

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AMANDA FIGUEIRA TAVARES

**ATRITO E MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS
REVESTIDAS PARA CONFORMAÇÃO A FRIO**

Rio Grande
Julho/2019

AMANDA FIGUEIRA TAVARES

**ATRITO E MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS
REVESTIDAS PARA CONFORMAÇÃO A FRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Orientadora: Henara Lillian Costa Murray

Rio Grande
Julho/2019

Ficha Catalográfica

T231a Tavares, Amanda Figueira.

Atrito e mecanismos de desgaste em ferramentas revestidas
para conformação a frio / Amanda Figueira Tavares. – 2019.
93 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Rio Grande/RS, 2019.

Orientadora: Dra. Henara Lillian Costa Murray.

1. Conformação a Frio 2. Estiramento 3. Ferramentas 4. Atrito
5. Desgaste 6. MEV 7. Topografia de Superfícies I. Murray, Henara
Lillian Costa II. Título.

CDU 621.9:531.783

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **11/2019** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dezenove dias do mês de julho de dois mil e dezenove, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas e na Sala de vídeo conferência do NTI, no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu a mestranda **AMANDA FIGUEIRA TAVARES**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **ATRITO E MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS PARA CONFORMAÇÃO A FRIO**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Kleber Bianchi, Carlos Henrique da Silva e João Henrique Corrêa de Souza, sob a presidência da Professora Henara Lillian Costa Murray. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Henara Lillian Costa Murray: APROVADA
2. Kleber Eduardo Bianchi: APROVADA
3. Carlos Henrique da Silva: Aprovada
4. João Henrique Corrêa de Souza: APROVADA

Foi concedido um prazo de ____ dias para a candidata efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. [Assinatura]
CPF: 847.359.106-20
2. [Assinatura]
CPF: 440.783.230-49
3. [Assinatura]
CPF: 622.489.606-20
4. [Assinatura]
CPF: 636.213.470-20

Amanda Figueira Tavares: Amanda Figueira Tavares

Dedico esse trabalho aos meus pais Antônio e Maria.

AGRADECIMENTOS

À orientadora Henara Lillian Costa por sua orientação, paciência e disponibilidade. Durante esses anos, além de orientadora também foi uma grande inspiração profissional e pessoal.

Agradeço a Bruning Tecnometal pela disponibilização de toda estrutura e material necessário para a pesquisa.

Agradeço aos colegas do setor de Pesquisa e Desenvolvimento da Bruning Tecnometal.

Agradeço ao CEME-SUL FURG pela disponibilidade, apoio e realização das análises necessária no decorrer do trabalho.

Agradeço aos meus amigos do LAPES, Daniel, Thaís e Aryel por todo incentivo, amizade e ajuda.

RESUMO

Processos de conformação envolvem movimento relativo entre ferramenta e peça sob a ação de elevadas pressões de contato, o que pode gerar elevado desgaste da ferramenta comprometendo a qualidade e o custo final do produto. Nesse sentido, o uso de revestimentos duros para aumentar a resistência ao desgaste de ferramentas de conformação a frio apresentam-se como uma boa alternativa. O presente trabalho analisou o comportamento e desempenho tribológico de ferramentas de conformação revestidas e não revestidas, desenvolvendo uma metodologia de caracterização das superfícies antes, durante e depois de ensaios de estiramento. Os valores de coeficiente de atrito foram correlacionados com análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão de energia de raio-X (EDS) e parâmetros topográficos para identificação dos mecanismos de desgaste. Foram selecionados oito aços para ferramenta (sinterizados, laminados, fundidos e refundidos) e revestidos com três tipos de revestimentos: VN (revestimento 1), TiCrN (revestimento 2) e TiAlN (revestimento 3). A caracterização inicial das amostras via microscopia eletrônico de varredura (MEV) e interferometria ótica, identificou uma condição superficial mais rugosa para revestimentos de VN comparado com os de TiCrN e TiAlN. Os resultados dos ensaios de estiramento mostraram que o revestimento VN e TiCrN apresentaram menor coeficiente de atrito e um melhor desempenho devido à formação de uma condição tribológica mais favorável de camadas de transferências lisas e parcialmente oxidadas. O revestimento TiAlN apresentou coeficientes de atrito mais elevados e instáveis, aparentemente pela formação de protuberâncias formadas pelo material transferido, que contribuíram para o aumento do coeficiente de atrito e eventualmente levaram ao travamento entre peça e ferramenta. Considerando a influência do material da ferramenta, somente as ferramentas fundidas revestidas com VN e TiCrN apresentaram comportamento diferenciado em termos de atrito. O melhor desempenho foi atribuído para o revestimento TiCrN por apresentar menores coeficientes de atrito com valores estáveis ao longo dos ensaios e o pior comportamento foi observado para o revestimento 3, apesar de apresentar a superfície mais lisa inicialmente.

Palavras-chave: conformação a frio, estiramento, ferramentas, atrito, desgaste, MEV, topografia de superfícies

ABSTRACT

Metal forming involves relative motion between a tool and a workpiece under very high contact pressures, thus possibly leading to severe tool wear, compromising the process stability and the quality of the final product. Despite being fundamental for the process, friction must be controlled to ensure stability of the process and reduced energy losses. For that, cold forming tool are usually coated. The present work analyzed the tribological behavior of commercial thin hard PVD coatings used in metalforming tools during strip drawing tests. This study developed a methodology for identifying wear mechanisms via scanning electron microscopy (SEM) and 3D topographic characterization before and after the tests, which were then correlated with the friction coefficient measurements. For that, eight different tools were ground and coated with three different coatings: VN (coating 1), TiCrN (coating 2) e TiAlN (coating 3). Those tools were classified into four groups according to their manufacturing process: sintered, rolled, cast and recast. They were initially characterized by SEM, optical interferometry and microhardness. It was shown that coating 1 was rougher, whereas coating 2 and 3 followed the substrate topography. The strip drawing tests showed that the VN and TiCrN coatings presented lower and more stable friction coefficient values, which was traced back to relatively smooth and partially oxidized transfer layers, leading to more favorable tribological conditions. The TiAlN coating presented higher and very unstable friction values, apparently due to protruding transfer layers, which increased friction and eventually led to galling. Regarding the tool material, only the cast tools coated with VN and TiCrN presented different friction values. The best performance was attributed to the tools coated with TiCrN since the friction values were very stable along the tests. The tools coated with TiAlN presented the worst tribological performance, despite their smoother surfaces.

Keywords: cold forming, strip drawing, tools, friction, wear, SEM, surface topography

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
6. CONCLUSÕES.....	89
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de crescimento de junção apresentado por Hutchings e Shipway (2017).....	19
Figura 2 - Superfície em contato, adaptação de (Azushima e Kudo, 1995).	21
Figura 3 - Duas configurações de ensaio para avaliar comportamento tribológico durante conformação: (a) ensaio de varredura cilindro-cilindro; (b) ensaio de estiramento (Figueiredo et al., 2011)	22
Figura 4 – Ensaio de laboratório utilizados para simular desgaste em conformação: (a) Pino Disco; (b) Cilindro-cilindro com carregamento de molas; (c) Teste de varredura com cilindros cruzados; adaptado de (Podgornik, Hogmark e Pezdirnik, 2004).	23
Figura 5 – Esquematização ilustrativa do conceito do equipamento de ensaio apresentado por Kirkhorn et al. (2012).....	24
Figura 6 - Ensaio tribológico de estiramento de chapas utilizado por De Souza e Liewald (2010).	25
Figura 7 - Mecanismos de desgaste de deslizamento e abrasão (Hutchings e Shipway, 2017).....	27
Figura 8 – Rugosidade do corpo durante ensaios pino-sobre disco material, adaptado de (Andreasen et al., 1998).....	28
Figura 9 – Rugosidade de ferramentas nova e desgastada e respectivas rugosidades dos contra-corpos após ensaio (Montmitonnet, P. et al., 2000)...	29
Figura 10 – Carregamento crítico de ferramentas revestidas para o início de transferência de material para diferentes rugosidades; adaptado de (Podgornik, Hogmark e Sandberg, 2004).	30
Figura 11 – Análise de tribocamadas formadas em ferramentas de conformação revestidas rugosas: a) MEV da trilha de desgaste; b) resultado de análise EDS da área indicada na figura (a) (Harlin et al., 2006).	32
Figura 12 - Microestrutura de revestimentos depositados a temperaturas de 250 e 330°C: (a) evaporação por feixe de elétrons (b) sputtering, (c) evaporação arco Arc-PVD (Lugscheider et al., 1996).	36
Figura 13 - Micrografia da secção transversal das superfícies com revestimento depositado usando apenas alta voltagem de pulso polarizada. Imagens obtidas por elétrons secundários via MEV. Fonte:(Azar et al., 2018)	37
Figura 14- Imagens via MEV por elétrons secundários das amostras revestidas com a técnica utilizada por Azar et al. (2018).....	38
Figura 15 - Fluxograma dos procedimentos experimentais.....	40

Figura 16- Morfologia inicial das amostras de ferramentas via MEV, imagens obtidas por elétrons retroespalhados.	44
Figura 17 - Corpo de prova da ferramenta.	44
Figura 18 - Representação das chapas estiradas.....	45
Figura 19 - Máquina para ensaios de estiramento.	46
Figura 20 – Esquema de funcionamento da máquina para ensaios de estiramento.	46
Figura 21 – Esquema do cabeçote móvel e sistema de aquisição.	47
Figura 22 – Exemplo de imagem obtida via microscópio eletrônico de varredura. À esquerda imagem obtida por elétrons secundário e à direita imagem obtida por elétrons retroespalhados destacando as regiões de interesse analisada via EDS.	50
Figura 23- Imagens por MEV obtidas da morfologia superficial inicial dos corpos de prova, à esquerda imagem por elétrons secundário e à direita por elétrons retroespalhados. a) e b) Sem revestimento; c) e d) revestimento 1; e) e f) revestimento 2; g) e h) revestimento 3.....	53
Figura 24 – Mapas topográficos 3D evidenciando morfologia superficial inicial das ferramentas: a) Sem revestimento; b) revestimento 1; c) revestimento 2; d) revestimento 3.	54
Figura 25. Valores iniciais de S_q das ferramentas por grupos de substratos. ..	55
Figura 26 - Imagens do revestimento 2 via MEV obtidas por elétrons secundário à esquerda e por elétrons retroespalhados à direita.	56
Figura 27 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio para o revestimento 1: (a) primeira chapa deslizada; (b) última chapa deslizada.	59
Figura 28 - Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio para o revestimento 2: (a) primeira chapa deslizada, (b) última chapa deslizada.	60
Figura 29 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio para o revestimento 3: primeira chapa deslizada; (b) última chapa.....	61
Figura 30 - Coeficientes de atrito médios para a primeira chapa deslizada.....	63
Figura 31 - Coeficientes de atrito médios para a primeira a última chapa deslizada.....	64
Figura 32 - MEV da superfície desgastada de amostra Sem revestimento (substrato Aço sinterizado 1), imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição intermediária.	65
Figura 33 - MEV da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 1, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição intermediária.	66

Figura 34 - MEV da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 1, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição final.	67
Figura 35 - MEV da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição intermediária.	68
Figura 36 - MEV da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição final.	69
Figura 37 - MEV da superfície desgastada de ferramenta fundida com Revestimento 3, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição intermediária.	70
Figura 38- MEV da superfície desgastada de ferramenta refundida com Revestimento 3, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição final.	70
Figura 39. Detalhes por MEV das camadas transferidas em ferramenta sinterizada com Revestimento 1: (a) SE, condição intermediária, (b) BSE, condição intermediária, (c) SE, condição final, (d) BSE, condição final.	72
Figura 40 - Detalhes por MEV das camadas transferidas em ferramenta sinterizada com Revestimento 2: (a) SE, condição intermediária, (b) BSE, condição intermediária, (c) SE, condição final, (d) BSE, condição final.	73
Figura 41 - Detalhes por MEV das camadas transferidas em ferramenta fundida com Revestimento 3: (a) SE, condição intermediária, (b) BSE, condição intermediária, (c) SE, condição final, (d) BSE, condição final.	74
Figura 42 - Mapas topográficos 3D das trilhas de desgaste produzidas nas amostras na condição intermediária: (a)Revestimento 1; (b) Revestimento 2; (a) Revestimento 3.....	75
Figura 43 - Resultados de Sq após os ensaios de desgaste: (a) condição intermediária; (b) condição final.....	76
Figura 44 - Resultados de Sz após os ensaios de desgaste: (a) condição intermediária; (b) condição final.....	77
Figura 45 - Resultados de Sbi antes e após os ensaios de desgaste: (a) condição inicial; (b) condição intermediária; (c) condição final.....	78
Figura 46 - Resultados de Sm antes e após os ensaios de desgaste: (a) condição inicial; (b) condição intermediária; (c) condição final.....	80
Figura 47- Espaço morfológico relativo a todas as ferramentas ensaiadas.	82
Figura 48 - Espaço morfológico relativo às ferramentas antes dos ensaios.	83
Figura 49- Espaço morfológico relativo às ferramentas com revestimento 1....	84
Figura 50 - Espaço morfológico relativo às ferramentas com revestimento 2...85	
Figura 51 - Espaço morfológico relativo às ferramentas com revestimento 3...86	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rugosidade da ferramenta e coeficientes de atrito dos ensaios de estiramento e cilindro-cilindro.	22
Tabela 2 - Composição química dos aços ferramentas sinterizados, laminados, fundidos e refundidos conforme informações disponibilizadas pela Bruning Tecnometal.	41
Tabela 3- Composição química dos revestimentos via EDS	55
Tabela 4 – Valores médios (por condição de substrato) da quantidade de chapas deslizadas nos ensaios de estiramento.	57
Tabela 5 - Resultado dos coeficientes de atrito para primeira chapa deslizada por substrato.	62
Tabela 6 - Resultado dos coeficientes de atrito para a última chapa deslizada por substrato.	62
Tabela 7. Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta sinterizada sem revestimento.	65
Tabela 8 – Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, condição intermediária.	66
Tabela 9 - Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 1, condição final.....	67
Tabela 10 - Porcentagem em peso de elementos químicos na superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, condição intermediária.	68
Tabela 11 - Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, condição final.....	69
Tabela 12 - Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta fundida com Revestimento 3, condição intermediária.	70
Tabela 13- Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta refundida com Revestimento 3, condição final.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

PVD: deposição física a vapor

CA-PVD: deposição física a vapor por arco catódico

MEV: microscópio eletrônico de varredura

EDS: espectroscopia de energia dispersiva

FN : força normal

FA : força de atrito

μ : coeficiente de atrito

BUT: bending-under-tension

DLC: Diamond-like carbon

P&D: Pesquisa e desenvolvimento

Sq : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à rugosidade superficial quadrática média.

Sz : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo ao valor médio das alturas absolutas dos cinco picos mais altos e as profundidades dos cinco vales mais profundos

Ssk : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à simetria da curva de distribuição de alturas da topografia (Skewness)

Sku : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo ao achatamento da curva de distribuição de alturas da topografia (Kurtosis)

Spk : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à altura dos picos mais proeminentes da superfície

Sbi : parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à capacidade de suporte mecânico da superfície

Sm : parâmetro de rugosidade tri-dimensional volumétrico relativo ao volume de

material na superfície

SE: imagem obtida via elétrons secundários

BSE: imagem obtida via elétrons retroespalhados

1. INTRODUÇÃO

A conformação de chapas metálicas refere-se a vários processos usados para converter chapas metálicas em diferentes formas para uma grande variedade de peças acabadas utilizadas em vários setores industriais, em particular na fabricação de máquinas de mobilidade, como carros, caminhões, aeronaves, além de máquinas agrícolas, revestimentos de construção civil, dentre outras.

Dentro dos processos de conformação, a estampagem de chapas metálicas é amplamente utilizada na indústria metal-mecânica devido à sua capacidade de reprodução de peças iguais, alta produtividade, geração de formas variáveis, estabilidade do processo e baixo custo de produção para altos volumes (Voelkner, 2000). O desempenho das ferramentas de conformação tem grande importância, pois permite que o custo do produto final seja reduzido.

Uma das formas de avaliar o desempenho de ferramentas é através da quantidade de peças produzidas por ferramenta. A resistência ao desgaste é fundamental para o aumento da vida da ferramenta. Segundo Budinski (1981), o fim da vida da ferramenta é determinado pelo aumento da rugosidade das peças conformadas e pela adesão de material desgastado das peças conformadas na ferramenta, podendo causar danos ao produto.

Para que seja possível projetar matrizes e equipamentos de maneira adequada é necessário o conhecimento da influência de variáveis como as propriedades dos materiais, a geometria da peça na mecânica do processo e as condições de atrito. Visto que a estampagem quase sempre é efetuada com o contato direto de uma peça com uma ferramenta, as forças de atrito representam um fator primordial para o desempenho da maioria dos processos.

Para aumentar a resistência ao desgaste de ferramentas e controlar o atrito durante a conformação, revestimentos duros apresentam-se como uma

boa alternativa. Vetter et al. (1996) apresentaram revestimentos como uma forma de alcançar um aumento da vida útil das ferramentas de estampagem através da aplicação de revestimentos aplicados por PVD (deposição física a vapor). Os autores apresentaram benefícios que reduziram consideravelmente os custos de produção: redução de lubrificante em 85%, aumento da velocidade de trabalho e redução da necessidade de limpeza do processo. É importante ressaltar, que os benefícios nas propriedades tribológicas dos revestimentos estão associados com a qualidade de deposição do revestimento (Lugscheider et al., 1996).

Na literatura encontra-se uma diversidade de filmes finos aplicados pelo processo PVD como exemplo TiN, CrN, TiC, TiCNAl, DLC (Diamond-like Carbon), entre outros. Carlsson e Olsson (2006) compararam o desempenho de revestimento de CrN e DLC em ensaio pino-disco com contra-corpo de alumínio e atribuíram à dureza do revestimento como sendo um dos principais fatores na melhora do desempenho tribológico. De forma semelhante, Birol (2013) comparou revestimentos de CrN e TiAlN e atribuiu o melhor desempenho para o revestimento TiAlN à sua alta dureza e às características de compatibilidade química com o contra-corpo. Podgornik, Hogmark e Sandberg (2004) estudaram a influência da rugosidade da ferramenta na resistência ao desgaste de ferramentas revestidas por TiN e WC durante a conformação de chapas de aço inoxidável e a principal observação foi o grande aumento da resistência ao desgaste com a redução da rugosidade superficial da ferramenta. Além dessas características, Montmitonnet, P. et al. (2000) atribuíram que as consequências tribológicas em relação ao atrito e aos aspectos de superfície das peças conformadas variaram com as propriedades da camada transferida durante o processo.

Dessa forma, torna-se clara a complexidade da análise tribológica do contato entre as superfícies para cada sistema tribológico. Devido à complexidade destes tribossistemas, é comum a utilização de ensaios de laboratório para a simulação dos fenômenos tribológicos envolvidos no contato entre a ferramenta e a peça. Porém, é fundamental que os ensaios de laboratório reproduzam os mesmos fenômenos tribológicos que acontecem no

contato encontrado em ferramentas de conformação (Gonçalves Jr et al., 2019). A literatura apresenta diversos ensaios para determinação dos coeficientes de atrito para estampagem de chapas.

Conforme Podgornik, Hogmark e Pezdirnik (2004), os ensaios que apresentam a uma única pista de desgaste facilitam a análise gradativa do desenvolvimento do desgaste na superfície de contato. Dessa forma, Kirkhorn et al. (2012) e De Souza e Liewald (2010) desenvolveram semelhantes equipamentos de ensaios de estiramento por tiras de chapas que possibilita maior controle de variáveis como velocidade de ensaio, carga normal aplicada, dimensão de ferramenta para permitir a melhor condição representativa de contato durante a conformação de chapas, além de se apresentarem como ensaios mais rápidos, comparado a ensaios tradicionais como pino-disco.

Este trabalho visa analisar o desempenho tribológicos de ferramentas de conformação revestidas e não revestidas utilizadas em operações industriais, desenvolvendo uma metodologia de caracterização de superfícies das amostras de ferramentas antes, durante e depois dos ensaios de estiramento, correlacionando os resultados de atrito com análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão de energia de raio-X (EDX) e parâmetros topográficos.

2. OBJETIVOS

Este projeto visa auxiliar no entendimento das relações entre as condições superficiais das superfícies em contato (antes, durante e após conformação) e o atrito durante ensaios de estiramento, de forma a identificar a influência das condições superficiais da chapa e da ferramenta no atrito e nos fenômenos de adesão e de transferência de material durante a conformação mecânica. Para tanto, os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos:

Comparar o atrito de três diferentes revestimentos comerciais utilizados na indústria de conformação a frio através de ensaios de estiramento

Avaliar o efeito do material da ferramenta (substrato) no comportamento tribológico de ferramentas revestidas

Estabelecer metodologia para a utilização de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e interferometria ótica para identificação dos mecanismos de desgaste em ferramentas de conformação e sua evolução com o tempo.

Correlacionar as medições de atrito durante os ensaios com os mecanismos de desgaste identificados nas ferramentas

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os processos de conformação dos metais permitem a fabricação de peças com características controladas. Em geral, esses processos têm como objetivo a obtenção de produtos finais com especificação de dimensão e forma, propriedades mecânicas e condições superficiais.

Para que tal conformação seja possível, ferramentas fabricadas de materiais de elevada dureza são pressionadas contra os componentes a serem deformados. Dentro da divisão das ferramentas de conformação existem punções, matrizes, extratores e sujeitadores. A escolha do material adequando para a fabricação da ferramenta de conformação apresenta impacto direto na vida útil da ferramenta. Os aços normalmente utilizados para essa aplicação são denominados genericamente como aços ferramentas (Bresciani Filho et al., 1997).

Os aços ferramentas compreendem um conjunto de aços utilizados na fabricação de ferramentas de uso industrial. Normalmente têm custo elevado e apresentam uma melhor qualidade, principalmente em função da quantidade de elementos de liga utilizados como tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio e cobalto e requerem um controle preciso no processo siderúrgico utilizado para sua fabricação. Os aços ferramentas são produzidos com tolerâncias de composição químicas rigorosas, apresentando baixo nível de inclusões e impurezas no material, além de serem utilizados durante sua produção diferentes tratamentos térmicos e processos de fabricação (Roberts et al., 1998).

A estampagem de chapas metálicas advém da aplicação de tensões externas a uma chapa, efetuadas pelo movimento de um punção contra uma matriz, processando a geometria plana da chapa para outra forma definida. Isto se dá através do controle do escoamento do material, no estado plástico de tensões e deformações, para o interior da ferramenta. A severidade de um processo de estampagem pode ser dada pelo nível de esforço de estampagem,

sendo que o seu nível depende essencialmente das condições de atrito - entre a chapa e a matriz, o punção e o sujeitador - e da intensidade da pressão de sujeição (Bresciani Filho et al., 1997). Por esse motivo, os principais motivos para controlar o atrito no processo de conformação são: diminuir o esforço necessário à conformação, tornar a deformação mais heterogênea, garantir o acabamento superficial do produto e diminuir o desgaste de ferramentas para elevar produtividade.

Um sistema de estampagem de chapa compreende variáveis relativas à peça bruta (geometria), às características do material, ao ferramental, às condições na interface ferramenta-material, à mecânica de deformação plástica, ao equipamento e, finalmente, aos fatores ambientais em que o processo está sendo conduzido. O controle e a otimização dos processos de conformação de chapas exigem conhecimento analítico sobre os materiais, os limites de deformação, tensões de contato, lubrificação, manuseio de materiais, projeto e fabricação de matrizes.

O atrito é a força de resistência tangencial à fronteira comum entre dois corpos quando, sob a ação de uma força externa, um corpo se move ou tende a se mover em relação à superfície do outro. A definição de atrito proposta por Amontons incorpora duas leis básicas: a força de atrito é proporcional à força normal e é independente do tamanho da área de contato aparente. De acordo com Schey (1984) isso não é necessariamente realista para a conformação, pois neste processo a força normal acaba sendo tão elevada que o material sofre escoamento. Dessa forma, parte da energia acaba sendo empregada para deformar plasticamente o material e não apenas para vencer a resistência devido ao atrito.

Resumidamente, o modelo de atrito de deslizamento proposto por Bowden e Tabor (2001) assume que a força de atrito surge a partir de duas fontes, primeiramente pela adesão que ocorre na área de contato real das asperidades e devido a uma força de deformação necessária para promover o sulcamento das mesmas. A análise do contato real entre asperidades metal-metal é explicada no modelo conhecido como crescimento de junções, que

ocorre para processos de deformação plástica ou não. O modelo de atrito por crescimento de junção conforme Hutchings (2017) considera a hipótese de que o estado de tensão na interface é uniaxial e representa o contato entre as asperidades como uma unidade infinitesimal sobre uma superfície plana de elevada dureza conforme Figura 1. O material é submetido por uma carga normal W a uma pressão P_0 . Partindo-se do princípio que o contato seja plástico, o que de acordo com Greenwood e Williamson (1966) é geralmente o caso para metais, a pressão de contato irá corresponder à dureza do material. Quando uma força tangencial F é aplicada (deslizamento das superfícies) o material sofre uma tensão de cisalhamento adicional τ . Para que o material permaneça em seu ponto de escoamento, já que num contato não conforme plástico a pressão de contato não varia, para uma carga normal constante a área de contato deve aumentar. Esse fenômeno é chamado de crescimento de junção. Com o constante aumento desse fenômeno o atrito pode assumir valores bem altos e o dano à superfície pode ser muito severo.

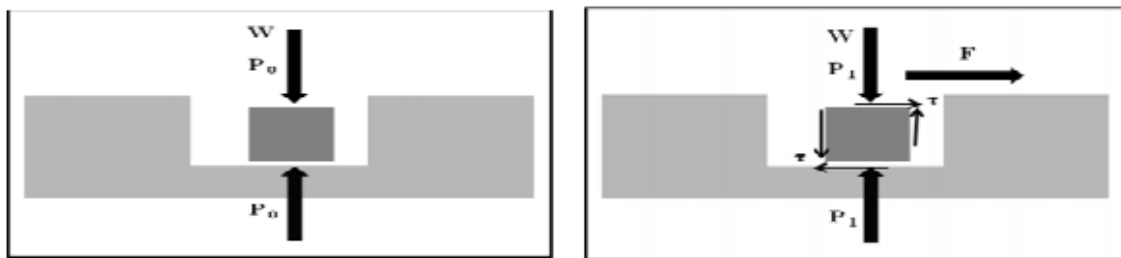


Figura 1 - Modelo de crescimento de junção apresentado por Hutchings e Shipway (2017).

Para a conformação de metais, a pressão aplicada, quase sempre, assume valores maiores que a tensão de escoamento do material. Dessa forma, os valores extremamente elevados de atrito levaria à adesão completa do material. Schey (1984) realça que durante a conformação, o atrito surge da interação na interface em função da velocidade de deslizamento, da temperatura, das reações químicas e de outras condições que afetem o comportamento do lubrificante na interface provocando sucessivas alterações no valor da força de atrito.

A força de atrito resulta da resposta de um sistema, variando com a área de contato real, a variação de pressão, a compatibilidade química dos materiais, a velocidade de deslizamento, o uso de lubrificantes, as temperaturas e outras condições às quais um processo de conformação esteja submetido. Em decorrência da complexidade de correlacionar todas essas variáveis, observa-se grande dificuldade de um modelo matemático que represente e quantifique adequadamente o fenômeno de atrito com o que ocorre na interface ferramenta-material, levando muitas vezes à necessidade de determinar experimentalmente o seu valor para diferentes aplicações.

Foi observado pelo estudo de Azushima e Kudo (1995) uma relação entre coeficiente de atrito com pressão de contato. Os autores identificaram que o coeficiente de atrito diminuía com o aumento da pressão. Para visualizar e quantificar diretamente o contato real foram utilizados uma matriz transparente de quartzo, um microscópio e um sistema de vídeo. Para o trabalho, o material escolhido foi uma chapa de alumínio puro com dois níveis de rugosidade superficial. Na Figura 2, as imagens apresentam o contato na interface para seis diferentes pressões médias duas condições de acabamento. Para menores pressões as zonas de contato reais são isoladas e a área de contato aumenta conforme a pressão aumenta, além de aumentar a quantidade de bolsos isolados de lubrificante sem permitir o fluxo lateral do mesmo. O mesmo efeito ocorre para o segundo acabamento (imagens inferiores), o aumento da área de contato com a pressão e a formação de bolsos isolados de lubrificante. Assim, os regimes de pressões médias mais baixas são caracterizados por zonas de contato isoladas promovendo uma pressão atuante metal-metal, enquanto os regimes de maiores pressões aprisionam os lubrificantes não permitindo seu escoamento. Isso promove uma elevada pressão hidrostática do lubrificante aprisionado nos bolsos na interface de contato entre as superfícies, que passa ser maior que a pressão metal-metal, permitindo a saída do lubrificante, o que leva a uma redução no coeficiente de atrito.

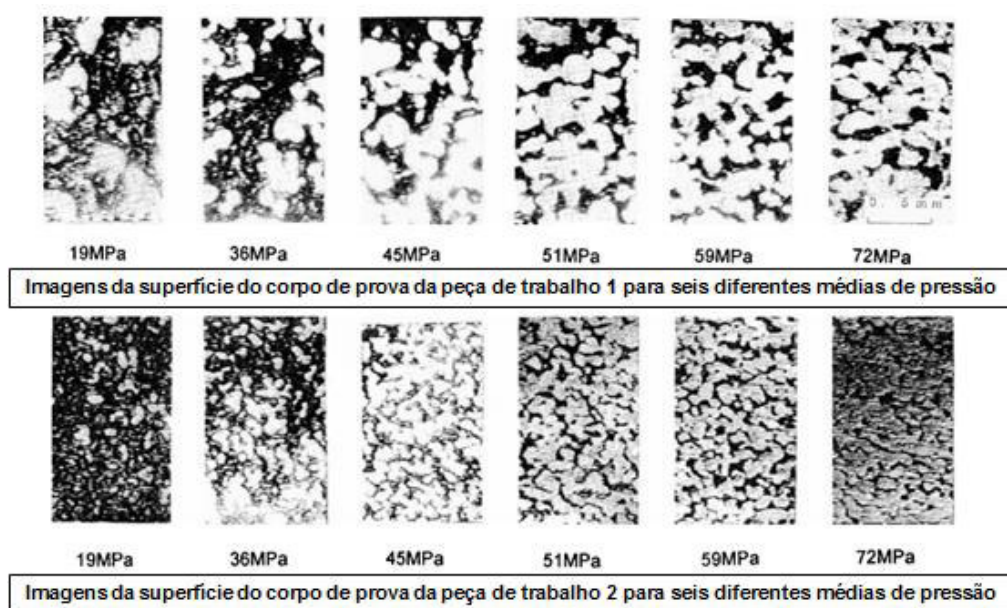


Figura 2 - Superfície em contato, adaptação de (Azushima e Kudo, 1995).

Figueiredo et al. (2011) tiveram como objetivo aplicar uma abordagem experimental a fim de unir experimentos simples de atrito de bancada com aplicações reais de conformação de chapas. Para avaliar o atrito, os autores utilizaram duas técnicas diferentes: na primeira, deslizamento unidirecional de cilindros cruzados com aumento linear da carga e, na segunda, um equipamento que permite medir o coeficiente de atrito sob condições de estiramento de chapa, mostradas na Figura 3. As diferenças entre os resultados obtidos a partir das duas técnicas são apresentadas na Tabela 1. Observou-se valores de coeficiente de atrito bem menores nos ensaios de deslizamento cilindro-cilindro quando comparados com os ensaios de estiramento. Além disso, a rugosidade da topografia da matriz desempenhou maior influência no coeficiente de atrito para o ensaio de deslizamento cilindro-cilindro. Os autores sugerem que a diferença dos resultados pode estar associada com uma maior pressão de contato no ensaio de varredura cilindro-cilindro. Dessa forma, pode-se notar que a determinação do coeficiente de atrito em um processo de conformação de chapa é um experimento complexo, onde muitas variáveis influenciam os mecanismos de contato e consequentemente o coeficiente de atrito. O maior desafio do método

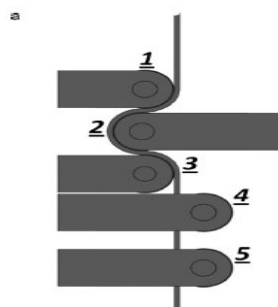
experimental é replicar mecanismos de desgaste em ensaios de laboratório que sejam compatíveis com a condição real de contato no processo de conformação.

Tabela 1 - Rugosidade da ferramenta e coeficientes de atrito dos ensaios de estiramento e cilindro-cilindro.

Materiais	Rugosidade (μm)	Ensaio Estiramento	Ensaio cilindros
AA1100-D3	1,66 – 0,22	$0,11 \pm 0,0014$	$0,075 \pm 0,018$
AA1100-D3	2,48 – 0,27	$0,13 \pm 0,0007$	$0,11 \pm 0,015$



(a)



(b)

Figura 3 - Duas configurações de ensaio para avaliar comportamento tribológico durante conformação: (a) ensaio de varredura cilindro-cilindro; (b) ensaio de estiramento (Figueiredo et al., 2011)

O método de ensaio para analisar a resistência ao desgaste das combinações de materiais comumente utilizados para conformação é extremamente importante. Diversos modelos são propostos em diferentes bibliografias. Podgornik, Hogmark e Pezdirnik (2004) apresentaram três métodos de teste diferentes a fim de classificar qualitativamente o melhor ensaio quanto à sua capacidade de avaliar as tendências de desgaste dos aços para ferramentas revestidas e não revestidas. O estudo incluiu a configuração tipo pino sobre disco Figura 4(a), um teste modificado utilizando dois cilindros cruzados com um sistema de carregamento de molas Figura 4 (b) e um novo método de teste de varredura de carga, que envolve dois cilindros

cruzados no qual uma trilha de desgaste é formada ao longo do comprimento de um dos cilindros, conforme mostrado na Figura 4 (c). De acordo com os autores, a configuração pino-disco é a mais simples, mas limitada a uma carga fixa e a uma única trilha de desgaste, além de ser mais demorado. Já para o ensaio utilizando cilindros cruzados, o mecanismo de varredura de carga permitiu avaliar a variação de atrito e a quantidade de material transferido com a carga e, conseqüentemente, determinar facilmente a carga crítica para a iniciação do galling (escoriação). Já o ensaio cilindro-cilindro mostrado na Figura 4(b), apesar de também oferecer a possibilidade de varredura de carga durante o ensaio, é limitado a uma única pista de desgaste, dificultando a análise gradativa do desenvolvimento do desgaste na superfície de contato.

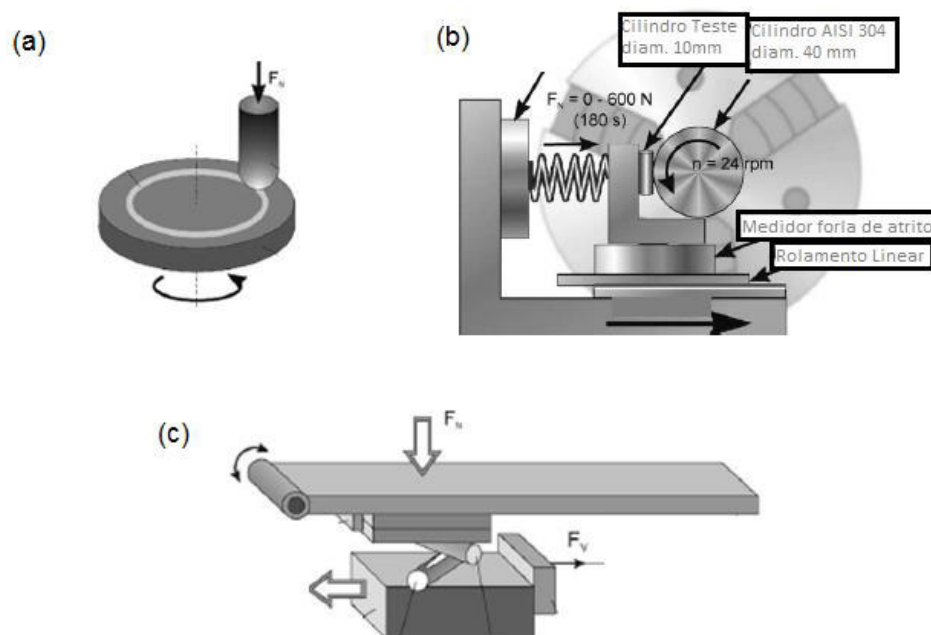


Figura 4 – Ensaio de laboratório utilizados para simular desgaste em conformação: (a) Pino Disco; (b) Cilindro-cilindro com carregamento de molas; (c) Teste de varredura com cilindros cruzados; adaptado de (Podgornik, Hogmark e Pezdinik, 2004).

Kirkhorn et al. (2012) desenvolveram um novo equipamento para ensaio tribológico para caracterizar as condições de atrito em aplicações de

conformação de chapas metálicas, apresentado na Figura 5. O estudo apresenta uma melhoria em configurações de teste convencionais de estiramento, pois oferece durante o ensaio o controle de velocidade e carga normal, um tamanho de ferramenta variável em uma ampla faixa de medição de força direta para permitir o cálculo de coeficientes de atrito sem considerar deformação interna do material. Diferentes experimentos foram realizados com carga constante, pressão constante e velocidade constante, com diferentes tipos e quantidade de lubrificantes. Os resultados dos diferentes testes de atrito com parâmetros constantes mostraram resultados promissores, particularmente em altas cargas normais. No entanto, em baixas cargas houve falta de repetitividade entre ensaios. Uma possível explicação seria devido à força normal ser aplicada por uma mola, o que pode interferir na interação chapa/ferramenta durante o teste com baixa força normal. Os experimentos iniciais mostraram que a preparação do teste é crucial para a precisão e repetitividade dos experimentos. Pequenas diferenças na preparação ou imperfeições nas amostras resultaram em grandes discrepâncias nos resultados calculados.

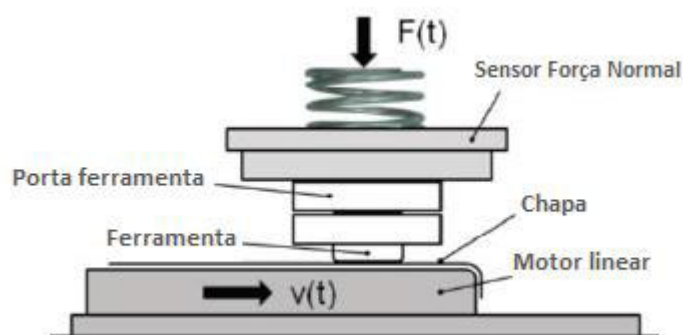


Figura 5 – Esquematização ilustrativa do conceito do equipamento de ensaio apresentado por Kirkhorn et al. (2012).

O trabalho realizado por De Souza e Liewald (2010) apresenta um novo método de teste para avaliação do desgaste de materiais poliméricos para conformação de chapas metálicas utilizando um ensaio de estiramento de chapas apresentado na Figura 6. Este ensaio de estiramento de chapas permite a variação de cargas normais sobre a amostra. Neste teste, uma

amostra plana do material da ferramenta é pressionada contra uma tira de chapa, que é conformada simultaneamente. A força de tração e a carga normal são medidas, bem como o coeficiente de atrito calculado ao longo de todo o trajeto traçado. Conforme os autores, o método permitiu uma avaliação rápida e robusta das características de desgaste e atrito de compósitos poliméricos e chapa metálica, sendo adequada para investigações comparativas entre diferentes tipos de polímeros ou para investigações sobre o efeito da superfície da chapa no atrito e desgaste. Os autores compararam os resultados do novo método com o ensaio tipo Bending-Under-Tension (BUT) mais tradicionalmente utilizado para avaliar desgaste em conformação mecânica e as maiores vantagens do novo método apontadas foram: o atrito pode ser medido com uma precisão muito maior em comparação ao teste BUT, porque ele atua em apenas uma direção (espessura da amostra da ferramenta); medição de atrito sob diferentes condições (velocidade de deslizamento, lubrificante) e várias quantidades de pressão superficial e por fim alta repetitividade na medição do atrito.

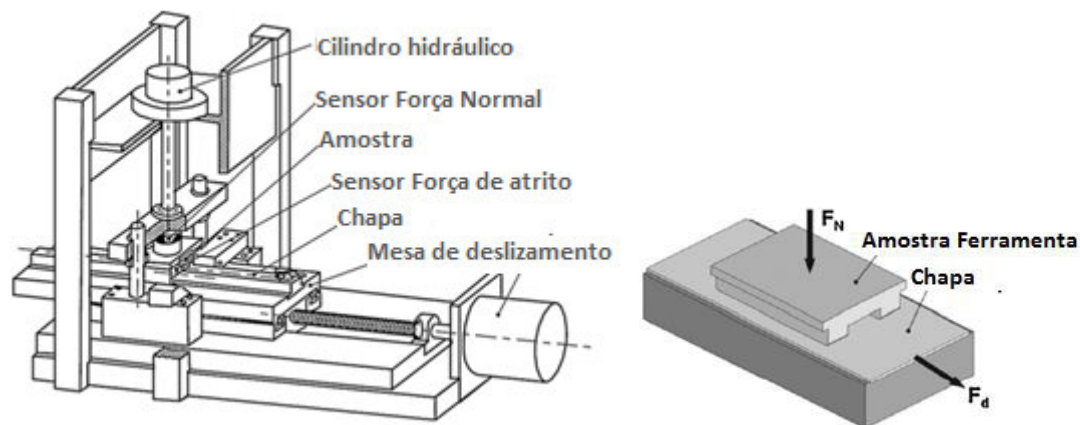


Figura 6 - Ensaio tribológico de estiramento de chapas utilizado por De Souza e Liewald (2010).

O entendimento dos fenômenos de atrito para que seja possível controlar ou estabilizar as forças de atrito é de extrema importância para diminuir o desgaste de ferramentas e consequentemente obter uma maior produtividade. Schedin (1994) estudou os mecanismos de desgaste para várias

combinações de materiais de ferramenta e chapa. Observou-se que a ocorrência de transferência de material do material mais macio para o material mais duro estava sempre presente. O autor atribuiu o termo galling para quando esse fenômeno se intensificava e ocasionava alterações significativas nas superfícies em contato.

O estudo realizado por Schedin (1994) observou as características iniciais de desgaste por deslizamento na conformação de chapas para várias combinações de ferramentas e chapas. O autor descreve o contato tribológico no processo de conformação como o contato entre uma superfície de alta dureza e relativamente lisa referente à ferramenta e o material mais macio e rugoso da chapa em movimento relativo (deslizamento). O trabalho reforça que é impossível evitar completamente a transferência de material no processo de conformação de chapas, pelo menos para a maioria das combinações de materiais comumente usados. Porém, o controle e o entendimento dos fatores que ocasionam o crescimento dessa camada transferida são importantes para o desenvolvimento de melhorias e novas tecnologias para os processos de conformação.

Para avaliar desgaste por deslizamento em situações de elevadas pressões de contato, Rigney (1997) discutiu conjuntamente no mecanismo de desgaste a importância de deformação plástica, transferência de material, mistura mecânica e formação de óxidos. O deslizamento de metais produz tensões de cisalhamento muito grandes na interface deslizante e elevados gradientes de deformações no material próximo à superfície. Dessa forma a transferência de material ocasionada por essas tensões pode ocorrer logo no início do deslizamento, iniciando um processo de aderência de material, mistura mecânica e deformação plástica. Essa sequência apresenta muitas variações para cada mecanismo de desgaste, condições ambientais e combinações químicas.

Outro ponto importante é que a distinção entre desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento somente é clara no início do processo de conformação. À medida que o processo de conformação avança, a presença

de debris na interface pode também levar à ocorrência de desgaste abrasivo, de forma que as duas formas de desgaste podem ocorrer simultaneamente ou consecutivamente. O modelo apresentado por Hutchings e Shipway (2017) é apresentado na Figura 7, sugerindo que a evolução do desgaste por deslizamento pode levar à abrasão devido às partículas encruadas removidas e posteriormente transferida para ferramenta atuarem como um abrasivo no contracorpo.

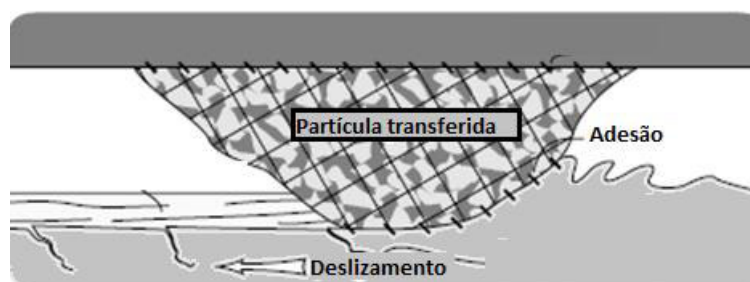


Figura 7 - Mecanismos de desgaste de deslizamento e abrasão (Hutchings e Shipway, 2017).

Em processos de conformação, a ocorrência de desgaste extremamente severo ou até mesmo de travamento entre ferramenta e peça é muitas vezes referido pelo termo “galling”. Porém, a definição de “galling” diverge nas literaturas. Para Hutchings e Shipway (2017) o conceito de galling está associado ao desgaste severo por deslizamento. Para Budinski et al. (2003), é necessário diferenciar o desgaste por deslizamento do galling, sendo que o último é encontrado apenas em situações mais severas, nas quais apresentam as seguintes características: formação de saliência macroscópica em regiões localizadas e na maioria das vezes misturas de material entre os pares deslizante e também de partículas deformadas plasticamente.

Para processos de conformação a condição da topografia da ferramenta pode ter influência no acabamento e até mesmo no atendimento das especificações dimensionais do produto final. Andreasen et al. (1998) realizaram testes de estiramento em chapas de aço inoxidável com diferentes

óleos lubrificantes utilizados para conformação, com o objetivo de identificar para qual lubrificante ocorriam menos escoriações em função de quebra do filme lubrificante, as quais levam a uma má qualidade do acabamento do produto final. A partir da medição de rugosidade da amostra (ferramenta), quantificaram o nível do galling em relação à distância deslizada. A Figura 8 apresenta os valores obtidos na medição dos perfis durante ensaio. Segundo os autores, o início do galling iniciaria a partir de 60 mm de ensaio. Porém este conceito é questionável, uma vez que a quantidade de material transferido é muito pequena. Muitos autores consideram que houve galling quando o dano superficial é bem mais significativo, como por exemplo o que acontece a partir da distância de deslizamento de 240 mm mostrada na Figura 8.

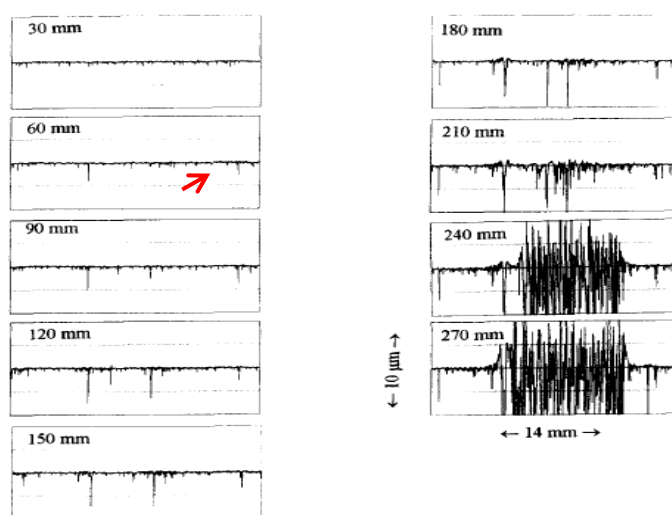


Figura 8 – Rugosidade do corpo durante ensaios pino-sobre disco material, adaptado de (Andreasen et al., 1998).

Montmitonnet, P. et al. (2000) apresentam uma revisão de experimentos realizados em um laminador experimental e em um teste de simulação tribológica, o teste de compressão de deformação plana (PSCT) utilizando diferentes materiais e sob uma variedade de condições de deformação. Observaram-se transferências de material entre a superfície da ferramenta, a peça e o lubrificante, sendo que a evolução do processo levou a um estado estacionário da camada transferida, cujas características (densidade e tamanho das partículas transferidas, rigidez e dureza) dependiam das

condições de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho. As consequências tribológicas em relação ao atrito e aspectos de superfície das peças conformadas variaram com as propriedades dessa camada transferida. De acordo com os autores, a grande diferença na dureza entre a ferramenta e a peça torna muito provável a formação de camadas transferida, pelas quais os debris removidos da peça de trabalho que permanecem no contato são fragmentados, aglomerados, deformados e eventualmente transferidos para a ferramenta, levando à formação de uma camada transferida. Outro fenômeno evidenciado foi o aumento da rugosidade da peça de trabalho com o aumento da quantidade de material transferido à ferramenta. A Figura 9 apresenta a chapa após a conformação com rugosidade mais suave quando comparada à chapa onde foi utilizada uma ferramenta desgastada. A camada transferida na interface de desgaste é amplamente identificada como tribocamada na literatura.

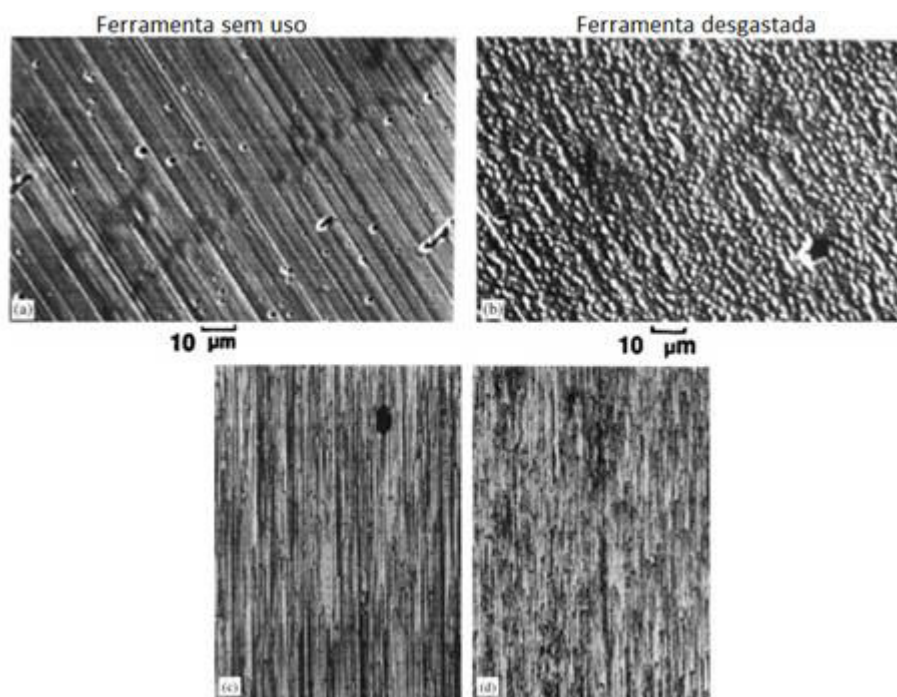


Figura 9 – Rugosidade de ferramentas nova e desgastada e respectivas rugosidades dos contra-corpos após ensaio (Montmitonnet, P. et al., 2000).

A rugosidade é um parâmetro de grande relevância no estudo tribológico de ferramentas de conformação. Podgornik, Hogmark e Sandberg (2004) estudaram a influência da rugosidade da ferramenta na resistência ao desgaste de ferramentas revestidas durante a conformação de chapas de aço inoxidável. A principal observação foi o grande aumento da resistência ao desgaste com a redução da rugosidade superficial da ferramenta. A discussão desse trabalho apresenta que a rugosidade da superfície tem um efeito crucial no nível de atrito e na capacidade de evitar a retirada do material mais macio. O polimento da superfície remove irregularidades e asperezas na superfície, eliminando assim fontes potenciais para o início da transferência de material. Os autores também mostraram que a diminuição da rugosidade permitiu utilizar maiores cargas nas ferramentas sem gerar transferência de material, como apresentado na Figura 10.

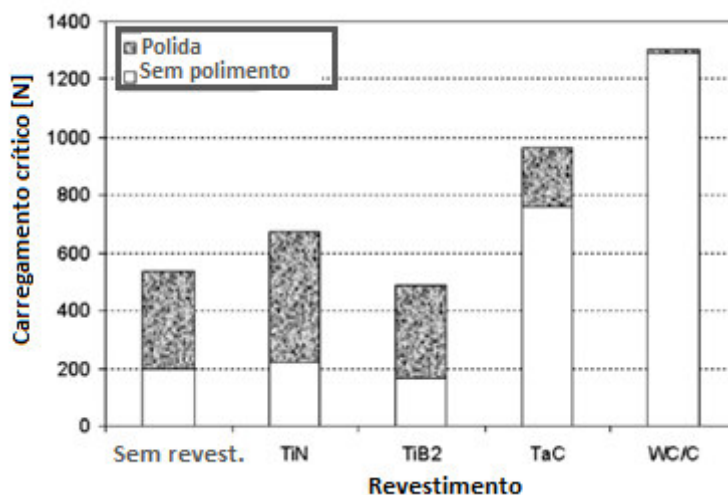


Figura 10 – Carregamento crítico de ferramentas revestidas para o início de transferência de material para diferentes rugosidades; adaptado de (Podgornik, Hogmark e Sandberg, 2004).

Considerando-se a importante correlação entre a topografia superficial e o comportamento tribológico durante a conformação, torna-se fundamental a quantificação e o entendimento das características topográficas das superfícies envolvidas no processo de conformação. A forma como as superfícies em

contato se desenvolve e qual melhor condição de topografia atende cada condição do processo de conformação levam a diversas literaturas procurarem métodos que possam identificar, controlar ou estimar os mecanismos de desgaste a partir de parâmetros topográficos.

Segundo Lonardo et al. (2002) embora a medição da topografia da superfície seja uma ciência de engenharia bem estabelecida, ela continua a evoluir. Seguindo a evolução da tecnologia, com a introdução de novas técnicas de produção e instrumentos de medição, o campo da metrologia de superfície ampliou seu interesse para incluir tanto a análise topográfica tradicional quanto a caracterização próxima da superfície.

Harlin et al. (2006) utilizaram dois diferentes tipos de testes em laboratório para simular desgaste deslizante e também analisaram a influência da rugosidade no desempenho tribológico de revestimentos em ferramenta. Os resultados mostraram que a rugosidade da superfície do revestimento é importante para o controle da transferência de material inicial e consequente atrito. A análise das tribocamadas (camadas transferidas) presentes na ferramenta foi realizada via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDX). A Figura 11 mostra imagens de MEV e resultados de EDX das trilhas de desgaste para uma ferramenta com superfície rugosa. Observa-se que durante o deslizamento formou-se uma tribocamada com alta quantidade de O e Fe. O trabalho sugeriu que a tribocamada diminuiu a oportunidade de contato direto entre as superfícies e assim contribuiu para melhores resultados no ensaio de desgaste.

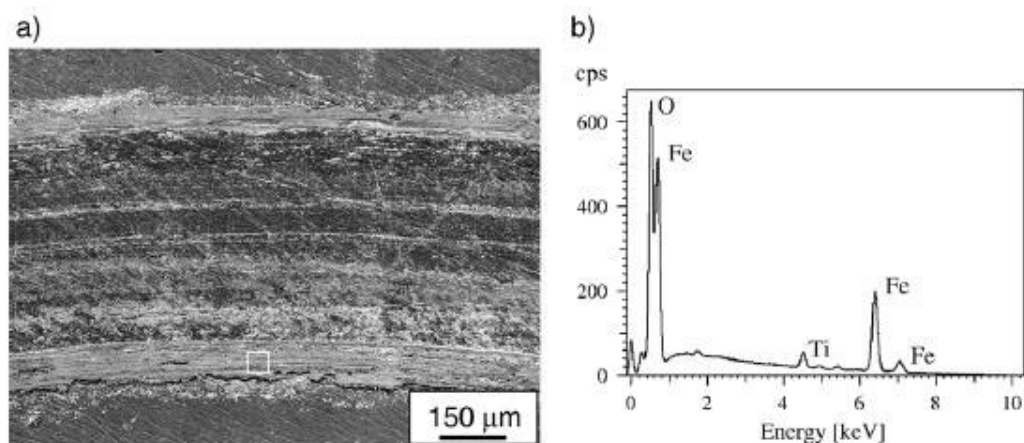


Figura 11 – Análise de tribocamadas formadas em ferramentas de conformação revestidas rugosas: a) MEV da trilha de desgaste; b) resultado de análise EDS da área indicada na figura (a) (Harlin et al., 2006).

A compatibilidade tribológica é outro fator importante no desgaste de ferramentas de conformação. O termo compatibilidade tribológica é apresentado por (Hutchings e Shipway, 2017), sendo associado à compatibilidade química das superfícies em contato. Quanto menor a compatibilidade química dos materiais que constituem as superfícies em contato, maior será a sua compatibilidade tribológica, ou seja, menor será a tendência de adesão entre esses materiais e menor a ocorrência de galling.

Entender como uma terceira interface, na superfície do filme (tribocamada) influencia no coeficiente de atrito é muito importante para entender o comportamento de desgaste do material. A tribocamada pode se apresentar de maneira benéfica ou prejudicial à taxa de desgaste. Geralmente, os óxidos, gases adsorvidos e contaminantes fazem com que ocorra a diminuição da força de atrito. Estes filmes se localizam na interface evitando muitas vezes o contato metal/metal visto que o atrito entre óxido/superfície é quase sempre menor (Bowden et al., 2001). O grau de redução do coeficiente de atrito depende da morfologia, da espessura e da composição química da tribocamada formada (Schey, 1984).

Gassner et al. (2004) apresentaram um estudo com revestimento de vanádio e nitrogênio preparados por pulverização catódica. A caracterização do revestimento VN ofereceu fases promissoras que melhoraram as propriedades tribológicas de revestimentos duros comuns, devido à sua capacidade de formar óxidos lubrificantes, a temperaturas elevadas. O ensaio tribológico utilizado foi o pino sobre disco, deslizados sobre alumina e aço inox austenítico. Verificou-se que o coeficiente de atrito diminuiu continuamente para temperaturas acima de 400 °C, atingindo um valor aproximado de 0,25 a 700 °C devido à formação e fusão de V_2O_5 , chamada de fase Magnéli, de baixo ponto de fusão, o que leva a uma lubrificação líquida.

Franz e Mitterer (2013) fornecem em seu estudo uma visão geral sobre pesquisas realizadas com revestimentos duros de nitretos contendo vanádio. Os revestimentos têm como objetivo reduzir o atrito a alta temperatura por meio da auto-adaptação do revestimento, enquanto ainda proporcionam um alto nível de resistência ao desgaste. O efeito lubrificante baseia-se na formação de óxidos de vanádio com planos fracamente ligados e baixa temperatura de fusão. No entanto, a oxidação rápida de VN que ocorre a temperaturas elevadas é benéfica para proporcionar efeitos lubrificantes, mas deteriora a resistência ao desgaste.

Hsieh *et al.* (2006) adicionaram alguns elementos químicos (Cr, Al, Si, C) em revestimentos de TiN, por este não apresentar sozinho resistência a oxidação e dureza suficientemente altas. Ensaio de deslizamento tipo pino-sobre disco foram utilizados para avaliar a resistência ao desgaste dos revestimentos utilizando uma esfera de alumina como contra-corpo. Dois revestimentos contendo carbono (TiCN e TiCNO) apresentaram baixos coeficientes de atrito e taxas de desgaste, enquanto os demais revestimentos estudados (TiAlN, AlTiN, and TiSiN) apresentaram coeficientes de atrito e desgaste relativamente altos. Ensaio auxiliares de oxidação estática em diferentes temperaturas foram utilizados para entender a formação de óxidos nestes revestimentos, os quais foram analisados por microscopia Raman. Os revestimentos à base de carbono mostraram maior tendência à formação de óxido de titânio. O revestimento de TiAlN apresentou elevada resistência à

oxidação. Já os revestimentos AlTiN e TiSiN formaram outros óxidos (óxido de alumínio ou óxido de silício). Portanto, a formação de TiO_2 (fenômeno bastante plausível por reações triboquímicas no contato) aparentemente contribui para a melhora do desempenho tribológico dos revestimentos TiCN e TiCNO, apesar de este aspecto não ter sido discutido pelos autores.

Carlsson e Olsson (2006) utilizaram ensaios de deslizamento tipo pino-sobre disco para estudar o comportamento tribológico de revestimentos CrN e DLC com potencial de utilização na indústria de conformação a frio, depositados por PVD, ensaiados contra chapas de Al-Zn. Os autores observaram que a morfologia da superfície dos revestimentos influenciou fortemente o desempenho tribológico dos revestimentos e os revestimentos de CrN mostraram pior desempenho baixo, com altos valores de atrito, devido a uma alta tendência à transferência de material, enquanto os revestimentos de DLC tiveram um bom desempenho. De forma semelhante, Birol (2013) comparou o desempenho tribológico dos revestimentos de CrN e AlCrN na condição de deslizamento com alumínio. O autor atribuiu o pior desempenho do revestimento CrN à sua menor dureza e maior interação química entre CrN e Al. A baixa dureza resulta em uma baixa capacidade de carga, aumenta a tendência de adesão e subsequente deterioração do revestimento frágil. O revestimento AlCrN, devido à sua estrutura de multicamadas e uma dureza muito maior e menor compatibilidade com o alumínio, apresentou um desempenho superior ao CrN em termos de atrito, resistência à transferência de material e danos por desgaste.

Dentre os vários processos de PVD disponíveis, os filmes finos podem ser depositados com maior ou menor energia de deposição. A partir desta energia de deposição, a estrutura e conseqüentemente as propriedades dos filmes depositados podem ser diretamente influenciadas. Uma das maiores desvantagens de uma estrutura do revestimento inadequada é a formação de macropartículas acopladas cuja presença deteriora as propriedades tribológicas e a capacidade de proteção contra corrosão dos revestimentos.

Lugscheider *et al.* (1996) compararam três diferentes processos de deposição de PVD: pulverização catódica, magnetron sputtering e evaporação por feixe de elétrons; com objetivo de examinar os parâmetros que são os principais responsáveis pelas diferentes microestruturas formadas. Os autores relacionaram os processos de PVD à estrutura de filme produzida sob condições diferentes de temperatura e energias de deposição. A Figura 12 mostra as microestruturas observadas. Cada figura compara as microestruturas resultantes da evaporação por feixe de elétrons A Figura 12 (a), por magnetron sputtering A Figura 12 (b), e por pulverização catódica A Figura 12 (c), diretamente com relação às diferentes temperaturas de deposição: 250 e 330° C. Nas imagens de MEV, pode-se observar que, com o aumento da temperatura para cada processo de PVD, a microestrutura dos filmes finos tende à formação de estrutura colunar para uma estrutura mais "densa e uniforme" (efeitos de recristalização). Em temperaturas mais baixas, gotículas embutidas levam a defeitos na uniformidade do filme e crescimento de estrutura colunar de cristalitos, como pode ser visto principalmente na A Figura 12 (c). Com o aumento da temperatura e da energia de deposição, este crescimento preferencial é suprimido e a superfície torna-se mais suave. A comparação dos diferentes processos de PVD para cada nível de temperatura mostra uma densificação de filmes finos com aumento da energia de condensação e da temperatura. Enquanto os revestimentos evaporados por feixes de elétrons têm estruturas geralmente colunares, os revestimentos por pulverização catódica e magnetron sputtering mostram uma microestrutura mais fibrosa e densa.

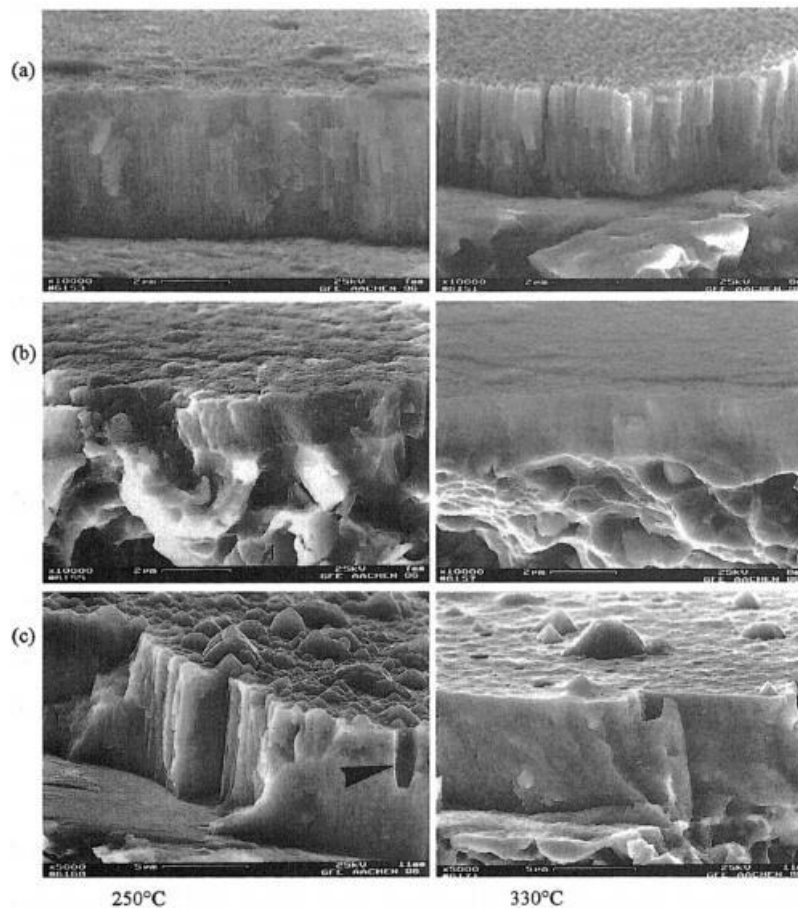


Figura 12 - Microestrutura de revestimentos depositados a temperaturas de 250 e 330°C: (a) evaporação por feixe de elétrons (b) sputtering, (c) evaporação arco Arc-PVD (Lugscheider et al., 1996).

Azar *et al.* (2018) realizaram tentativas de deposição de revestimentos PVD por evaporação por arco catódico (CA-PVD) de revestimentos de TiAlN com corrente pulsada de alta tensão para ajuste de suas propriedades estruturais e não obtiveram sucesso. Os revestimentos resultantes tinham uma superfície inaceitavelmente rugosa, com um grande número de macropartículas (MPs) conforme apresentado na Figura 13.

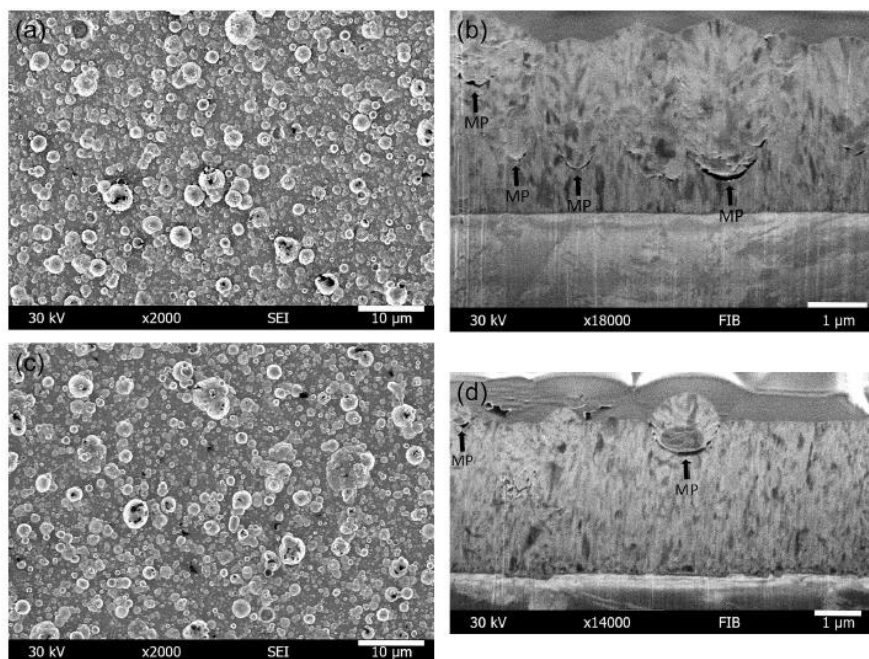


Figura 13 - Micrografia da secção transversal das superfícies com revestimento depositado usando apenas alta voltagem de pulso polarizada. Imagens obtidas por elétrons secundários via MEV. Fonte:(Azar et al., 2018)

Para resolver este problema e beneficiar-se dos efeitos favoráveis da corrente pulsada de alta tensão para ajustar as propriedades microestruturais dos revestimentos, sobrepôs-se de polarização de correntes contínua de alta tensão constantemente aplicada durante o revestimento. De acordo com os resultados obtidos, este modo de aplicação não só produziu revestimentos com uma estrutura colunar mais densa e mais fina, mas também resultou numa redução substancial no número de MPs. A temperatura do substrato também aumentou com o aumento da magnitude do pulso, mas não aumentou acima de 460 °C. Como resultado, obteve a diminuição das macropartículas MP e estrutura mais densa dos revestimentos, conforme apresentado na Figura 14. Este efeito tornou-se mais pronunciado com o aumento da magnitude da tensão sobreposta.

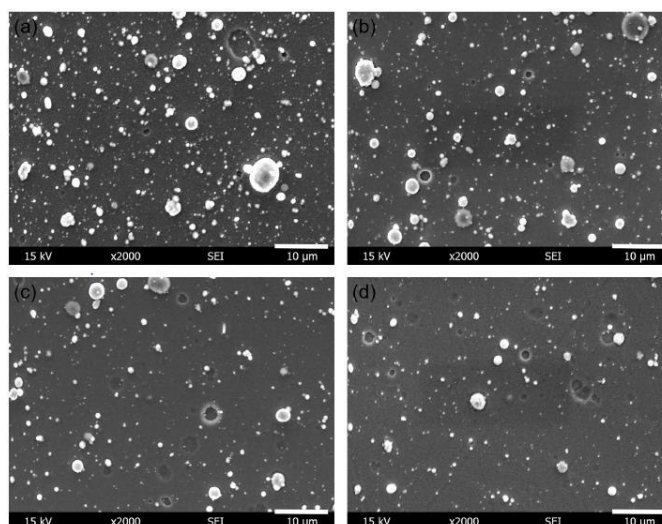


Figura 14- Imagens via MEV por elétrons secundários das amostras revestidas com a técnica utilizada por Azar et al. (2018).

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este trabalho foi realizado em parceria com a Bruning Tecnometal Ltda, tendo como objetivo correlacionar o desenvolvimento do atrito com os mecanismos de desgaste e a avaliação da topografia na vida útil de combinações de ferramentas apresentando diferentes substratos e revestimentos comerciais, a fim de estimar a melhor combinação de substrato/condição superficial, além de auxiliar na compreensão dos mecanismos de desgaste em ferramentas de conformação.

A Figura 15 apresenta um fluxograma da sequência de procedimentos realizados no desenvolvimento do trabalho. Primeiramente foi realizada a caracterização topográfica e morfológica para identificar as condições iniciais das amostras e a composição química dos revestimentos comerciais selecionados para estudo. Na sequência, foram realizados os ensaios tribológicos de estiramento em um equipamento desenvolvido pelo setor de pesquisa da Bruning Tecnometal. Por fim, para correlacionar os resultados obtidos nos ensaios tribológicos, foi novamente realizada a caracterização topográfica e morfológica das superfícies de estudo.

Para o presente trabalho foram utilizados oito diferentes materiais para ferramenta, sendo que estas foram divididas em subgrupos de acordo com o processo de fabricação: sinterizados, laminados, fundidos e refundidos. Para cada ferramenta ainda foram determinadas quatro condições superficiais diferentes: Sem Revestimento, Revestimento 1, Revestimento 2 e Revestimento 3. No total, obteve-se uma quantidade de 32 combinações de ferramenta e condição superficial para análise. Para cada amostra/combinação a caracterização ocorreu na condição inicial, intermediária e final de ensaio.

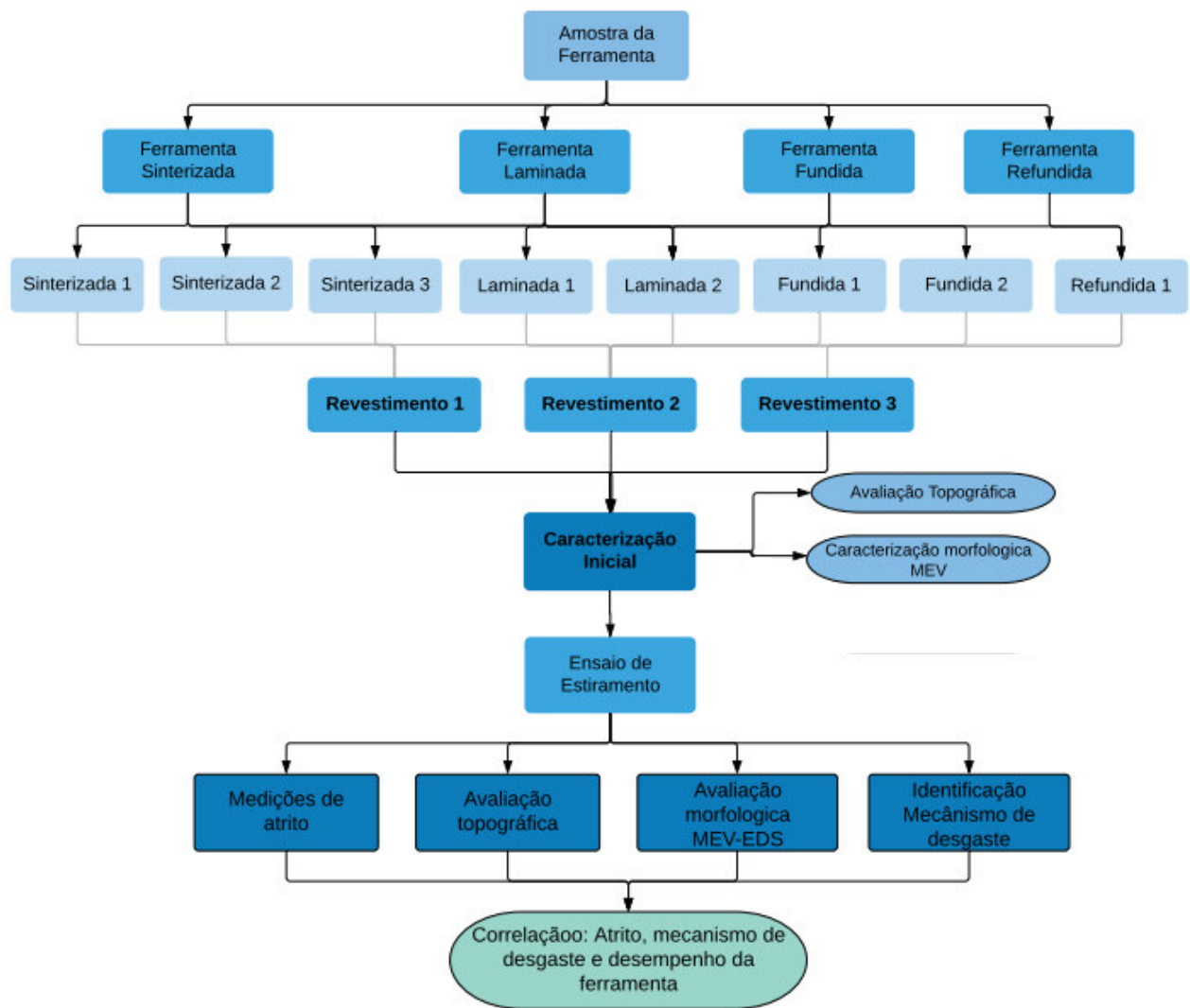


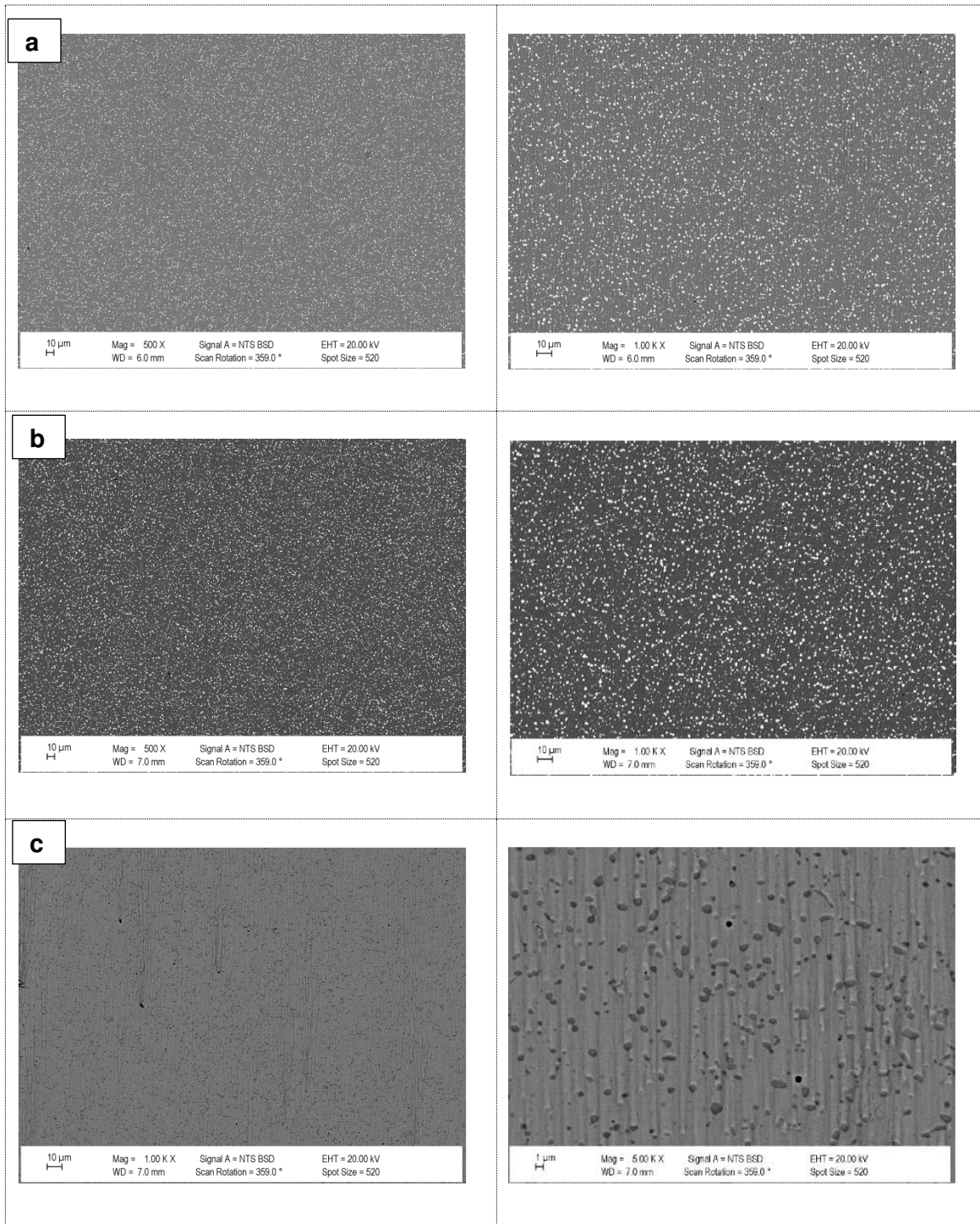
Figura 15 - Fluxograma dos procedimentos experimentais.

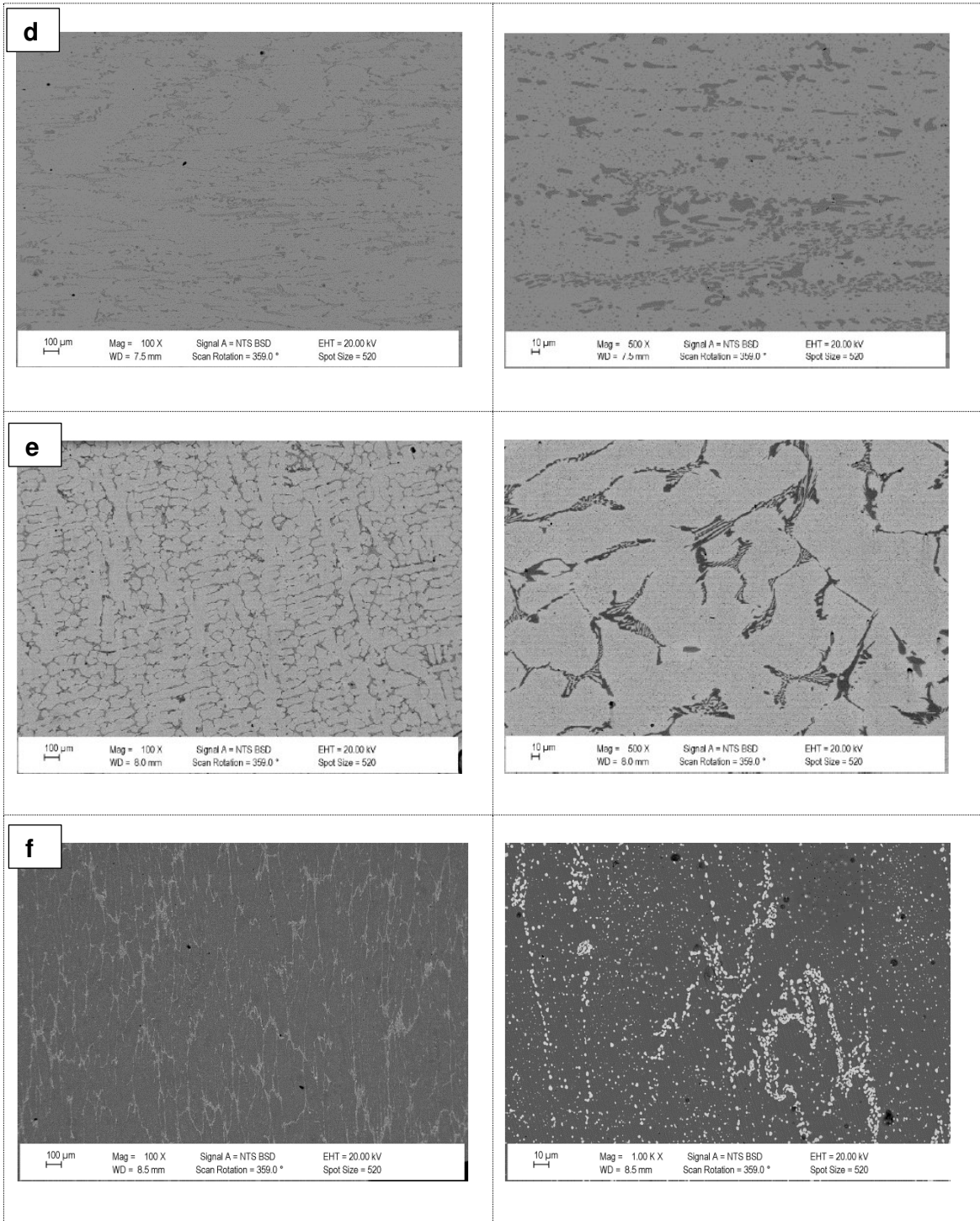
A composição química e o processo de fabricação dos materiais utilizados como substratos foi inicialmente disponibilizada pela empresa Bruning Tecnometal, conforme apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química dos aços ferramentas sinterizados, laminados, fundidos e refundidos conforme informações disponibilizadas pela Bruning Tecnometal.

Composição Química								
Substrato	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co
Aço sinterizado 1	1,64	0,60	0,30	4,80	2,00	10,40	4,80	8,00
Aço sinterizado 2	1,29	0,60	0,30	4,20	5,00	6,30	3,00	-
Aço Sinterizado 3	1,40	0,40	0,40	4,70	3,50	-	3,70	-
Aço Laminado 1	0,85	0,90	0,40	8,00	2,00	-	0,50	-
Aço Laminado 2	1,50	0,30	-	12,00	0,95	-	0,90	-
Aço Fundido 1	1,50	0,30	0,40	12,00	0,95	-	0,90	-
Aço Fundido 2	0,89	-	-	4,20	4,90	6,20	1,80	-
Aço Refundido	0,70	0,20	0,50	5,00	2,30	-	0,50	-

Foram ainda fornecidas pela empresa Bruning imagens via microscopia eletrônica de varredura (MEV) relativa às microestruturas (sem ataque químico) dos materiais das diferentes ferramentas utilizados neste trabalho, as quais evidenciaram detalhes da morfologia e distribuição dos precipitados ao longo da matriz dos aços ferramenta, conforme mostrado na Figura 16. Os aços sinterizados (Figura 16 a, b e c) apresentaram uma fina distribuição de precipitados. Os aços laminados apresentaram textura típica de deformação (Figura 16. d). Os aços fundidos apresentaram estrutura dendrítica (Figura 16 e, f), enquanto que o aço refundido mostrou significativo refino da microestrutura.





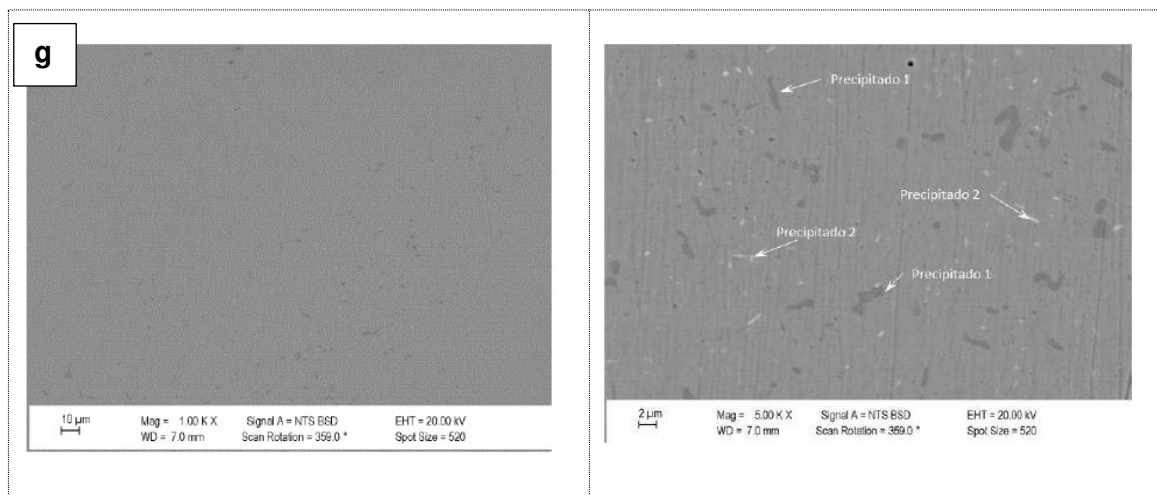


Figura 16- Morfologia inicial das amostras de ferramentas via MEV, imagens obtidas por elétrons retroespalhados.

Ilustrada na Figura 2, a geometria da ferramenta tem o objetivo de representar a superfície de uma ferramenta de estampagem no ensaio de atrito. O contato entre a ferramenta e a peça ocorre ao longo de três insertos de áreas distintas sendo elas identificadas como A1, A2 e A3.

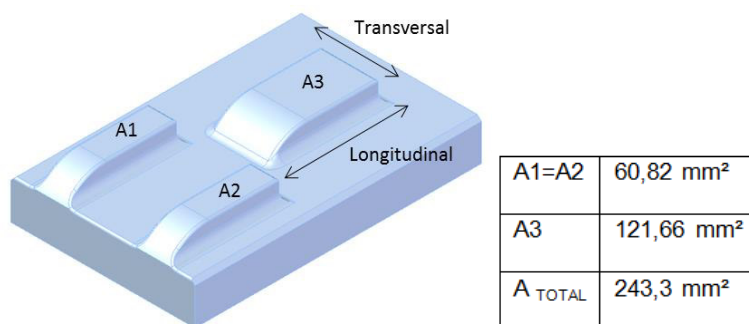


Figura 17 - Corpo de prova da ferramenta.

As amostras foram revestidas por três revestimentos comerciais distintos. Os revestimentos foram depositados comercialmente pelo processo PVD (Deposição Física de Vapor) e neste trabalho são identificados como: Revestimento 1, Revestimento 2 e Revestimento 3.

As chapas deslizadas contra as ferramentas foram retirados de bobina laminada a frio NBR 5915 na condição superficial decapada e oleada com espessura de 1,20 mm. A superfície dos corpos de prova antes do ensaio de

atrato foi submetida a limpeza com pano de algodão e acetona com a finalidade de remover contaminantes. As dimensões dos corpos de prova da chapa são demonstradas na Figura 3 (dimensões em milímetros). Foram aplicadas três gotas de lubrificante comercial e espalhadas uniforme nas chapas antes do início dos ensaios

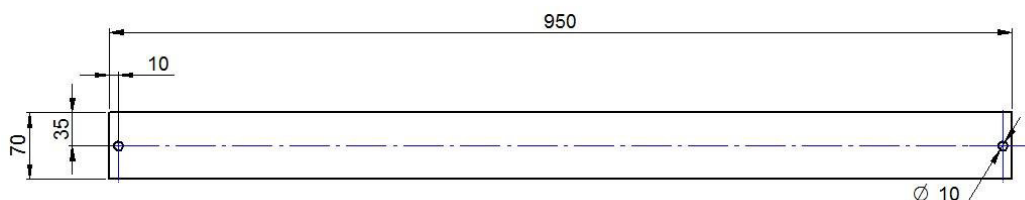


Figura 18 - Representação das chapas estiradas.

Os ensaios tribológicos foram avaliados sob condições de deslizamento, utilizando o equipamento desenvolvido no setor de P&D da Bruning Tecnometal Ltda. O equipamento de ensaios consiste em uma estrutura na qual está presente um cilindro hidráulico acoplado à um cabeçote móvel onde é posicionada a amostra da ferramenta com os insertos apresentados na Figura 17 posicionados para baixo. O cabeçote móvel está sobreposto à uma mesa com fuso, onde é posicionada e presa a chapa que irá deslizar contra o corpo de prova da ferramenta, durante o ensaio o contato das superfícies ocorre entre os três insertos e a chapa. O ensaio consiste na aplicação de uma força normal pelo cilindro hidráulico no cabeçote móvel durante a execução do movimento linear da mesa à qual está presa a chapa, dessa forma movimentando a chapa contra a amostra da ferramenta. A força de reação contrária a este movimento corresponde às forças tangenciais. A Figura 19 ilustra os principais componentes da máquina para ensaios de estiramento e uma esquematização do movimento relativo entre amostra e chapa.

A força normal foi ajustada para 5000 kgf e a velocidade constante de deslizamento foi de 100 mm/s. Todos os testes foram realizados em temperatura ambiente.

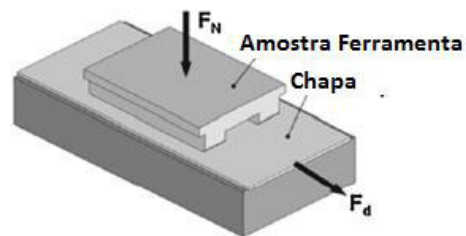


Figura 19 - Máquina para ensaios de estiramento à esquerda. À direita um esquema representativo do movimento relativo da amostra e a chapa durante ensaio (De Souza e Liewald (2010)).

As medições das forças normais e de atrito são realizadas através de sensores resistivos montados no cabeçote móvel conforme Figura 20 e Figura 21. A força tangencial (atrito), a força normal e o deslocamento da mesa foram registrados durante os ensaios à uma taxa de aquisição de 1000 Hz. Os valores de coeficientes de atrito foram calculados a partir da razão dos valores obtidos da aquisição da força tangencial pelos valores da aquisição da força normal.

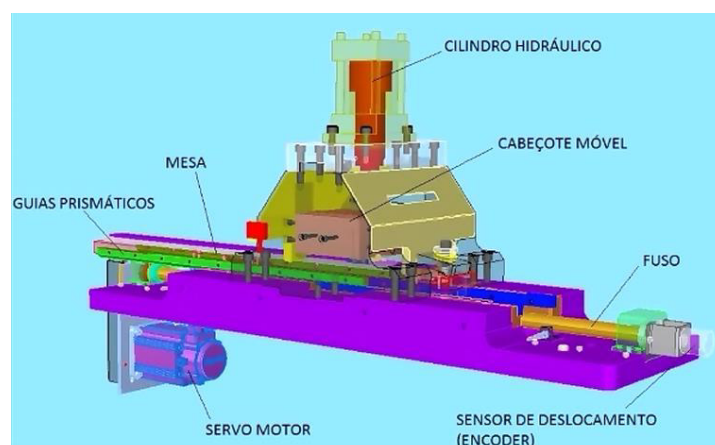


Figura 20 – Esquema de funcionamento da máquina para ensaios de estiramento.

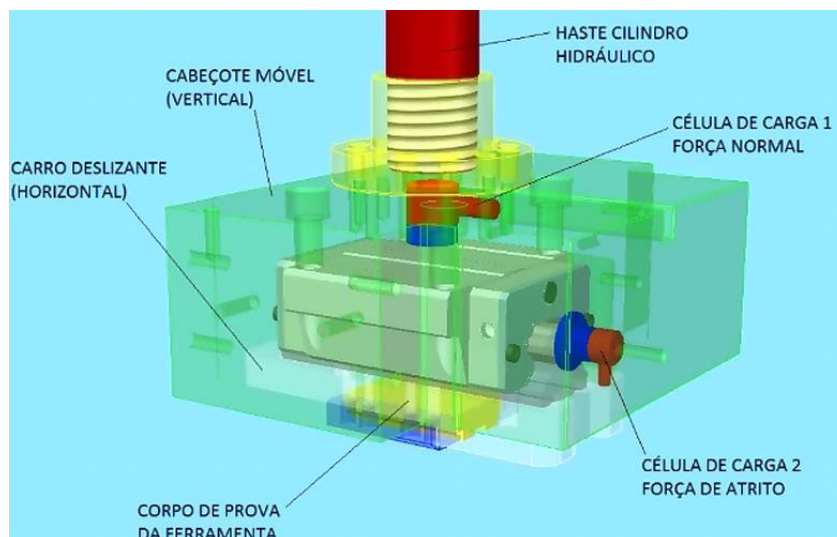


Figura 21 – Esquema do cabeçote móvel e sistema de aquisição.

Para todas as combinações de ferramenta e condição superficial foram realizados dois ensaios de tribológico de estiramento, denominados como condição final e condição intermediária. Foi determinado como critério de condição final de ensaio o deslizamento de 25 chapas ou o travamento do ensaio. A quantidade de chapas deslizadas definida como critério de condição final foi previamente selecionada pela empresa Bruning Tecnometal. Após a determinação da condição final foi realizado um ensaio definido como intermediário, correspondendo ao deslizamento da metade do número de chapas da condição final, a fim de melhor entender a evolução dos fenômenos tribológicos envolvidos.

As superfícies das ferramentas iniciais e as superfícies após os ensaios de atrito foram quantificadas através de caracterização topográfica por interferometria ótica utilizando-se um equipamento da marca Bruker, modelo Contour GT. Para as medições foi selecionada primeiramente uma área de medição de 1259,4 x 944,6 μm . Para cada amostra foram realizadas 3 medições, uma em cada inserto da amostra. Após a realização das medições foi utilizado o software Vision64 para análise e tratamento das imagens. Para quantificar a topografia das superfícies, foram utilizados parâmetros de superfície topográficos tridimensionais. Estes parâmetros são definidos a partir do plano médio da superfície e calculados através do nivelamento usando o

método dos mínimos quadrados.

Para a caracterização topográfica das amostras para a condição inicial, intermediária e final foram selecionados os parâmetros Sq, Sz, Sbi e Sm, Sku e Ssk. O Sq representa a rugosidade quadrática média e é o valor RMS das alturas, em relação ao plano médio da superfície. Sz é definido como o valor médio das alturas absolutas dos cinco picos mais altos e as profundidades dos cinco poços ou vales mais profundos dentro da área de amostragem. Sbi é um parâmetro funcional que representa a capacidade de apoio (suporte mecânico). Sm é um parâmetro volumétrico que também fornece uma indicação sobre a capacidade de apoio da superfície, quantificando o volume de material acima do plano médio.

Outra maneira de caracterizar a superfície é a análise simultânea dos parâmetros Ssk e Sku, denominada de espaço morfológico. O parâmetro Ssk permite determinar se as superfícies apresentam a predominância de picos ($Ssk > 0$) ou de vales ($Ssk < 0$). O parâmetro Sku está associado à agudez ou achatamento da curva de distribuição normal das alturas das irregularidades. As superfícies com valores de $Ssk < 3$ apresentam irregularidades que destoam significativamente do valor médio (Sq), valores de $Sku = 3$ correspondem aquelas superfícies em que as irregularidades seguem a curva de distribuição gaussiana e para valores de $Ssk > 3$ as irregularidades apresentam mais ocorrências centradas no valor médio Sq. A análise foi realizada a partir da plotagem os valores de Ssk nos eixos das abscissas e Sku no eixo das ordenadas, dentro deste plano, cada perfil típico da superfície desgastada pode ser identificado, bem como possíveis evoluções da superfície com consequentes alterações de topografias decorrentes do ensaio.

Além da caracterização topográfica, foi realizada a caracterização visual e composicional obtida por MEV/EDS. As superfícies das ferramentas, antes e após os ensaios de estiramento, foram submetidas a um exame cuidadoso utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) para investigar a morfologia inicial das superfícies das ferramentas. Para a realização das análises foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura, Jeol®, JSM - 6610LV, com microsonda

de EDS, o equipamento descrito, pertence ao Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL) localizado na Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

Primeiramente foi realizado o processo de limpeza com etanol durante cinco minutos em uma cuba ultrassônica. Os parâmetros de tensão de aceleração dos elétrons variaram entre 15 kV e 20 kV, em seguida foi utilizado o detector de elétrons retroespalhados para um melhor contraste de composição química para encontrar as regiões de desgaste do maior inserto da ferramenta em um aumento de 50x. Encontrada as trilhas de desgaste características, foi selecionado os modo de formação de imagens por elétrons secundários e elétrons retroespalhados em imagens com aumentos de 50x, 150x e 800x. O contraste na imagem obtida por elétrons secundário apresenta características da topografia da superfície, apresentando as regiões mais claras em um plano superior as regiões mais escuras. O contraste na imagem obtida por elétrons retroespalhados ocorre em função do número atômico dos elementos presentes na amostra, dessa forma as regiões mais claras apresentam regiões com elementos com maior peso atômico. Para uma análise semiquantitativa via EDS dos elementos química presentes na imagem obtida por elétrons retroespalhados, foram selecionadas regiões de interesse que apresentavam contrastes de composição química.

A Figura 22 apresenta um exemplo de imagem obtida por elétrons secundário à esquerda e a mesma região à direita obtida por elétrons retroespalhados. É possível observar que existe uma região mais clara na imagem por elétrons secundários indicando a existência de uma quantidade de material em um plano superior às demais regiões, já a imagem por elétrons retroespalhados nos permite observar que essa mesma região apresenta uma composição química diferente, com elementos de maior peso atômico por apresentar uma tonalidade mais clara. A partir da imagem de elétrons retroespalhado foram selecionadas as regiões de interesse para a análise semiquantitativa dos elementos químicos presentes na amostra via EDS.

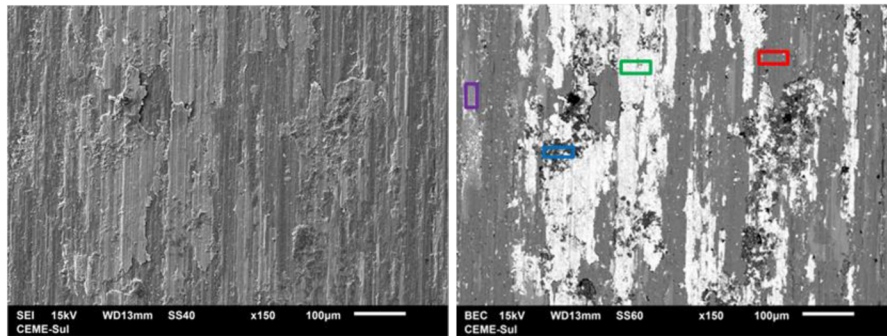


Figura 22 – Exemplo de imagem obtida via microscópio eletrônico de varredura. À esquerda imagem obtida por elétrons secundário e à direita imagem obtida por elétrons retroespalhados destacando as regiões de interesse analisada via EDS.

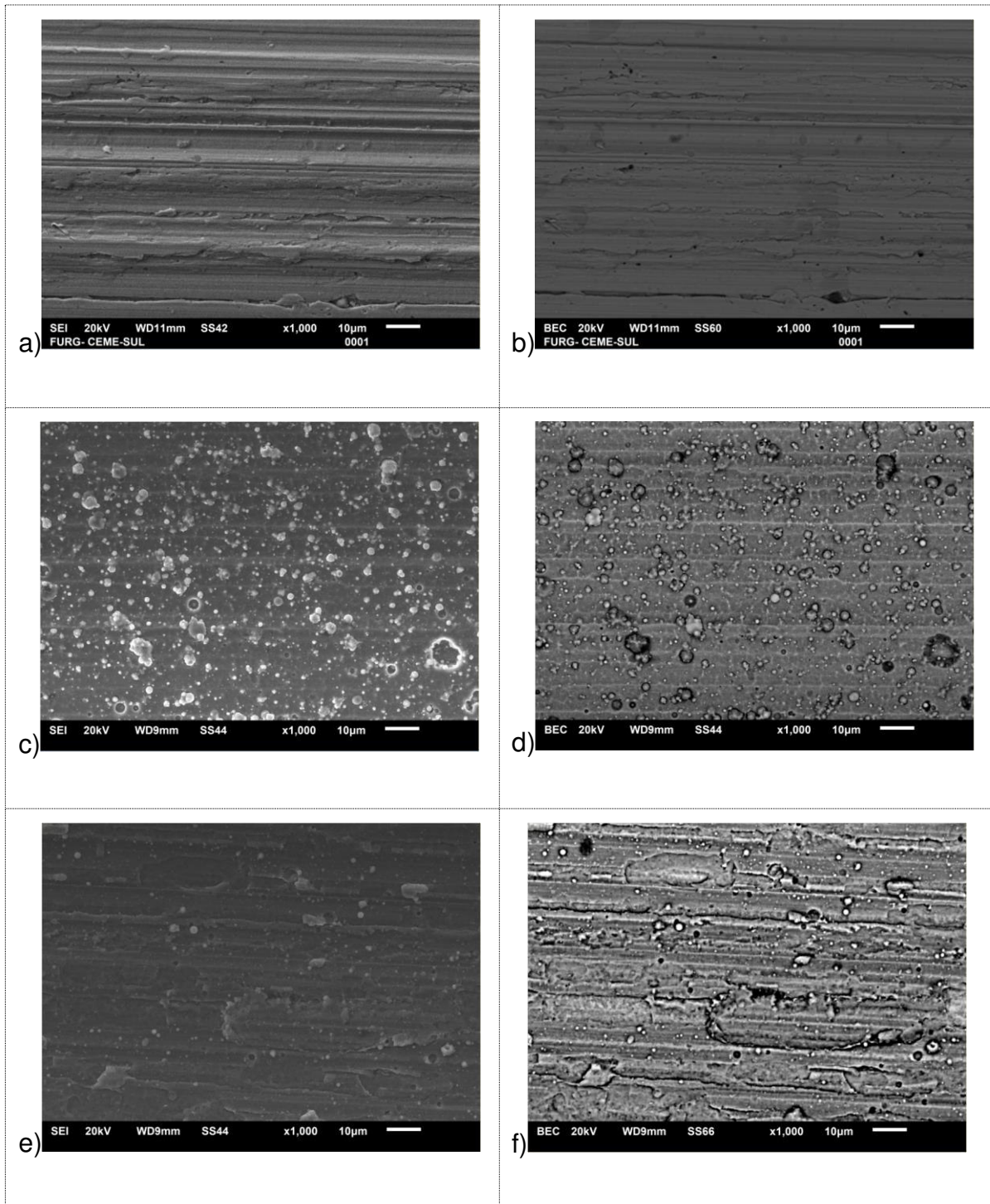
Com essas análises objetivou-se identificar parâmetros topográficos e características da tribocamada formada durante os ensaios de estiramento que possam ser correlacionados aos valores de coeficiente de atrito medidos, de forma a identificar padrões característicos que possam comprometer o comportamento tribológico antes que severa adesão na ferramenta ocasiona o travamento ou engripamento do ensaio. A partir das análises propostas para este trabalho pretendeu-se estabelecer uma método de correlação entre atrito, condições superficiais e dano superficial da ferramenta.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização inicial das amostras

O trabalho iniciou-se com a caracterização inicial dos corpos de prova da ferramenta via MEV, EDS e interferometria. De forma qualitativa as análises realizadas por MEV e EDS permitiram avaliar a qualidade e a composição química dos revestimentos. A análise via interferometria permitiu quantificar a diferença entre as topografias iniciais das amostras.

A Figura 23 apresenta as morfologias das superfícies dos revestimentos antes dos ensaios tribológicos obtidas via MEV por elétrons secundários (SE, (imagens à esquerda) e por elétrons retroespalhados (BSE, imagens à direita). Observa-se que os revestimentos apresentaram um acabamento superficial diferente. A condição sem revestimento (Figura 23.a, b) apresenta as marcas de usinagem prévia bem definidas. Para o revestimento 1 (Figura 23.c, d) observa-se uma superfície bastante irregular, mais rugosa comparada aos revestimentos 2 e 3. O revestimento 1 apresenta características do crescimento de uma estrutura colunar, provavelmente oriunda de gotículas embutidas que levam a esses defeitos na uniformidade do filme. A literatura normalmente associa um pior acabamento superficial do revestimento a piores desempenhos tribológicos, conforme observado nos trabalhos de (Lugscheider *et al.*, 1996; Azar *et al.*, 2018). Para o revestimento 2 (Figura 23. e, f), observa-se uma superfície mais lisa e uniforme, apesar de ainda serem vistos alguns glóbulos na superfície. O revestimento 3 (Figura 23g, h) apresentou uma superfície que parece acompanhar as marcas de usinagem prévias na superfície. Assim, aparentemente para os revestimentos 2 e 3, tem-se a formação de um filme com estrutura mais densa e uniforme. Topografias semelhantes às apresentadas para cada revestimento foram observadas independente do material de base da ferramenta.



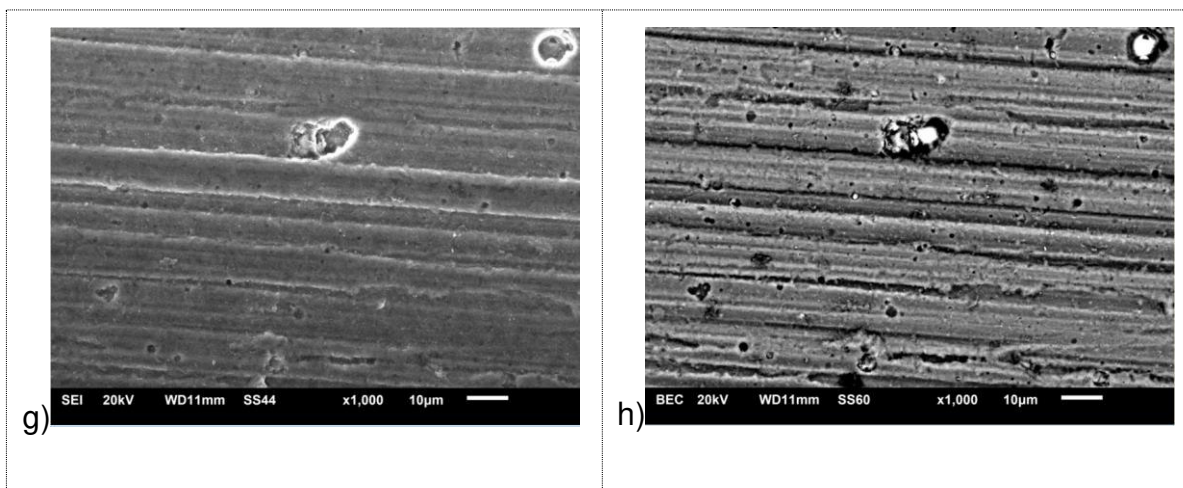
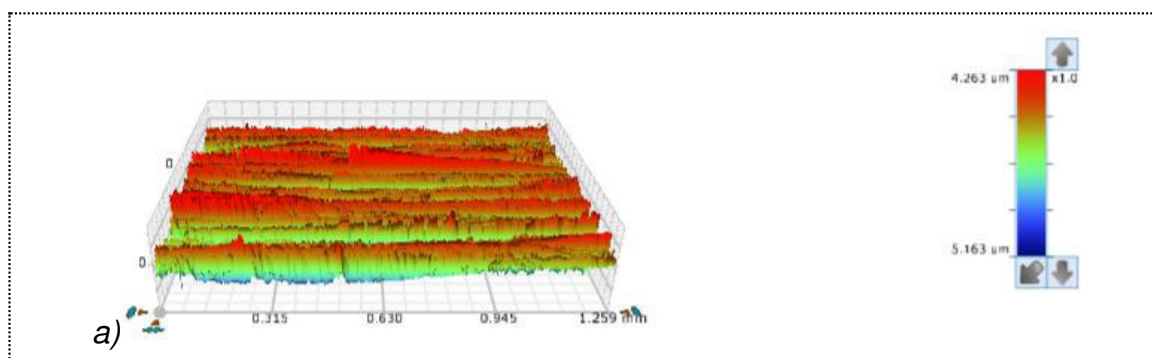


Figura 23- Imagens por MEV obtidas da morfologia superficial inicial dos corpos de prova, à esquerda imagem por elétrons secundário e à direita por elétrons retroespalhados. a) e b) Sem revestimento; c) e d) revestimento 1; e) e f) revestimento 2; g) e h) revestimento 3.

A caracterização topográfica das superfícies dos revestimentos foi realizada via interferometria 3D antes do ensaio de deslizamento, sendo que os mapas topográficos são apresentados na Figura 23. Estes mapas confirmam as características superficiais observadas pelas imagens via MEV. A condição sem revestimento apresenta claramente as marcas de usinagem prévia. O revestimento 1 apresenta uma superfície mais rugosa com pequenas protuberâncias características do crescimento colunar. Os revestimentos 2 e 3 não apresentam estrutura globular, mas acompanham melhor a topografia prévia da amostra antes do recobrimento.



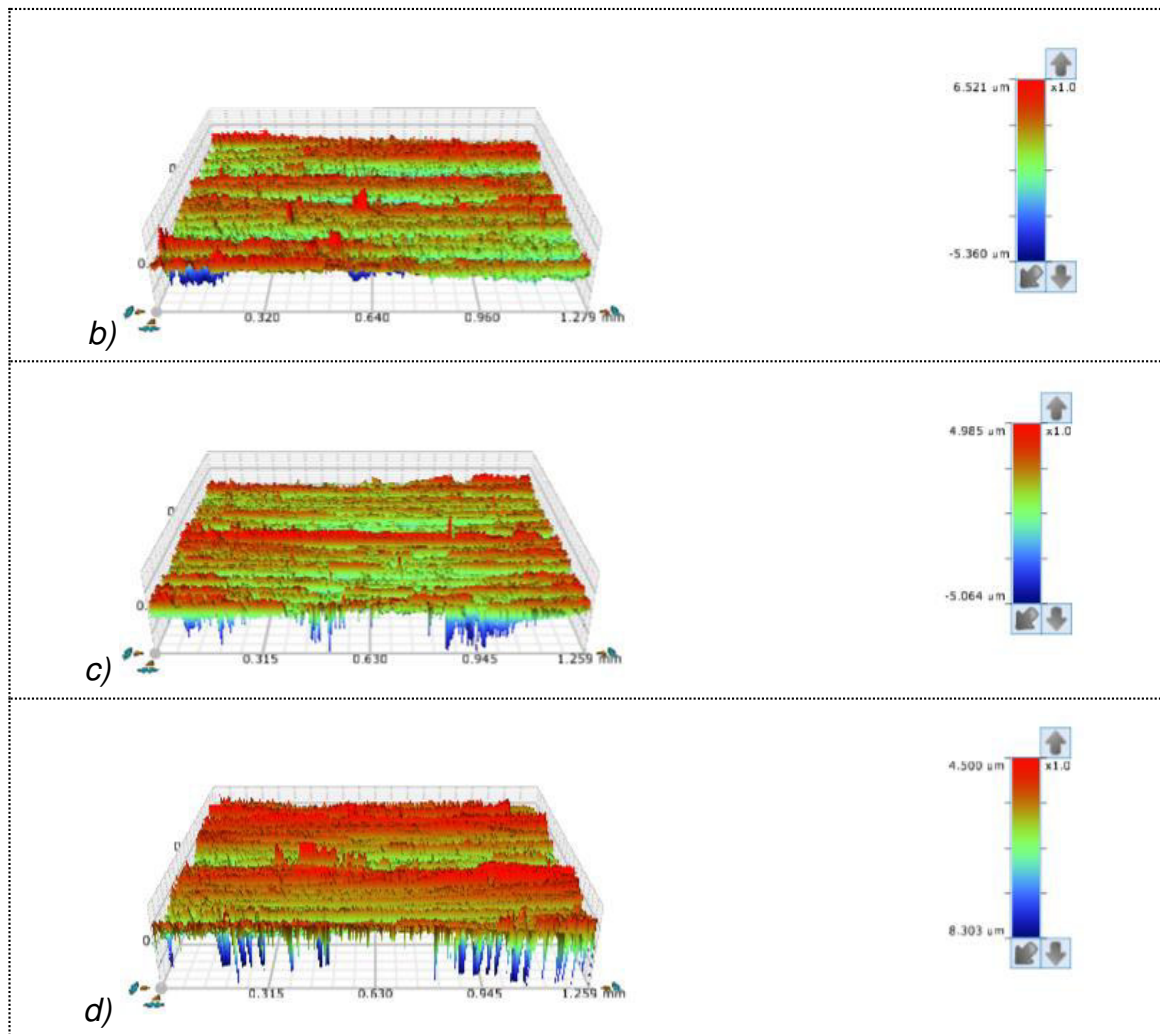


Figura 24 – Mapas topográficos 3D evidenciando morfologia superficial inicial das ferramentas: a) Sem revestimento; b) revestimento 1; c) revestimento 2; d) revestimento 3.

Para quantificar a topografia superficial das ferramentas antes dos ensaios, a Figura 25 compara os valores do parâmetro S_q em função do tipo de substrato (sinterizado, laminado, fundido ou refundido) e em função do revestimento (sem revestimento, revestimento 1, revestimento 2 e revestimento 3). É possível observar uma tendência de maior rugosidade para o revestimento 1 em relação aos demais revestimentos. Estes resultados reforçam a hipótese de formação de uma estrutura colunar do revestimento, a qual influenciou diretamente na rugosidade da amostra. Observa-se ainda que os substratos fundidos e refundidos tendem a resultar em rugosidade pós-revestimento ligeiramente maior, em particular para o revestimento 1.

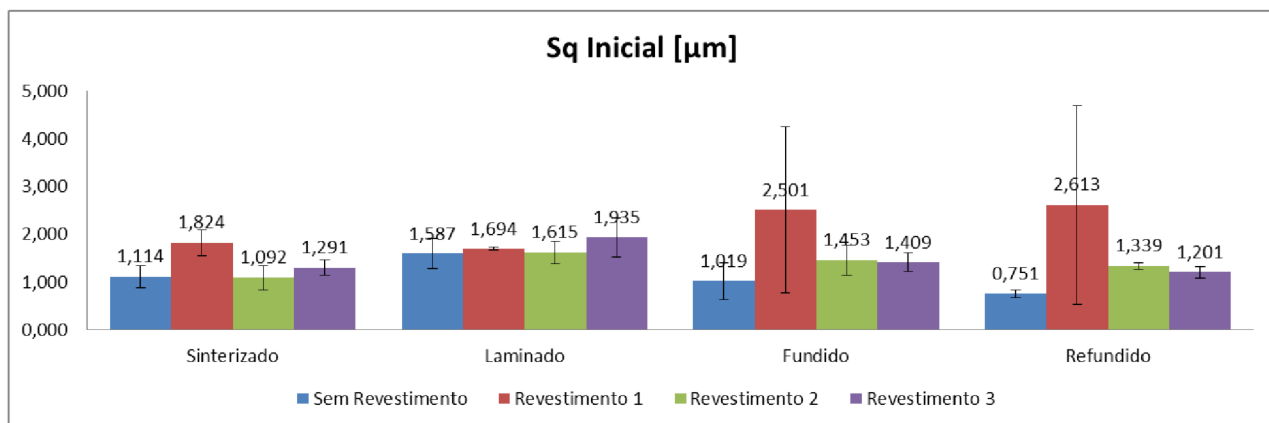


Figura 25. Valores iniciais de Sq das ferramentas por grupos de substratos.

A Tabela 3 apresenta de forma qualitativa os resultados obtidos via EDS da composição química dos revestimentos. Estes resultados sugerem que o revestimento 1 é composto por VN e o revestimento 3 é composto por TiAlN. A partir das imagens via MEV apresentadas na Figura 26, observa-se que o revestimento 2 apresenta indícios de um revestimento multicamadas. Para exemplificar esses indícios é apresentada a imagem por elétrons secundários Figura 26 (esquerda), que mostra uma falta de cobertura do revestimento em algumas áreas específicas, sendo que a imagem por elétrons retroespalhados sugere uma composição química diferente Figura 26 (direita). A partir dessas observações, pode-se inferir que se trata de um revestimento multicamadas, composto por CrN (Camada intermediária) sobreposta por uma camada de TiN (Camada superficial).

Tabela 3- Composição química dos revestimentos via EDS

Amostra	% C	% N	% V	% Ti	% Cr	% Al
Revestimento 1	-	12 - 14	86 - 88	-	-	-
Revestimento 2 (1)	5-7	7 - 9	-	82 - 88	0 -3	
Revestimento 2 (2)	-	15 -18		5-15	60-80	
Revestimento 3	-	15 - 18	-	55-70	-	22-25

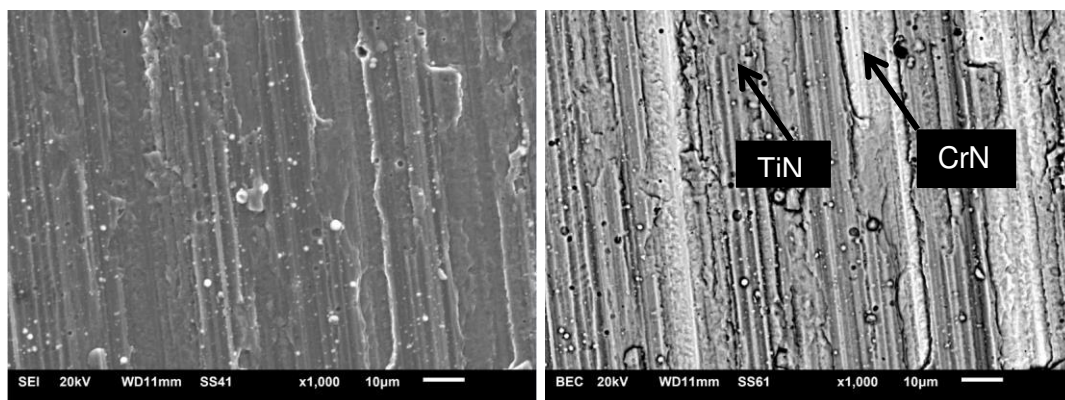


Figura 26 - Imagens do revestimento 2 via MEV obtidas por elétrons secundário à esquerda e por elétrons retroespalhados à direita.

Resumindo, a análise comparativa do desempenho dos revestimentos será realizada com três revestimentos de composição química diferentes, sendo um deles multicamadas. A princípio, apenas um revestimento apresenta uma diferença significativa na topografia inicial. Após a caracterização inicial, iniciaram-se os ensaios propostos para avaliação do desempenho tribológico das amostras.

5.2. Ensaios tribológicos

A Tabela 4 apresenta a quantidade média de chapas deslizadas para cada combinação de material de ferramenta e revestimento até a sua condição final. Observa-se que a para condição sem revestimento somente conseguiu-se ensaiar uma chapa, pois durante o estiramento da primeira ocorreu travamento, evidenciando a necessidade crucial do uso de revestimentos em ferramentas de conformação a frio. Para o Revestimento 3, para dois grupos de material de ferramenta (amostras de aço sinterizado e laminado) houve travamento antes da condição final de 25 chapas, ao passo que para os substratos fundido e refundido foi possível atingir a condição de 25 chapas estiradas. Para os revestimentos 1 e 2, todos os ensaios atingiram o critério de condição final de 25 chapas ensaiadas.

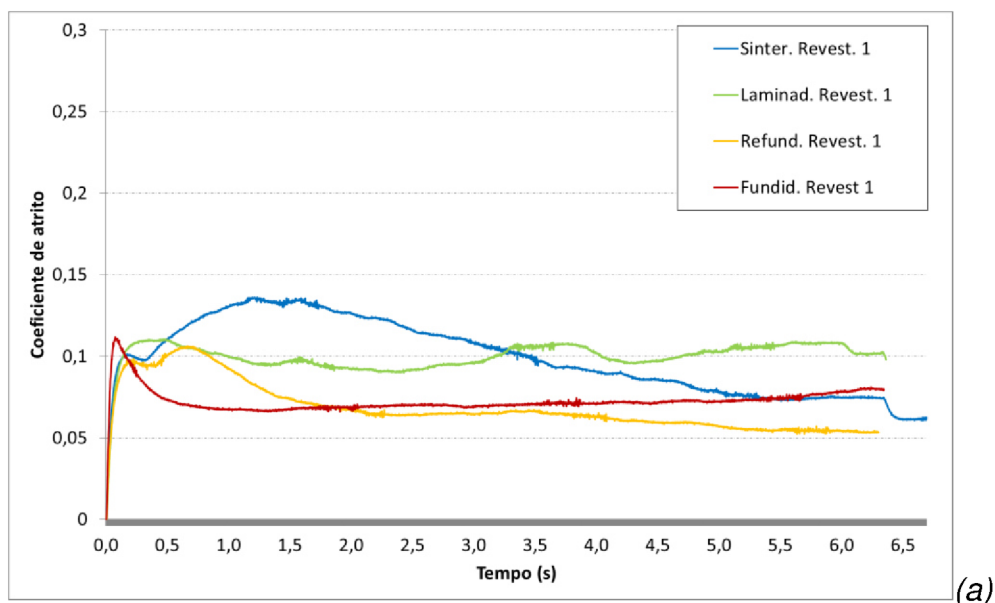
Tabela 4 – Valores médios (por condição de substrato) da quantidade de chapas deslizadas nos ensaios de estiramento.

Corpo de prova		Revestimento	Nº chapas deslizadas
Aço sinterizado	Condição Final	Sem revestimento	1
	Condição Final	Revestimento 1	25
	Condição Final	Revestimento 2	25
	Condição Final	Revestimento 3	20
Aço Laminado	Condição Final	Sem Revestimento	1
	Condição Final	Revestimento 1	25
	Condição Final	Revestimento 2	25
	Condição Final	Revestimento 3	17
Aço fundido	Condição Final	Sem Revestimento	1
	Condição Final	Revestimento 1	25
	Condição Final	Revestimento 2	25
	Condição Final	Revestimento 3	25
Aço Refundido	Condição Final	Sem Revestimento	1
	Condição Final	Revestimento 1	25
	Condição Final	Revestimento 2	25
	Condição Final	Revestimento 3	25

Os valores de coeficientes de atrito foram monitorados com uma frequência de aquisição de 1000 Hz ao longo das 25 chapas estiradas para cada condição ensaiada. Para exemplificar os comportamentos observados, são apresentados gráficos da evolução do coeficiente de atrito com o tempo de ensaio para a primeira (chapa 1) e a última (chapa 25) chapas ensaiadas. São apresentados gráficos para os três revestimentos, com um exemplo para cada condição da ferramenta (sinterizada, laminada, fundida e refundida).

A Figura 27.a apresenta a evolução do coeficiente de atrito durante o estiramento da primeira chapa para amostras revestidas com o revestimento 1. Observa-se para todas as condições um aumento inicial do coeficiente de

atrito, o qual em seguida decresce e tende a estabilizar-se em valores menores. O aumento inicial do coeficiente de atrito pode estar associado com o início do processo de formação da camada transferida. Em seguida, observa-se uma redução no coeficiente de atrito, o qual estabiliza-se, o que pode sugerir que a transferência de material evolui para uma condição tribológica mais favorável, diminuindo o coeficiente de atrito. O substrato fundido, que inicialmente havia resultado em uma ferramenta mais rugosa (ver Figura 25), aparentemente tem uma transição mais rápida, seguido pelo refundido, também de maior rugosidade inicial sugerindo que sua maior rugosidade, que pode levar a mais material removido da chapa, resulte em uma transição mais rápida para uma condição tribologicamente mais estável e favorável. Para a última chapa (chapa 25), apresentada na Figura 27.b, a transição inicial é muito menos visível, sugerindo que a ferramenta já tenha atingido uma condição estável, levando a um regime relativamente permanente de desgaste. Porém, a ferramenta fundida, que havia sofrido uma transição mais rápida no coeficiente de atrito para a primeira chapa, mostra na última chapa valores de atrito mais altos, sugerindo que após um elevado número de chapas ensaiadas a grande quantidade de material transferido (devido à maior rugosidade da ferramenta) esteja comprometendo o comportamento tribológico da ferramenta.



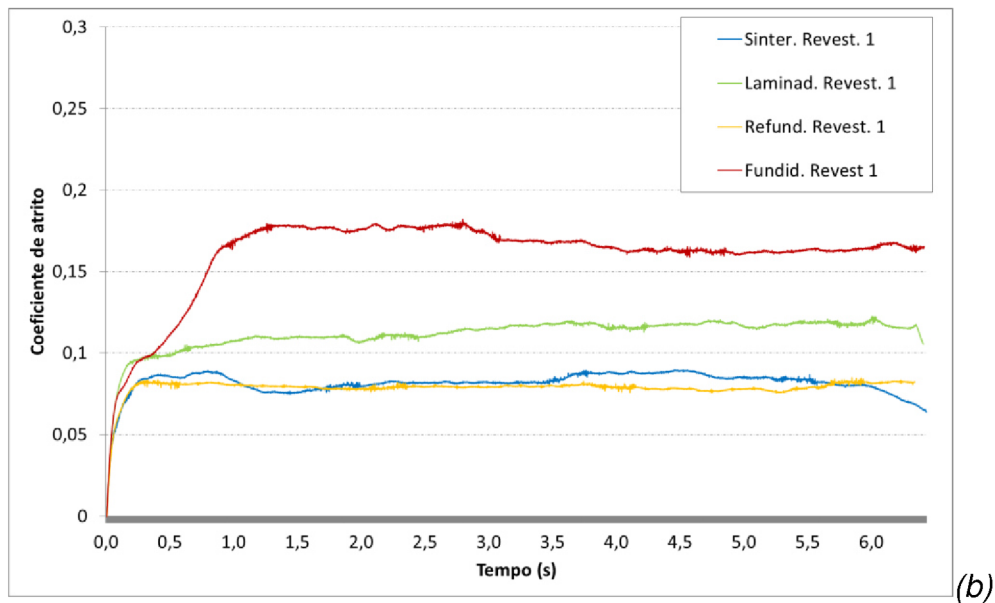


Figura 27 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio para o revestimento 1: (a) primeira chapa deslizada; (b) última chapa deslizada.

Para o revestimento 2, durante o deslizamento da primeira chapa (Figura 28.a), observa-se novamente um aumento inicial do coeficiente de atrito, seguido de uma redução para valores menores, ao quais se mostraram bastante estáveis ao longo do ensaio. Além disso, não foi observada variação significativa com o tipo de ferramenta. Durante o ensaio da última chapa (Figura 28.b), não mais foi observada a transição inicial, sugerindo que a condição superficial encontra-se bastante estável, onde tenha se atingido uma condição permanente de desgaste.

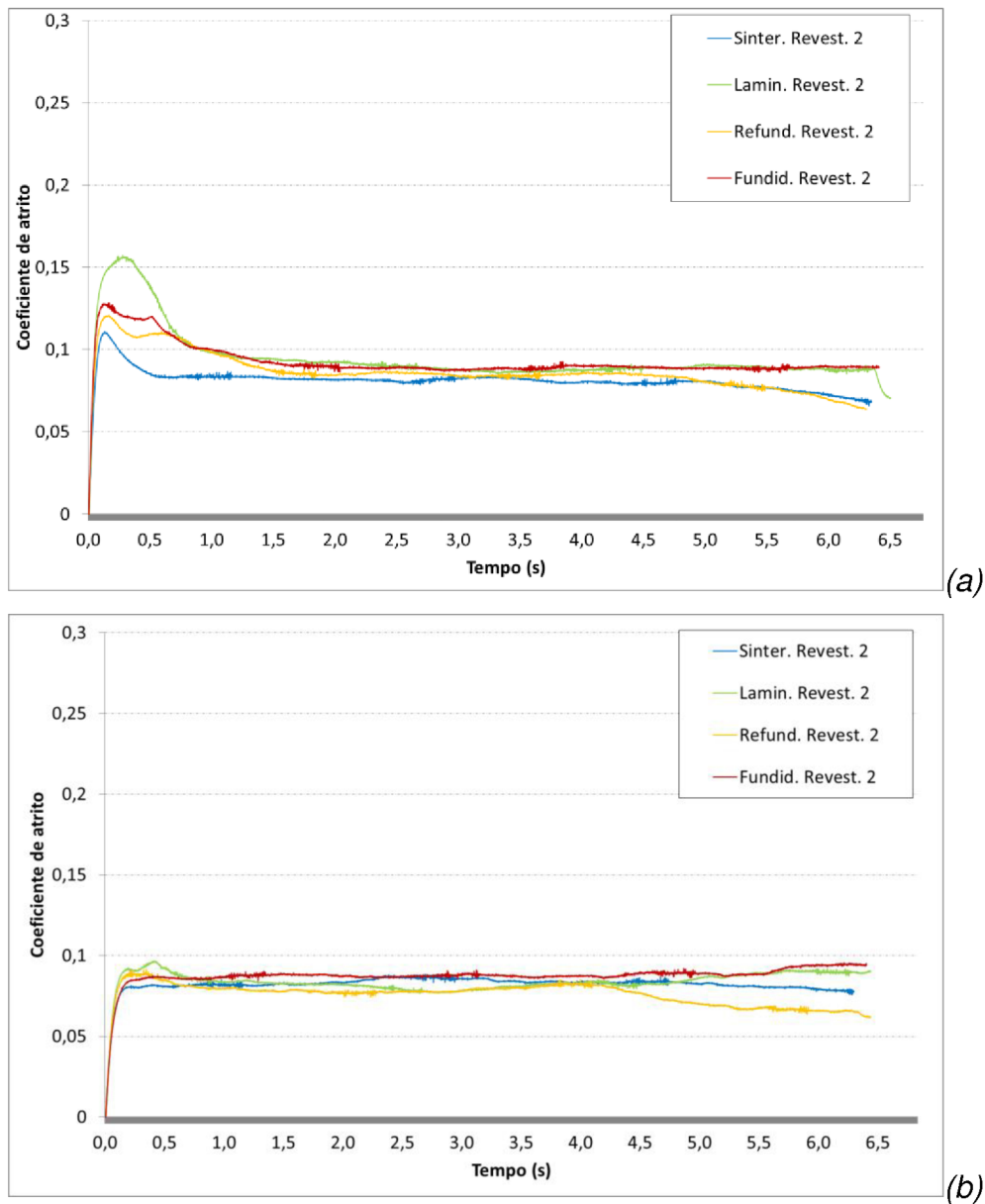


Figura 28 - Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio para o revestimento 2: (a) primeira chapa deslizada, (b) última chapa deslizada.

Para o revestimento 3, durante o deslizamento da primeira chapa (Figura 29.a), tem-se o aumento inicial do atrito, mas a redução posterior foi bastante suave. Além disso, o coeficiente de atrito apresenta-se bastante instável ao longo de todo o estiramento. Este comportamento é bastante diferente do apresentado pelos revestimentos 1 e 2. Para a última chapa (Figura 29.b), mantém-se o comportamento de grande instabilidade do coeficiente de atrito, mas sem nenhuma tendência de redução ao longo do ensaio.

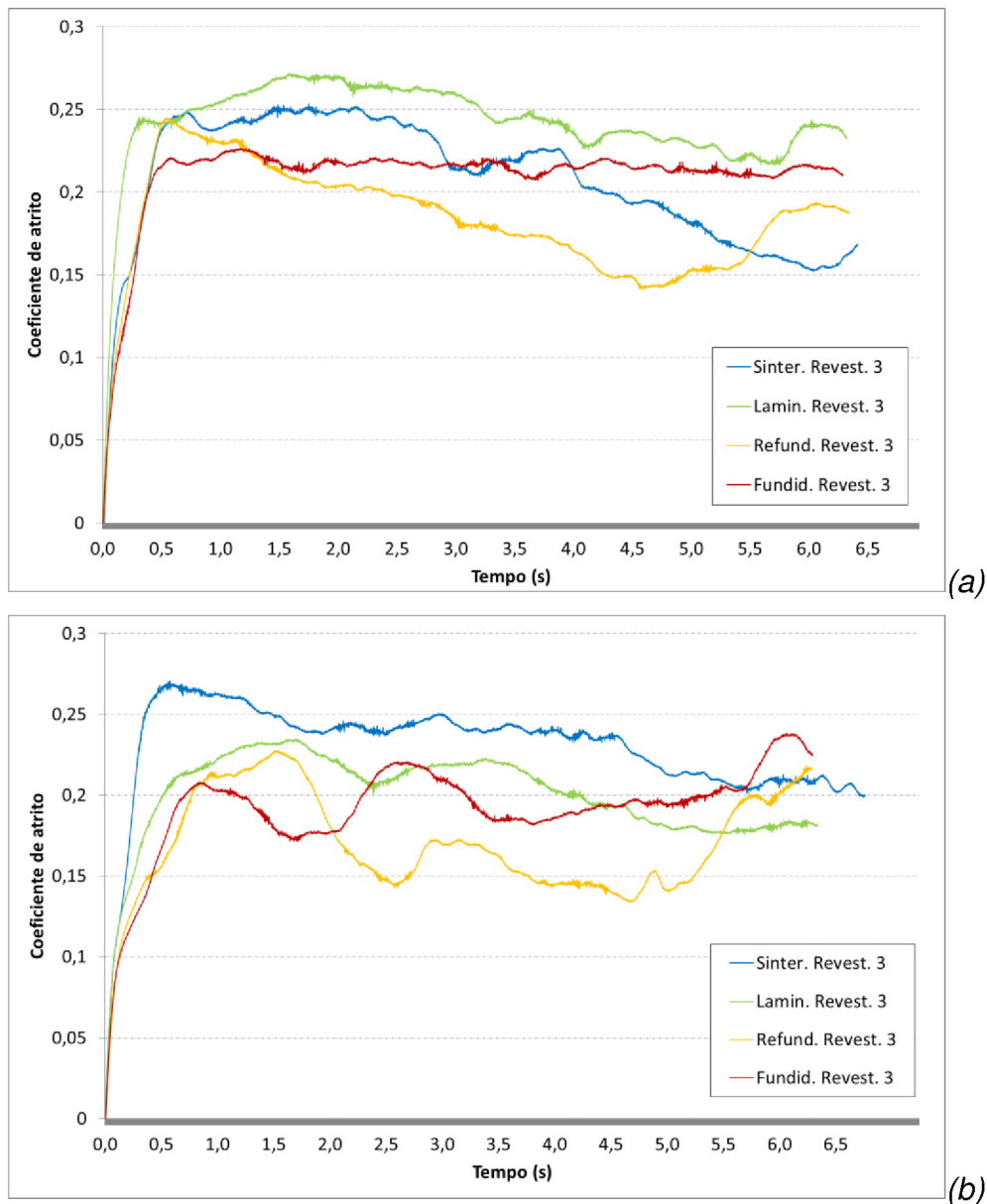


Figura 29 – Evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio para o revestimento 3: primeira chapa deslizada; (b) última chapa.

Os valores médios de coeficientes de atrito da primeira e a última chapa deslizada, para todos os substratos, são apresentados respectivamente na Tabela 5 e na Tabela 6. Para a primeira chapa (Tabela 5), as ferramentas recobertas com o revestimento 1 apresentaram menores coeficientes de atrito, com exceção do substrato Sinterizado 1, para o qual o revestimento 2 apresentou um menor valor. O revestimento 2 apresentou valores levemente maiores que o revestimento 1 e ambos apresentaram baixo desvio padrão, indicando maior estabilidade das forças de atrito durante o ensaio. Para o

revestimento 3 observou-se resultados significativamente maiores que os demais, além de maior desvio padrão.

Tabela 5 - Resultado dos coeficientes de atrito para primeira chapa deslizada por substrato.

Substrato	Revestimento 1	Revestimento 2	Revestimento 3
Sinterizado 1	0,0994 ± 0,0227	0,0801 ± 0,0035	0,2119 ± 0,0329
Sinterizado 2	0,0688 ± 0,0027	0,0789 ± 0,0170	0,2252 ± 0,0151
Sinterizado 3	0,0790 ± 0,0008	0,1384 ± 0,0485	0,2215 ± 0,0128
Laminado 1	0,1002 ± 0,0054	0,1009 ± 0,0131	0,2462 ± 0,156
Laminado 2	0,0729 ± 0,0032	0,0922 ± 0,0030	0,2456 ± 0,0187
Fundido 1	0,0713 ± 0,0032	0,0911 ± 0,0055	0,2161 ± 0,0037
Fundido 2	0,0779 ± 0,0020	0,1398 ± 0,0098	0,2683 ± 0,0105
Refundido	0,0668 ± 0,0130	0,0847 ± 0,0088	0,1864 ± 0,0276

Para o ensaio da última chapa deslizada (Tabela 6), o revestimento 2 apresentou menor coeficiente de atrito para a maioria dos substratos, com exceção das ferramentas sinterizadas, para a qual o revestimento 1 continuou apresentando valores ligeiramente menores. O revestimento 3 ainda apresentou altos valores de atrito quando comparado aos demais revestimentos.

Tabela 6 - Resultado dos coeficientes de atrito para a última chapa deslizada por substrato.

Substrato	Revestimento 1	Revestimento 2	Revestimento 3
Sinterizado 1	0,0823 ± 0,0046	0,0829 ± 0,0021	0,2612 ± 0,0127
Sinterizado 2	0,0792 ± 0,0027	0,0859 ± 0,0033	0,2147 ± 0,0558
Sinterizado 3	0,0766 ± 0,0031	0,0977 ± 0,0023	0,2069 ± 0,0236
Laminado 1	0,1137 ± 0,0048	0,0837 ± 0,0038	0,2575 ± 0,0109
Laminado 2	0,0897 ± 0,0099	0,0867 ± 0,0016	0,2028 ± 0,0543
Fundido 1	0,1667 ± 0,0111	0,0884 ± 0,0023	0,1982 ± 0,0155
Fundido 2	0,1240 ± 0,0145	0,1042 ± 0,0040	0,1974 ± 0,0180
Refundido	0,0794 ± 0,0015	0,0756 ± 0,0056	0,1738 ± 0,0280

A Figura 30 e a Figura 31 apresentam os valores de coeficientes de atrito médios por grupo de substrato para a primeira e última chapa deslizada. Dessa forma, não é possível notar uma diferença estatisticamente significativa nos valores do coeficiente de atrito das ferramentas sinterizadas, laminadas e refundidas. As ferramentas fundidas, que haviam apresentado menor valor no coeficiente de atrito para a primeira chapa e na última chapa valores de atrito mais altos para o revestimento 1, apresentou para o revestimento 3 um comportamento contrário, o valor do coeficiente de atrito diminui para a última chapa deslizada, porém com um valor ainda superior aos demais revestimentos. Para o revestimento 2 não observa-se uma diferença significativa do valor de atrito.

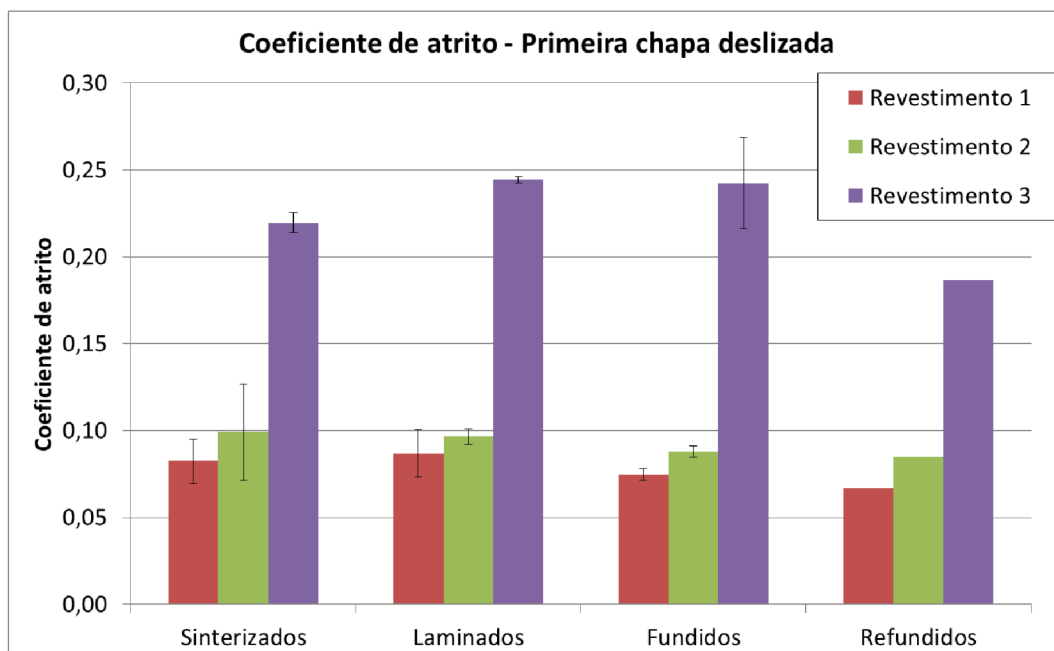


Figura 30 - Coeficientes de atrito médios para a primeira chapa deslizada.

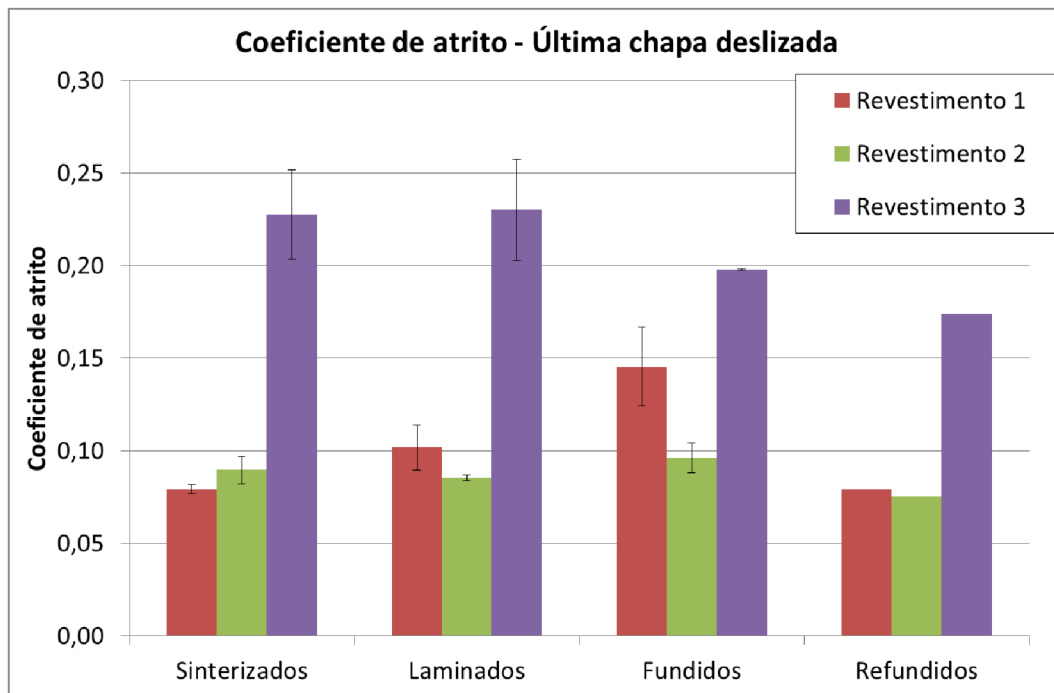


Figura 31 - Coeficientes de atrito médios para a primeira a última chapa deslizada.

Os valores de coeficiente de atrito podem estar associados a diversos fatores, como compatibilidade química, topografia das superfícies em contato, lubrificação e mecanismo de desgaste. Tendo em vista que a condição de lubrificação em princípio foi a mesma para todas as amostras, é importante analisar a qualidade superficial, a química dos revestimentos e os mecanismos de desgaste.

Como apresentado na Tabela 4, para os ensaios com as ferramentas sem revestimento não foi possível realizar o ensaio em mais de uma chapa, pois ocorreu o engripamento da chapa durante o ensaio. A Figura 32 evidencia uma grande quantidade de adesão na ferramenta. O material aderido corresponde às regiões mais escuras na imagem de por elétrons retroespalhados. Análise por EDS (Tabela 7) identificou que essas regiões são pobres em elementos de liga como V, Cr e W, os quais fazem parte da composição da ferramenta, ou seja, trata-se de aço carbono comum transferido da chapa à ferramenta. Essa morfologia de adesão sugere excessivo crescimento de junções, conforme sugerido no modelo de Bowden *et al.*

(2001), provavelmente em função da inexistência de filmes de baixa resistência ao cisalhamento na interface de deslizamento.

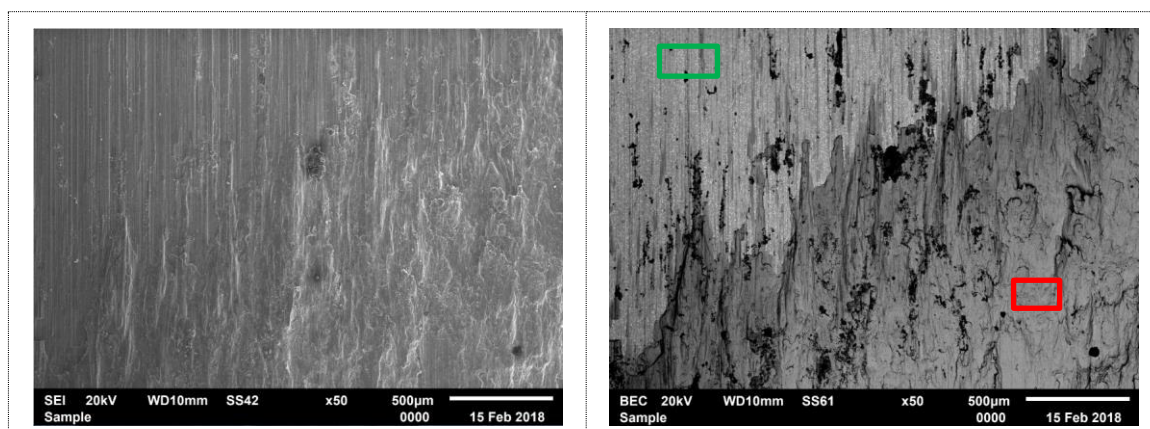


Figura 32 - MEV da superfície desgastada de amostra Sem revestimento (substrato Aço sinterizado 1), imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição intermediária.

Tabela 7. Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta sinterizada sem revestimento.

% Peso	O	V	Cr	Mn	Fe	Mo	W
	0,23	0	0,07	2,16	96,01	0,09	0
	2,36	3,58	3,69	0,65	78,67	4,49	5,45

A Figura 33 e a Figura 34 apresentam as imagens por MEV das trilhas de desgaste produzidas nas ferramentas recobertas com o revestimento 1 em sua condição de desgaste intermediária e final, respectivamente. À esquerda são apresentadas as imagens de elétrons secundários e à direita as imagens de elétrons retroespalhados, que permitem obter contraste devido a diferenças de composição química. Em regiões selecionadas, foram também realizadas análises por EDS. A imagem de elétrons secundários, que fornece características topográficas da superfície, sugere o desenvolvimento de uma camada transferida relativamente lisa e deformada sobre a superfície da ferramenta.

Na condição intermediária (Figura 33), a imagem de elétrons secundários sugere que a camada transferida é rica em elementos químicos de maior número atômico quando comparado ao revestimento (região mais

escura). A análise química por EDS mostra que essa camada (região verde) é rica em Fe com alta quantidade de O. Portanto, trata-se de uma camada transferida da chapa para a ferramenta, conforme regularmente reportado na literatura (Schedin, 1994; Montmitonnet, Pierre *et al.*, 2000) . Trata-se de uma camada constituída de debris removidos principalmente da chapa, os quais são aglutinados, compactados, deformados e transferidos à superfície da ferramenta. Essa camada transferida foi intensamente deformada, produzindo uma superfície razoavelmente lisa sobre a superfície, e foi parcialmente oxidada. A região em vermelho apresenta uma elevada quantidade de O, porém não tem evidências de ser material transferido, pois seu teor de Fe é muito baixo. Dessa forma é possível supor que o revestimento, assim como a camada transferida, também está sendo parcialmente oxidado. Comportamento semelhante foi observado para todos os substratos de aço sinterizado, aço laminado, aço fundido e aço refundido revestidos com o Revestimento 1.

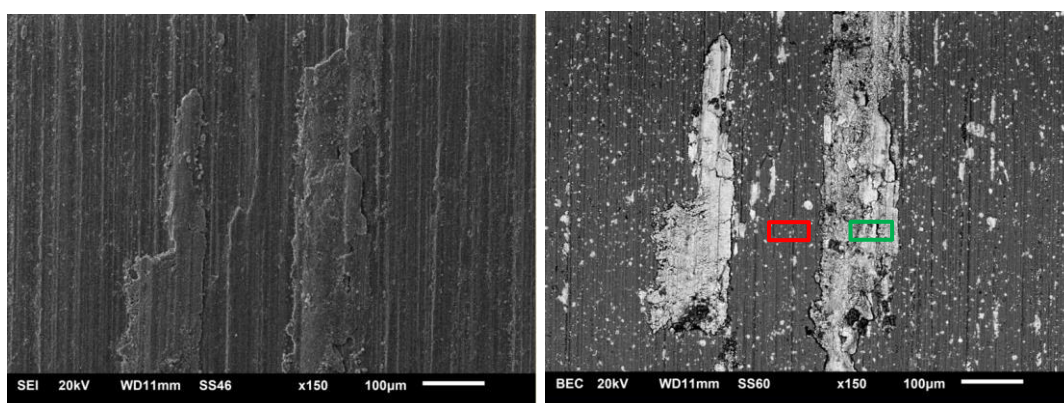


Figura 33 - MEV da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 1, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição intermediária.

Tabela 8 – Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, condição intermediária.

% Peso	N	O	V	Cr	Mn	Fe
 	8,11	34,58	55,81	0,0	-	1,24
 	5,42	15,03	24,17	0,10	1,05	51,83

A condição final apresenta um comportamento muito semelhante à condição intermediária. Porém, observa-se nas imagens por elétrons secundários uma maior quantidade de material transferido e regiões onde o

material transferido apresenta uma maior alta quantidade de O (região azul), de forma que a camada transferida encontra-se parcialmente oxidada.

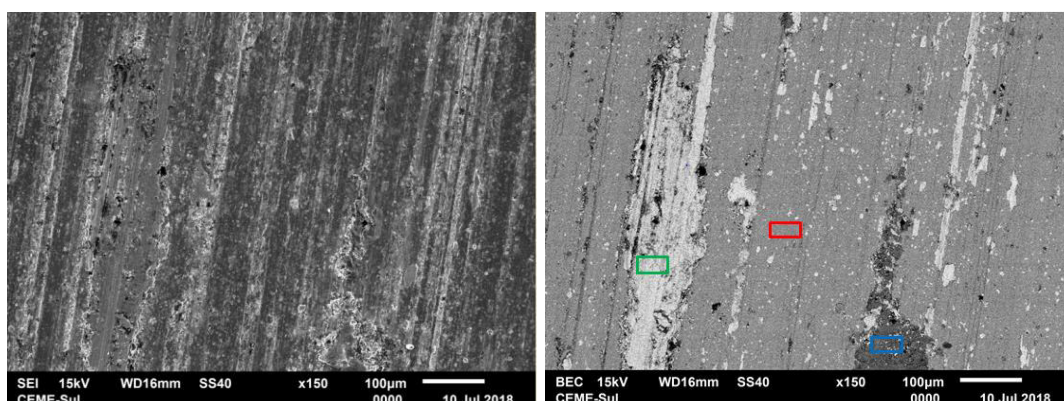


Figura 34 - MEV da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 1, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição final.

Tabela 9 - Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 1, condição final..

% Peso	N	O	V	Cr	Mn	Fe
	8,38	28,19	60,45	-	-	2,66
	-	5,15	2,52	0,19	1,84	88,37
	-	32,12	2,88	-	1,40	56,91

A Figura 35 apresenta o comportamento do corpo de prova com o Revestimento 2 na condição intermediária. Observa-se adesão da chapa na ferramenta, conforme observado para o Revestimento 1, mas em quantidade um pouco menor. A análise por EDS realizada na imagem de elétrons retroespalhados evidenciou as diferenças de composição química entre as diferentes regiões observadas. Na região em vermelho, tem-se altos teores de Ti e Cr, que correspondem aproximadamente à composição inicial do revestimento, sem apresentar indícios de significativa transferência de material desgastado das chapas. A região em verde apresenta uma cor relativamente mais clara que a região do revestimento, onde o alto teor de Fe a presença de O sugerem a presença de material transferido parcialmente oxidado. A região em azul apresenta um aumento significativo da quantidade de Cr e O. Isso evidencia que ocorreu a exposição de uma segunda camada de revestimento composta por CrN. Observa-se ainda que essa camada, quando exposta, sofreu significativa oxidação, apresentando valores de O superiores ainda aos

observados na camada transferida. Dessa forma, tem-se regiões onde está presente a camada mais superficial do revestimento contendo altos valores de Ti, regiões onde ocorreu exposição da camada intermediária de CrN, a qual é oxidada, e regiões com camadas transferidas provenientes de debris desgastados da chapa, as quais são parcialmente oxidadas.

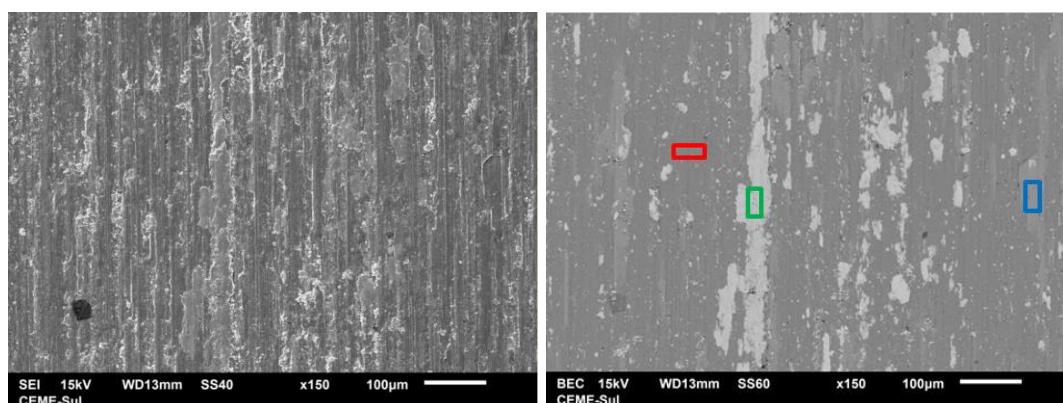


Figura 35 - MEV da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição intermediária.

Tabela 10 - Porcentagem em peso de elementos químicos na superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, condição intermediária.

.% Peso	N	O	Ti	Cr	Mn	Fe
	-	-	88,19	1,20	-	5,57
	-	3,04	1,04	2,71	1,87	90,06
	10,98	9,12	0,51	77,85	-	1,29

A morfologia da ferramenta após deslizamento de 25 chapas no ensaio de desgaste do Revestimento 2 é apresentado na Figura 36. É ainda possível observar regiões com alta porcentagem de Ti e baixo O, ou seja, com composição bastante semelhante à composição inicial do revestimento (regiões em vermelho). As regiões delimitadas em roxo correspondem à camada intermediária de CrN, com composição semelhante à encontrada para a condição intermediária, mas existe uma maior área de exposição de CrN. As regiões de material transferido, em verde e azul, apresentam regiões mais

claras (verde), com pequena quantidade de oxigênio e regiões mais escuras (azul), onde ocorreu um significativo aumento de O, indicando regiões severamente oxidadas, as quais aparecem em maior quantidade na condição final que na condição intermediária. Comportamentos semelhantes foram observados para todos os substratos de aço sinterizado, aço laminado, aço fundido e aço refundido.

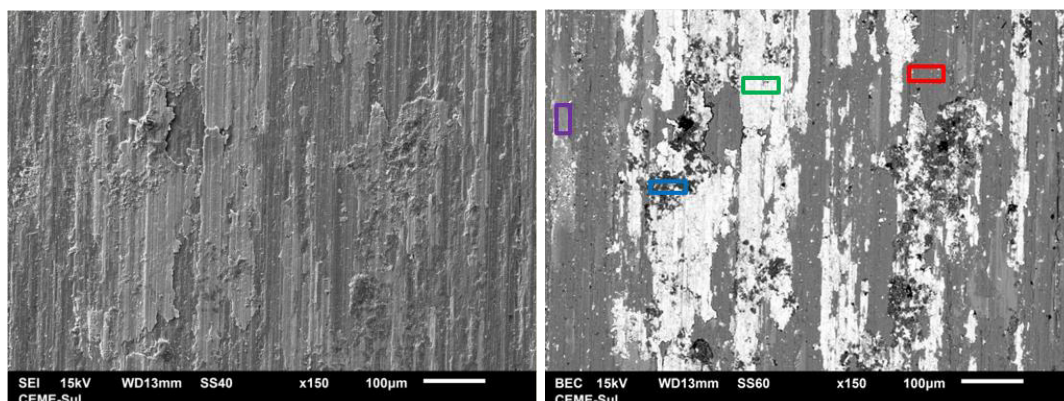


Figura 36 - MEV da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição final.

Tabela 11 - Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta laminada com Revestimento 2, condição final.

%Peso	N	O-K	Ti	Cr	Mn	Fe
 	7,31	-	81,10	1,88		4,43
 	0,79	4,61	2,81	2,50	1,64	86,45
 	-	19,84	2,86	1,90	1,52	70,48
 	9,44	9,44	15,64	57,40		7,63

Resultados representativos do Revestimento 3 após deslizamento de 12 chapas (condição intermediária) são apresentados na Figura 37 e a Tabela 12, Conforme sugerido pela imagem de elétrons retroespalhados e pela análise por EDS, observa-se uma menor quantidade de material transferido da chapa e em pequenas regiões restritas. As imagens por elétrons secundários mostram que o material transferido não foi amplamente deformado sobre a superfície, ocorrendo assim, a formação de protuberâncias mais pontiagudas. Em sua composição, as regiões de material transferido apresentam valores de O significativamente menores (teor baixo) comparado aos demais revestimentos. Além disso, nas regiões onde o revestimento apresenta-se aparentemente intacto (região vermelha), observa-se também um teor de O muito baixo, evidenciando muito pouca oxidação do revestimento em função do

deslizamento.

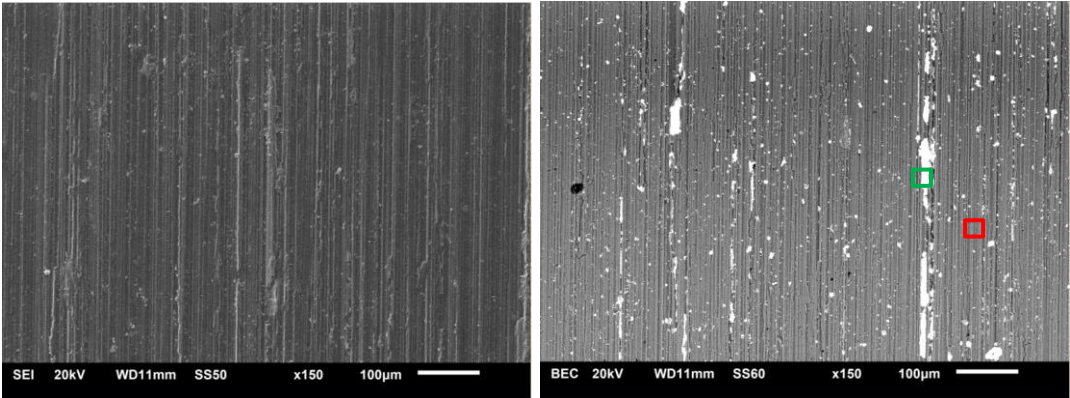


Figura 37 - MEV da superfície desgastada de ferramenta fundida com Revestimento 3, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição intermediária.

Tabela 12 - Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta fundida com Revestimento 3, condição intermediária.

% Peso	N	O	Al	Ti	Mn	Fe
	22,88	1,42	22,55	50,20	-	1,26
	-	1,09	0,88	4,19	1,59	90,99

A condição final, quando comparada à condição intermediária, apresenta um ligeiro aumento na quantidade de material transferido, como pode ser observado nas imagens por elétrons secundários. Mesmo com o deslizamento das 25 chapas, é possível notar que tanto o material transferido (região verde) quanto o revestimento (região vermelha) apresentam um baixo teor de O (ver Tabela 13), ou seja, sofreram muito pouca oxidação.

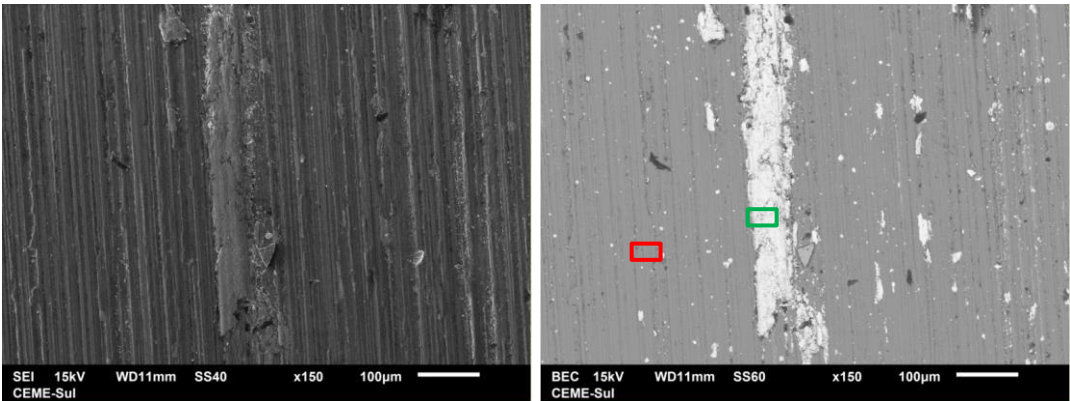


Figura 38- MEV da superfície desgastada de ferramenta refundida com Revestimento 3, imagem SE à esquerda e BSE à direita, condição final.

Tabela 13- Análise por EDS da superfície desgastada de ferramenta refundida com Revestimento 3, condição final.

% Peso	N	O	Al	Ti	Mn	Fe
	20,03	0,28	23,42	53,96		1,12
		1,53	0,23	0,37	1,83	94,57

Imagens de MEV com maior ampliação das superfícies desgastadas das ferramentas nas condições intermediária e final são apresentadas na Figura 39 para o Revestimento 1, Figura 40 para o Revestimento 2 e Figura 41 para o Revestimeno 3, para melhor entendimento da evolução dos mecanismos envolvidos no desgaste das ferramentas. As imagens sugerem que à medida que ocorre o deslizamento, a grande diferença na dureza entre a ferramenta e a chapa torna muito provável a remoção de debris preferencialmente da chapa. Após a formação de debris da peça de trabalho, alguns permanecem no contato, são fragmentados, aglomerados, deformados e eventualmente transferidos para ferramenta, levando à adesão, conforme largamente reportado na literatura (Montmitonnet, Pierre *et al.*, 2000). Para o Revestimento 1 na condição intermediária (Figura 39.a e b), é possível observar na camada transferida regiões com debris aglomerados e regiões onde intensa deformação plástica dos debris aglomerados levou à formação de uma camada transferida razoavelmente lisa. Na condição final (Figura 39,c e d), o aspecto das camadas transferidas foi semelhante. Apesar de preponderarem as regiões mais deformadas e lisas, é possível observar debris aparentemente recém transferidos, os quais encontram-se bastante oxidados e pouco compactados e deformados. Comportamento bastante semelhante foi observado para o Revestimento 2 (Figura 40). Já para o Revestimento 3 (Figura 41), a camada transferida ocupa uma região significativamente menor da trilha de desgaste, como já foi observado anteriormente. As imagens em maior aumento evidenciam uma dificuldade em deformar o material transferido. Na condição intermediária (Figura 41.a e b), a camada transferida encontra-se ainda pouco compactada. Na condição final (Figura 41.c e d), a camada transferida encontra-se mais compactada e a sua espessura parece aumentar

significativamente, podendo-se ainda observar que ela apresenta-se bastante trincada, como é comum observar em tribocamadas espessas. Porém, esta camada não parece estar deformada e uniforme, formando uma tribocamada razoavelmente lisa, como observado para os Revestimentos 1 e 2. Ao invés disso, as regiões transferidas aparecem mais como protuberâncias na superfície da ferramenta e aparentemente menos aderidas a ela.

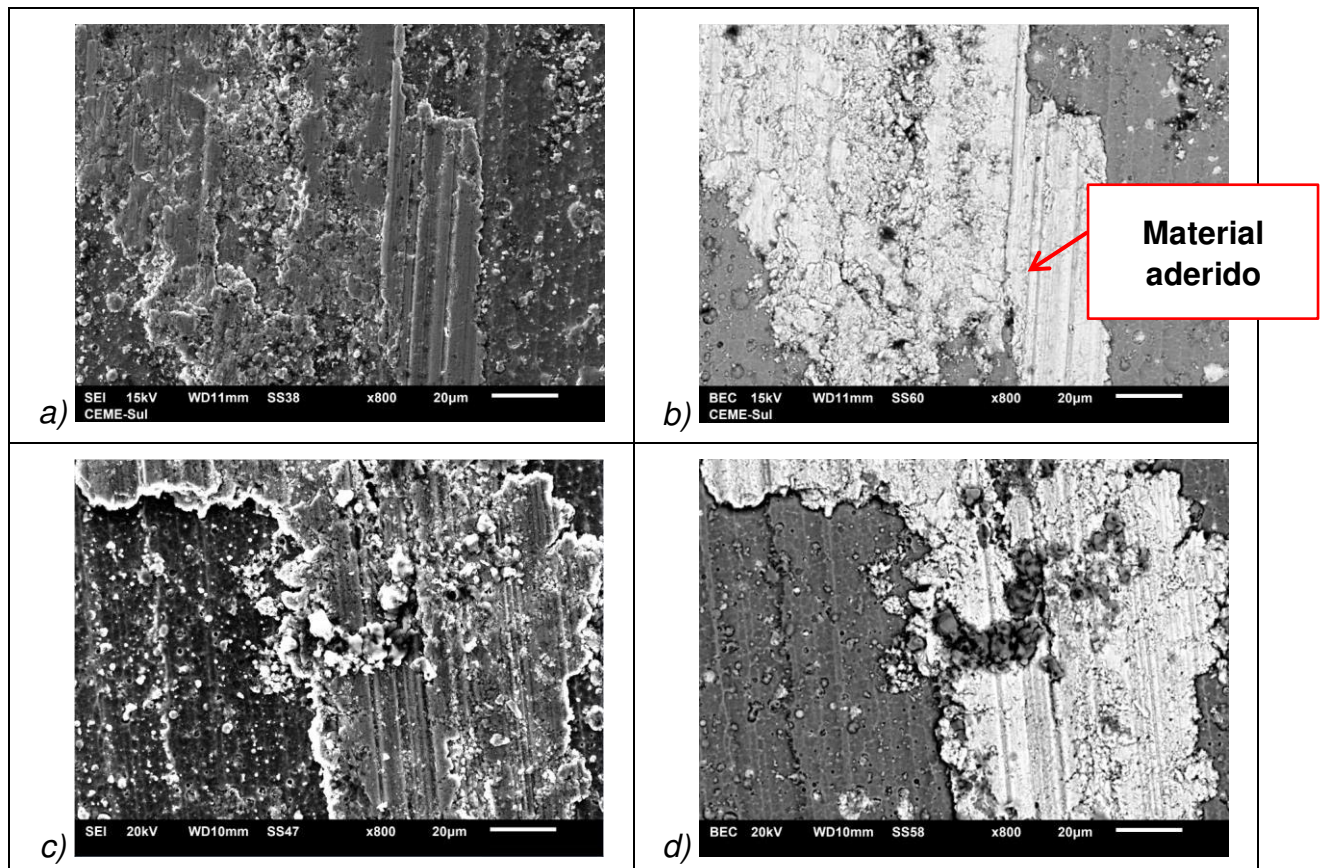


Figura 39. Detalhes por MEV das camadas transferidas em ferramenta sinterizada com Revestimento 1: (a) SE, condição intermediária, (b) BEC, condição intermediária, (c) SE, condição final, (d) BEC, condição final.

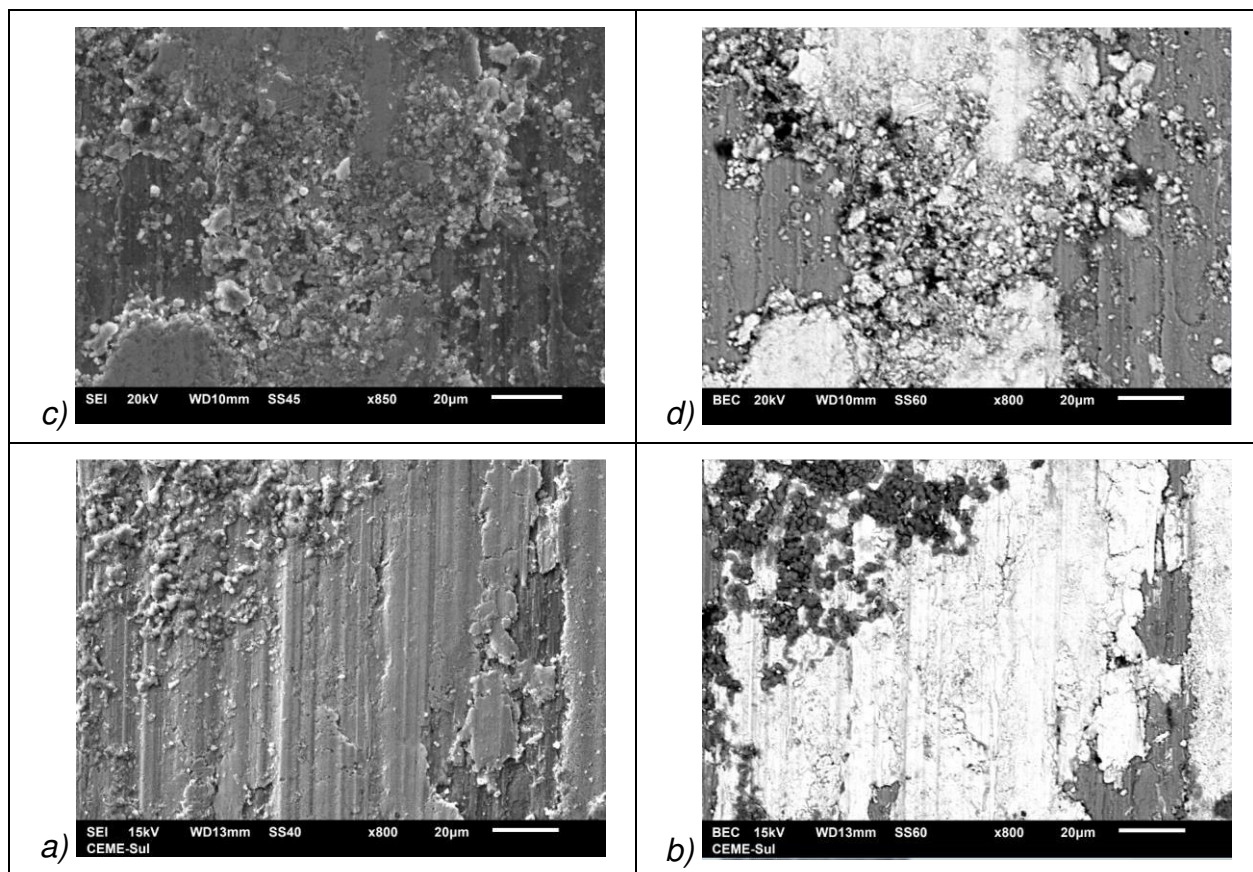
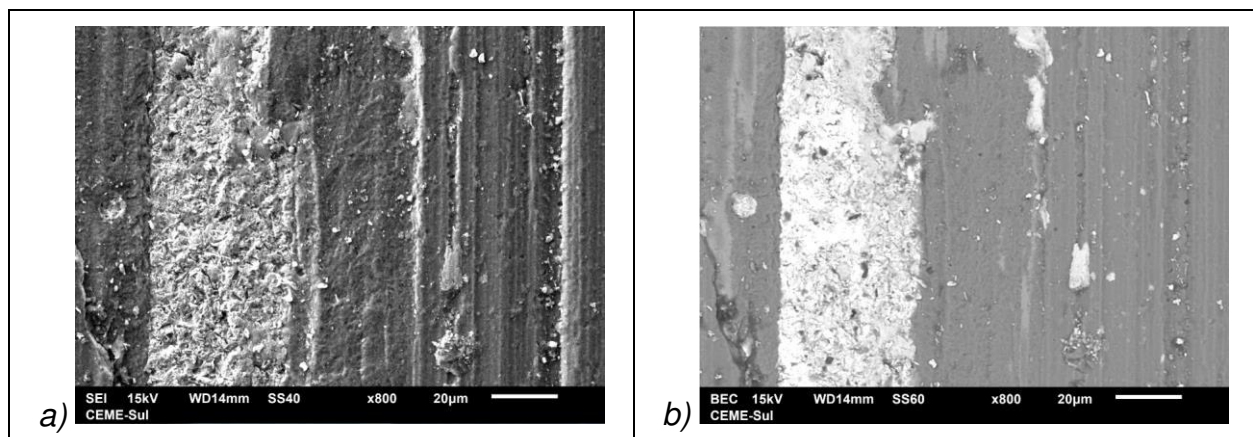


Figura 40 - Detalhes por MEV das camadas transferidas em ferramenta sinterizada com Revestimento 2: (a) SE, condição intermediária, (b) BSE, condição intermediária, (c) SE, condição final, (d) BSE, condição final.



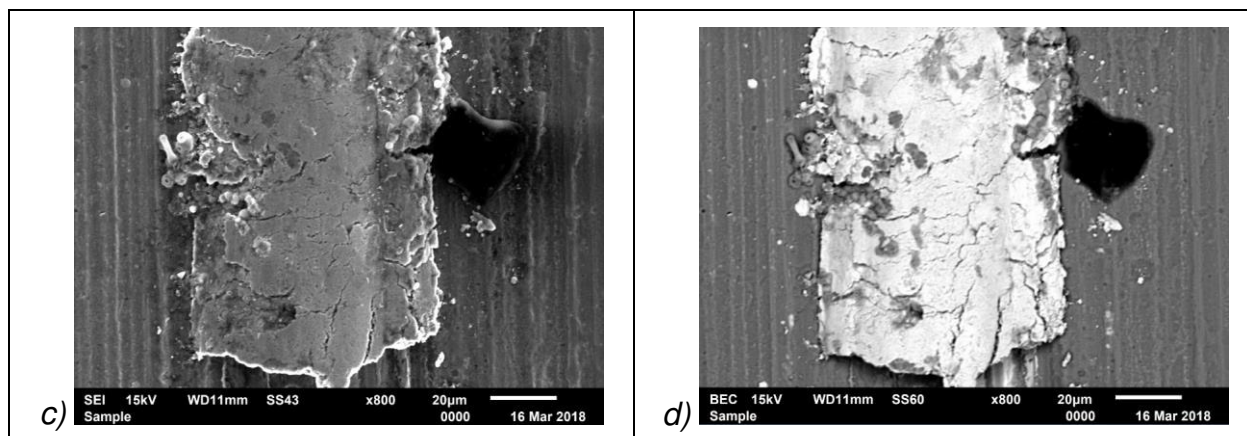
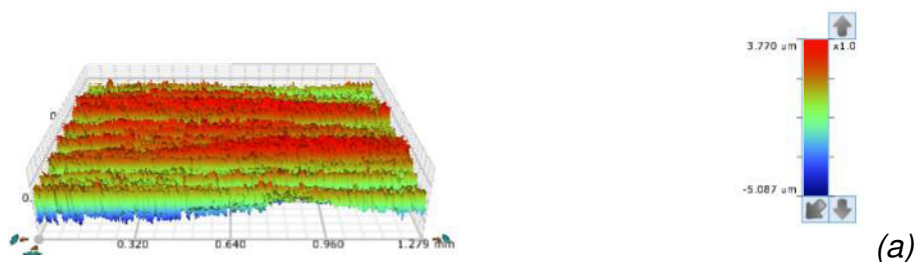


Figura 41 - Detalhes por MEV das camadas transferidas em ferramenta fundida com Revestimento 3: (a) SE, condição intermediária, (b) BSE, condição intermediária, (c) SE, condição final, (d) BSE, condição final.

Para quantificar as diferenças nas morfologias das superfícies das ferramentas antes e após os ensaios de desgaste, a topografia das superfícies geradas dentro das trilhas de desgaste foram avaliadas por interferometria ótica. Exemplos de mapas topográficos 3D dentro das trilhas são apresentados na Figura 42 para os três tipos de revestimentos. Os mapas topográficos confirmam qualitativamente as morfologias superficiais observadas com as imagens de MEV. Para o Revestimento 1 (Figura 42.a), existe uma grande quantidade de material transferido na superfície da ferramenta, mas este encontra-se bastante deformado, formando regiões razoavelmente lisas. Comportamento semelhante é observado para o Revestimento 2 (Figura 42.b), apesar de uma quantidade ligeiramente menor de material transferido. No entanto, para o Revestimento 3 (Figura 42.c), o material transferido cobre uma porção bem menor da superfície da ferramenta. Por outro lado, essas regiões de material transferido possuem maior altura, apresentando-se como protuberâncias na superfície da ferramenta.



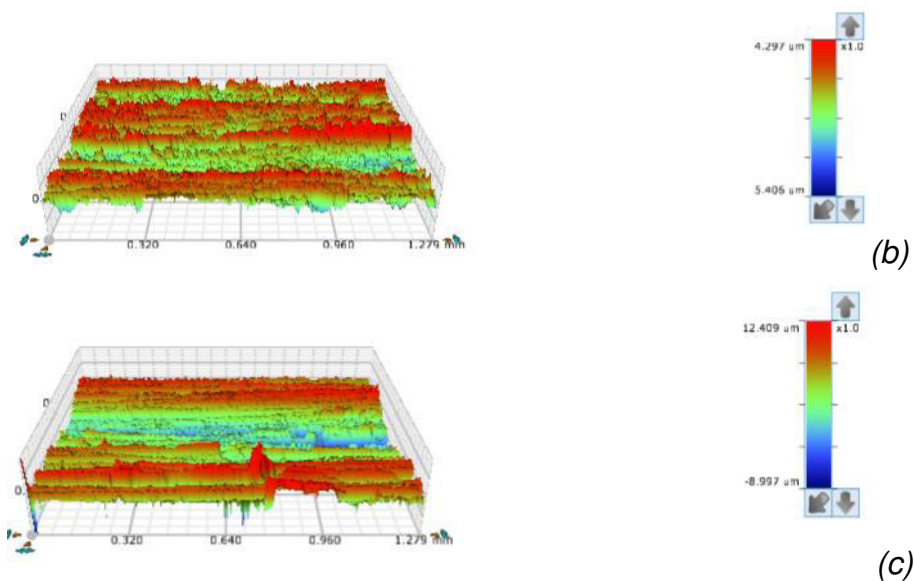


Figura 42 - Mapas topográficos 3D das trilhas de desgaste produzidas nas amostras na condição intermediária: (a) Revestimento 1; (b) Revestimento 2; (c) Revestimento 3.

Para quantificar as diferenças entre as morfologias das superfícies desgastadas, os parâmetros topográficos S_q , S_z , S_{sk} , S_{ku} , S_m e S_{bi} foram calculados nas condições inicial, intermediária e final.

A Figura 43 apresenta os valores de S_q encontrados dentro das trilhas de desgaste para cada tipo de ferramenta (sinterizada, laminada, fundida e refundida), por revestimento, nas condições de ensaio inicial, intermediária (a) e final (b). Na condição intermediária, é possível observar que o revestimento 1 apresenta valores de S_q maiores para as ferramentas fundida e sinterizada, o que pode refletir a maior rugosidade inicial das amostras com revestimento 1. Porém, comparando-se as demais condições de ferramenta na condição intermediária, ou comparando-se as condições intermediária e final para todas as ferramentas, observa-se uma tendência de pouca diferença na altura média das irregularidades entre ferramentas. Esta observação está de acordo com as observações por MEV e com os mapas topográficos das superfícies desgastadas, as quais mostram material transferido para todas as ferramentas testadas, tanto na condição intermediária quanto na condição final. Além disso, para o revestimento 1, existe uma tendência de uma redução da rugosidade entre as condições intermediária e final. Esse comportamento pode estar

associado ao desgaste e suavização dos picos mais proeminentes ou ao preenchimento dos vales pelos debris de desgaste, bem como à compactação e deformação da camada transferida, tornando a superfície relativamente mais lisa.

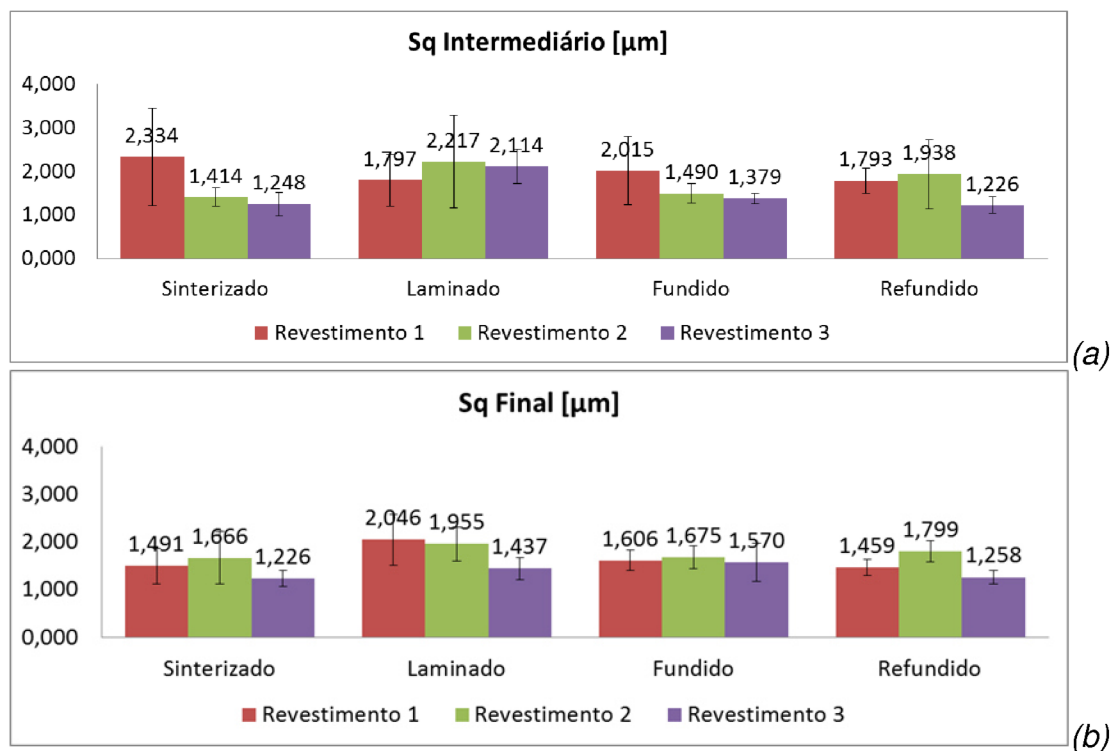


Figura 43 - Resultados de Sq após os ensaios de desgaste: (a) condição intermediária; (b) condição final.

Os resultados relativos ao parâmetro Sz são mostrados na Figura 44. Este parâmetro está associado às irregularidades mais altas presentes na superfície, sendo em geral um bom parâmetro para evidenciar a ocorrência ou não de transferência de material. De uma maneira geral, as diferenças observadas entre as diferentes ferramentas ou entre as condições intermediária e final não são estatisticamente significativas. Isso provavelmente ocorreu porque transferência de material foi observada para todas as condições testadas. Porém, pode-se detectar alguma tendência de maiores valores de Sz para o revestimento 1. Isso pode estar associado tanto à sua maior rugosidade inicial quanto a uma quantidade maior de material transferido.

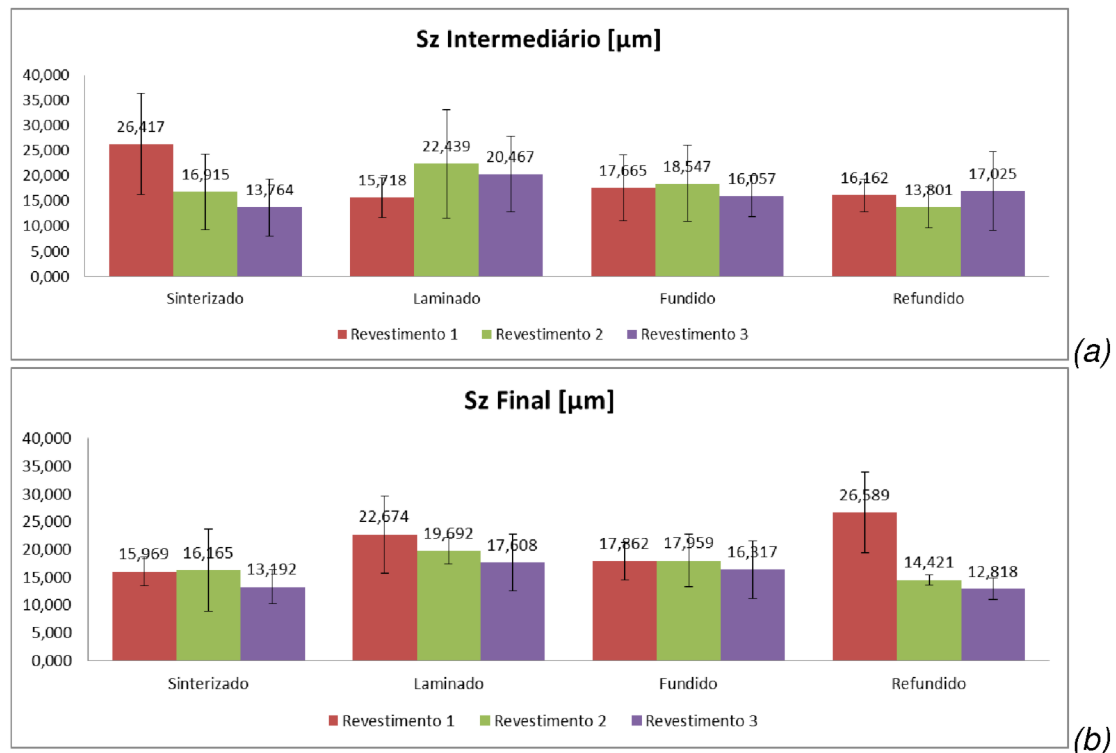


Figura 44 - Resultados de Sz após os ensaios de desgaste: (a) condição intermediária; (b) condição final.

O parâmetro *Sbi* representa a capacidade de suporte mecânico de uma superfície. Antes dos ensaios (Figura 45.a), todas as ferramentas investigadas apresentam valores semelhantes de *Sbi*. Comparando-se a condição inicial com a condição intermediária (b), os valores de *Sbi* variam, particularmente para o revestimento 1. Apesar de nenhuma tendência clara ter sido identificada, essas variações de valores de *Sbi* na condição intermediária devem estar associadas ao material transferido, que por um lado pode diminuir a capacidade de apoio, mas por outro lado o contínuo deslizamento dessa camada transferida bem como o arrancamento de protuberâncias mais elevadas e preenchimento de vales pode aumentar a capacidade de apoio. Na condição final (c), novamente não foi possível verificar diferenças significativas entre as ferramentas. Este comportamento complexo do parâmetro *Sbi* com o processo desgaste tem sido observado na literatura (Gonçalves Júnior, 2016).

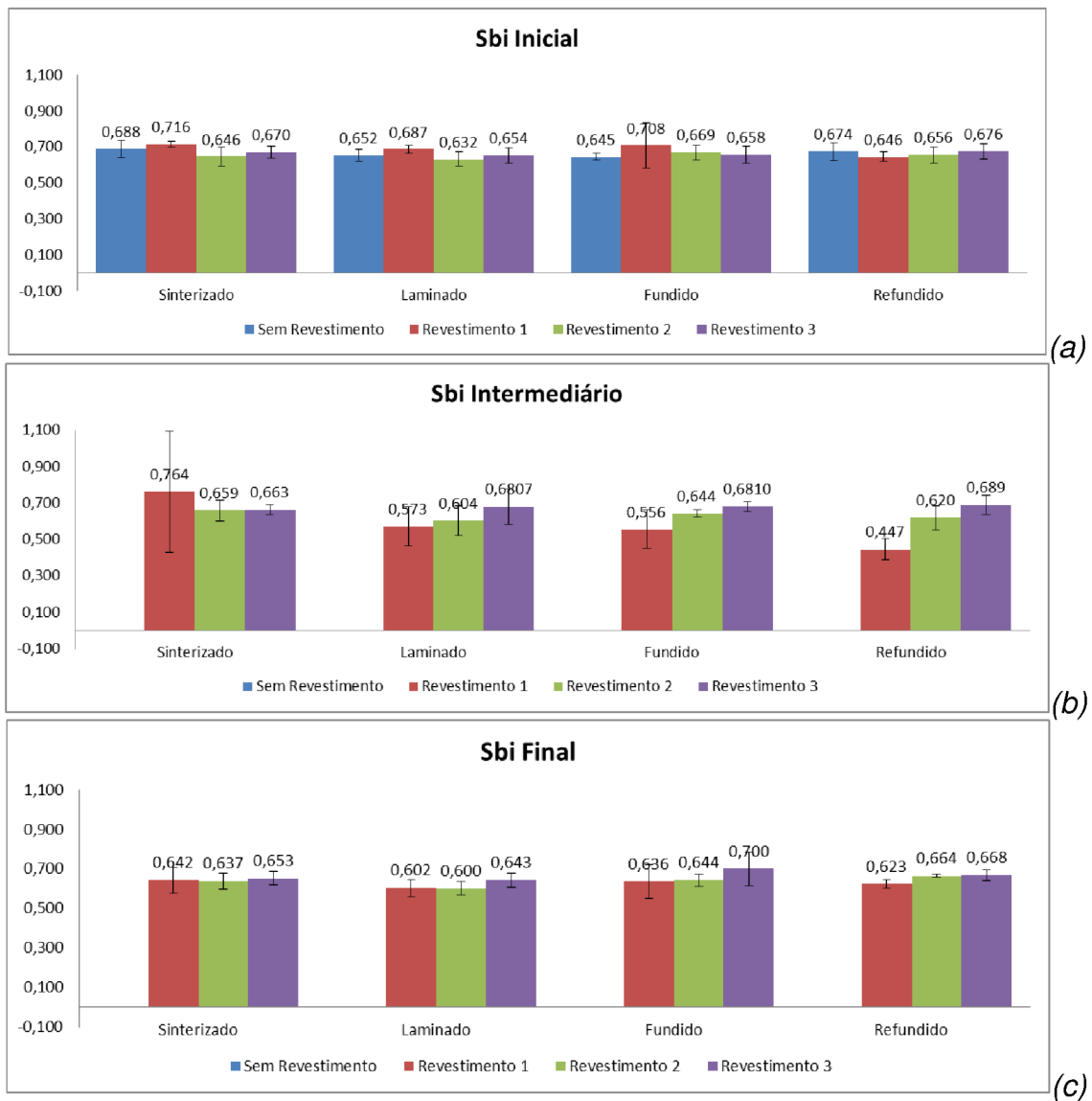


Figura 45 - Resultados de Sbi antes e após os ensaios de desgaste: (a) condição inicial; (b) condição intermediária; (c) condição final.

A Figura 46 apresenta os valores do parâmetro de volume de material (Sm) antes e após os ensaios. O parâmetro Sm é outro parâmetro que também fornece indicação sobre a capacidade de apoio de uma superfície, já que está associado ao volume de material mais protuberante e que portanto será o volume de material desgastado durante o *running-in*. Porém, em condições severas como a conformação mecânica, onde pode ocorrer significativa transferência de material entre as superfícies, este parâmetro também pode estar associado ao volume de material transferido. Na condição inicial, ou seja, antes dos ensaios (a) o revestimento 1 apresentou o maior valor de Sm . Como

este revestimento apresentou estrutura colunar, com maior rugosidade, os maiores valores iniciais estão associados a mais material que precisaria ser removido antes de se obter uma boa capacidade de apoio, como normalmente reportado na definição do parâmetro S_m na literatura. Após os ensaios de estiramento, na condição intermediária (Figura 46.b), existe uma tendência de aumento nos valores de S_m para todas as ferramentas, apesar de os valores de S_m se manterem maiores para as ferramentas com revestimento 1. Estes resultados sugere a existência um aumento significativo da quantidade de material acima do plano médio da topografia, ou seja, material transferido para a ferramenta. Entre a condição intermediária e a final, tem-se uma redução nos valores de S_m para as ferramentas com revestimento 1, provavelmente refletindo a intensa deformação sofrida pela camada transferida, com consequente alisamento, conforme observado nas imagens MEV.

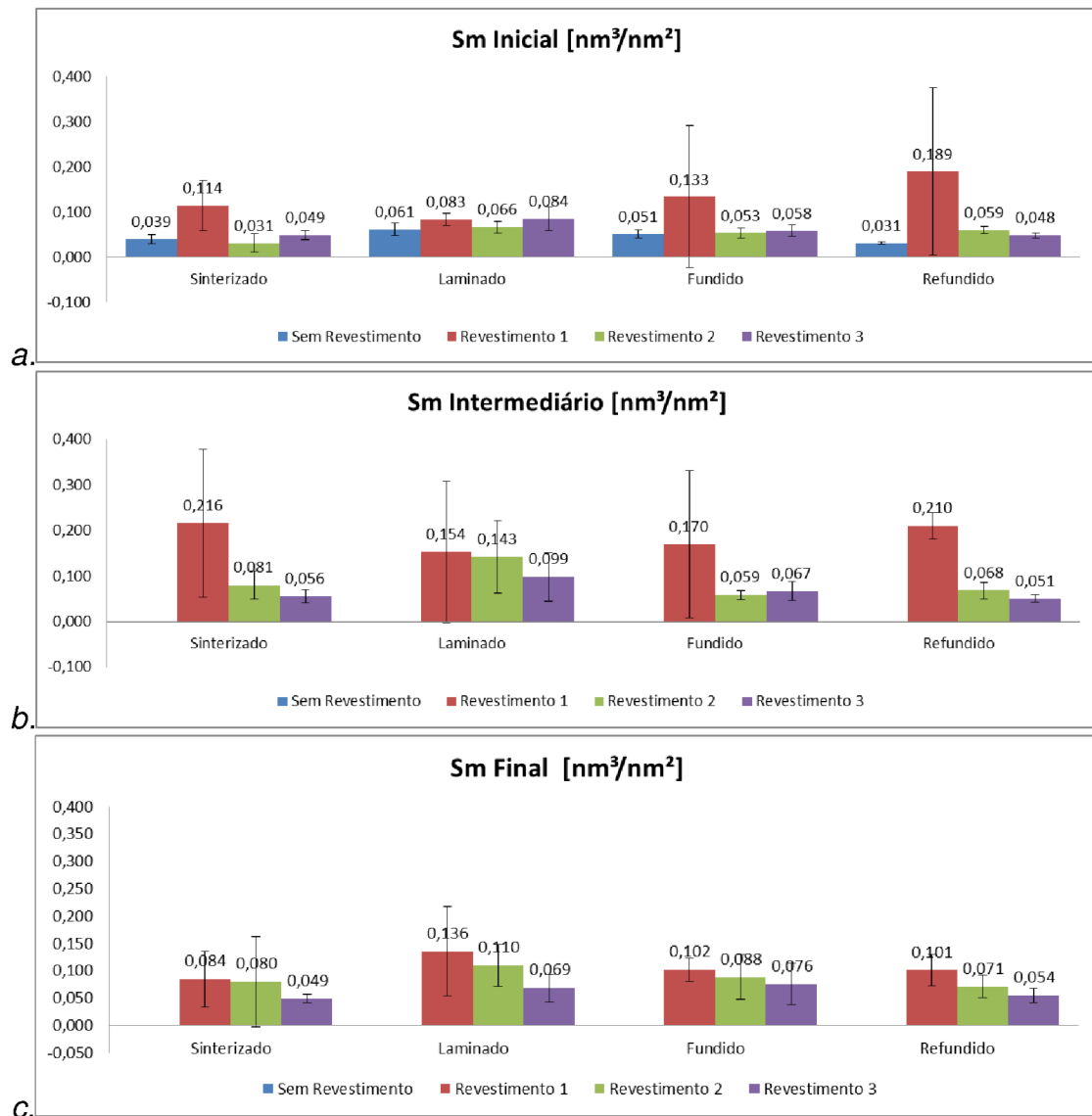


Figura 46 - Resultados de Sm antes e após os ensaios de desgaste: (a) condição inicial; (b) condição intermediária; (c) condição final.

Foram também avaliados os parâmetros de assimetria (Ssk) e achatamento (Sku) da curva de distribuição das alturas das irregularidades nas condições de ensaio inicial, intermediária e final das ferramentas. A análise simultânea desses parâmetros é realizada a partir da plotagem os valores de Ssk nos eixos das abscissas e Sku no eixo das ordenadas, denominado de espaço morfológico. Nesse tipo de diagrama é possível identificar grupos de amostras com comportamentos semelhantes, bem como possíveis evoluções da superfície com consequentes alterações de topografias decorrentes do ensaio. O espaço morfológico relativo a todos os ensaios é apresentado na Figura

(■), as ferramentas com revestimento 1 são denotadas por triângulos (▲), as ferramentas com revestimento 2 por círculos (●) e com o revestimento 3 por losangos (◊) ; as condições iniciais são denotadas por formas vazias, as condições intermediárias por formas hachuradas e as condições finais por formas cheias; as diferentes cores designam os diferentes tipos de substrato (azul = sinterizado, vermelho = laminado, verde = fundido e amarelo = refundido). De uma forma geral, essa figura mostra que o quadrante positivo, relativo a valores de S_{ku} positivo, corresponde fundamentalmente às amostras com revestimento 1 (antes e após desgaste) e às amostras sem revestimento após o desgaste. Um valor positivo de S_{sk} indica uma assimetria da curva de distribuição de amplitudes das irregularidades, com preponderância de picos (platô-picos). Já valores de S_{ku} significativamente acima de 3, o que indica um desvio em relação a uma curva gaussiana no sentido de ter uma curva de distribuição mais pontiaguda, somente foi observado para o revestimento 1 e em alguns casos para o revestimento 3. Para uma análise mais detalhada desse espaço morfológico, ele será dividido em um espaço correspondente às condições iniciais, um relativo ao revestimento 1, um relativo ao revestimento 2 e um relativo ao revestimento 3, os quais são apresentados da Figura 47 à Figura 51.

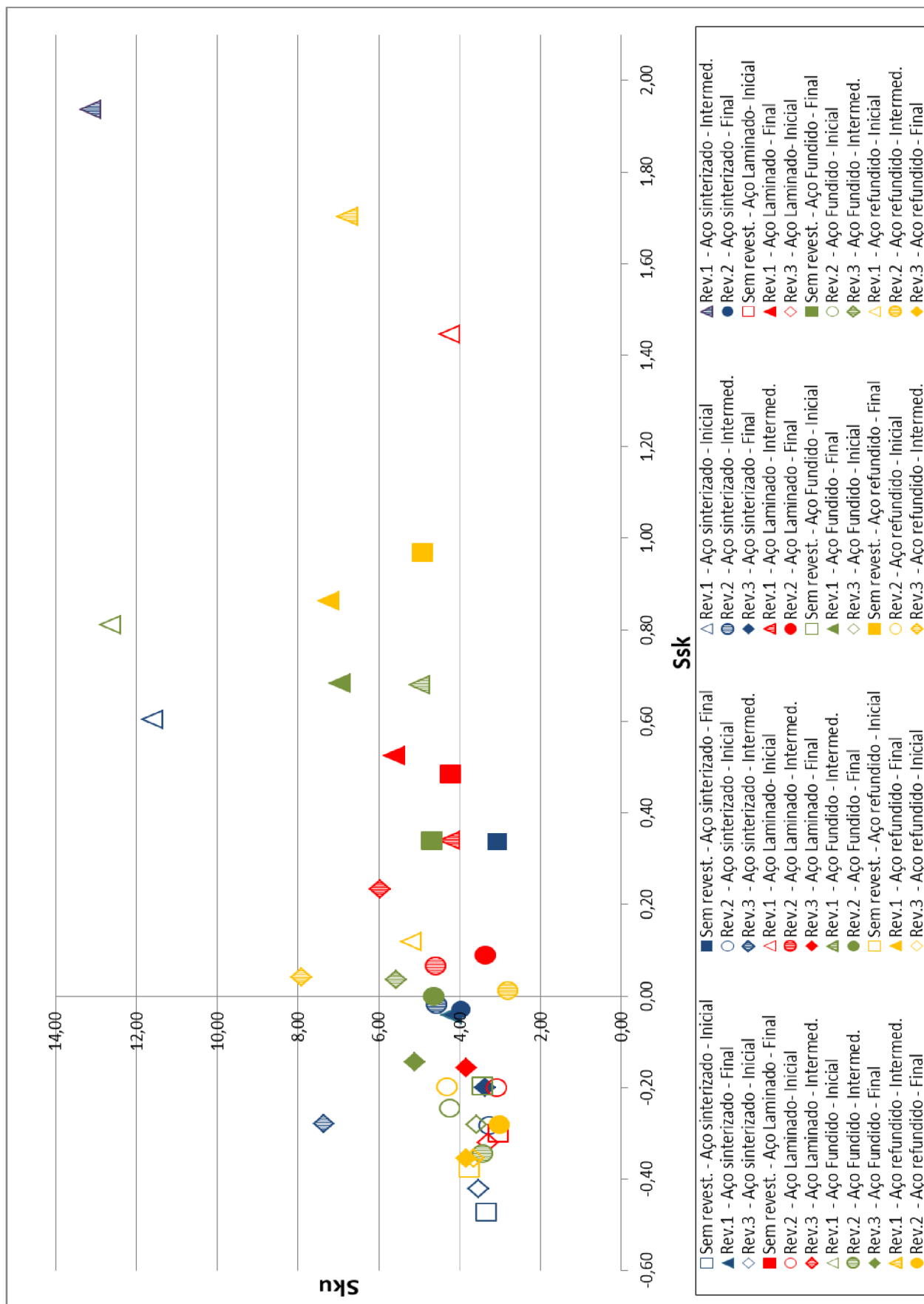


Figura 47- Espaço morfológico relativo a todas as ferramentas ensaiadas.

Na Figura 48, tem-se o espaço morfológico relativo às amostras antes dos ensaios de desgaste. Pode-se observar que com, exceção do Revestimento 1, todas as amostras iniciais se concentram no quadrante negativo de Ssk . Isto indica que estas superfícies têm por característica a predominância de vales em relação a picos, característico do processo de retificação pelo qual as ferramentas passaram antes da deposição do revestimento. Além disso elas mostram valores de Sku próximos de 3, o que é característico de superfícies com uma curva de distribuição das alturas da irregularidades gaussiana, como é o caso de superfícies retificadas. Isto confirma as observações anteriores que para os Revestimentos 2 e 3 a camada de deposição de revestimento acompanhou a rugosidade do substrato. O Revestimento 1 mostrou que todas as amostras se encontram no quadrante positivo de Ssk , evidenciando predominância de picos na sua condição inicial. Com relação ao parâmetro Sku , associado ao achatamento da curva de distribuição das alturas, as amostras com Revestimento 1 sinterizadas e fundidas apresentaram valores mais elevados, caracterizando curvas de distribuição mais ponteadas. Isso pode ocorrer quando existem, por exemplo, um pequeno número de irregularidades mais altas.

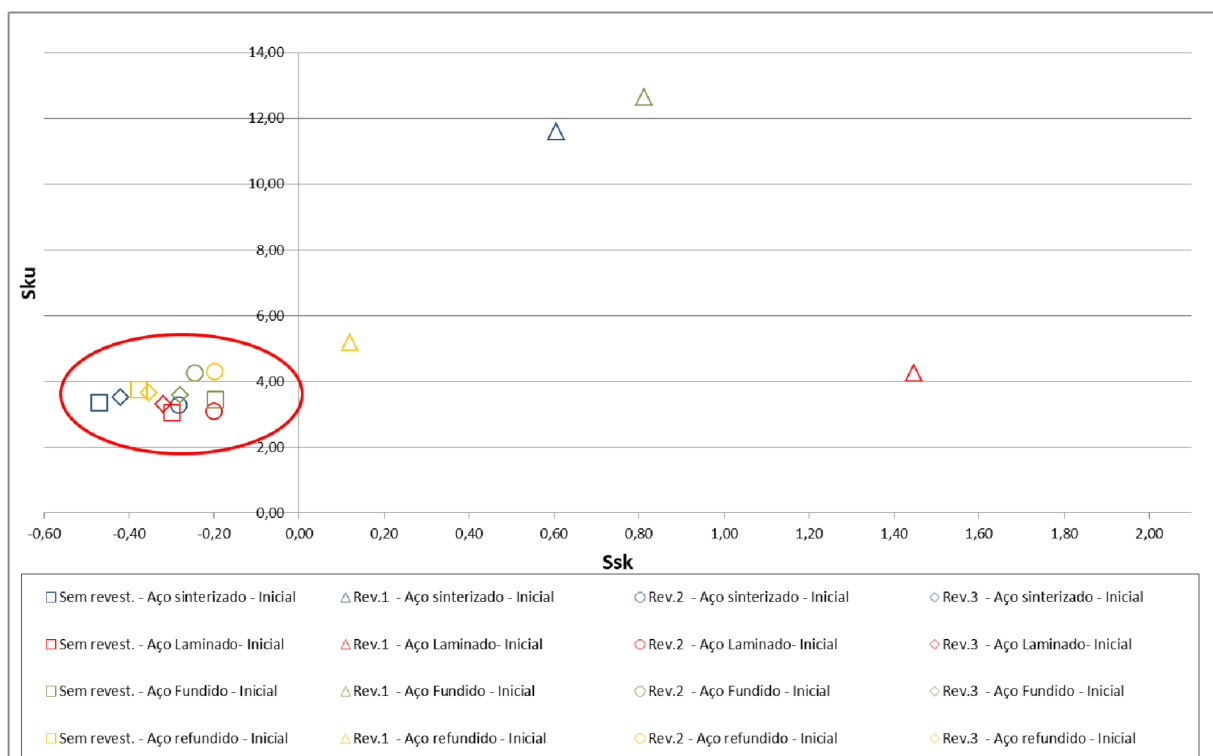


Figura 48 - Espaço morfológico relativo às ferramentas antes dos ensaios.

O espaço morfológico somente das ferramentas com revestimento 1 é apresentado na Figura 49. Todas as condições ensaiadas levaram a valores de S_{sk} positivos, mostrando uma predominância de platô-picos, mesmo nas condições desgastadas. Isso confirma que o desgaste, ao invés de predominantemente arrancar material da ferramenta, leva à transferência de material das peças para a ferramenta. Porém, o desgaste tendeu a reduzir um pouco os valores de S_{ku} , particularmente na condição final, provavelmente em função do material transferido levar à formação de protuberâncias relativamente lisas ao invés de mais ponteadas, o que deve tornar a distribuição das alturas um pouco mais gaussiana.

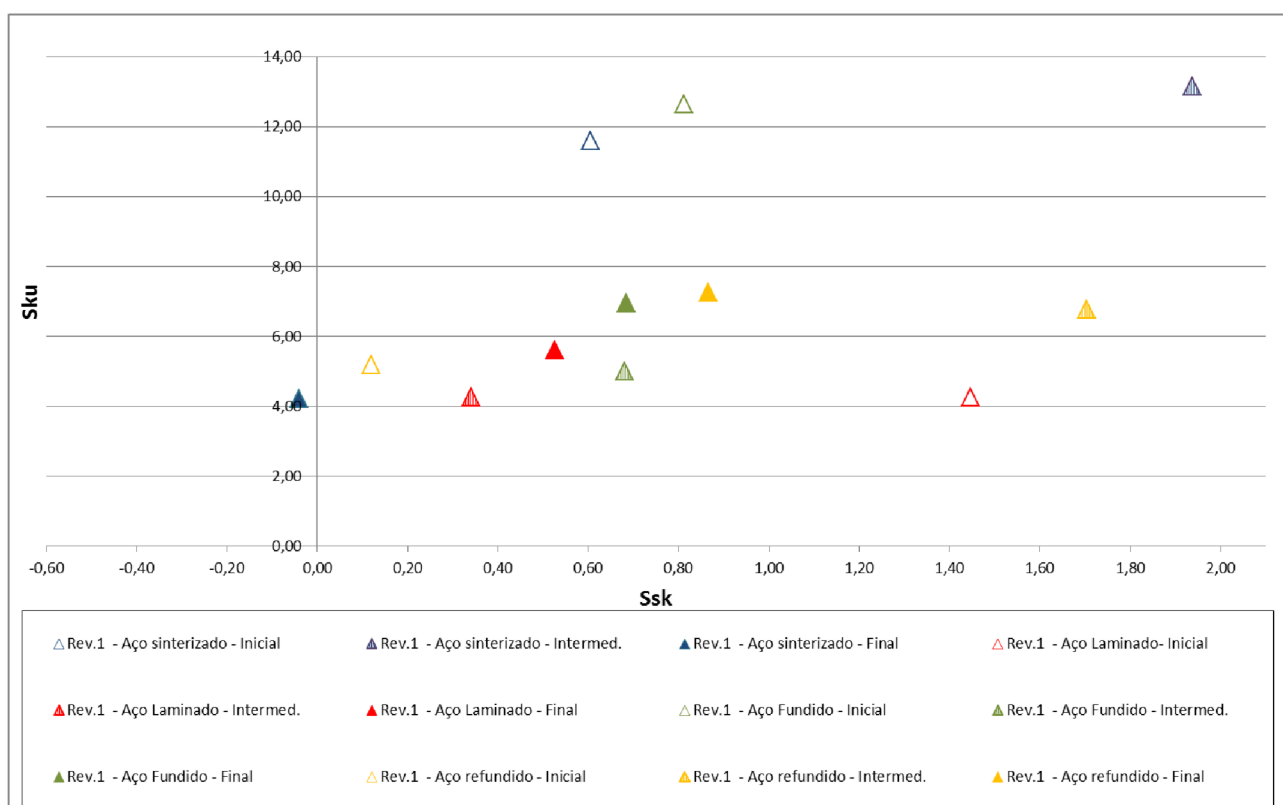


Figura 49- Espaço morfológico relativo às ferramentas com revestimento 1.

A Figura 50 apresenta o espaço morfológico das amostras com revestimento 2 nas condições inicial, intermediária e final. Não se observam tendências de variação quanto aos valores de S_{ku} em função dos ensaios de desgaste. Por outro lado, observa-se uma tendência que as amostras

desgastadas (condição intermediária e final) apresentem valores de S_{sk} próximos de zero, característicos de curvas de distribuição gaussianas, enquanto para as amostras não desgastadas os valores são predominantemente ligeiramente negativos. Em uma análise conjunta com as imagens via MEV, pode-se reforçar a hipótese da formação de uma camada transferida homogênea e facilmente deformada plasticamente através da pressão de contato local no decorrer do ensaio.

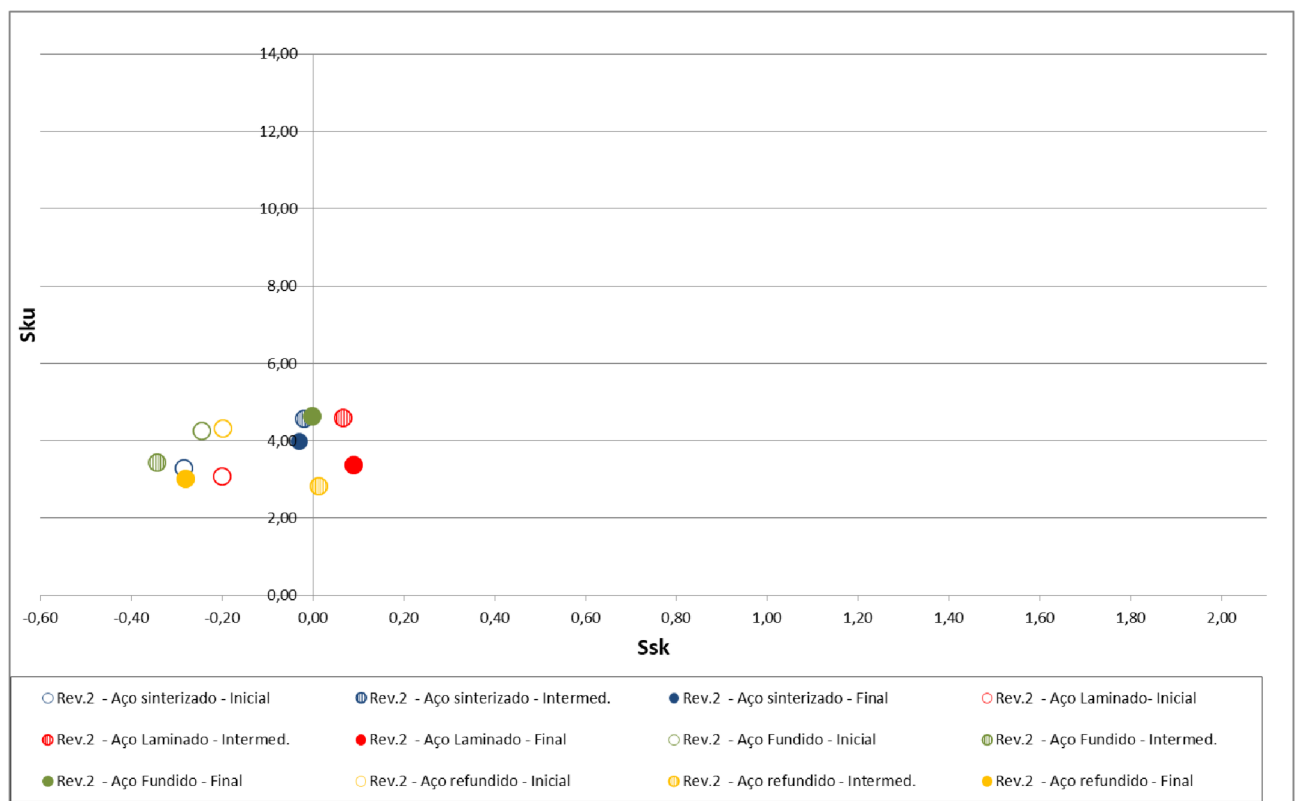


Figura 50 - Espaço morfológico relativo às ferramentas com revestimento 2.

A Figura 51 apresenta o espaço morfológico para o revestimento 3. Observa-se para as amostras desgastadas uma tendência de aumento nos valores de S_{ku} , o que normalmente está associado à presença de poucas irregularidades mais altas. Isto confirma as observações das imagens MEV, que indicaram a presença de material transferido nas ferramentas, mas que este material transferido não se espalhava sobre a superfície da ferramenta. Essa informação reforça a hipótese de uma dificuldade de deformação do material aderido anteriormente apresentado nas imagens via MEV. Na

condição final do Revestimento 3 o valor de Sku volta à mesma faixa de valores de Sku encontrada na condição inicial, podendo por hipótese ter ocorrido a suavização da topografia intermediária devido ao desgaste natural das proeminências e preenchimento dos vales.

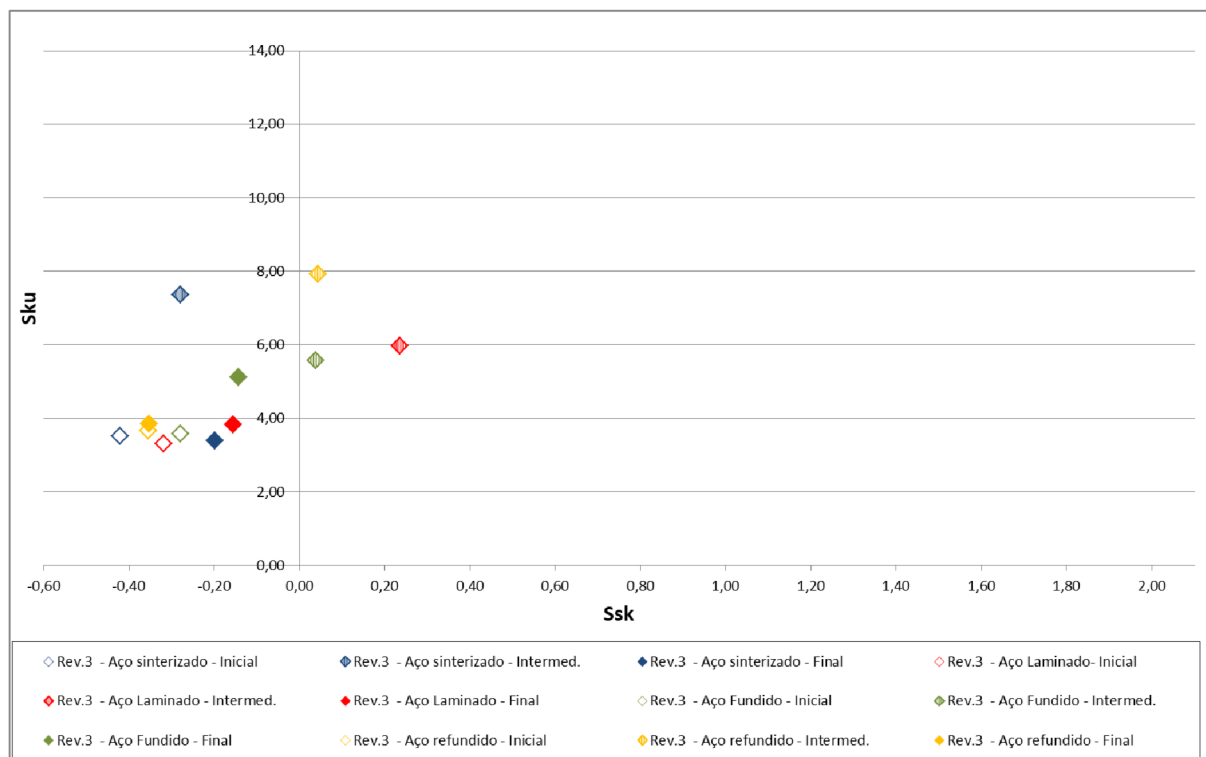


Figura 51 - Espaço morfológico relativo às ferramentas com revestimento 3.

Sumarizando os resultados relativos às condições morfológicas das ferramentas antes e após os ensaios de desgaste, as observações qualitativas fornecidas pelas imagens de MEV foram confirmadas quantitativamente pelas medições de topografia superficial. Antes dos ensaios, os níveis de rugosidade superficial eram muito semelhantes para os revestimentos 2 e 3, enquanto o revestimento 1 apresentou-se mais rugoso. Apesar disso, o comportamento em atrito apresentado pelas ferramentas revestidas com o revestimento 1 e 2 foram semelhantes e significativamente diferentes do revestimento.

Após os ensaios de estiramento, as superfícies desgastadas das ferramentas evidenciaram camadas transferidas para os três tipos de revestimentos. Para o revestimento 1, à base de VN, observou-se a maior

quantidade material transferido na ferramenta. Porém, este material transferido apresentou uma morfologia razoavelmente lisa e mostrou-se parcialmente oxidada. Além disso, o revestimento também sofreu oxidação pela ação do estiramento. As ferramentas revestidas com o Revestimento 2, que possuía uma estrutura multicamada constituída de CrN + TiN, também mostraram uma camada transferida lisa e parcialmente oxidada após o estiramento. Além disso, o estiramento expôs parcialmente a camada de CrN, a qual sofreu oxidação. As ferramentas com o revestimento 3, à base de TiAlN, apresentaram valores de atrito mais elevados e bastante instáveis, sugerindo constante competição entre a formação de uma camada transferida e a sua remoção. Essas regiões de material transferido mostraram-se pouco aderidas à superfície e pouco deformadas, ou seja, formavam protuberâncias relativamente pontiagudas na superfície das ferramentas.

A literatura normalmente reporta bom comportamento tribológico de revestimentos à base de VN, em particular baixos valores de coeficiente de atrito (Gassner et al., 2004) (Franz e Mitterer, 2013), o que tem sido associado à formação de óxidos de vanádio lubrificantes. De fato, as superfícies da ferramenta após os ensaios mostraram elevado teor de oxigênio. Porém, o revestimento não consegue evitar algum desgaste da chapa em função da elevada dureza da ferramenta quando comparada com a da chapa. As imagens de MEV mostram que os debris removidos da chapa são aglomerados, compactados, deformados, oxidados e transferidos à superfície da ferramenta. Aparentemente, este processo de transferência ocorre desde o estiramento da primeira chapa. Portanto, acredita-se que os baixos valores de coeficiente de atrito observados para o revestimento 1 devam-se à formação de óxidos de vanádio na superfície da ferramenta, mas também à formação de uma tribocamada razoavelmente lisa e oxidada, que ajuda a manter um coeficiente de atrito relativamente baixo apesar da transferência de material da peça na ferramenta. Assim, apesar da rugosidade inicial da ferramenta ser relativamente alta, o que aparentemente levou a maior transferência de material, essa camada transferida não comprometeu o comportamento tribológico das ferramentas.

Comportamento semelhante foi observado para o revestimento 2. Apesar de a camada mais superficial de TiN não ter sofrido oxidação significativa durante o estiramento, a camada intermediária de CrN foi bastante oxidada após os ensaios. Além disso, a camada transferida na ferramenta mostrou-se razoavelmente lisa a parcialmente oxidada, como observado para o revestimento 1. A maior diferença no comportamento dos revestimentos 1 e 2 foi que os valores de atrito medidos para o revestimento 2 mostraram-se mais estáveis para todas as condições de substrato, tanto para a primeira quanto a última chapa estiradas. Isso deve estar associado à menor rugosidade inicial do revestimento 2.

Já o revestimento 3 mostrou valores de atrito elevados e instáveis. As superfícies desgastadas mostraram camadas transferidas pouco aderidas às superfícies das ferramentas e pouco deformadas, apresentando-se em relevo. A literatura reporta uma elevada resistência à oxidação conferida de revestimentos TiAlN Hsieh *et al.*, 2006. De fato, as superfícies desgastadas das ferramentas mostraram ausência de oxidação. A presença de óxidos na superfície geralmente reduz a resistência ao cisalhamento na interface deslizante, o que pode justificar os maiores valores de coeficiente de atrito. Por outro lado, o comportamento instável do coeficiente de atrito também sugere que as regiões transferidas sejam facilmente removidas, o que é confirmado pelas imagens de MEV, que mostram pouca adesão, compactação e deformação das camadas transferidas. A baixa adesão da camada transferida à superfície da ferramenta pode estar associada à ausência de óxidos cobrindo essa superfície. Assim, os coeficientes de atrito mais elevados também podem ser devidos às protuberâncias causadas pelo material aderido, que não sofre intensa deformação, formando uma camada transferida de baixa capacidade de apoio, mas que pela sua morfologia pode levar a desgaste da chapa e eventualmente adesão com a chapa, causando engripamento entre ferramenta e peça. Dessa forma, apesar do revestimento 3 ter apresentado uma morfologia inicial mais lisa em função provavelmente de condições mais adequadas de deposição, ele levou ao pior desempenho tribológico das ferramentas, quando comparado aos outros dois revestimentos.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo central o estudo do comportamento tribológico de revestimentos comerciais amplamente utilizados pela indústria de conformação a frio. O entendimento das relações entre as condições iniciais, intermediárias e finais de ensaio para a identificação e análise dos mecanismos de desgastes foram analisadas através de ensaio de estiramento de chapas. Para o ensaio tribológico foi utilizado um equipamento desenvolvido pelo setor de P&D da empresa Bruning Tecnometal Ltda. Para os materiais e métodos utilizados no presente estudo, as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

- Os revestimentos à base de VN e à base de TiCrN apresentaram menores coeficientes de atrito e um melhor desempenho considerando a quantidade de tiras deslizadas. Este comportamento foi associado à formação de uma condição tribológica mais favorável de camadas de transferências lisas, parcialmente oxidadas, de relativamente baixo atrito que mitigou os efeitos do material aderido na ferramenta.
- O revestimento TiCrN teve um comportamento bastante estável ao longo de todos os ensaios, indicando ter sido atingida uma condição permanente de desgaste. Além disso, não foi observada variação significativa com o tipo de ferramenta. Assim, apesar de apresentarem valores de coeficientes de atrito médio semelhantes, o desempenho do revestimento TiCrN foi considerado superior ao do revestimento VN. O melhor comportamento do revestimento TiCrN comparado ao revestimento VN possivelmente está associado à sua menor rugosidade inicial.
- O revestimento TiAlN apresentou maiores valores de coeficiente de atrito, alta variabilidade nas medições de atrito e maior tendência a engripamento entre ferramenta e peça. A avaliação das superfícies desgastadas sugeriu que camadas transferidas protuberantes, pouco aderidas e deformadas levaram a instabilidades durante o estiramento, eventualmente levando a um intertravamento entre peça e ferramenta.

- O material da ferramenta fundido apresentou baixos valores de atrito para os revestimento VN para a primeira chapa estirada. Provavelmente o menor valor de atrito pode estar associado com superfície inicialmente mais rugosa da ferramenta, que auxilia em uma transição mais rápida do processo de formação da camada transferida. Porém, após um elevado número de chapas ensaiadas a grande quantidade de material transferido aumentou os valores de atrito comparado às demais ferramentas.
- O material da ferramenta fundido apresentou inicialmente elevados valores de atrito para o revestimento TiAlN. Provavelmente o resultado está associado com uma superfície inicialmente mais rugosa da superfície fundida, mas essas diferenças desapareceram com o aumento do número de chapas ensaiadas.
- Para os materiais da ferramenta sinterizado, laminado e refundido não se observou uma diferença significativa nos valores de coeficiente de atrito ou na morfologia das superfícies desgastadas para cada tipo de revestimento.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como possibilidades de continuidade desse trabalho, sugere-se:

- Avaliar os mecanismos de desgaste nas chapas ensaiadas por MEV, EDS e interferometria ótica.
- Avaliar a primeira chapa deslizada por MEV e EDS.
- Utilizar a metodologia desenvolvida para avaliar o comportamento tribológico de para outras possíveis combinações de chapa e revestimentos. Em particular, citam-se chapas de alumínio e aço inoxidável.
- Investigar o efeito da topografia superficial da ferramenta no seu comportamento tribológico. Em particular no caso do revestimento VN, sugere-se a investigação de revestimentos com um acabamento superficial mais liso. Além disso, pode-se avaliar como topografias superficiais controladas, como é o caso de ferramentas texturizadas, afetam o comportamento tribológico.
- Avaliar o comportamento tribológico dos revestimentos utilizando-se diferentes pressões de contato.
- Avaliar o efeito de diferentes lubrificantes no comportamento tribológico das ferramentas revestidas

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREASEN, J. L.; BAY, N.; DE CHIFFRE, L. Quantification of galling in sheet metal forming by surface topography characterisation. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 38, n. 5-6, p. 503-510, 1998. ISSN 0890-6955.

AZAR, G. T. P.; ER, D.; ÜRGEN, M. The role of superimposing pulse bias voltage on DC bias on the macroparticle attachment and structure of TiAlN coatings produced with CA-PVD. **Surface and Coatings Technology**, v. 350, p. 1050-1057, 2018. ISSN 0257-8972.

AZUSHIMA, A.; KUDO, H. Direct Observation of Contact Behaviour to Interpret the Pressure Dependence of the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming. **CIRP Annals**, v. 44, n. 1, p. 209-212, 1995/01/01/ 1995. ISSN 0007-8506. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607623099> >.

BIROL, Y. Sliding wear of CrN, AlCrN and AlTiN coated AISI H13 hot work tool steels in aluminium extrusion. **Tribology International**, v. 57, p. 101-106, 2013/01/01/ 2013. ISSN 0301-679X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X12002721> >.

BOWDEN, F. P.; BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The friction and lubrication of solids**. Oxford university press, 2001. ISBN 0198507771.

BRESCIANI FILHO, E. et al. **Conformação plástica dos metais**. Ed da Unicamp, 1997.

BUDINSKI, K. G. Incipient galling of metals. **Wear**, v. 74, n. 1, p. 93-105, 1981/12/08/ 1981. ISSN 0043-1648. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164881901964> >.

BUDINSKI, K. G.; BUDINSKI, M. K.; KOHLER, M. S. A galling-resistant substitute for silicon nickel. **Wear**, v. 255, n. 1-6, p. 489-497, 2003. ISSN 0043-1648.

CARLSSON, P.; OLSSON, M. PVD coatings for sheet metal forming processes—a tribological evaluation. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 14, p. 4654-4663, 2006/04/10/ 2006. ISSN 0257-8972. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897204011326> >.

DE SOUZA, J.; LIEWALD, M. Analysis of the tribological behaviour of polymer composite tool materials for sheet metal forming. **Wear**, v. 268, n. 1-2, p. 241-248, 2010. ISSN 0043-1648.

FIGUEIREDO, L. et al. Experimental study of friction in sheet metal forming. **Wear**, v. 271, n. 9-10, p. 1651-1657, 2011. ISSN 0043-1648.

FRANZ, R.; MITTERER, C. Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: A review. **Surface and Coatings Technology**, v. 228, p. 1-13, 2013. ISSN 0257-8972.

GASSNER, G. et al. A new low friction concept for high temperatures: lubricious oxide formation on sputtered VN coatings. **Tribology Letters**, v. 17, n. 4, p. 751-756, 2004. ISSN 1023-8883.

GONÇALVES JR, J. L.; DE MELLO, J. D. B.; COSTA, H. L. Wear in cold rolling milling rolls: A methodological approach. **Wear**, v. Accepted for publication, 2019.

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

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. P. B. Contact of nominally flat surfaces. **Proc. R. Soc. Lond. Ser. A**, v. 295, p. 300-319, 1966.

HARLIN, P. et al. Influence of surface roughness of PVD coatings on tribological performance in sliding contacts. **Surface and coatings Technology**, v. 201, n. 7, p. 4253-4259, 2006. ISSN 0257-8972.

HSIEH, J.; TAN, A.; ZENG, X. Oxidation and wear behaviors of Ti-based thin films. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 7, p. 4094-4098, 2006. ISSN 0257-8972.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 0081009518.

KIRKHORN, L. et al. Improved tribotesting for sheet metal forming. **Procedia CIRP**, v. 3, p. 507-512, 2012. ISSN 2212-8271.

LONARDO, P. M.; LUCCA, D. A.; DE CHIFFRE, L. Emerging Trends in Surface Metrology. **CIRP Annals**, v. 51, n. 2, p. 701-723, 2002/01/01/ 2002. ISSN 0007-8506. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607617089> >.

LUGSCHEIDER, E. et al. Comparison of the structure of PVD-thin films deposited with different deposition energies. **Surface and Coatings Technology**, v. 86, p. 177-183, 1996. ISSN 0257-8972.

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, Oct 2000. ISSN 0043-1648. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000090046900014 >.

MONTMITONNET, P.; DELAMARE, F.; RIZOULIERES, B. Transfer layer and friction in cold metal strip rolling processes. **Wear**, v. 245, n. 1, p. 125-135, 2000/10/01/ 2000. ISSN 0043-1648. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164800004737> >.

PODGORNIK, B.; HOGMARK, S.; PEZDIRNIK, J. Comparison between different test methods for evaluation of galling properties of surface engineered tool surfaces. **Wear**, v. 257, n. 7-8, p. 843-851, 2004. ISSN 0043-1648.

PODGORNIK, B.; HOGMARK, S.; SANDBERG, O. Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 184, n. 2-3, p. 338-348, 2004. ISSN 0257-8972.

RIGNEY, D. A. Comments on the sliding wear of metals. **Tribology International**, v. 30, n. 5, p. 361-367, 1997/05/01/ 1997. ISSN 0301-679X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X96000655> >.

ROBERTS, G. A.; KENNEDY, R.; KRAUSS, G. **Tool steels**. ASM international, 1998. ISBN 1615032010.

SCHEDIN, E. Galling mechanisms in sheet forming operations. **Wear**, v. 179, n. 1-2, p. 123-128, 1994. ISSN 0043-1648.

SCHEY, J. A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear. **Journal of Applied Metalworking**, v. 3, n. 2, p. 173-173, January 01 1984. ISSN 0162-9700. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/BF02833697> >.

VETTER, J. et al. Hard coatings for lubrication reduction in metal forming. **Surface and Coatings Technology**, v. 86, p. 739-747, 1996. ISSN 0257-8972.

VOELKNER, W. Present and future developments of metal forming: selected examples. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 106, n. 1-3, p. 236-242, 2000. ISSN 0924-0136.