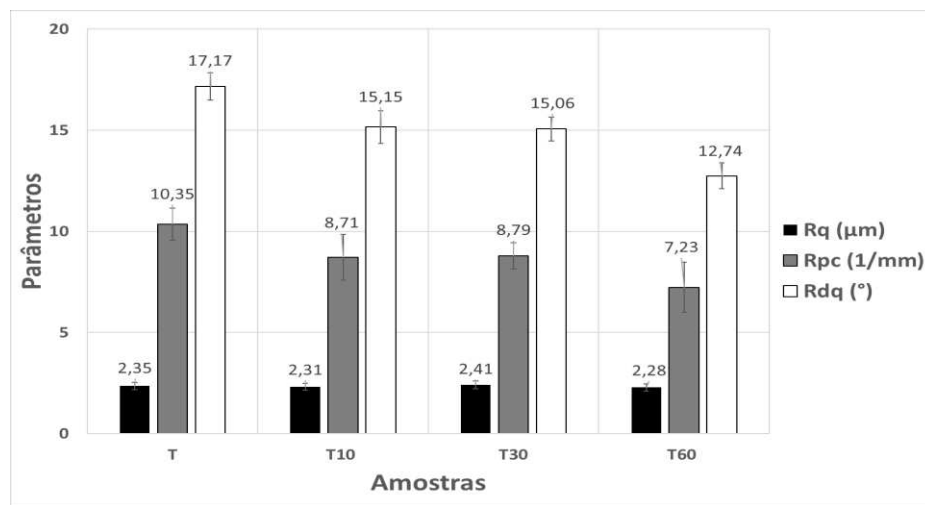
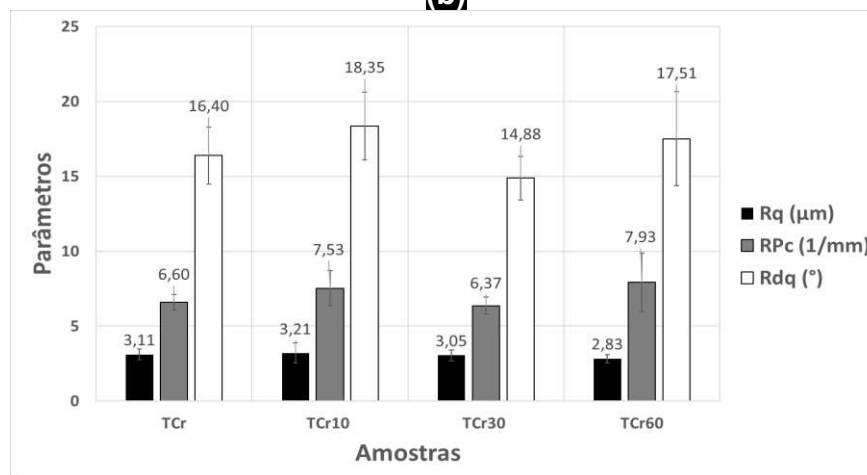
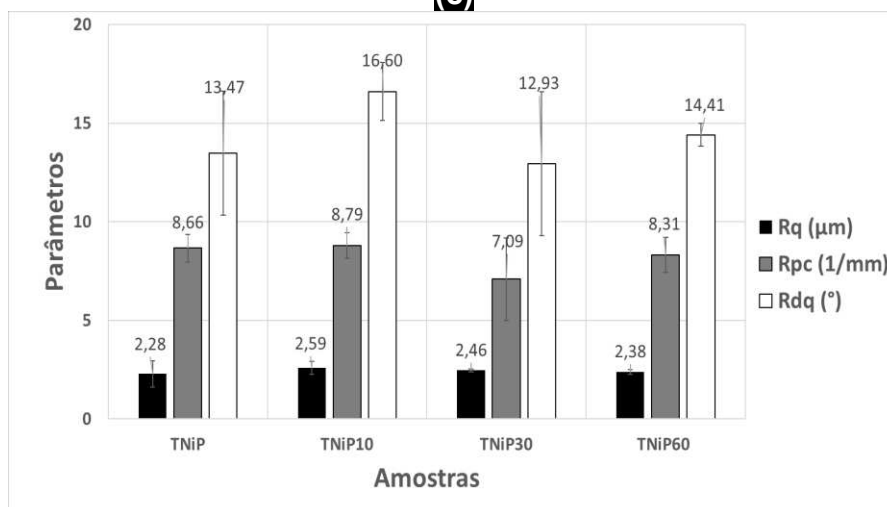
(a)**(b)****(c)**

Figura 5.12 – Parâmetros Rq, Rpc e Rdq nas regiões entre bolsos correspondentes a amostras: (a) não revestidas, (b) revestidas com cromo duro, (c) revestidas com níquel químico.

A análise de parâmetros de rugosidade nas regiões entre bolsos, com parâmetros bidimensionais, é importante para analisar o comportamento da porção da superfície da amostra que efetivamente entra em contato com o contracorpo. Por outro lado, é interessante também avaliar a superfície completa, isto é, levando-se em conta as regiões entre bolsos e os bolsos. Dessa forma, as análises a seguir utilizam parâmetros topográficos tridimensionais que são medidos não em um perfil de superfície, mas em uma área de interesse.

A Figura 5.13 mostra os parâmetros tridimensionais S_q , S_{dq} e S_{pd} nas superfícies T, TCr e TNiP não ensaiadas e nessas superfícies ensaiadas por 10, 30 e 60 minutos.

A Figura 5.13-a mostra os resultados correspondentes à superfície texturizada e não revestida; o parâmetro S_q apresenta um leve crescimento quando se compara o ensaio de 10 minutos com a amostra não ensaiada. No entanto, com maiores tempos de ensaio, há uma tendência de alisamento dessa superfície, pois o parâmetro S_q começa a decrescer. O parâmetro S_{dq} apresenta uma tendência de redução com maiores tempos de ensaio, o que indica que as irregularidades mais pontiagudas podem estar sendo desgastadas. O parâmetro S_{pd} sofre uma elevação, em relação à superfície não ensaiada, quando o tempo de ensaio é de 10 minutos; para tempos de ensaios maiores esse parâmetro é menor, ou seja, ensaiar a superfície não revestida inicialmente eleva o número de picos por unidade de área, talvez apenas como efeito imediato do contato inicial, mas posteriormente a tendência é que esses picos sejam desgastados com a elevação do tempo de ensaio.

A Figura 5.13-b e a Figura 5.13-c mostram, respectivamente, os resultados correspondentes às superfícies texturizadas e revestidas com cromo duro e texturizadas e revestidas com níquel químico. Nesses dois casos: o parâmetro S_q não sofreu variações significativas com a elevação do tempo de ensaio. O parâmetro S_{dq} também não apresenta grandes variações e nem uma tendência clara de decrescimento. O parâmetro S_{pd} é maior para amostras ensaiadas em relação às não ensaiadas, entretanto não é possível observar uma tendência de decrescimento desse parâmetro com o aumento do tempo de ensaio como foi observado no caso das amostras não revestidas (Figura 5.13-a).

De acordo com a Figura 5.13, os revestimentos de cromo duro e níquel químico atuam de maneira a retardar o desgaste dos picos mais altos de superfícies

texturizadas pelo método MECT e, portanto, aumentam a durabilidade das texturas fabricadas.

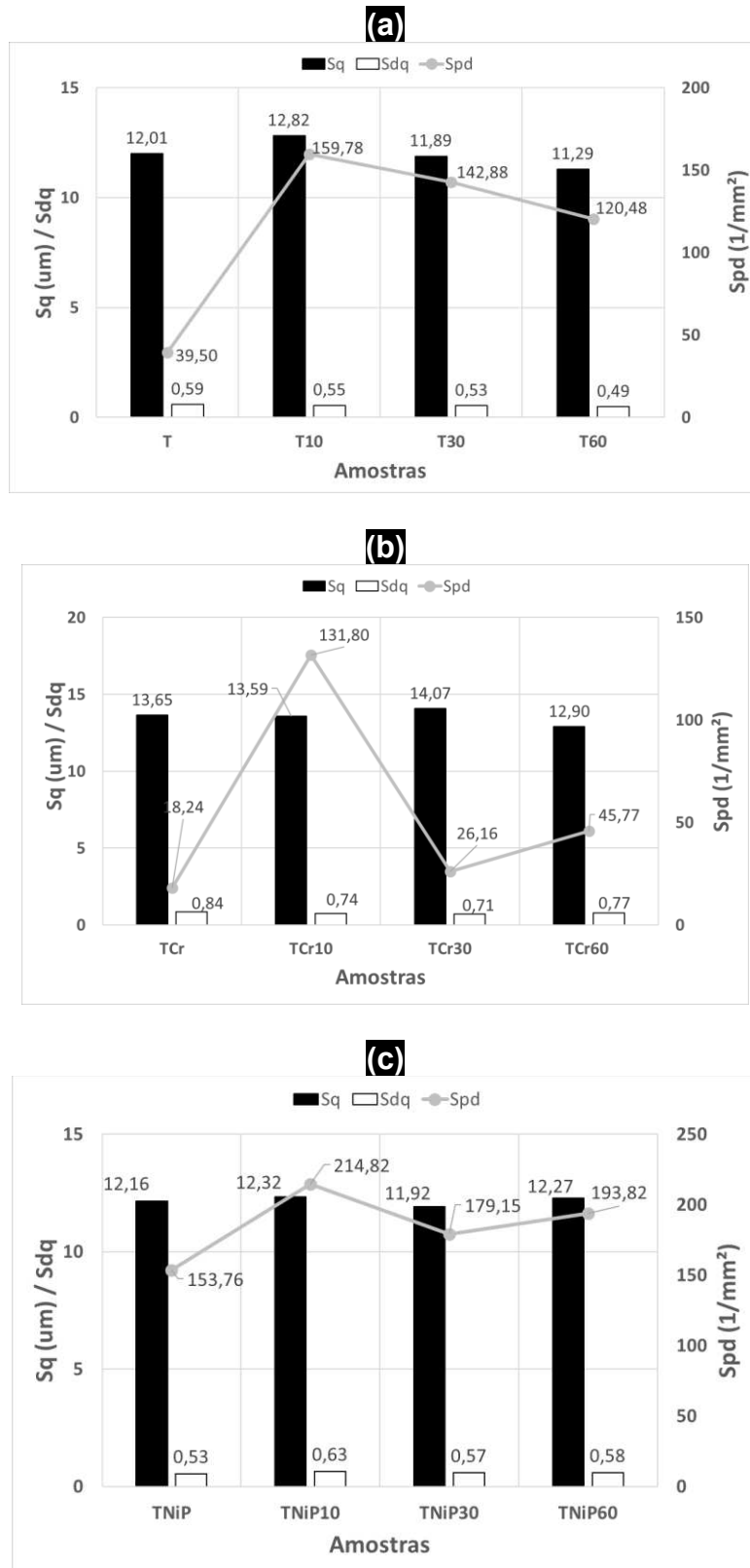


Figura 5.13 – Parâmetros Sq, Sdq e Spd correspondentes a amostras: (a) não revestidas, (b) revestidas com cromo duro, (c) revestidas com níquel químico.

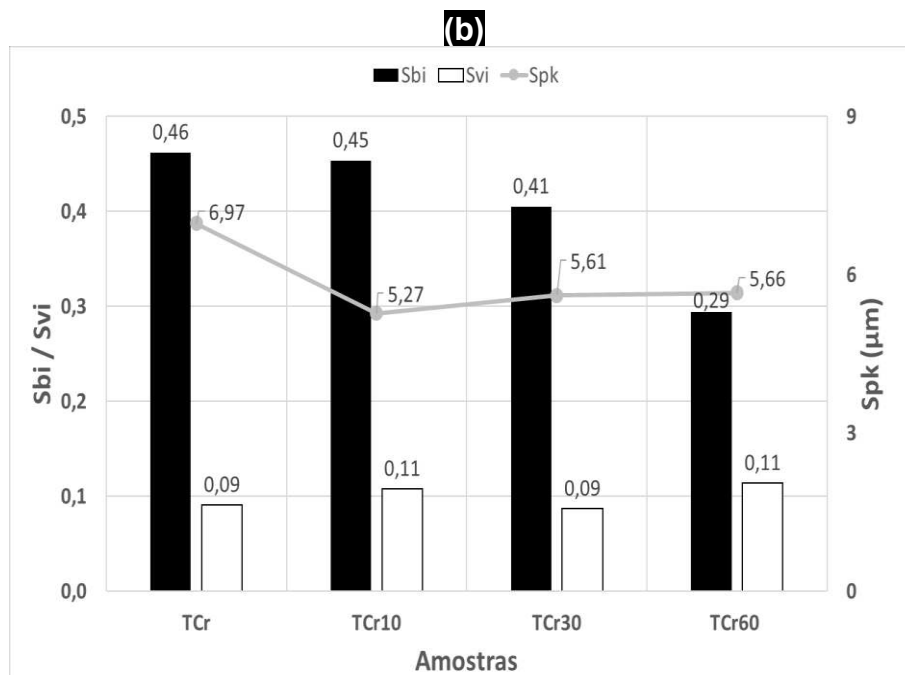
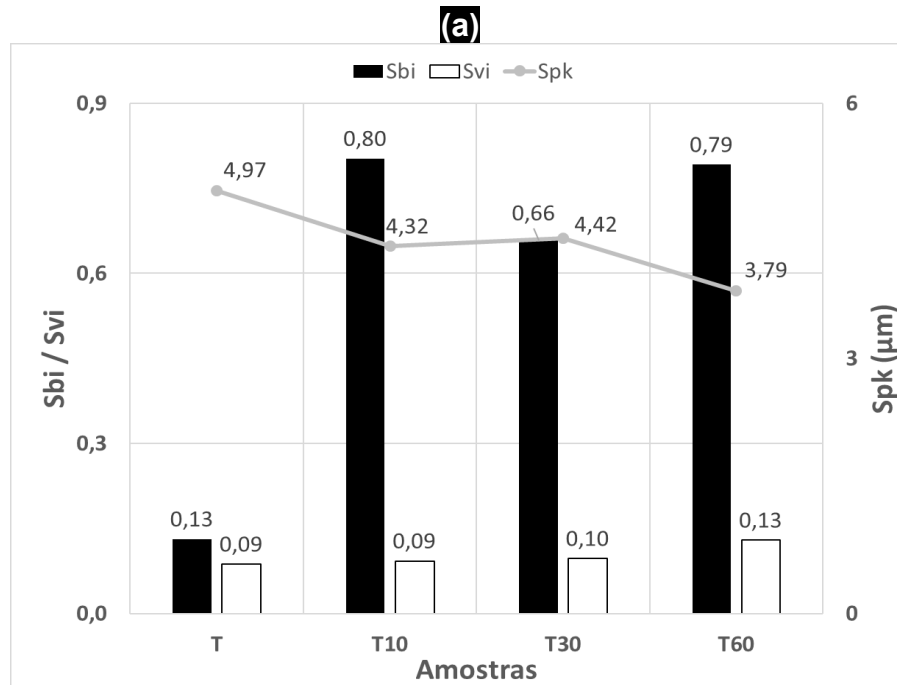
A Figura 5.14 mostra os parâmetros tridimensionais Sbi, Svi e Spk nas superfícies T, TCr e TNiP não ensaiadas e nessas superfícies ensaiadas por 10, 30 e 60 minutos.

A Figura 5.14-a mostra os resultados correspondentes às amostras texturizadas e não revestidas. Nota-se que as amostras ensaiadas possuem valores de Sbi mais elevados que a amostra não ensaiada. Ao que parece, quando a amostra é submetida aos ensaios de deslizamento ocorre um alisamento da superfície, o que resulta em uma maior capacidade de suporte mecânico da superfície. O parâmetro Svi aparentemente não sofre alterações significativas. O parâmetro Spk apresenta uma tendência de decrescimento com a elevação do tempo de ensaio; assim os tempos de ensaios de deslizamento parecem ser suficientes para que ocorra o desgaste dos picos mais elevados.

A Figura 5.14-b e a Figura 5.14-c mostram, respectivamente, os resultados correspondentes às amostras texturizadas e revestidas com cromo duro e texturizadas e revestidas com níquel químico. Nos dois casos o parâmetro Sbi parece tender a diminuir com o aumento do tempo de ensaio, o que indica que as superfícies se tornam mais irregulares, provavelmente devido à formação de uma tribocamada ou transferência de material do contracorpo para a amostra, entretanto maiores esclarecimentos serão obtidos nas análises de microscopia eletrônica de varredura. O parâmetro Svi não apresenta variações significativas. Por fim, o parâmetro Spk não apresenta tendências claras de crescimento ou decrescimento nas superfícies revestidas com a elevação do tempo de ensaio, uma possível explicação está associada aos fenômenos tribológicos citados anteriormente que ocorrem na interface.

De forma geral, a Figura 5.14 mostra que os revestimentos atuam elevando a capacidade de suporte mecânico em amostras não ensaiadas, conforme indica os valores de Sbi das amostras T, TCr e TNiP, o que já havia sido constatado anteriormente. Os tempos de ensaio foram suficientes para alisar a superfície e melhorar a capacidade de suporte mecânico no caso da superfície não revestida, mas não nos casos das superfícies revestidas. O parâmetro Svi não apresenta variações significativas, o que aponta que a capacidade de retenção de fluido nos vales pouco varia com a elevação do tempo de ensaio nas superfícies com ou sem revestimentos. Por fim, novamente percebe-se que nas amostras não revestidas os picos mais

elevados são desgastados à medida que o tempo de ensaio aumenta, mas essa tendência não fica clara no caso das amostras revestidas.



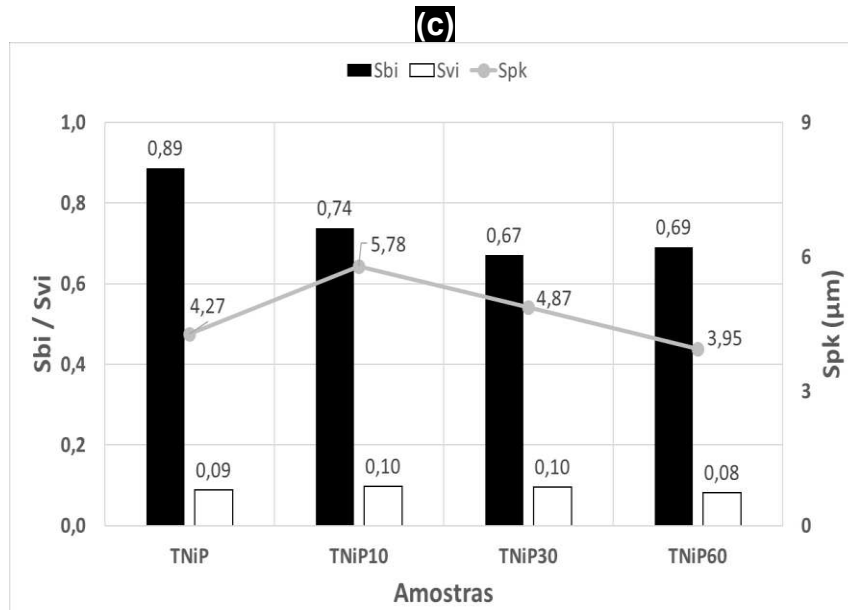


Figura 5.14 – Parâmetros Sbi, Svi e Spk correspondentes a amostras: (a) não revestidas, (b) revestidas com cromo duro, (c) revestidas com níquel químico.

A Figura 5.15 mostra o espaço morfológico correspondente às amostras T, TCr e TNiP ensaiadas e não ensaiadas. Percebe-se que o coeficiente de achatamento ou *kurtosis* (*Sku*) está abaixo de 3 para a maioria dos pontos, o que provavelmente está associado com o fato de os bolsos distribuídos na superfície não possuírem exatamente as mesmas dimensões e nem estarem exatamente às mesmas distâncias uns dos outros; essas e outras irregularidades contribuem para uma curva de distribuição das alturas do perfil mais uniformemente distribuída. Outra observação consiste no fato de o coeficiente de assimetria ou *skewness* (*Ssk*) permanecer negativo para todos os pontos do espaço morfológico, o que indica a presença de vales profundos o suficiente para reter vestígios de lubrificante; esse comportamento também está associado com as texturas na superfície das amostras.

Em relação aos ensaios nas amostras não revestidas (T), para maiores tempos de ensaio, o parâmetro *Sku* tem um leve aumento sem, no entanto, ultrapassar o número 3, aparentemente nada significativo. Por outro lado, o comportamento de *Ssk*, que se torna mais negativo com maiores tempos de ensaio, indica que ocorre uma remoção dos picos mais proeminentes sem, entretanto, alterar significativamente a profundidade das texturas superficiais.

Em relação às amostras texturizadas e revestidas (TCr e TNiP), nota-se que a topografia varia pouco com a elevação do tempo de ensaio, pois os valores de *Sku* permanecem quase todos entre 2 e 3 e os valores de *Ssk* permanecem todos na faixa

entre -0,5 e -0,2, o que aparentemente mostra a proteção que os revestimentos exercem sobre a superfície texturizada. A amostra revestida com cromo duro e não ensaiada possui um valor de S_{ku} entre 4 e 5, provavelmente devido à modificação de topografia que a deposição de cromo duro confere à superfície texturizada, cobrindo alguns picos e elevando a altura desses. Entretanto, percebe-se que com um ensaio de 10 minutos essa superfície já passa a apresentar um valor de S_{ku} dentro da faixa correspondente às demais amostras revestidas.

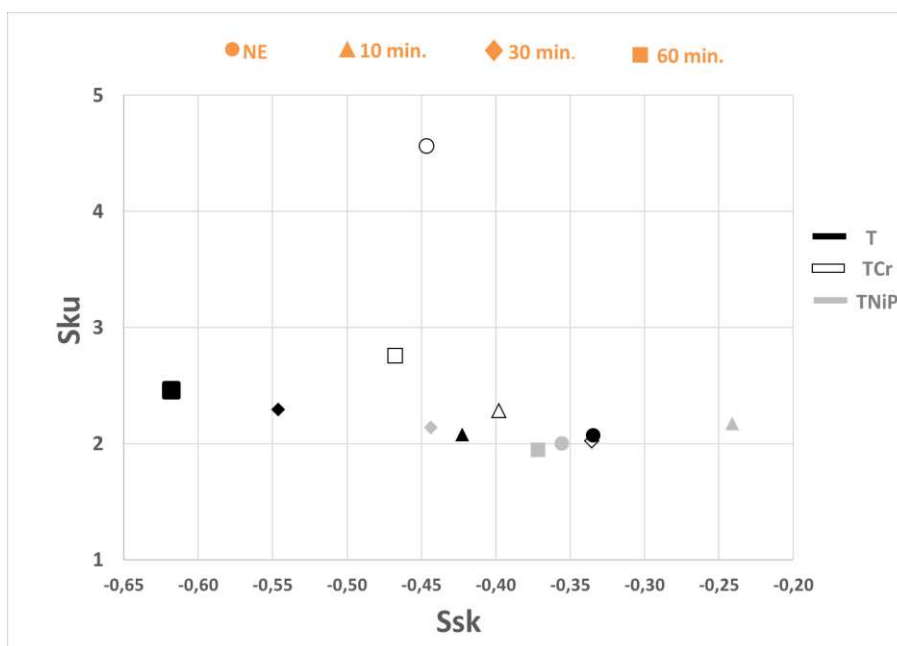


Figura 5.15 – Espaço morfológico correspondente às amostras T, TCr e TNiP não ensaiadas (NE) e ensaiadas por 10, 30 e 60 minutos.

A Figura 5.16, obtida no MEV, mostra uma superfície somente texturizada e ensaiada por 10 minutos, via elétrons secundários (Figura 5.16-a) e elétrons retroespalhados (Figura 5.16-b). É possível notar na Figura 5.16-a que as regiões entre bolsos são as mais “alisadas” devido ao contato com o contracampo; não há evidência de que tenha ocorrido um desgaste a ponto de modificar significativamente a geometria inicial das texturas. A Figura 5.16-b mostra que o material “alisado” nas regiões entre bolsos (cinza claro no contraste) está sobre uma camada de material que aparece branco no contraste, o qual aparentemente foi menos afetado durante os ensaios

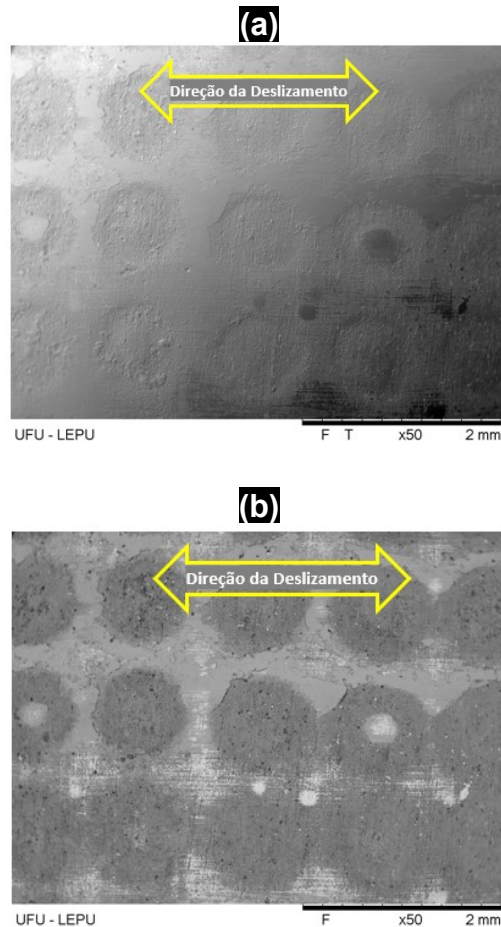


Figura 5.16 –Superfície somente texturizada ensaiada por 10 minutos (T10) obtida via MEV: (a) SE e (b) BSE.

A Figura 5.17 (SE) e a Figura 5.18 (BSE) mostram as mesmas superfícies com maior aumento. A Figura 5.19, obtida via BSE, mostra uma análise de EDS em um ponto da região entre bolsos. Estas imagens evidenciam uma tribocamada de material que foi “alisado” durante os ensaios de deslizamento; aparentemente o material dessa tribocamada foi cominuído, deformado e parcialmente oxidado, mas não se tornou suficiente espesso ou frágil a ponto de ser removido ou de sofrer lascamento em grandes volumes. A Figura 5.18 mostra a análise de EDS que foi realizada em um ponto dessa tribocamada, a qual é formada por cromo, ferro e oxigênio. Na Figura 5.19 é possível notar que a porção de material mais clara que está sob a camada transferida alisada é também formada por cromo, ferro e oxigênio. É provável que a camada transferida da Figura 5.18 seja originada principalmente de uma porção de material da superfície da qual o ferro foi intensamente removido na texturização, a ponto de reduzir o suporte mecânico da matriz e deixar essa porção de material mais suscetível à remoção. Provavelmente a porção mais clara no

contraste (Figura 5.19), talvez por ter sofrido uma dissolução anódica menos intensa no processo de texturização, permaneceu menos afetada nos ensaios de deslizamento devido ao maior suporte mecânico da matriz. Além disso, essa região mais clara abaixo da camada transferida provavelmente sofreu bem menos tribo-oxidação.

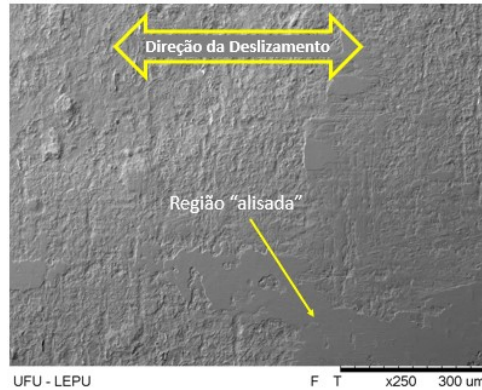


Figura 5.17 – Microscopia eletrônica de varredura (SE) de uma superfície somente texturizada e ensaiada por 10 minutos (T10)

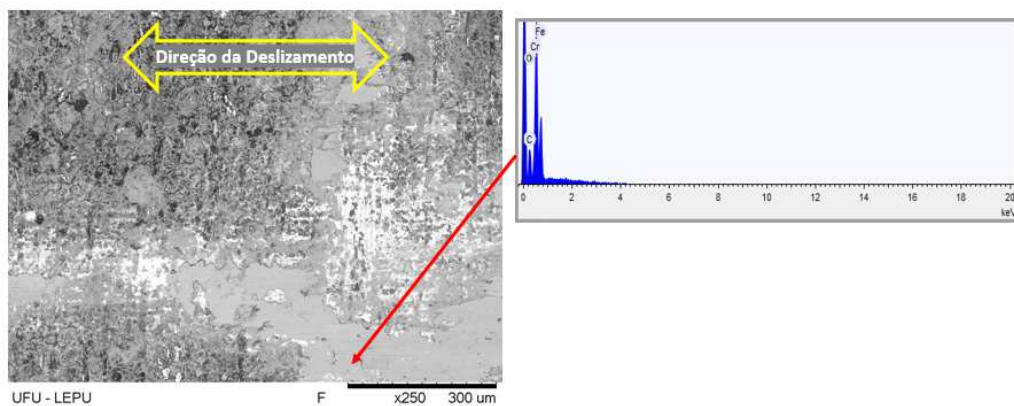


Figura 5.18 – Análise de EDS no ponto da superfície indicado na Figura 5.17. Imagem obtida via BSE.

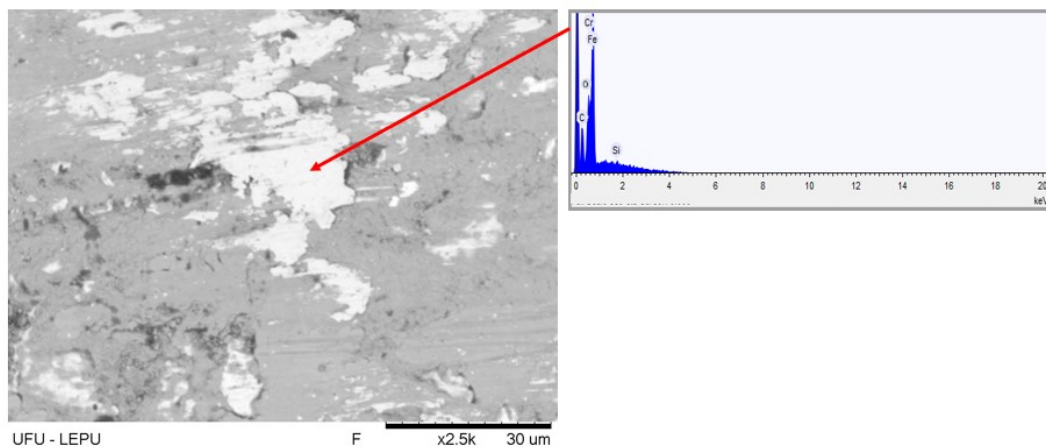


Figura 5.19 – Análise de EDS em uma região fora dos bolsos de uma superfície ensaiada por 10 minutos. Imagem obtida via BSE.

A Figura 5.20, obtida via BSE, mostra um contracorpo ensaiado contra uma amostra somente texturizada por 10 minutos bem como a análise de EDS correspondente a uma região cinza escuro e outra a uma partícula preta. Nota-se que ocorreu acúmulo de material cinza escuro principalmente nas bordas da trilha de desgaste; é provável que se trate de material transferido da amostra para o contracorpo, provavelmente daquela camada alisada observada anteriormente na Figura 5.18. A análise de EDS da partícula preta sugere que se trate de carboneto de Fe,Cr ou de óxidos.

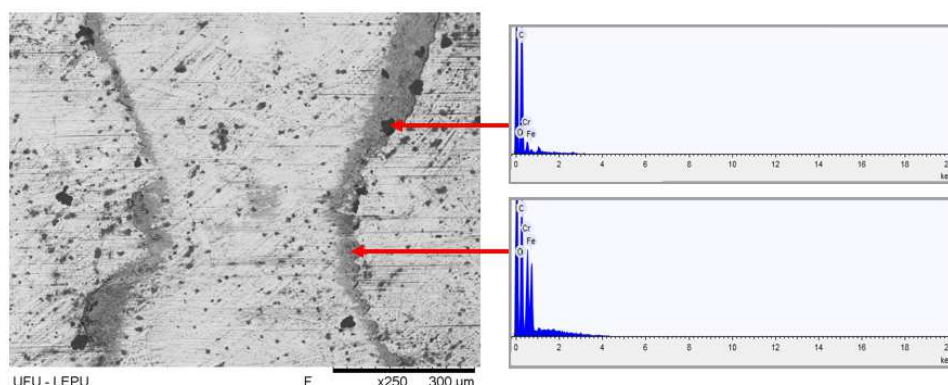
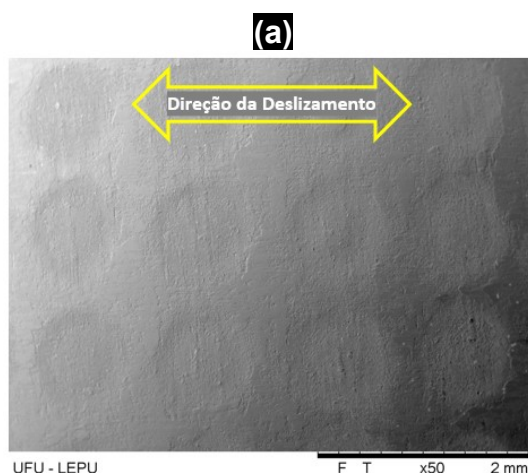


Figura 5.20 – Análise de EDS do contracorpo ensaiado contra uma amostra somente texturizada por 10 minutos. Imagem obtida via BSE.

A Figura 5.21 mostra uma superfície texturizada e ensaiada por 30 minutos obtida no MEV via elétrons secundários (Figura 5.21-a) e elétrons retroespalhados (Figura 5.21-b). É possível notar na Figura 5.21-a que o material “alisado” está presente de maneira mais uniforme nas regiões entre bolsos quando se compara com a uniformidade da tribocamada correspondente ao ensaio de 10 minutos; novamente, não há evidência de que tenha ocorrido um desgaste a ponto de modificar significativamente a geometria inicial das texturas.



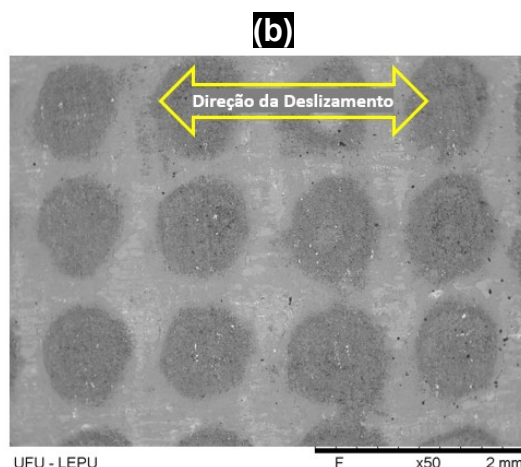
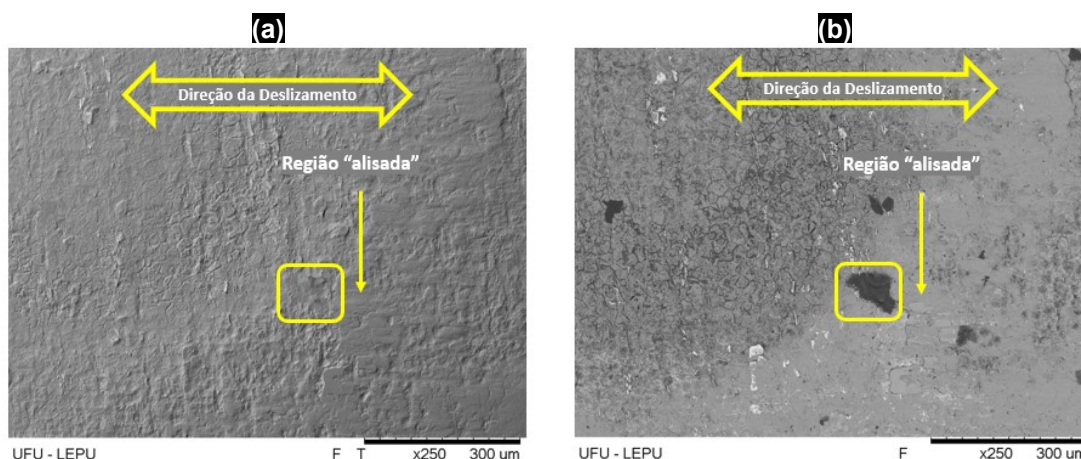


Figura 5.21 - Superfície somente texturizada ensaiada por 30 minutos (T30) obtida via MEV: (a) SE e (b) BSE.

A Figura 5.22 apresenta essas trilhas de desgaste com maior aumento via elétrons secundários (Figura 5.22-a) e elétrons retroespalhados (Figura 5.22-b). É possível notar que mesmo com a presença de uma tribocamada ainda percebe-se regiões com cavidades (Figura 5.22-a) e escuras (Figura 5.22-b), conforme destacado pelos retângulos traçados em linha contínua amarela. A análise de EDS na Figura 5.22-c sugere a presença de carbonetos de Fe,Cr, mas é possível também que as partículas escuras se tratem de óxidos. Com relação à análise de EDS da porção de material “alisado” durante o ensaio de 30 minutos (Figura 5.22-c) são válidas as mesmas considerações realizadas anteriormente para o ensaio de 10 minutos, isto é, essa camada aparentemente também é originada de regiões de mais intensa dissolução anódica e que portanto foram mais facilmente desgastadas. Os debris formados foram cominuídos, aglomerados, deformados, oxidados e transferidos à amostra, conforme proposto por MONTMITONNET; DELAMARE; RIZOULIERES, 2000.



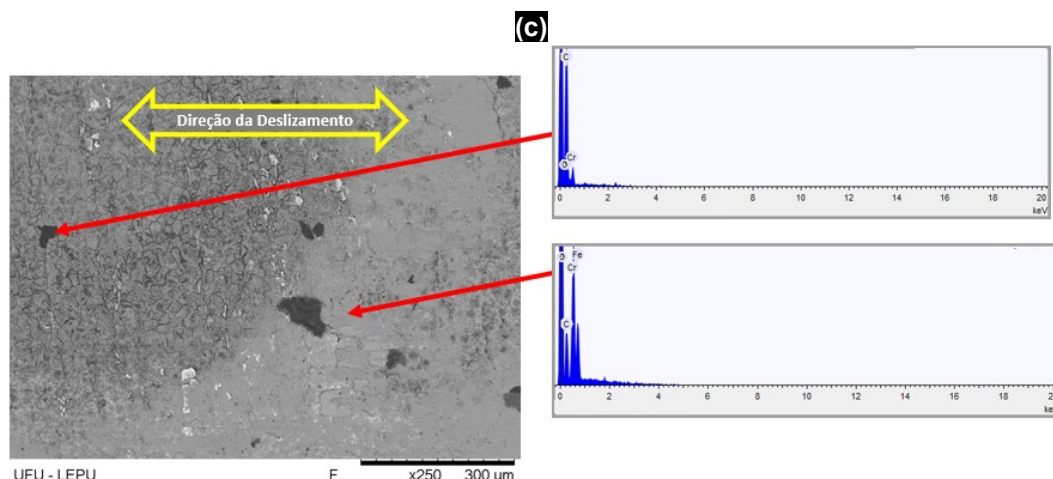


Figura 5.22 – Superfície texturizada e ensaiada por 30 minutos analisada via MEV: (a) SE, (b) BSE e (c) EDS em uma imagem obtida via BSE.

A Figura 5.23, obtida via MEV (BSE), mostra um contracorpo ensaiado contra uma amostra somente texturizada por 30 minutos bem como a análise de EDS correspondente à uma porção de material cinza escuro no contraste, o qual é constituído por ferro, cromo, carbono e oxigênio; é provável que se trate de material transferido da amostra para o contracorpo, provavelmente semelhante à camada transferida observada anteriormente na Figura 5.22.

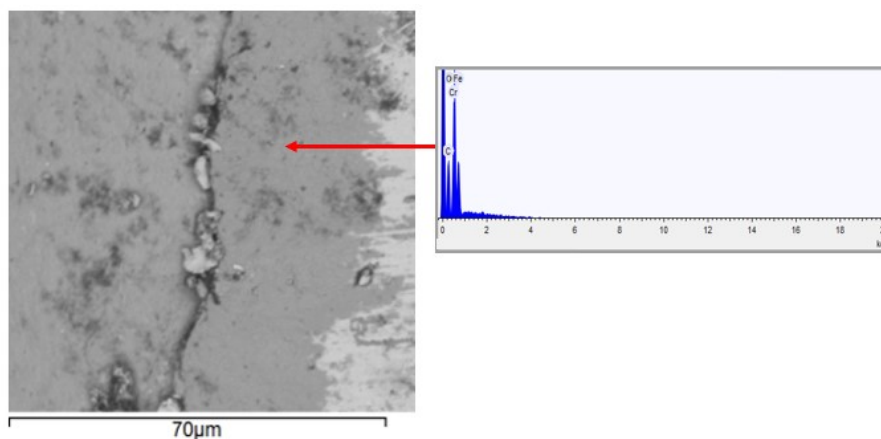


Figura 5.23 – Análise de EDS do contracorpo ensaiado contra uma amostra somente texturizada por 30 minutos. Imagem obtida via BSE.

A Figura 5.24 foi obtida no MEV e mostra uma superfície texturizada e ensaiada por 60 minutos, via elétrons secundários (Figura 5.24-a) e elétrons retroespalhados (Figura 5.24-b). É possível notar na Figura 5.24-a que a porção de material alisado nas regiões entre bolsos tem aspecto semelhante ao observado na superfície ensaiada por 30 minutos (Figura 5.21). Mesmo o tempo de 60 minutos sendo o maior utilizado neste trabalho e a superfície ensaiada sendo não revestida, não ocorreram

mudanças significativas na geometria original das texturas fabricadas. A Figura 5.24-b mostra algumas partículas pretas, provavelmente carbonetos de Fe,Cr ou óxidos.

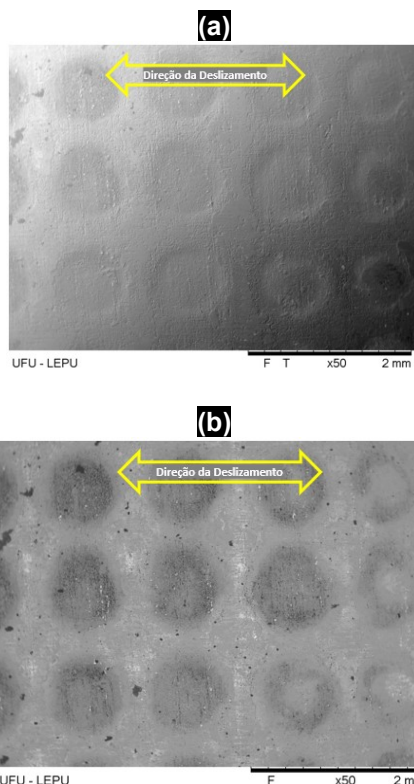


Figura 5.24 – Superfície somente texturizada ensaiada por 60 minutos (T60) obtida via MEV: (a) SE e (b) BSE.

Essa trilha é apresentada com maior aumento via elétrons secundários (Figura 5.25-a) e elétrons retroespalhados (Figura 5.25-b). A Figura 5.25-c mostra algumas análises de EDS. Nota-se uma tribocamada “alisada” mais elevada (Figura 5.25-a) sobre a superfície, conforme indicado por uma seta na imagem. Além disso há retângulos numerados que destacam algumas regiões de interesse. O retângulo 1 mostra uma região que contém uma cavidade (Figura 5.25-a) escura (Figura 5.25-b) semelhante ao que foi observado na superfície não ensaiada (Figura 4.19). Os retângulos 2 e 3 mostram regiões onde aparentemente carbonetos de Mo,V (claros no contraste) protuberantes ainda permanecem na superfície mesmo após 60 minutos de ensaio. Na Figura 5.25-c as análises I e II são referentes à camada transferida, ocorrendo somente diferença de altura entre esses pontos, sendo o ponto II correspondente a uma região mais elevada. A região III corresponde a uma porção superficial menos afetada pelo contato nos ensaios de deslizamento.

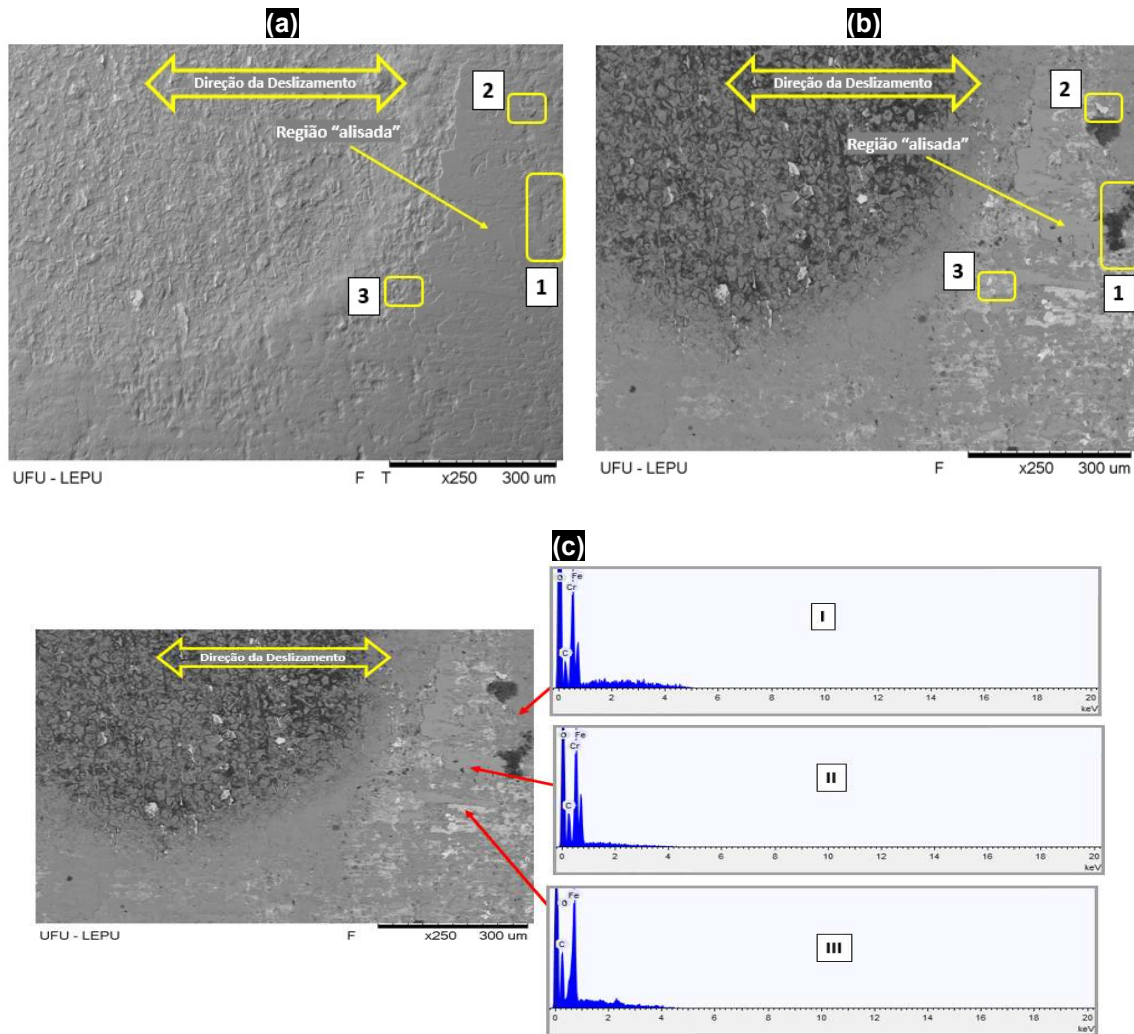


Figura 5.25 – Microscopia eletrônica de varredura de uma superfície somente texturizada e ensaiada por 60 minutos: (a) via SE, (b) via BSE e (c) análises de EDS.

A Figura 5.26-a, obtida via MEV (BSE), mostra a região da borda da trilha de desgaste em um contracorpo ensaiado por 60 minutos contra uma amostra somente texturizada. Figura 5.26-b mostra uma análise de EDS correspondente a uma porção de material cinza escuro no contraste e outra correspondente a uma partícula preta. Ao que parece o material cinza escuro que é acumulado principalmente na borda da trilha (Figura 5.26-a) se trata de uma camada transferida semelhante à observada anteriormente para a amostra na Figura 5.25. A partícula preta pode ser um carboneto de Fe,Cr. Parece que devido à perda de suporte mecânico essa fase escura é mais suscetível a ser arrancada e transferida do que os carbonetos primários protuberantes observados na Figura 5.25. O retângulo na Figura 5.26-b destaca estes carbonetos.

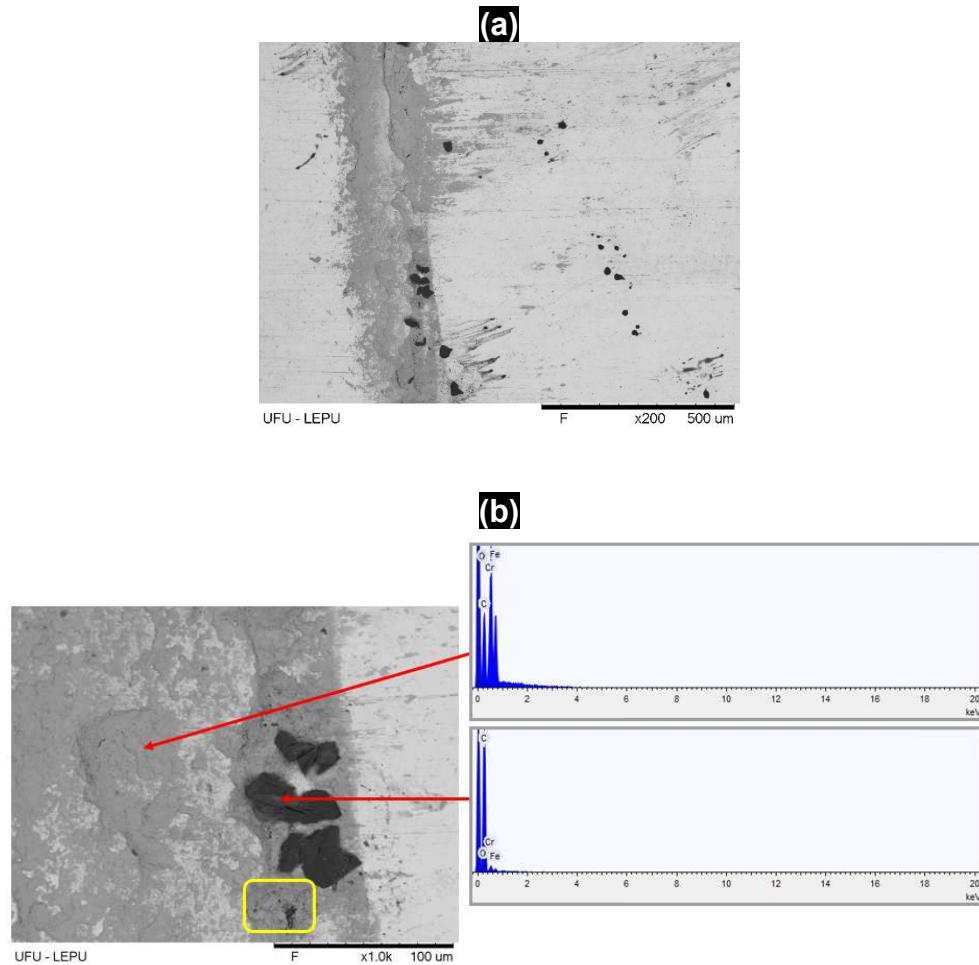
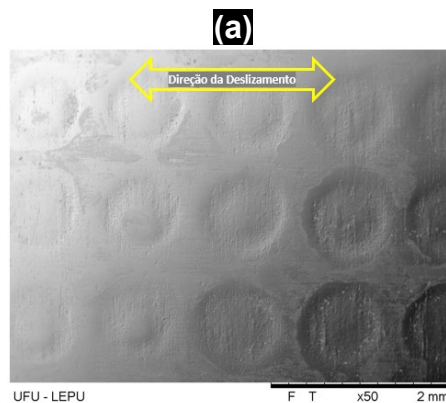


Figura 5.26- Análise de EDS de um contracorpo ensaiado contra uma amostra somente texturizada por 60 minutos. Imagem obtida via BSE.

A Figura 5.27, obtida via MEV, mostra uma superfície ensaiada por 10 minutos, texturizada e revestida com cromo duro. A Figura 5.27-a, obtida via SE, mostra que após 10 minutos de ensaio algumas partes das regiões entre bolsos já foram “alisadas” e a Figura 5.27-b, obtida via BSE, mostra que aparentemente as partículas da fase escura que estavam anteriormente mais concentradas nas regiões entre bolsos (Figura 4.20) agora estão presentes também dentro dos bolsos.



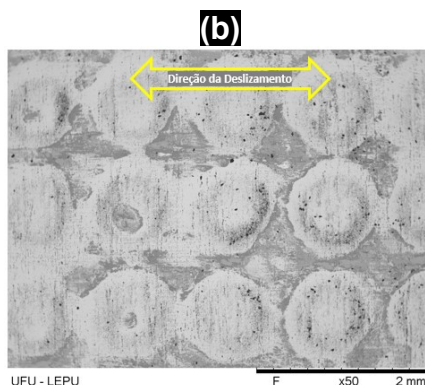
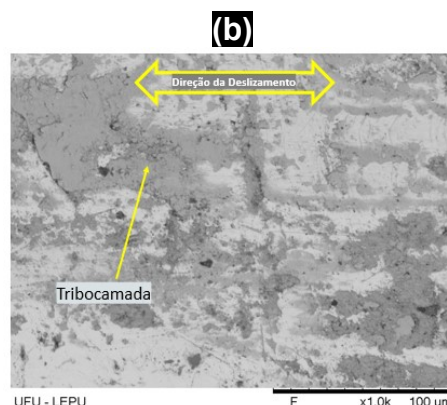
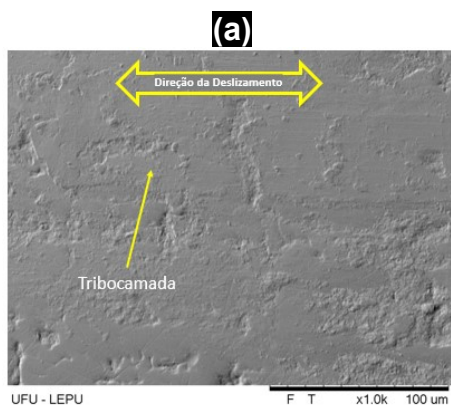


Figura 5.27 – Microscopia eletrônica de varredura de uma superfície texturizada, revestida com cromo duro e ensaiada por 10 minutos: (a) SE, (b) BSE.

Essas trilhas são observadas com maiores aumentos na Figura 5.28-a (obtida via SE), indicando uma camada transferida em relevo que está sobre a superfície da amostra. Essa tribocamada aparece cinza escuro no contraste da Figura 5.28-b, obtida via BSE, e aparentemente é formada por material proveniente principalmente do contracorpo, pois não há indícios de desgaste severo com remoção acentuada do revestimento depositado. Ao que parece, debris provenientes principalmente do contracorpo foram aglomerados, cominuídos e deformados para formar essa tribocamada que aparentemente é uma camada de transferência do contracorpo para a amostra. A análise de EDS I mostrada na Figura 5.28-c, obtida via BSE, mostra que essa tribocamada contém ferro, provavelmente transferido principalmente do contracorpo; a análise de EDS II é referente a uma porção da superfície revestida e não coberta pela tribocamada e, como esperado, essa região é rica em cromo e é empobrecida em ferro; a análise de EDS III é referente a uma partícula escura que pode ser procedente da fase escura oxidada mostrada na Figura 4.21-c. Parece que devido ao ensaio de deslizamento essa partícula foi removida e lançada na interface e posteriormente aderiu à tribocamada; é provável também que essa partícula escura seja um carboneto de Fe,Cr.



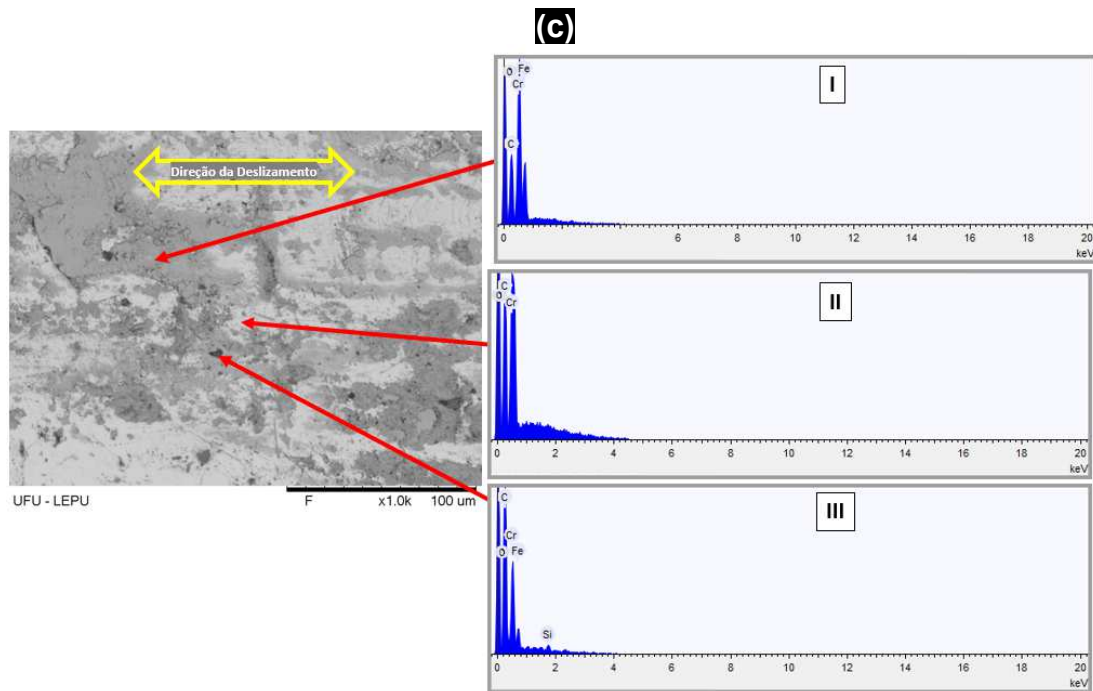
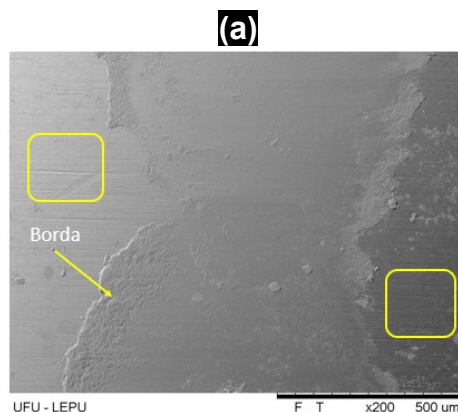


Figura 5.28 – Microscopia eletrônica de varredura de uma superfície ensaiada por 10 minutos, texturizada e revestida com cromo duro: (a) via SE, (b) via BSE e (c) análises de EDS.

A Figura 5.29 mostra um contracampo que foi ensaiado por 10 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com cromo duro. Na Figura 5.29-a, obtida via elétrons secundários, os retângulos presentes fora da trilha de desgaste mostram que nessas regiões ainda há marcas de retificação, o que não é percebido dentro da trilha, o que indica que na trilha de desgaste, de fato ocorreu uma alteração de topografia e provavelmente remoção de material; além disso a seta indica a borda da trilha onde ocorreu depósito de material. Na análise de EDS I na Figura 5.29-b, obtida via elétrons retroespalhados, nota-se que o material acumulado na borda da trilha, cinza escuro no contraste, aparentemente é constituído pelo mesmo material da tribocamada observada na amostra (Figura 5.28-c). A partícula escura, indicada pela análise de EDS II, parece se tratar de algum óxido.



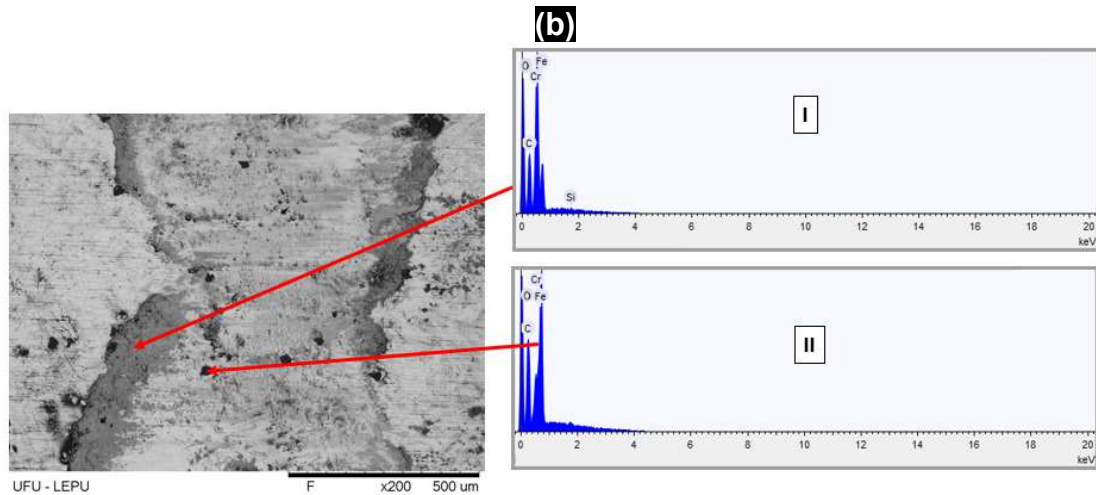


Figura 5.29 – Microscopia eletrônica de varredura de um contracorpo ensaiado por 10 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com cromo duro: (a) via SE e (b) análises de EDS.

A Figura 5.30, obtida via MEV, mostra uma superfície ensaiada por 30 minutos, texturizada e revestida com cromo duro. A Figura 5.30-a, obtida via SE, mostra que após 30 minutos as regiões entre bolsos se encontram com aspecto semelhante às aquelas correspondentes ao ensaio de 10 minutos (Figura 5.27). Na Figura 5.30-b, obtida via BSE, mostra que nas regiões entre bolsos ocorreu a formação de uma tribocamada.

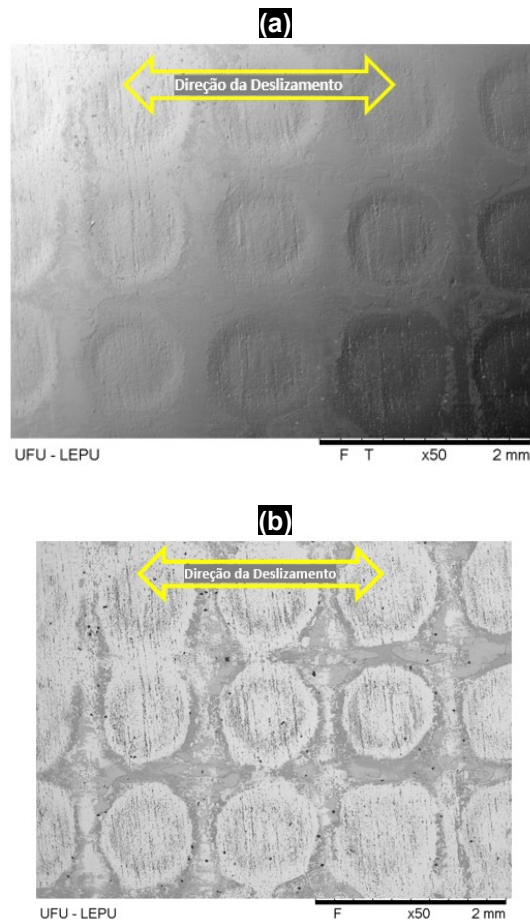
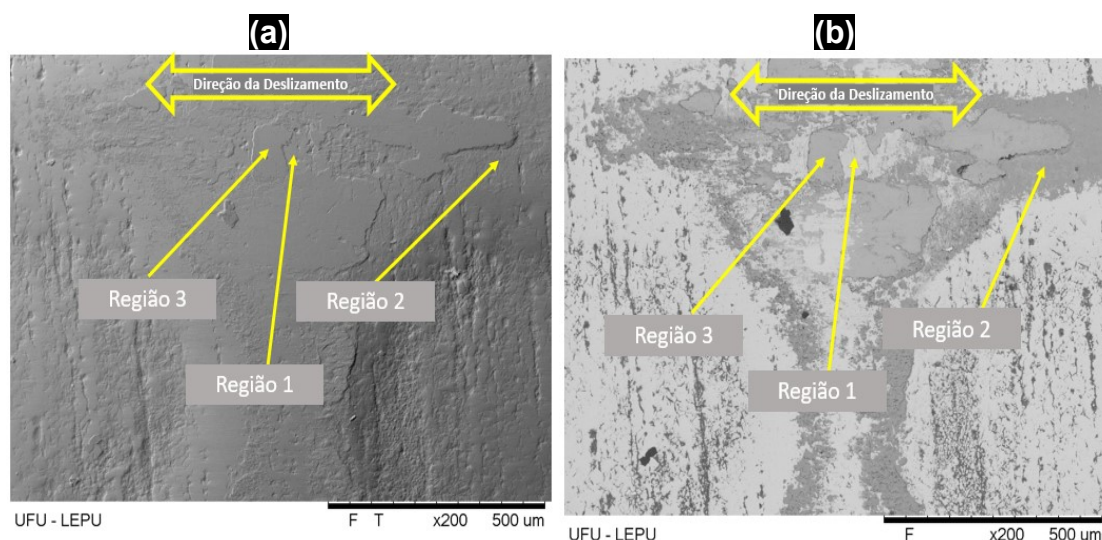


Figura 5.30 – Microscopia eletrônica de varredura de uma superfície texturizada, revestida com cromo duro e ensaiada por 30 minutos: (a) SE, (b) BSE.

Quando essa trilha é observada com maior aumento, é possível perceber na Figura 5.31-a (SE) e na Figura 5.31-b (BSE) três regiões distintas, as quais serão chamadas de regiões 1, 2 e 3, conforme indicado nas imagens. As análises de EDS na Figura 5.31-c, obtida via BSE, mostram que nas regiões entre bolsos há uma região “alisada” cinza (região 3) e outra região cinza escuro (região 2), ambas com ferro, cromo, carbono e oxigênio. No entanto, a região 2 apresenta um tom de cinza mais escuro que a região 3, o que indica que a região 2 é rica em elementos mais leves. A região 3, mais elevada que a 2, parece ser uma camada de transferência e é provavelmente formada pelos mesmos mecanismos já apontados na discussão da tribocamada mostrada na Figura 5.28. A região 2 aparentemente se trata de locais onde o revestimento foi mais removido e onde provavelmente ocorreu oxidação. A região 1, empobrecida em ferro, aparentemente é uma parte da superfície onde o revestimento de cromo duro ainda está preservado, além disso essa região apresenta cor semelhante a que se observa dentro dos bolsos onde teoricamente o revestimento também ainda está preservado.



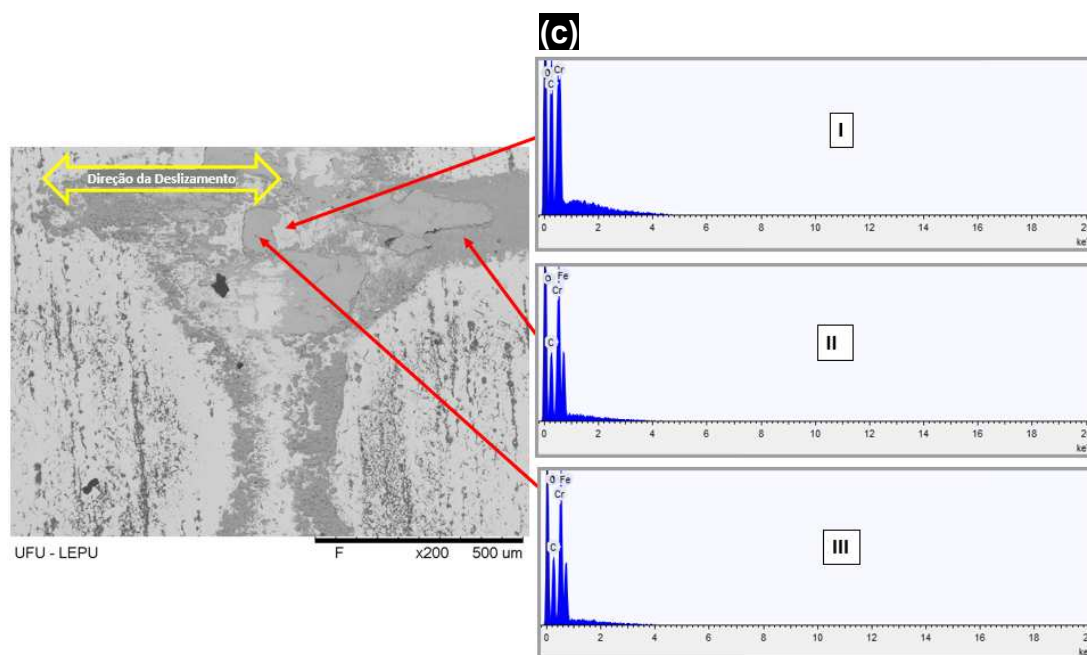


Figura 5.31 – Microscopia eletrônica de varredura de uma superfície ensaiada por 30 minutos, texturizada e revestida com cromo duro: (a) via SE, (b) via BSE e (c) análises de EDS.

A Figura 5.32 mostra um contracorpo que foi ensaiado por 30 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com cromo duro. Na Figura 5.32-a, obtida via elétrons secundários, se nota que há material acumulado nas bordas e no interior da trilha de desgaste. Na Figura 5.32-b, obtida via elétrons retroespalhados, a análise de EDS I na borda da trilha de desgaste indica que no material acumulado há ferro, carbono e cromo, provavelmente esse material é formado pelos mesmos mecanismos que formaram a camada de transferência (região 3) indicada na Figura 5.31. A análise de EDS II na Figura 5.32-b mostra que o material (escuro no contraste) acumulado dentro da trilha de desgaste pode ser procedente da fase escura já observada na Figura 5.28-c. A análise de EDS III mostra que no interior da trilha, na porção de material que aparece mais clara no contraste, não foi encontrado cromo, o que indica que não ocorreu transferência acentuada de cromo do revestimento para o contracorpo no ensaio realizado com 30 minutos.

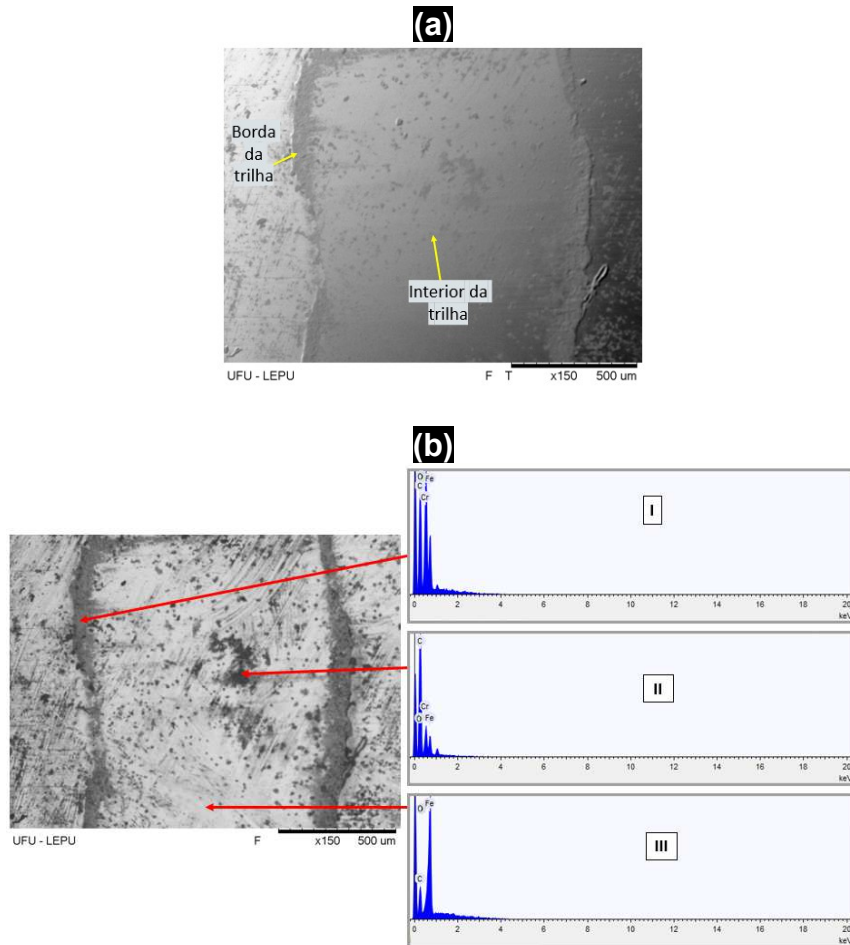
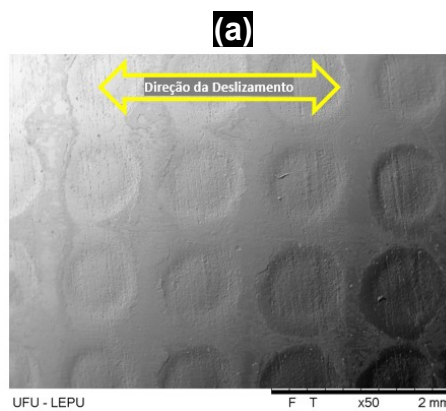


Figura 5.32 – Microscopia eletrônica de varredura de um contracorpo ensaiado por 30 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com cromo duro: (a) via SE e (b) análises de EDS.

A Figura 5.33, obtida via MEV, mostra uma superfície ensaiada por 60 minutos, texturizada e revestida com cromo duro. Nota-se que, em relação aos ensaios de 10 e 30 minutos, nas regiões entre bolsos há uma maior porção de material “alisado” (Figura 5.33-a) bem como uma maior porção de material cinza escuro (Figura 5.33-b).



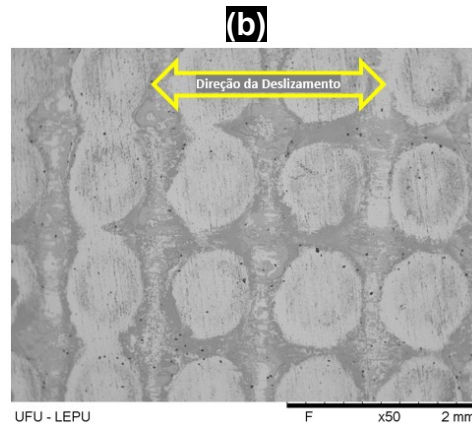
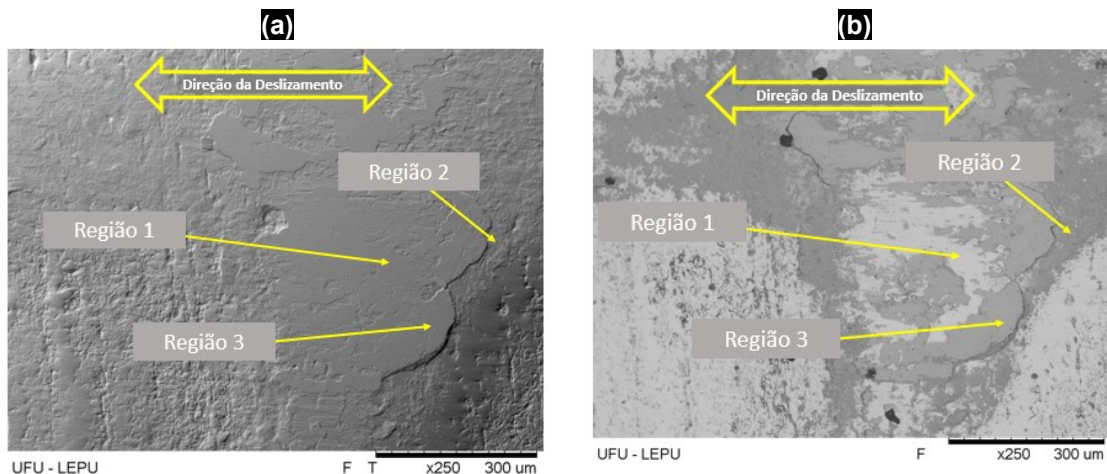


Figura 5.33 – Microscopia eletrônica de varredura de uma superfície texturizada, revestida com cromo duro e ensaiada por 60 minutos: (a) SE, (b) BSE.

A Figura 5.34 mostra essa trilha com maior aumento. Semelhantemente ao que foi observado nos ensaios com 30 minutos na Figura 5.31, é possível perceber na Figura 5.34-a, obtida via SE, e na Figura 5.34-b, obtida via BSE, três regiões (1, 2 e 3). As análises de EDS na Figura 5.34-c também são semelhantes às aquelas observadas na Figura 5.31. Assim conclui-se que os fenômenos ocorridos nos ensaios com 30 e 60 minutos são semelhantes, entretanto parece que quanto maior o tempo de ensaio, a região 2, cinza escuro no contraste, cobrindo a superfície aumenta, isto é, parece que uma maior porção de revestimento foi desgastado de regiões que foram posteriormente oxidadas.



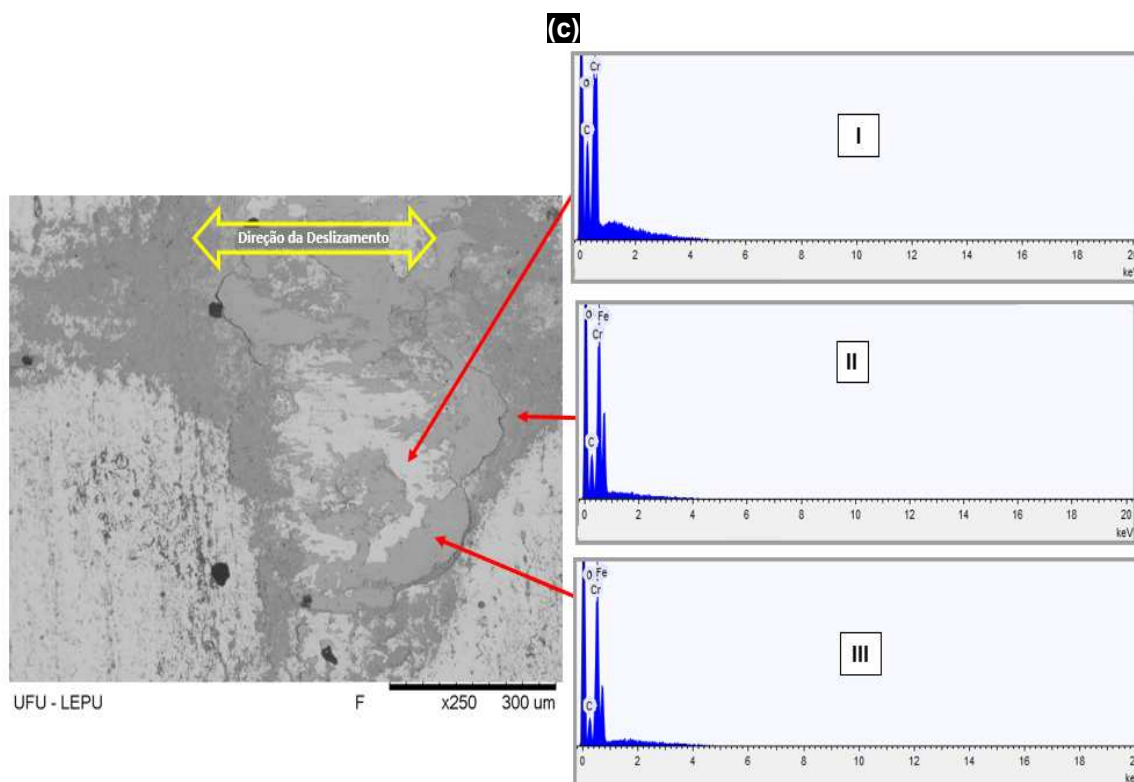


Figura 5.34 – Microscopia eletrônica de varredura de uma superfície texturizada, revestida com cromo duro e ensaiada por 60 minutos: (a) SE, (b) BSE e (c) análise de EDS.

A Figura 5.35 mostra um contracorpo que foi ensaiado por 60 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com cromo duro. Na Figura 5.35-a, obtida via elétrons secundários, se nota que há material acumulado nas bordas da trilha de desgaste. Na Figura 5.35-b, a análise de EDS II na borda da trilha de desgaste indica que no material acumulado, cinza escuro no contraste, há ferro, carbono e cromo; provavelmente esse material é formado pelos mesmos mecanismos que formaram a camada de transferência (região 3) indicada na Figura 5.34. A análise de EDS III mostra que no interior da trilha, na porção de material que aparece mais clara no contraste BSE, foi encontrado cromo, o que indica que com 60 minutos de ensaio já ocorre transferência de material proveniente do revestimento de cromo duro para o contracorpo. A partícula preta indicada apontada na análise de EDS I provavelmente se trata de um carboneto de Fe,Cr ou de algum óxido.

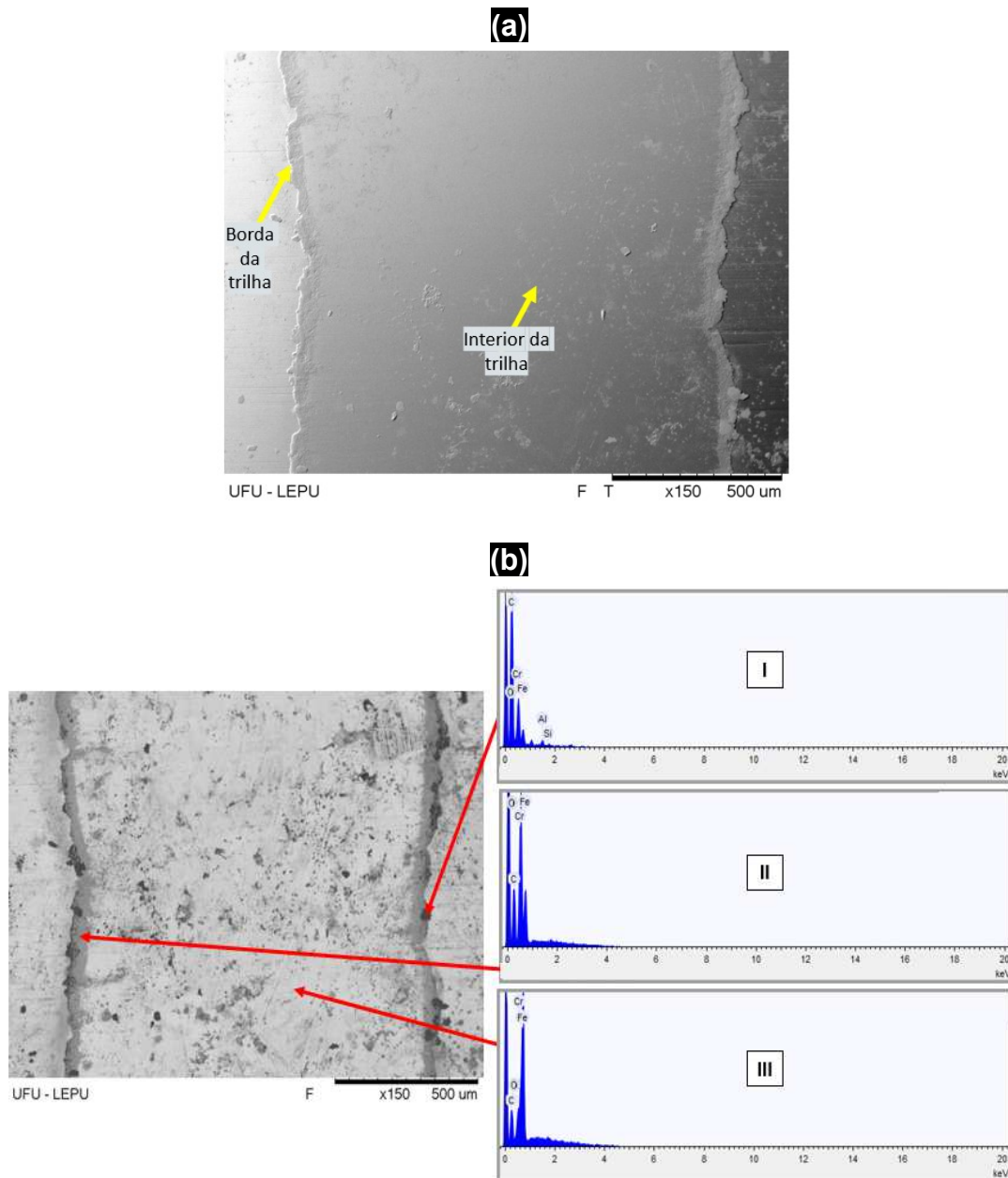


Figura 5.35 – Microscopia eletrônica de varredura de um contracorpo ensaiado por 60 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com cromo duro: (a) via SE e (b) análises de EDS.

A Figura 5.36, obtida no MEV, mostra uma superfície ensaiada por 10 minutos, texturizada e revestida com níquel químico. É possível observar que nas regiões entre bolsos ocorreu a formação de uma tribocamada, conforme mostra a Figura 5.36-a, obtida via SE. Nota-se também que essa tribocamada é mais escura no contraste, isto é, rica em elementos mais leves, conforme indica Figura 5.36-b, obtida via BSE.

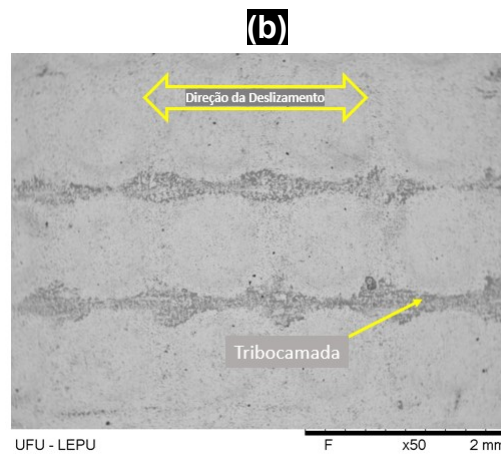
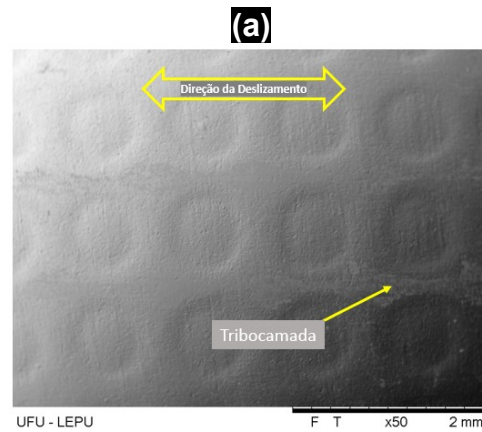
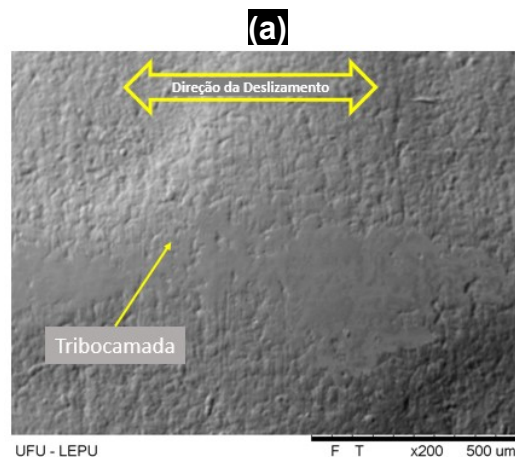


Figura 5.36 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e ensaiada por 10 minutos (TNiP10): (a) via SE, (b) via BSE.

A Figura 5.37 mostra essa trilha com maior aumento. A Figura 5.37-a (SE), mostra em maiores detalhes uma região da tribocamada que foi observada na Figura 5.36-a. A Figura 5.37-b (BSE), mostra a análise de EDS realizada nessa tribocamada onde se observa a presença de ferro e cromo, provavelmente provenientes de debris removidos da superfície do contracorpo, pois não foi identificado desgaste da superfície da amostra que indique que o contato chegou ao substrato.



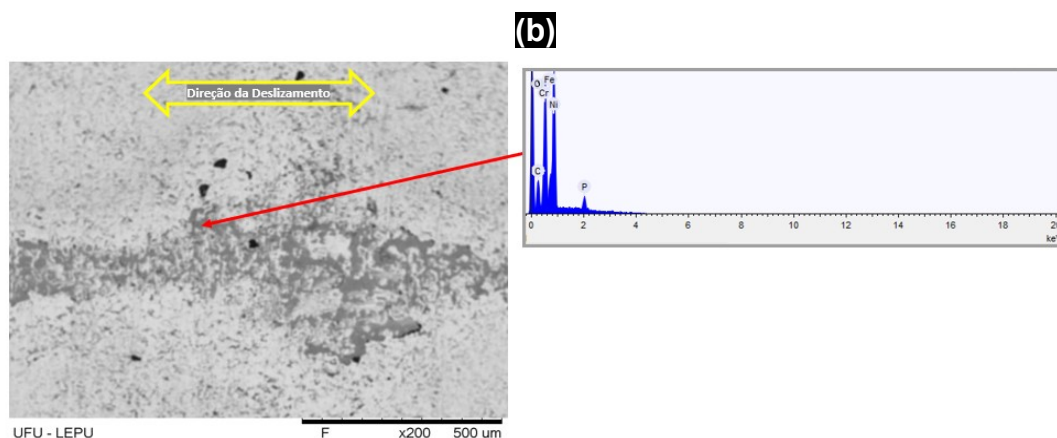
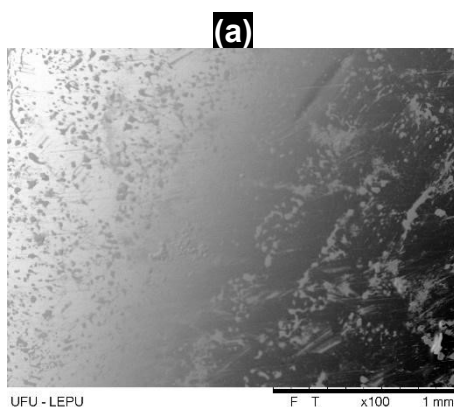


Figura 5.37 – Microscopia eletrônica de varredura de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e ensaiada por 10 minutos (TNiP10): (a) via SE, (b) análise de EDS.

A Figura 5.38 mostra um contracorpo que foi ensaiado por 10 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com níquel químico. Na Figura 5.38-a, obtida via elétrons secundários, nota-se que não há formação clara de uma trilha de desgaste, no entanto percebe-se que há uma camada descontínua de material aderido à superfície do contracorpo. Nas análises de EDS na Figura 5.38-b, obtida via elétrons retroespalhados, nota-se que essa camada de material aparece escura no contraste e contém cromo e carbono, provavelmente provenientes do próprio contracorpo e não de material desgastado do revestimento. A análise de EDS na porção de material que aparece clara no contraste contém ferro e carbono e parece se tratar da superfície do contracorpo que não sofreu maiores danos, como pode ser visto na Figura 5.38-a, além disso não foi observado a transferência de níquel da amostra para o contracorpo, o que corrobora a ideia de que não ocorreu remoção de material significativa das matrizes do corpo e do contracorpo.



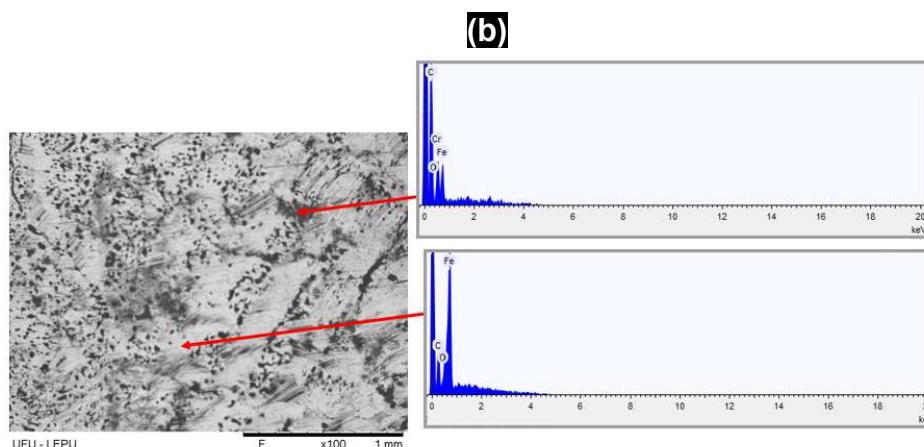


Figura 5.38 – Microscopia eletrônica de varredura de um contracorpo ensaiado por 10 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com níquel químico: (a) via SE e (b) análises de EDS em uma imagem obtida via BSE.

A Figura 5.39 mostra uma superfície ensaiada por 30 minutos, texturizada e revestida com níquel químico, obtida no MEV via elétrons secundários (Figura 5.39-a) e elétrons retroespalhados (Figura 5.39-b). Nota-se que a tribocamada formada cobre uma maior porção da superfície das regiões entre bolsos em relação aos ensaios realizados com 10 minutos de deslizamento alternado.

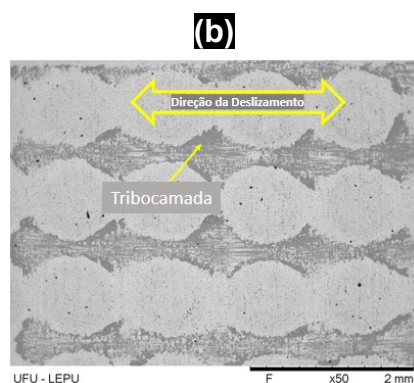
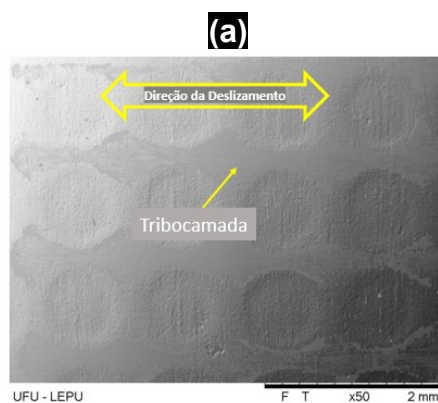


Figura 5.39 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e ensaiada por 30 minutos (TNiP30): (a) via SE, (b) via BSE.

A Figura 5.40-a, obtida via SE, mostra em maiores detalhes uma região da tribocamada que foi observada na Figura 5.39-a. A análise de EDS na Figura 5.40-b, obtida via BSE, mostra que a porção clara da superfície é rica em elementos mais pesados, como o níquel, assim essa região se trata da superfície do revestimento depositado. A análise de EDS na tribocamada indicou a presença de cromo e a ausência de ferro; o cromo provavelmente é proveniente dos carbonetos de cromo. Novamente não foi observado desgaste severo no revestimento. Assim provavelmente os carbonetos presentes na tribocamada sugerem que os carbonetos não foram perfeitamente recobertos pelo revestimento e, portanto, foram preferencialmente removidos da amostra.

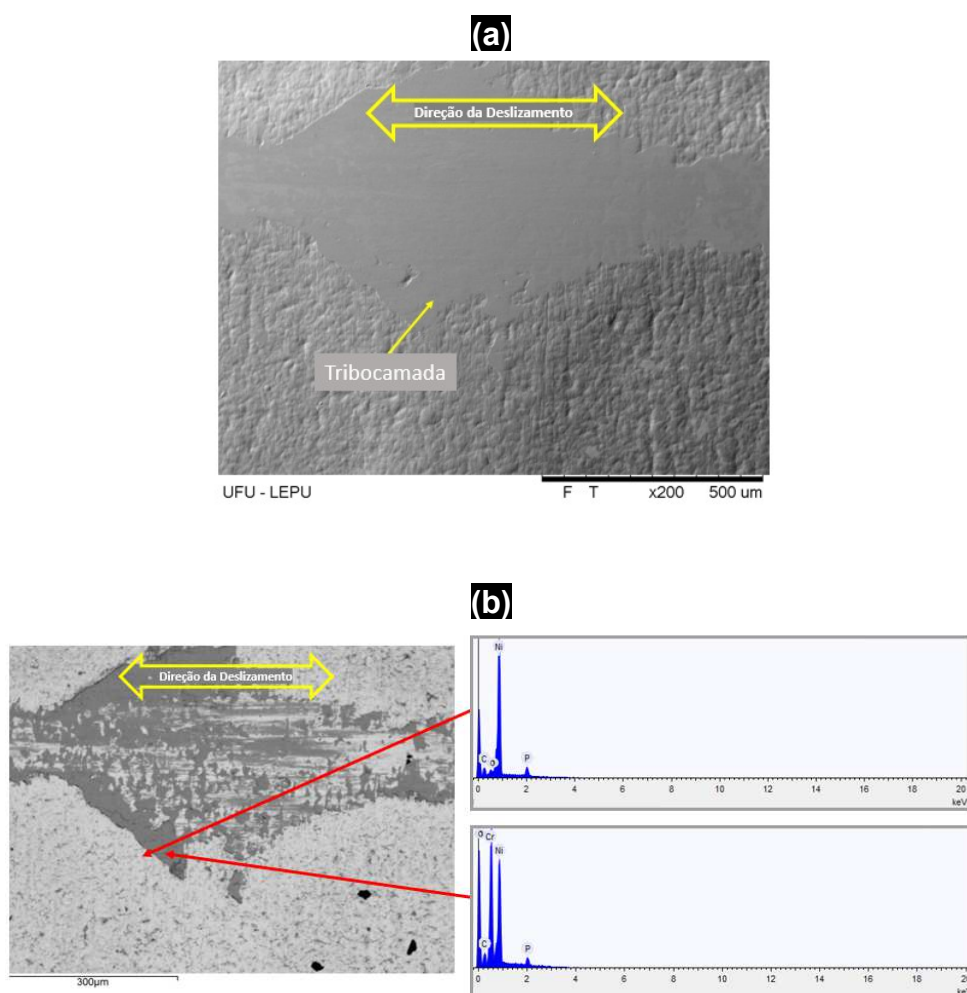


Figura 5.40 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e ensaiada por 30 minutos (TNiP30): (a) via SE, (b) análise de EDS em uma imagem obtida via BSE.

A Figura 5.41 mostra um contracorpo que foi ensaiado por 30 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com níquel químico. Na Figura 5.41-a, obtida via elétrons secundários, nota-se que começa a ocorrer a aderência de material de

forma mais concentrada. Entretanto, ainda não é possível perceber uma trilha de desgaste contínua, com material acumulado principalmente nas bordas, como foi observado nos ensaios das outras superfícies mesmo nos tempos menores. Isso aponta que o processo de desgaste do contracorpo aparentemente está sendo atenuado. Na Figura 5.41-b, obtida via elétrons retroespalhados, nota-se que aparece novamente uma fase escura, certamente rica em material proveniente dos carbonetos de cromo, e também uma camada de material cinza escuro no contraste na qual a análise de EDS indicou a presença de cromo e níquel; o cromo parece ser procedente dos carbonetos de cromo e o níquel parece ser proveniente do revestimento da amostra; assim parece que em algum momento entre 10 e 30 minutos de ensaio começa a ocorrer também alguma transferência de material do revestimento para o contracorpo.

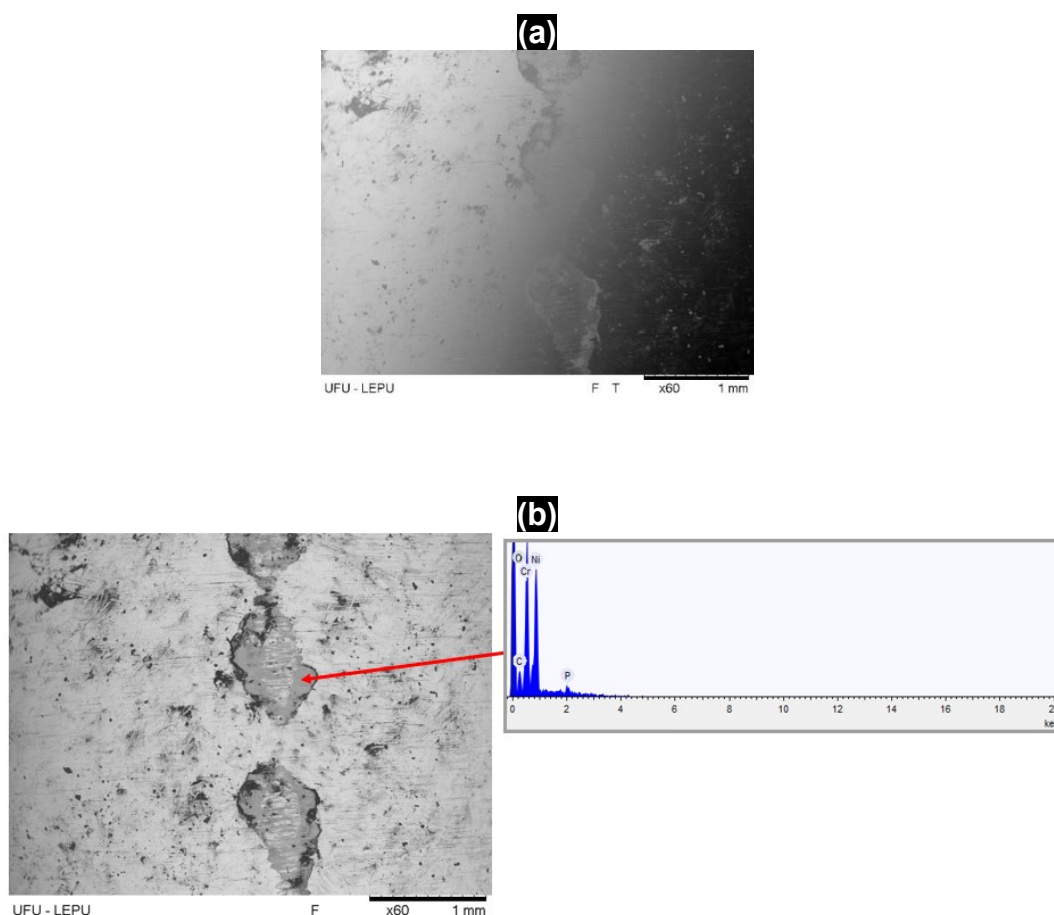


Figura 5.41 – Microscopia eletrônica de varredura de um contracorpo ensaiado por 30 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com níquel químico: (a) via SE e (b) análises de EDS em uma imagem obtida via BSE.

A Figura 5.42, obtida no MEV via elétrons secundários (Figura 5.42-a) e elétrons retroespalhados (Figura 5.42-b), mostra uma superfície ensaiada por 60

minutos, texturizada e revestida com níquel químico. Nota-se que a tribocamada formada cobre uma maior porção da superfície das regiões entre bolsos em relação aos ensaios realizados com 10 e 30 minutos.

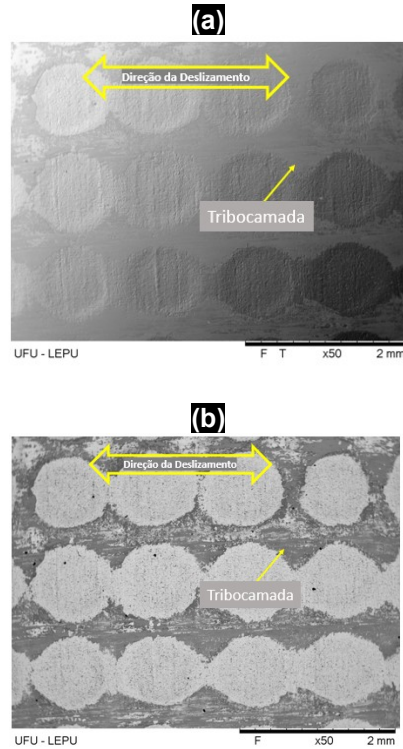
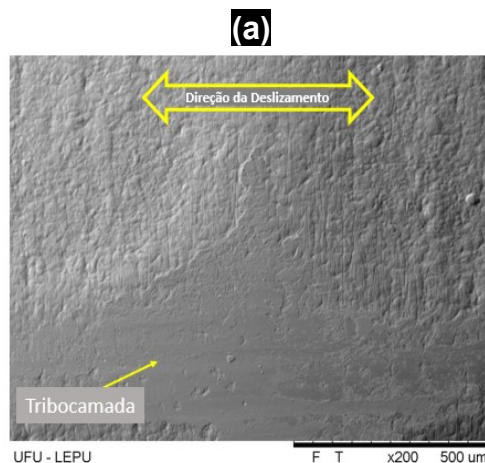


Figura 5.42 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e ensaiada por 60 minutos (TNiP60): (a) via SE, (b) via BSE.

A Figura 5.43, obtida no MEV, mostra uma superfície ensaiada por 60 minutos, texturizada e revestida com níquel químico. A Figura 5.43-a, obtida via SE, mostra em maiores detalhes uma região da tribocamada que foi observada na Figura 5.42-a. Na Figura 5.43-b, obtida via BSE, a análise de EDS na tribocamada indicou a presença de ferro e cromo, provavelmente provenientes tanto da superfície da amostra quanto do contracorpo.



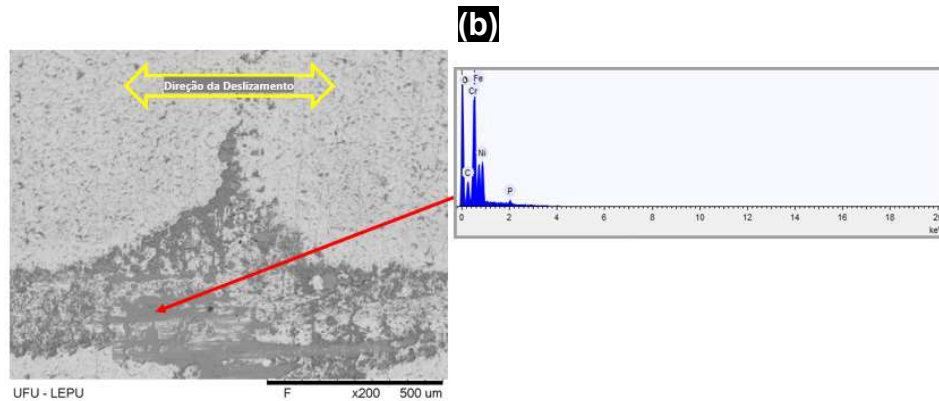
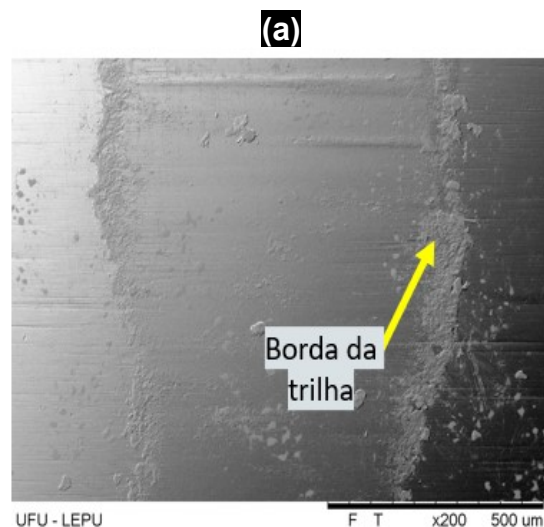


Figura 5.43 – Microscopia Eletrônica de Varredura de uma amostra texturizada, revestida com níquel químico e ensaiada por 60 minutos (TNiP60): (a) via SE, (b) análise de EDS em uma imagem obtida via BSE.

A Figura 5.44 mostra um contracampo que foi ensaiado por 60 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com níquel químico. Na Figura 5.44-a, obtida via elétrons secundários, nota-se agora uma trilha de desgaste com material acumulado nas bordas semelhantemente ao que foi observado nos ensaios das outras superfícies. Na Figura 5.41-b, obtida via elétrons retroespalhados, nota-se que aparece novamente uma fase escura na qual a análise de EDS indicou a presença de cromo e carbono. A análise de EDS no material acumulado nas bordas da trilha, cinza escuro no contraste, indicou a presença de cromo e níquel; o cromo parece ser procedente dos carbonetos ou de óxidos de cromo e o níquel parece ser proveniente do revestimento da amostra.



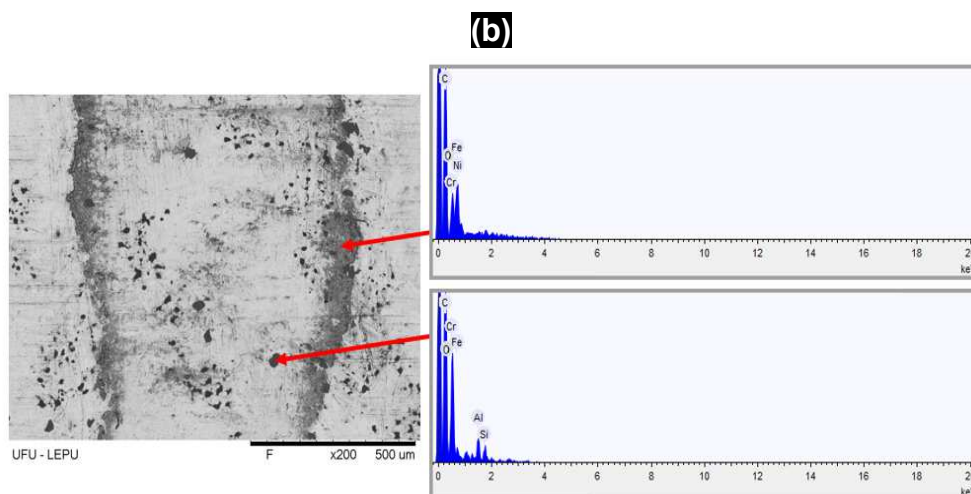


Figura 5.44 – Microscopia eletrônica de varredura de um contracorpo ensaiado por 60 minutos contra uma superfície texturizada e revestida com níquel químico: (a) via SE e (b) análises de EDS em uma imagem obtida via BSE.

5.4 Observações Finais

A metodologia aqui aplicada foi capaz de avaliar a durabilidade das texturas superficiais dos cilindros de laminação no passe de acabamento. Pois embora a remoção de massa das amostras tenha sido bastante pequena, as análises de durabilidade puderam ser realizadas por meio de parâmetros de topografia.

O coeficiente de atrito dos ensaios TNiP foi menor que o coeficiente de atrito correspondente aos ensaios T e TCr. Por fim, os revestimentos de cromo duro e níquel químico atuaram de maneira a retardar o desgaste dos picos mais altos de superfícies texturizadas pelo método MECT e, portanto, aumentaram a durabilidade das texturas fabricadas.

CAPITULO VI

Transferência de Textura Superficial na Laminação a Frio

6.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é avaliar como as texturas do cilindro são transferidas para a chapa durante o processo de laminação a frio. Até onde se sabe, o método MECT ainda não foi aplicado em ensaios reais de laminação.

O diâmetro e a profundidade dos bolsos foram escolhidos como parâmetros para avaliação da transferência das texturas. Assim, este capítulo se concentra principalmente em comprovar que é possível transferir as texturas produzidas via MECT. Outro ponto importante consiste em mostrar os aspectos geométricos das texturas resultantes na superfície da chapa. As replicações da superfície do cilindro bem como os ensaios de transferência de texturas foram realizados pela Aperam nos seus laboratórios.

6.2 Procedimento Experimental

Os ensaios de transferência de textura foram realizados em um laminador quádruplo, em escala piloto, nos laboratórios de pesquisa da Aperam South America Brazil, conforme representado na Figura 6.1. A capacidade de carga máxima do laminador é de 150 toneladas. Os cilindros de encosto possuem diâmetro e comprimento iguais de 250 mm. Os cilindros de trabalho (apenas um deles foi texturizado) possuem comprimento útil de 150 mm e diâmetro de 72,2 mm. Os ensaios de laminação a frio foram realizados a seco a uma velocidade de laminação constante.

Todos os ensaios de microdureza Vickers deste trabalho foram realizados em um microdurômetro HMV Micro Hardness Tester da Shimadzu, sendo a carga de 100 g com o tempo de 15 segundos.

A chapa, produzida pela Aperam South America, é de aço inoxidável AISI 430 (P430F). Com relação ao material da chapa, a composição química é mostrada na Tabela 6.1 e sua microdureza Vickers é de $166,1 \pm 5,06 \text{ HV}_{0,1}$. As dimensões da chapa são as seguintes: 25 mm (comprimento), 100 mm (largura) e 1,46 mm (espessura).

Tabela 6.1 – Composição química do material da chapa, informada pela Aperam.

Material	Porcentagem em peso							ppm
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Nb	N
AISI 430 (P430F)	0,021	0,20	0,31	0,030	0,001	16,15	0,336	184

Inicialmente, foi necessário ajustar os parâmetros do processo de laminação. Os ensaios devem ocorrer de forma semelhante ao que acontece no passe de acabamento da laminação a frio, isto é, de maneira que a transferência de textura aconteça sem grandes deformações na chapa. Assim, a Tabela 6.2 mostra os ensaios que foram realizados para tal ajuste. Do ensaio 1 até o 4 as deformações são cada vez menores, o que significa menores reduções na espessura da chapa. A Figura 6.4 mostra as chapas correspondentes aos ensaios indicados na Tabela 6.2. Percebe-se que nos ensaios 1 e 2 as deformações são tais que as chapas adquirem uma curvatura bastante acentuada. No ensaio 3 a curvatura da chapa já não é mais tão evidente. No ensaio 4, onde a deformação é de aproximadamente 2%, a chapa também já não apresenta uma curvatura acentuada. Ao que tudo indica, nas condições do ensaio 4, em que ocorrem pequenas reduções, os mecanismos de transferência de textura do cilindro para a chapa são parecidos com aqueles que ocorrem no passe de acabamento da laminação a frio.

Tabela 6.2 – Ensaios realizados para ajuste dos parâmetros dos ensaios.

Ensaio	Espessura Inicial (EI)	Espessura Final (EF)	EI - EF	Deformação (%)
1	1,46	1,24	0,22	15,1
2	1,46	1,30	0,16	11,0
3	1,46	1,39	0,07	4,80
4	1,46	1,43	0,03	2,10

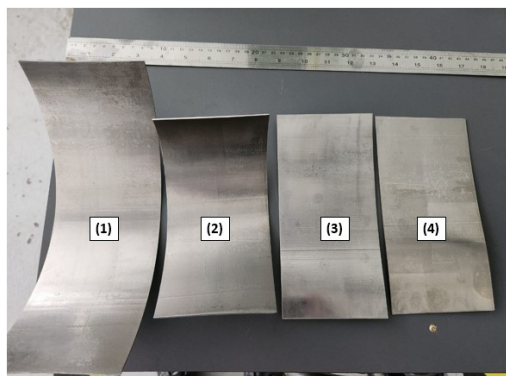


Figura 6.4 – Chapas correspondentes aos ensaios de ajuste da Tabela 6.1.

Após os testes de laminação, prosseguiu-se com as análises das texturas transferidas às chapas em um interferômetro da Marca OPM - Hyperion System (sensor confocal KF3), com densidade de 500 pontos/mm, área analisada de 4 mm x 4 mm, taxa de 1,6 mm/s e frequência de 800 Hz. Para a análise dos dados gerados utilizou-se o programa Mountains Map Universal®, 3.0.11, versão de avaliação. As superfícies das chapas após transferência também foram avaliadas por microscopia ótica. As imagens geradas via microscopia óptica foram obtidas em um microscópio óptico Olympus BX51m.

As análises da superfície do cilindro texturizado ocorreram por meio da técnica de replicação, uma vez que, devido às dimensões do cilindro, não foi possível analisar a superfície do mesmo diretamente no interferômetro. No processo de replicação de superfície foi utilizada uma resina de peróxido de dibenzoíla e um catalisador de metacrilato de metila. Posteriormente utilizou-se um perfilômetro de contato Hommel Etamic, modelo T8000 para obtenção de perfis superficiais, os quais foram analisados no programa Mountains Map Universal®, versão 9, para a obtenção da representação da superfície cilíndrica texturizada.

A sequência de passos no Mountains realizada para a análise das réplicas superficiais foi a seguinte: (1) forma removida por um polinômio de grau 2, (2) preenchimento de pontos não medidos, (3) nivelamento, (4) inversão da superfície no eixo de altura (eixo z). Nenhum filtro de ondulação foi aplicado. É importante mencionar que foi necessário inverter o eixo z para que as interferometrias das superfícies replicadas representassem a superfície do cilindro. A Figura 6.5 mostra a interferometria superficial da réplica do cilindro antes dos tratamentos no Mountains (Figura 6.5-a) e após a remoção da forma, preenchimento de pontos não medidos e nivelamento, isto é, antes da inversão do eixo de altura 1 (Figura 6.5-b).

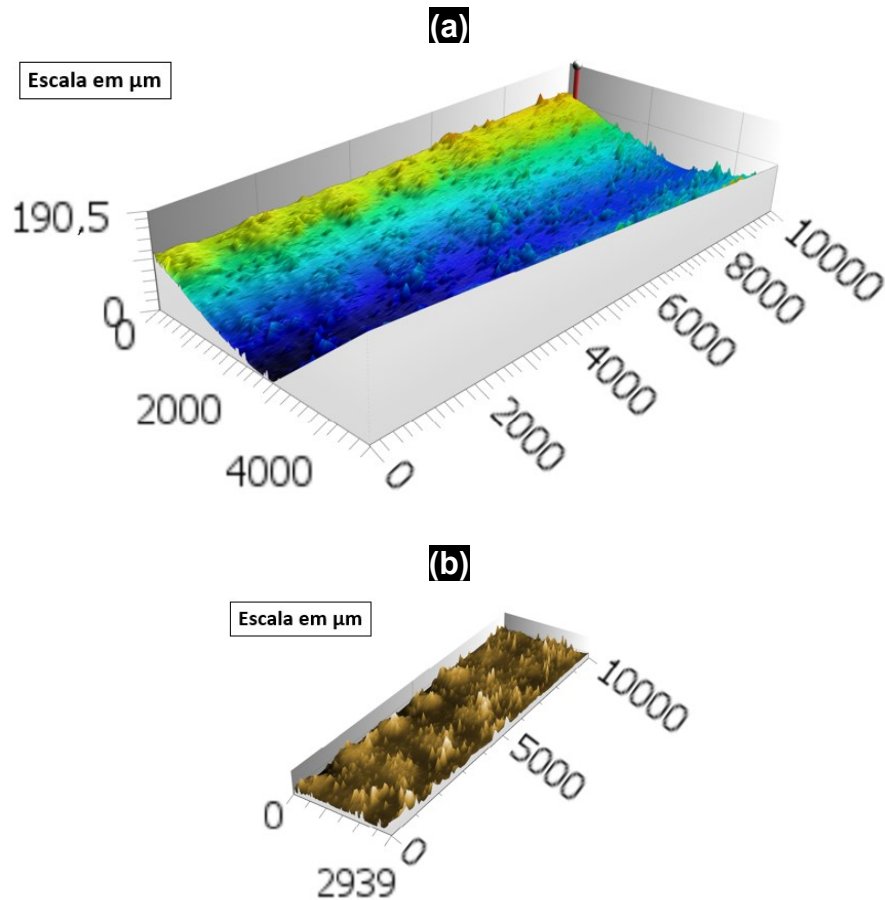


Figura 6.5 – Réplicas superficiais do cilindro de laminação: (a) antes dos tratamentos no software, (b) antes da inversão do eixo de altura.

6.3 Resultados e Discussões

A Figura 6.6 mostra a interferometria da superfície da réplica utilizada para a análise das texturas do cilindro. Apesar da falta de uniformidade das texturas, já relatadas no capítulo 3, a região replicada possui bolsos com aspecto razoavelmente uniformes. A Figura 6.7 mostra perfis de superfícies extraídos de alguns bolsos presentes na região replicada do cilindro de laminação.

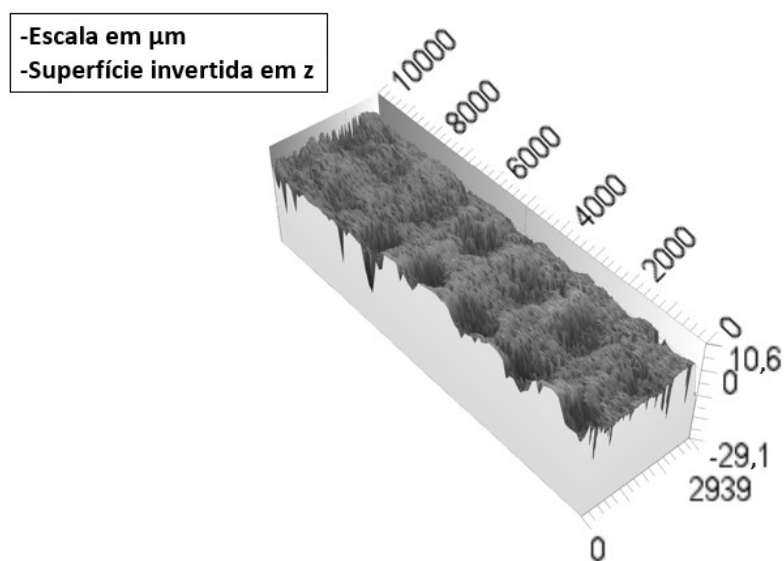
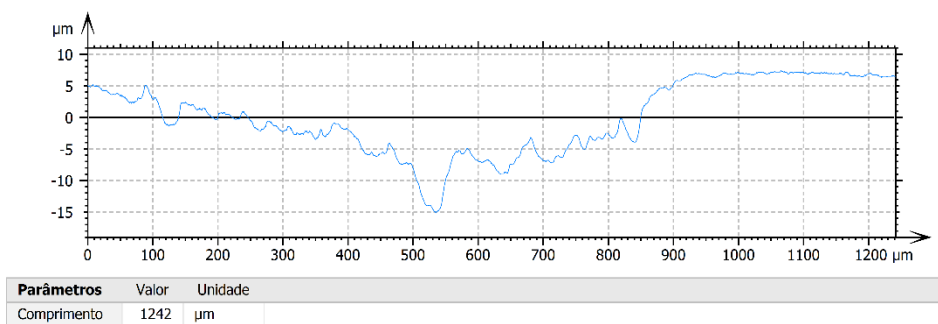
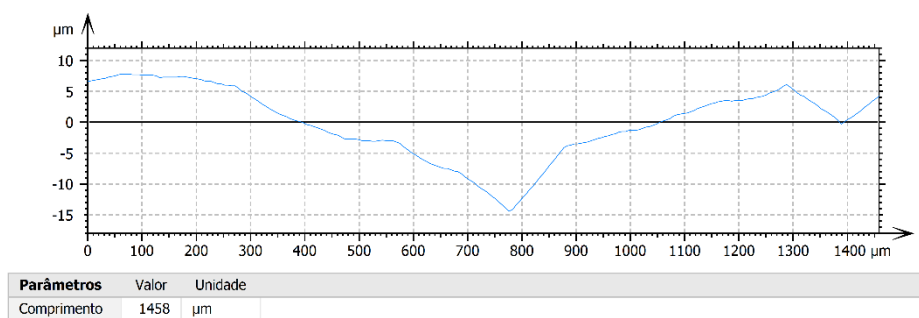
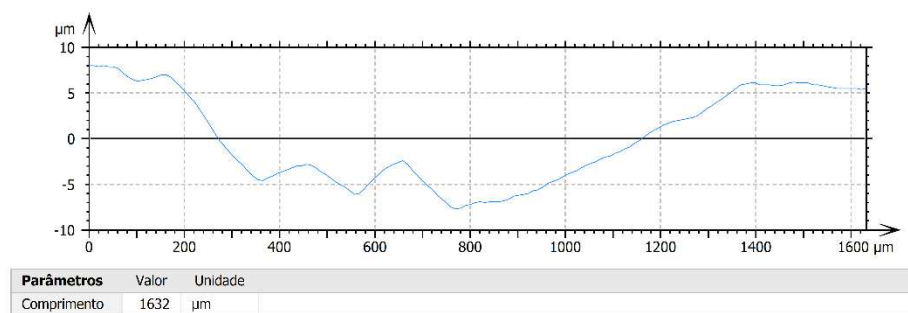


Figura 6.6 – Interferometria: réplica da superfície do cilindro de laminação.



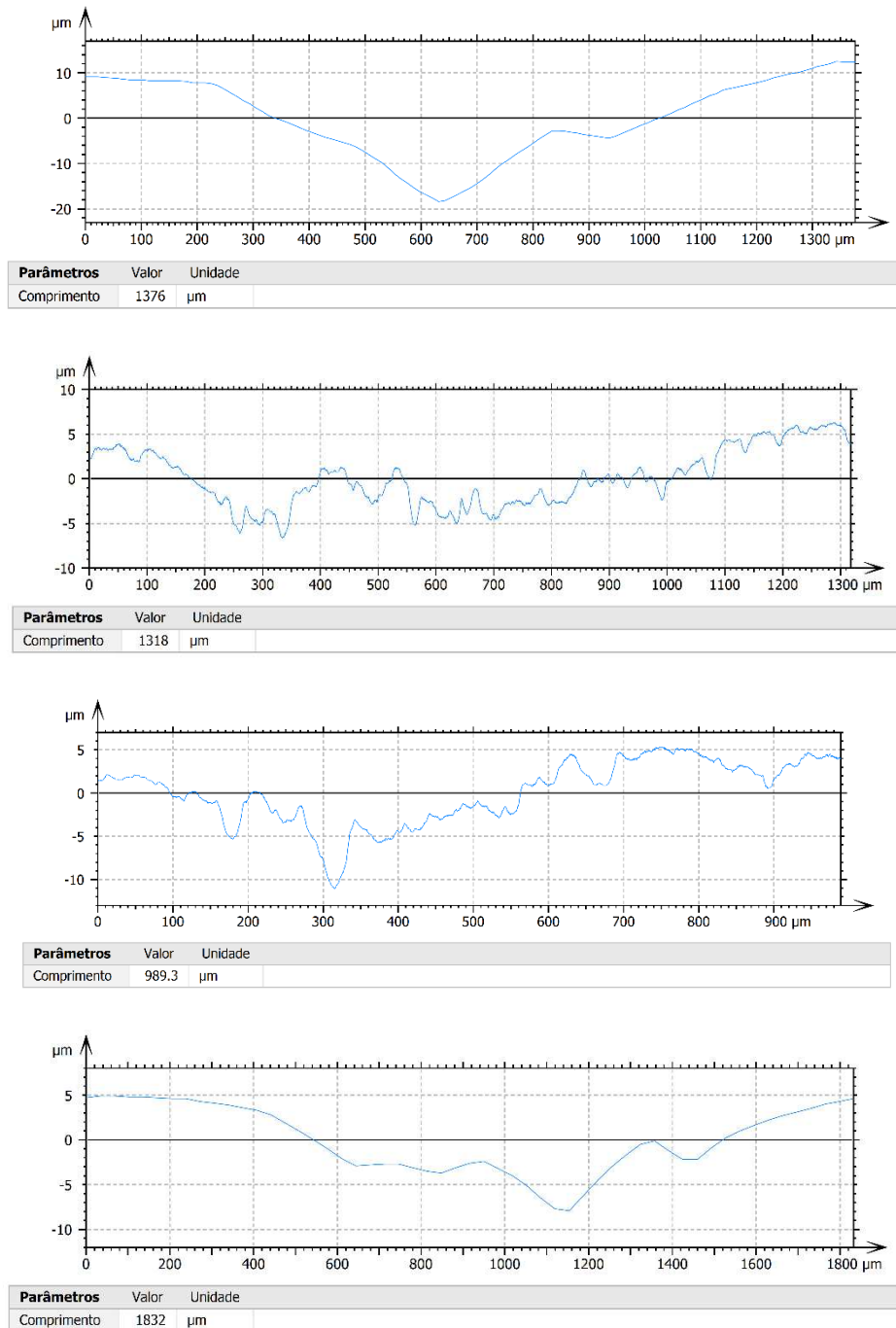


Figura 6.7 – Perfis de superfícies extraídos de alguns bolsos presentes na região replicada do cilindro de laminação.

A Figura 6.8 mostra a interferometria da chapa laminada. Nota-se que a superfície do cilindro texturizada com bolsos gerou estruturas elevadas na chapa, semelhantes a pilares. Percebe-se também que os pilares produzidos aparentam ter alturas e diâmetros semelhantes. A Figura 6.9 mostra um perfil de superfície correspondente à linha traçada na Figura 6.8. A transferência de topografia do cilindro para a chapa gerou o negativo da superfície do cilindro na chapa laminada. As regiões

entre bolsos na superfície do cilindro correspondem às regiões menos elevadas na superfície da chapa. Os bolsos da superfície do cilindro correspondem às regiões onde há pilares na superfície da chapa.

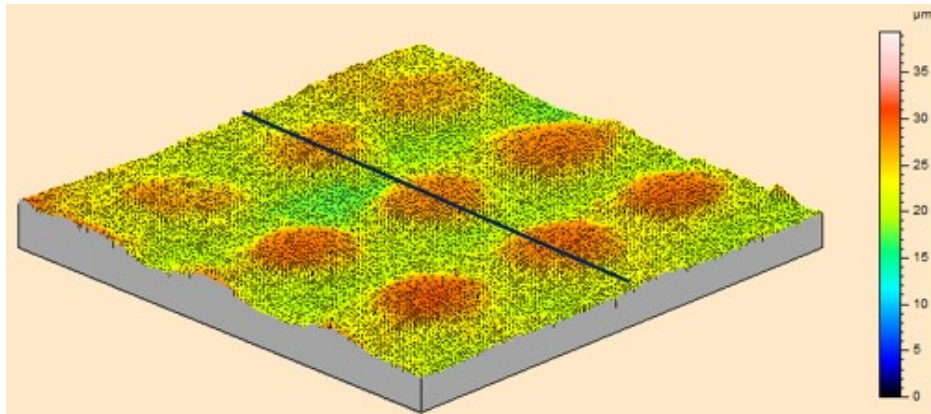


Figura 6.8 – Interferometria da chapa laminada.

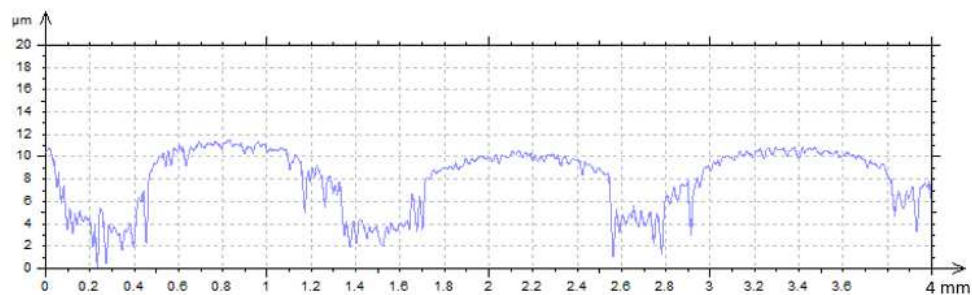


Figura 6.9 – Perfil de superfície correspondente à linha traçada na Figura 6.8.

A Figura 6.10 mostra o diâmetro médio dos bolsos do cilindro e dos pilares da chapa laminada. O tamanho do diâmetro médio dos pilares é aproximadamente 78% do tamanho do diâmetro dos bolsos. Ao que parece, o diâmetro médio dos bolsos não é totalmente transferido para os pilares da chapa. Isso indica que para efeito de controle de topografia deve-se texturizar o cilindro com bolsos cujo diâmetro seja maior que o desejado nos pilares da chapa.

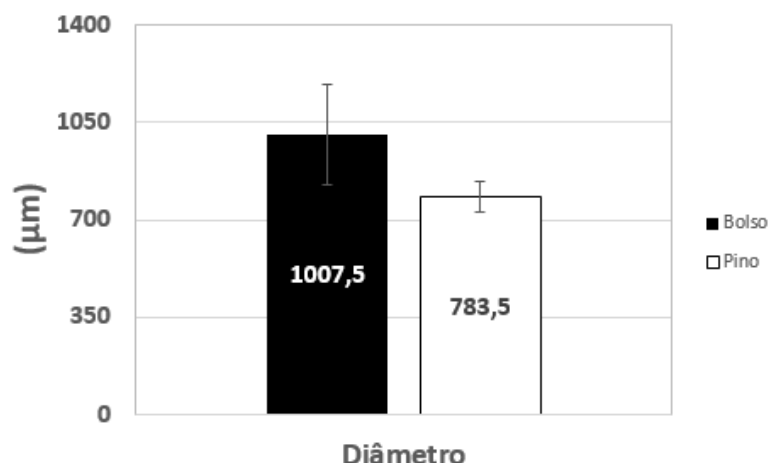


Figura 6.10 – Diâmetro médio dos bolsos do cilindro e dos pinos da chapa laminada.

A Figura 6.11 mostra a profundidade máxima média dos bolsos do cilindro e a altura máxima média dos pilares da chapa laminada. A altura máxima média dos pilares é aproximadamente 59 % da profundidade máxima média bolsos. Ao que parece, a profundidade dos bolsos do cilindro não é totalmente transferida para a altura dos pilares da chapa. Isso indica que para efeito de controle de topografia a profundidade dos bolsos do cilindro deve ser maior que a altura desejada nos pilares da chapa

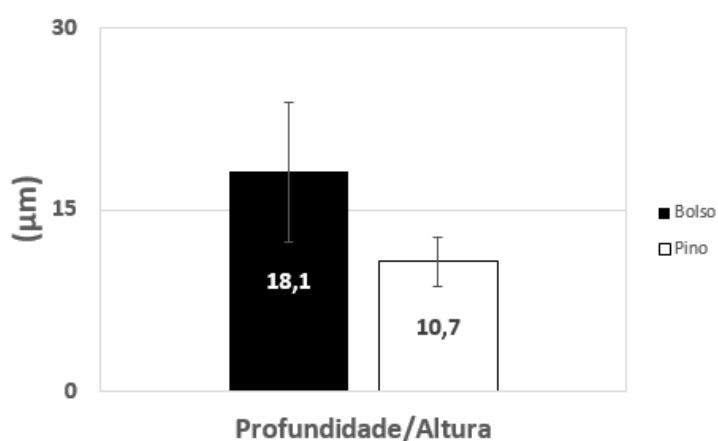


Figura 6.11 – Profundidade máxima média dos bolsos do cilindro e altura máxima média dos pinos da chapa laminada.

A Figura 6.12, obtida no microscópio óptico, mostra a superfície da chapa de aço AISI 430 (P430F) após a laminação. A imagem foi obtida em uma porção da superfície com pilares aparentemente uniformes, isto é, com dimensões semelhantes. Observa-se uma geometria circular nos pilares, o que reflete a geometria circular dos bolsos que os originaram. Além disso, nota-se também que as regiões dos pilares

possuem um aspecto de superfície diferente das regiões entre pilares, aparentemente estas regiões são mais rugosas.

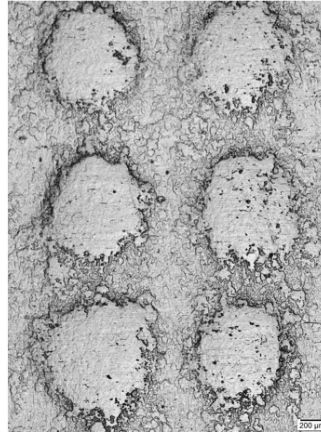


Figura 6.12 – Chapa de aço AISI 430 (P430F) após o ensaio de laminação a frio.

A Figura 6.13, obtida no microscópio óptico, mostra a superfície da chapa de aço AISI 430 (P430F) laminada (Figura 6.13-a) e não laminada (Figura 6.13-b). Observa-se que a face superior do pilar possui aspecto superficial semelhante à superfície da chapa antes da laminação. Dentro dos bolsos da superfície do cilindro o processo de remoção eletroquímica de material é mais acentuado do que fora. Assim, não se espera que o interior dos bolsos tenha um acabamento superficial semelhante ao da chapa não laminada. Ao que tudo indica, as regiões dos pilares não entram em contato com o fundo dos bolsos de forma tão intensa como ocorre com as regiões entre pilares e entre bolsos, o que corrobora a hipótese de ocorrência de extrusão reversa. Ou seja, o mecanismo pelo qual os pilares são gerados na chapa trata-se predominantemente de extrusão reversa. Ao que parece, os pilares foram projetados, ou extrudados, para dentro dos bolsos superficiais do cilindro (WENTINK et al., 2015).

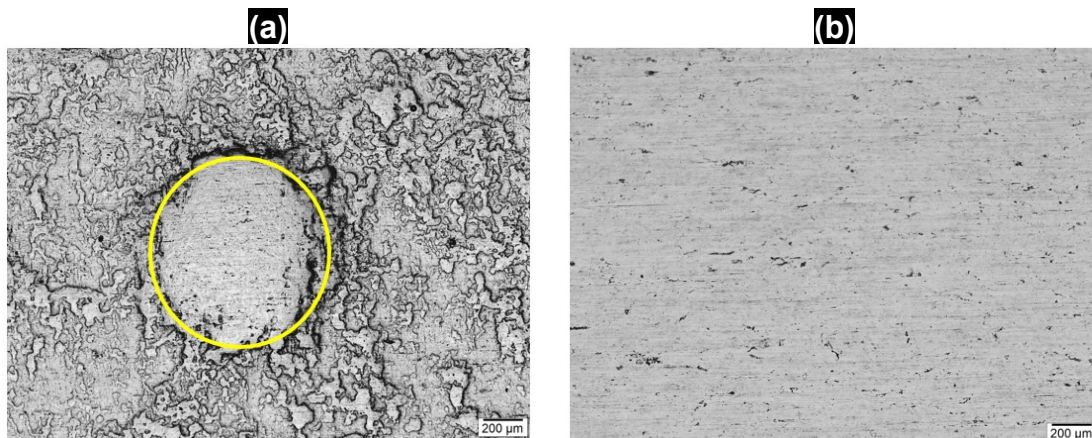


Figura 6.13 – Chapa de aço AISI 430 (P430F): (a) laminada, (b) não laminada.

Conforme já mencionado no capítulo 2, normalmente no passe de acabamento, no arco de contato, ocorre uma região central plana, ou uma zona neutra, onde não ocorre deslizamento. Alguns estudos sugerem que essa zona pode ocupar uma região considerável do contato entre o cilindro e a chapa. Nessa região, a pressão normal de contato tende a permanecer em um valor máximo, aproximadamente constante, e a tensão de cisalhamento tende a permanecer nula (JING-NA et al., 2009; KIJIMA; BAY, 2006). Dessa forma, é plausível sugerir que a extrusão reversa, que origina os pilares, ocorre principalmente devido à pressão normal de contato entre o cilindro e a chapa, conforme ilustra a Figura 6.14. Nesta imagem, as setas ascendentes indicam o sentido da projeção dos pilares, as setas descendentes indicam o movimento de compressão do cilindro. No entanto, o fato de os pilares não serem o negativo exato dos bolsos indica que o controle de topografia deve levar em conta diversos parâmetros de processo. Assim, deve-se levar em conta, por exemplo, o material do cilindro, o material da chapa, os parâmetros de texturização, as condições de laminação e os resultados esperados em futuros processos de conformação da chapa.



Figura 6.14 – Surgimento dos pilares na chapa (em azul) devido à extrusão reversa dos mesmos para dentro dos bolsos do cilindro (na cor preta).

A Figura 6.15, obtida no microscópio óptico, mostra uma região da chapa laminada com pilares não uniformes. Os círculos traçados na imagem indicam regiões onde deveria ocorrer a projeção dos pilares. Conforme relatado no capítulo 3, o dispositivo de texturização de cilindros necessita de aperfeiçoamentos. Para aplicação industrial, é fundamental que as texturas superficiais do cilindro apresentem um aspecto homogêneo ao longo da superfície. Percebe-se, portanto, que as diversas etapas do processo de produção estão interligadas, o que ressalta a importância da condução de estudos como este.

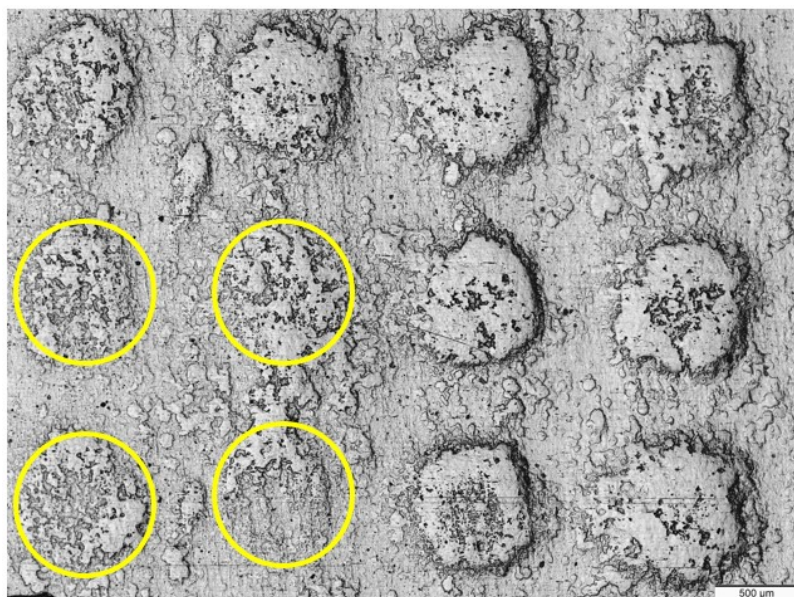


Figura 6.15 – Chapa de aço AISI 430 (P430F): região superficial com pinos não uniformes.

6.4 Sugestões para Aperfeiçoamento

Como já mencionado no capítulo 2, para que alguns benefícios esperados ocorram em chapas com superfícies texturizadas são necessários alguns requisitos topográficos. Por exemplo, seria mais interessante que, após a transferência de topografia, a superfície da chapa apresentasse bolsos ao invés de pilares. Estes, chamados bolsos de lubrificação, podem ser fechados pela superfície da matriz em um posterior processo de conformação, dando origem a mecanismos de lubrificação plastohidrostática e plastohidrodinâmica (HILGENBERG; STEINHOFF, 2015). No entanto, observou-se que os bolsos produzidos na superfície do cilindro originaram pilares na superfície da chapa. Apesar disso, seria interessante realizar futuros ensaios para verificar, por exemplo, o efeito dos pilares superficiais na estampabilidade das chapas laminadas.

Paralelamente, é possível também modificar os padrões de texturas superficiais dos cilindros a fim de produzir bolsos na chapa e não pilares. Por exemplo, a Figura 6.16 mostra um padrão direcional de textura que consiste em bolsos com uma espécie de elevação no centro. É possível que esse padrão reduza a projeção dos pinos e produza reentrâncias na superfície da chapa.

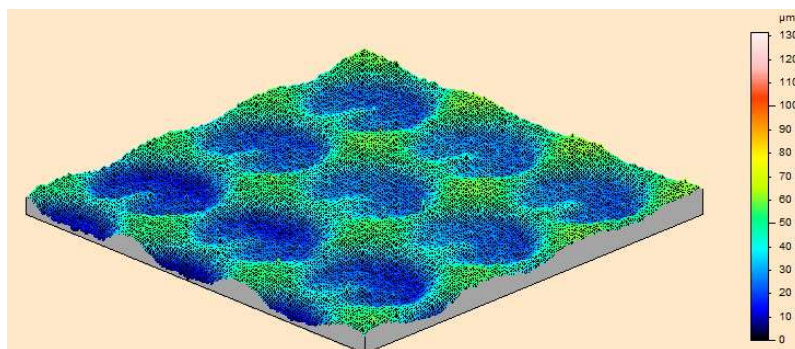


Figura 6.16 – Sugestão de padrão de textura para cilindros de laminação. Amostra: aço AISI 1010 texturizada pelo método MECT. Parâmetros de texturização: o mesmo utilizado nas amostras com superfícies planas do capítulo 3.

Uma outra opção seria tentar modificar os parâmetros de texturização eletroquímica para que fossem produzidos anéis protuberantes nas bordas dos bolsos. Isso ocorre, por exemplo, no processo EBT, conforme ilustra a Figura 6.17. Devido à penetração dos anéis nas chapas é provável que a extrusão reversa não ocorra de forma tão acentuada a ponto de gerar pilares tão proeminentes como ocorreu nos ensaios realizados neste trabalho. Assim, a chapa seria texturizada principalmente com cavidades em forma de anel.

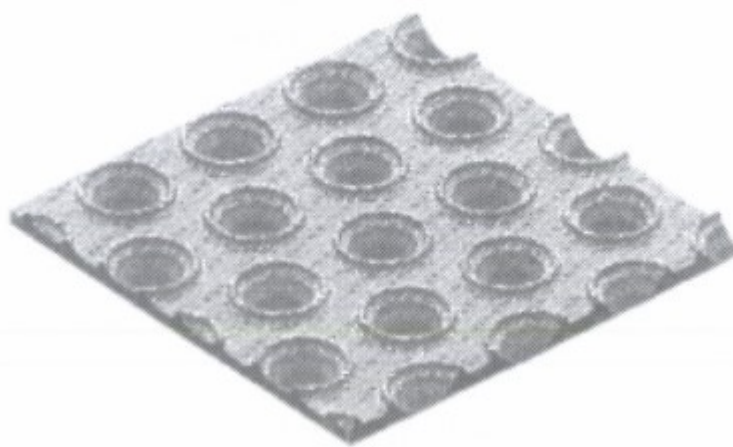


Figura 6.17 – Modelo computacional de uma superfície texturizada pelo método EBT (DE MARE *et al.*, 1997).

Por fim, uma outra alternativa seria texturizar o cilindro com pilares. Assim seria necessário projetar uma máscara para proteger regiões circulares ao longo da superfície do cilindro. Como consequência, a texturização ocorreria principalmente nas regiões não protegidas, o que produziria regiões elevadas, como pilares, na superfície do cilindro.

CAPÍTULO VII

Conclusões

O presente estudo avaliou a durabilidade e a transferência de texturas superficiais (fabricadas via MECT) de cilindros utilizados no passe de acabamento da laminação a frio.

A câmara de texturização de amostras com superfícies planas foi satisfatoriamente projetada, fabricada e validada. Sobre as câmaras de texturização de cilindros, conclui-se que:

- Conceitualmente foi mostrado que é possível texturizar cilindros de laminação aplicando o método MECT;
- Manter um *gap* uniforme da ordem de micrometros entre a ferramenta e a peça cilíndrica, ao longo de uma área com comprimento e largura da ordem centímetros, se mostrou como principal desafio no desenvolvimento da câmara de texturização de cilindros.

Sobre as análises das superfícies do material do cilindro de laminação texturizadas pelo método MECT, conclui-se que:

- Ao que parece, a dissolução anódica envolvida na texturização ocorre preferencialmente em torno dos carbonetos primários, provavelmente pelo empobrecimento de elementos de liga (Mo, V, Cr) para a formação dos carbonetos primários, sendo regiões que podem sofrer oxidação mais intensa;
- Adicionalmente, uma perda de suporte mecânico da matriz em decorrência da remoção preferencial de Fe, característica do processo de texturização eletroquímica, pode favorecer o arrancamento de parte desses carbonetos.

Em relação às análises de durabilidade das texturas, conclui-se que:

- Embora a remoção de massa das amostras tenha sido bastante pequena, as análises de durabilidade puderam ser realizadas por meio da avaliação de parâmetros de topografia. Tal comportamento é característico do desgaste que ocorre em cilindros no passe de acabamento da laminação a frio. Dessa forma, a metodologia utilizada para a análise de durabilidade mostrou-se adequada.
- Os ensaios realizados em amostras texturizadas e revestidas com níquel químico apresentaram um menor coeficiente de atrito em relação aos ensaios com superfícies somente texturizadas e texturizadas e revestidas com cromo duro. As análises dos parâmetros de topografia mostraram que tanto o revestimento de níquel químico quanto o de cromo duro atenuaram o desgaste dos picos mais proeminentes da superfície texturizada.
- Levando-se em conta as análises tanto de atrito quanto dos parâmetros de topografia, conclui-se que, ao invés do cancerígeno revestimento de cromo duro, o revestimento de níquel químico é uma alternativa plausível para elevar a durabilidade das texturas.
- O revestimento de NiP resultou na formação de uma tribocamada protetora tanto no corpo quanto no contracorpo provocando a redução do coeficiente de atrito e atenuando o desgaste no corpo e no contracorpo.

. Sobre a análise de transferência de textura do cilindro às chapas, conclui-se que:

- Os bolsos texturizados na superfície dos cilindros foram transferidos na forma de pilares para as superfícies das chapas por meio do mecanismo de extrusão reversa.
- Os pilares produzidos na chapa não são o negativo exato dos bolsos dos cilindros. Ou seja, apenas uma porcentagem da textura é transferida às chapas.

CAPÍTULO VIII

Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se como trabalhos futuros:

- Otimizar a câmara de texturização de cilindros de laminação para obtenção de texturas mais uniformes;
- Produzir texturas superficiais nos cilindros de formar que sejam gerados bolsos de lubrificação na superfície da chapa ao invés de pilares;
- Avaliar a transferência de texturas utilizando cilindros texturizados e revestidos;
- Adaptar ensaios de compressão para a realização de ensaios de transferência de texturas;
- Avaliar a estampabilidade das chapas texturizadas nos ensaios de laminação
- Realizar análises da transferência de textura superficial por meio de simulações computacionais.

CAPITULO IX

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287 - **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil** – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASPINWALL, D.; WISE, M.; STOUT, K.; GOH, T.; ZHAO, F.; EL-MENSHAWY, M. Electrical discharge texturing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 32, n. 1-2, p. 183-193, 1992.
[https://doi.org/10.1016/0890-6955\(92\)90077-T](https://doi.org/10.1016/0890-6955(92)90077-T).

BELOV, V.; BEGLETSOV, D.; D'YAKOVA, M.; GORBUNOV, A. Production of sheet with regulated surface microtopography. **Steel in Translation**, v. 44, n., p. 298-305, 2014. <https://doi.org/10.3103/S0967091214040020>.

BENATI, F. **Effect of surface topography upon the quality of autobody panels**: Fabrizio Benati, 2003.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**: Wiley New York, 2018

COSTA, H.; HUTCHINGS, I. Development of a maskless electrochemical texturing method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 8, p. 3869-3878, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.004>.

COSTA, H.; HUTCHINGS, I. M. Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 4, p. 429-448, 2015.
<https://doi.org/10.1177/1350650114539936>.

Çolak, B., Kurgan, N. An experimental investigation into roughness transfer in skin-pass rolling of steel strips. **Int J Adv Manuf Technol** 96, 3321–3330 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1691-9>

DA SILVA, L.; COSTA, H. Maskless electrochemical texturing of automotive cylinders. **Materials Performance and Characterization**, v. 6, n. 2, p. 96-111, 2017. <https://doi.org/10.1520/MPC20160027>.

DE MARE, C.; SCHEERS, J.; LAMBERT, F.; VERMEULEN, M.; DE GRAEF, L.; GADEYNE, Y. Development of the SIBETEX sheet having excellent drawability and paint appearance. **Revue de Métallurgie**, v. 94, n. 6, p. 827-836, 1997. <https://doi.org/10.1051/metal/199794060827>

DE MELLO, J.; GONÇALVES JR, J.; COSTA, H. Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls. **Wear**, v. 302, n. 1-2, p. 1295-1309, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.006>.

DE MELLO, J. D. B.; OLIVEIRA JR, M. M.; BINDER, C.; KLEIN, A. N. **Solid Lubrication in Fluid Film Lubrication**. ASIATRIB -2014. Agra, India 2014.

DICK, K.; LENARD, J. G. The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 168, n. 1, p. 16-24, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091>.

DIETER GEORGE, E. **Mechanical Metallurgy. SI metric edition**: secondary title: McGraw-Hill Series in Material Science and Engineering, 1988.

DOS SANTOS, M.; COSTA, H.; DE MELLO, J. Potentiality of triboscopy to monitor friction and wear. **Wear**, v. 332, n., p. 1134-1144, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.10.017>.

ELKOCA, O. A study on the characteristics of electrical discharge textured skin pass mill work roll. **Surface and Coatings Technology**, v. 202, n. 12, p. 2765-2774, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.10.004>.

EVIN, E.; TOMÁŠ, M.; KMEC, J. Optimization of Electro-Discharge Texturing Parameters for Steel Sheets' Finishing Rollers. **Materials**, v. 13, n. 5, p. 1223, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13051223>.

FERRI, G. G. B. **TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL ELETROQUÍMICA SEM MASCARAMENTO DE COMPONENTES CILÍNDRICOS**(Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande., 2019.

FERRI, GABRIEL ; DIAS, LEONARDO ; DE CARVALHO, RUAN ; COSTA, HENARA . Sliding energy of textured surfaces via pendular tests. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 72, p. 1051-1057, 2019. <https://doi.org/10.1108/ILT-07-2019-0279>.

FRAGOSO, J. V. Estudo metalúrgico e mecânico para a verificação da necessidade efetiva do número de repetições de tratamentos de revenimento para ferramentas de aço rápido. v., n., p., 2015.

GADELMAWLA, E.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, n. 1, p. 133-145, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2).

GONÇALVES, J. L.; DE MELLO, J. D. B.; COSTA, H. L. Wear in cold rolling milling rolls: A methodological approach. **Wear**, v. 426, n., p. 1523-1535, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.005>.

GONÇALVES, J. L.; DE MELLO, J. D. B.; COSTA, H. L. Tribological behaviour of alternative surface modifications for cold rolling mill rolls. **Wear**, v. 470-471, n., p. 203614, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203614>.

GONÇALVES JÚNIOR, J. L. Avaliação tribológica de novas modificações superficiais para cilindros de laminação a frio. v., n., p., 2016.

GORBUNOV, A.; BELOV, V.; BEGLETISOV, D. Texturing of rollers for the production of auto-industry sheet. **Steel in Translation**, v. 39, n. 8, p. 696, 2009. <https://doi.org/10.3103/S0967091209080178>.

HILGENBERG, K.; STEINHOFF, K. Texturing of skin-pass rolls by pulsed laser dispersing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 225, n., p. 84-92, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.05.027>.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, n. 3, p. 263-284, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**: Butterworth-Heinemann, 2017.

JING-NA, S.; HUA-GUI, H.; FENG-SHAN, D.; XUE-TONG, L. Nonlinear Finite Element Analysis of Thin Strip Temper Rolling Process. **JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL**, v. 16, n. 4, p. 27-32, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60056-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60056-X).

KIJIMA, H.; BAY, N. Modelling of skinpass rolling by elasto-plastic analysis of plane strain upsetting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, n. 1-3, p. 509-512, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.113>.

KIJIMA, H.; BAY, N. Contact conditions in skin-pass rolling. **CIRP annals**, v. 56, n. 1, p. 301-306, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.070>.

KIJIMA, H. **Mechanism of roughness profile transfer in skin-pass rolling of thin steel strip**. JFE Technical Report, 129-134. 2019.

KÖHLER, K.; KWIATON, N.; BRETSCHNEIDER, M. Skin pass rolling of high manganese steels. In: Materials Science Forum, 2016Trans Tech Publ, p. 93-98. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.854.93>.

LEACH, R. **Characterisation of areal surface texture**: Springer, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36458-7>.

LENARD, J. G.; ALTAN, B.; BAY, D.; GEIGER, K.; KOPP, L.; SCHEY, S.; SHAW, S. Tribology in metal rolling keynote presentation forming group F. **CIRP annals**, v. 49, n. 2, p. 567-590, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63456-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63456-8).

LENARD, J. G. **Metal Forming Science and Practice: A State-of-the-Art Volume in Honour of Professor JA Schey's 80th Birthday**: Elsevier, 2002.

MCGEOUGH, J.; RASMUSSEN, H. A model for the surface texturing of steel rolls by electrodischarge machining. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences**, v. 436, n. 1896, p. 155-164, 1992. <https://doi.org/10.1098/rspa.1992.0011>.

MONTMITONNET, P.; DELAMARE, F.; RIZOULIERES, B. Transfer layer and friction in cold metal strip rolling processes. **Wear**, v. 245, n. 1-2, p. 125-135, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00473-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00473-7).

OGARKOV, N.; ZVYAGINA, E. Y.; ISMAGILOV, R. Theoretical Analysis of Formation of Automobile Sheet Roughness during Temper Rolling in Shot-Blasted Rolls. **Steel in Translation**, v. 49, n. 8, p. 499-503, 2019. <https://doi.org/10.3103/S0967091219080138>.

OULD, C.; BADICHE, X.; MONTMITONNET, P.; GACHON, Y. PVD coated mill rolls for cold rolling of stainless steel strips—Tribological and mechanical laboratory tests. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 15, n. 1, p. 77-86, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.09.011>.

PARREIRA, J.; GALLO, C.; COSTA, H. New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes. **Surface and Coatings Technology**, v. 212, n., p. 1-13, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.043>.

PARREIRA, J. G. **Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento com finalidades tribológicas**. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

PAWELSKI, O.; RASP, W.; ZWICK, W.; NETTELBECK, H.-J.; STEINHOFF, K. The influence of different work-roll texturing systems on the development of surface structure in the temper rolling process of steel sheet used in the automotive industry. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, n. 1-4, p. 215-222, 1994. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90343-3](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90343-3).

RAY, S. **Principles and applications of metal rolling**: Cambridge University Press, 2016. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139879293>.

RODRIGUES, T. A. **Efeito do controle da topografia na eficiência de contatos lubrificados: avaliação experimental**. Universidade Federal de Uberlândia., 2018.

RODRIGUES, T. A.; ARENCIBIA, R. V.; COSTA, H. L.; DA SILVA, W. M. Roughness analysis of electrochemically textured surfaces: effects on friction and wear of lubricated contacts. **Surface Topography-Metrology and Properties**, v. 8, n. 2, p., 2020. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/ab96da>.

RODRIGUEZ-VIDAL, E.; MATTHEWS, D. T. A.; DE VITERI, V. S.; KORVER, F.; WENTINK, D.; QUINTANA, I. Surface design and texturing of strip steel using nanosecond pulsed lasers for simulated roughness transfer and paint appearance. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 275, n., p. 116365, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116365>.

SILVA, L. R. R. D. Texturização superficial de cilindros automotivos. v., n., p., 2016.

SIMAO, J.; APINWALL, D.; WISE, M.; SUBARI, K. Surface texture transfer in simulated tandem and temper mill rolling using electrical discharge textured rolls. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 56, n. 1-4, p. 177-189, 1996. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01833-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01833-6).

SIMÃO, J.; ASPINWALL, D. Hard chromium plating of EDT mill work rolls. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 92, n., p. 281-287, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00124-7).

SPUZIC, S.; STRAFFORD, K.; SUBRAMANIAN, C.; SAVAGE, G. Wear of hot rolling mill rolls: an overview. **Wear**, v. 176, n. 2, p. 261-272, 1994. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90155-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90155-4).

STOUT, K. J.; BLUNT, L.; DONG, W. P.; MAINSAH, E.; LUO, N.; MATHIA, T.; SULLIVAN, P. J.; ZAHOUANI, H. **Development of Methods for Characterisation of Roughness in Three Dimensions**: Elsevier Science, 2002.

UENO, M.; FUJITA, N.; KIMURA, Y.; NAKATA, N. Evaluation of coating and wear characteristics of roll surface coated with TiC by electrical discharge coating. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 236, n., p. 9-15, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.025>.

WENTINK, D.; MATTHEWS, D.; APPELMAN, N.; TOOSE, E. A generic model for surface texture development, wear and roughness transfer in skin pass rolling. **Wear**, v. 328, n., p. 167-176, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.015>.

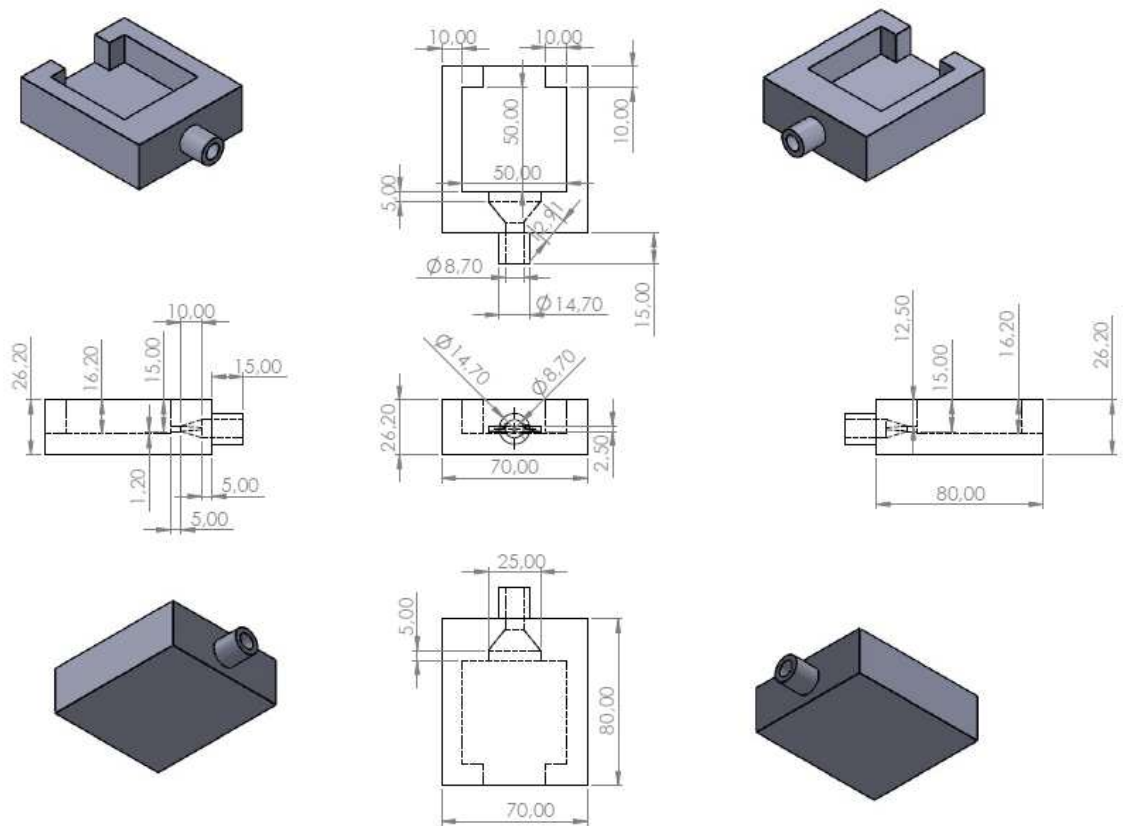
WU, C.; ZHANG, L.; QU, P.; LI, S.; JIANG, Z. A new method for predicting the three-dimensional surface texture transfer in the skin pass rolling of metal strips. **Wear**, v. 426, n., p. 1246-1264, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.020>.

YUAN, S.; LIN, N.; ZOU, J.; LIU, Z.; WANG, Z.; TIAN, L.; QIN, L.; ZHANG, H.; WANG, Z.; TANG, B. Effect of laser surface texturing (LST) on tribological behavior of double glow plasma surface zirconizing coating on Ti6Al4V alloy. **Surface and Coatings Technology**, v. 368, n., p. 97-109, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.038>.

CAPÍTULO X

Apêndices

Apêndice A – Câmara de texturização de superfícies planas (dimensões em mm).



Apêndice B – Câmara de texturização de superfícies cilíndricas (dimensões em mm).

