

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

**EVOLUÇÃO DA TOPOGRAFIA SUPERFICIAL E FENÔMENOS TRIBOLÓGICOS
EM CHAPAS LAMINADAS A FRIO SUBMETIDAS A ENSAIO DE ATRITO PLANO
COM FERRAMENTAS REVESTIDAS COM PVD**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PRISCILA FAGUNDES LEAL

RIO GRANDE, RS

2024

PRISCILA FAGUNDES LEAL

**EVOLUÇÃO DA TOPOGRAFIA SUPERFICIAL E FENÔMENOS TRIBOLÓGICOS
EM CHAPAS LAMINADAS A FRIO SUBMETIDAS A ENSAIO DE ATRITO PLANO
COM FERRAMENTAS REVESTIDAS COM PVD.**

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

Orientadora: Profa. Dra. Henara Lilian Costa Murray

Co- orientador: Prof. Dr. João Henrique Correa de Souza

Rio Grande,RS

2024.

Ficha Catalográfica

L435e Leal, Priscila Fagundes.

Evolução da topografia superficial e fenômenos tribológicos em chapas laminadas a frio submetidas a ensaio de atrito plano com ferramentas revestidas com PVD / Priscila Fagundes Leal. – 2024.
89 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2024.

Orientadora: Dra. Henara Lilian Costa Murray.

Coorientador: Dr. João Henrique Correa de Souza.

1. Chapa Laminada 2. Ferramenta 3. Estiramento 4. Atrito
5. Desgaste 6. MEV 7. Conformação a frio 8. Estampagem
9. Topografia de Superfície I. Murray, Henara Lilian Costa II. Souza, João Henrique Correa de III. Título.

CDU 621

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 2/2024 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e dois dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e quatro, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às oito horas, online via web conferência, a que se submeteu a mestranda **Priscila Fagundes Leal**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **EVOLUÇÃO DA TOPOGRAFIA E FENÔMENOS TRIBOLÓGICOS EM CHAPAS LAMINADAS A FRIO SUBMETIDAS A ENSAIO DE ATRITO PLANO COM FERRAMENTAS REVESTIDAS COM PVD**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Henara Lilian Costa Murray, Fábio Augusto Dornelles do Amaral e o convidado Diego Tolotti de Almeida sob a presidência da Professora Henara Lilian Costa Murray. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Henara Lilian Costa Murray: Aprovado
2. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: Aprovado
3. Diego Tolotti de Almeida: Aprovado

Foi concedido um prazo de 60 dias para o candidato 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:

Documento assinado digitalmente
gov.br HENARA LILLIAN COSTA MURRAY
Data: 29/02/2024 15:15:59-0300
Verifique em <https://validar.itb.gov.br>

1. _____
CPF: 847.359.106-20

Documento assinado digitalmente
gov.br FÁBIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL
Data: 22/02/2024 13:16:09-0300
Verifique em <https://validar.itb.gov.br>

2. _____
CPF: 905.700.220-53

3. Diego Tolotti de Almeida
CPF: 010.687.950-26

Priscila Fagundes Leal:

Priscila Fagundes Leal

*Dedico este trabalho aos meus Avós paternos e Pais de criação e coração Lenita
Martins Leal e Ubirajara Costa Leal (In Memoriam).*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus. Sem Ele eu não chegaria até aqui.

Agradeço a todo apoio, incentivo e paciência do meu esposo, Diego de Andrade França e à minha amada filha Larissa Leal França por entender, embora tão pequenina, a minha presença parcial ao longo dos anos de mestrado.

Agradeço ao Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl por todo o incentivo durante estes anos que além de professor, é para mim, um exemplo de educador.

Agradeço aos colegas do Lapes: à técnica Thaís e ao estagiário Felipe Luz, o qual se tornou um grande amigo.

Agradeço à Empresa Bruning Tecnometal LTDA pela disponibilização de toda estrutura e materiais necessários 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 necessárias no decorrer do trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. João Henrique por compartilhar comigo todo o seu conhecimento e me apresentar à conformação mecânica de modo que eu me apaixonasse.

E agradeço, em especial, à Orientadora Professora Dra. Henara Lillian por toda a paciência, dedicação e disponibilidade nestes anos de mestrado. Durante este tempo tornou-se uma fonte de inspiração pessoal e principalmente profissional.

Resumo

O processo de estampagem implica em contato direto metal-metal entre ferramenta e peça sendo essencial a presença do atrito para que a conformação ocorra. Com isto, o desgaste peça-ferramenta torna-se inevitável, mesmo que natural, para que o processo aconteça. De forma auxiliar no controle do atrito e do desgaste no processo de estampagem, ferramentas de conformação a frio foram retificadas e submetidas à 3 tipos de revestimentos: Revestimento 1(VN), Revestimento 2 (TiCrN) e Revestimento 3 (TiAlN). O presente trabalho teve o intuito de analisar os fenômenos tribológicos ocorridos nas chapas ensaiadas contra ferramentas com e sem revestimento. Primeiramente, foi constatada através de espectrofotômetro, ensaio de dureza Vickers e imagem obtida via microscopia ótica o tipo de chapa laminada que foi extraída da bobina laminada NBR5915 utilizada para a realização dos ensaios de atrito, sendo sugerido pelos resultados obtidos que a chapa é um aço carbono SAE 1020. Foi realizada a caracterização inicial das amostras de chapas não ensaiadas, retiradas diretamente da bobina e das chapas ensaiadas contra as ferramentas com e sem revestimento via microscopia eletrônica de varredura (MEV) e via espectroscopia de dispersão de raio-X (EDS), sendo confirmada a hipótese de que as imagens observadas para as chapas ensaiadas contra ferramentas sem revestimento acompanhariam as características dos substratos das ferramentas, ocorrendo *galling* em algumas chapas. Arrancamento e transferência de material também foram observados. Já as chapas ensaiadas contra as ferramentas revestidas tiveram como desgaste características mais provenientes dos revestimentos, sendo o desgaste não tão severo quando das chapas ensaiadas contra as ferramentas não revestidas. Entretanto, para as chapas ensaiadas contra revestimento 1, observou-se arrancamento de material e presença de pequenos debris, assim como para os revestimentos 2 e 3, em menor proporção. A topografia superficial das chapas também foi quantificada por microscopia confocal invertida de varredura a laser. Os parâmetros de superfície evidenciaram, no geral, uma condição mais rugosa (parâmetro S_q) para as chapas ensaiadas contra ferramentas sinterizadas e posteriormente retificadas (não revestidas). O parâmetro S_z não apresentou variações estatisticamente significativas para as chapas, bem como os valores de S_{bi} . Os parâmetros S_{ku} e S_{sk} apresentaram valores maiores para as chapas ensaiadas sem revestimento retificadas por processo de fundição. Resumindo, tanto a microscopia eletrônica de varredura quanto a microscopia confocal evidenciaram algum efeito do substrato das ferramentas não revestidas na morfologia das chapas ensaiadas, mas para as ferramentas revestidas as diferenças de morfologia nas chapas não foram significativas.

Palavras-chave: Chapa Laminada, Ferramenta, Estiramento, Atrito, Desgaste, MEV, Conformação a frio, Estampagem, Desgaste, Topografia de Superfície.

Abstract

The stamping process involves direct metal-to-metal contact between tool and part, making the presence of friction essential for forming to occur. As a result, part-tool wear becomes inevitable, even if natural, for the process to take place. To help control friction and wear in the stamping process, cold forming tools were ground and subjected to 3 types of coatings: Coating 1 (VN), Coating 2 (TiCrN) and Coating 3 (TiAlN). The present work aimed to analyze the tribological phenomena occurring in the sheets tested against tools with and without coating. Firstly, the type of laminated sheet that was extracted from the NBR5915 laminated coil used to carry out the friction tests was verified using a spectrophotometer, Vickers hardness test and an image obtained via optical microscopy SAE 1020 carbon. The initial characterization of the untested sheet samples, taken directly from the coil and the sheets tested against the tools with and without coating, was carried out via scanning electron microscopy (SEM) and via X-ray dispersion spectroscopy (EDS), confirming the hypothesis that the images observed for the sheets tested against uncoated tools would follow the characteristics of the tool substrates, with galling occurring in some sheets. Pulling out and material transfer were also observed. The sheets tested against coated tools had wear characteristics that are more likely to come from the coatings, with the wear not being as severe as that of the sheets tested against uncoated tools. However, for the sheets tested against coating 1, material pulling out and the presence of small debris were observed, as well as for coatings 2 and 3, to a lesser extent. The surface topography of the sheets was also quantified by inverted confocal laser scanning microscopy. The surface parameters showed, in general, a rougher condition (parameter S_q) for the sheets tested against sintered and subsequently ground (uncoated) tools. The S_z parameter did not present statistically significant variations for the plates, as well as the S_{bi} values. The S_{ku} and S_{sk} parameters presented higher values for the tested sheets without coating rectified by the casting process. In summary, both scanning electron microscopy and confocal microscopy showed some effect of the substrate of the uncoated tools on the morphology of the tested sheets, but for the coated tools the differences in morphology on the sheets were not significant.

Keywords: Rolled Sheet, Tool, Stretching, Friction, Wear, SEM, Cold Forming, Stamping, Wear, Surface Topography.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	18
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1. Processos de Fabricação	19
3.1.2. Conformação de chapas ou estampagem	21
3.1.3. Mecanismos de atrito de desgaste.....	23
3.1.4. Revestimentos para ferramentas	26
3.2. Aspectos tribológicos da conformação.....	31
3.2.1. Atrito e desgaste	31
3.2.2. Camada de transferência	33
3.2.3. Experimentos de atrito na literatura	34
3.2.4. Desgaste por deslizamento e desgaste abrasivo	38
3.2.5. Ensaio de deslizamento com ferramentas revestidas	44
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	47
4.1. Materiais e Métodos para os Ensaio de Atrito	50
4.1.1. Corpos de prova das chapas	50
4.1.2. Corpos de prova das ferramentas.....	51
4.2. ENSAIOS DE ATRITO	53
4.2.1. Caracterização Topográfica das Chapas	56
5.1. Organização, identificação e caracterização inicial das amostras.....	58
5.2.1. Chapas Ensaioadas contra Ferramentas de Revestimento 1	66
5.2.2. Mecanismos de Desgaste para as Chapas Ensaioadas contra Revestimento 2	68
5.2.3. Mecanismos de Desgaste para Chapas Ensaioadas Contra Ferramentas de Revestimento 3	69
5.2.4. Topografia de superfície das chapas	71
6. CONCLUSÕES	82
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO CONFORME A NORMA DIN- 8580, ADAPTADO DE (SOUZA 2021).	21
FIGURA 2. SOLICITAÇÕES MECÂNICAS EM UMA PEÇA ESTAMPADA	23
FIGURA 3. PARTES ATIVAS DA MÁQUINA DE ESTAMPAGEM QUE ENTRAM EM CONTATO COM A CHAPA; ADAPTADO DE METAL FORMING HANDBOOK (GMBH. 1998).	24
FIGURA 4. MODELO DE ATRITO POR CRESCIMENTO DE JUNÇÃO, PROPOSTO POR	25
FIGURA 5. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO EM DIFERENTES	29
FIGURA 6. MICROGRAFIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DAS SUPERFÍCIES COM REVESTIMENTO DEPOSITADO USANDO APENAS ALTA VOLTAGEM DE PULSO POLARIZADA. IMAGENS OBTIDAS POR ELÉTRONS SECUNDÁRIOS VIA MEV – ADAPTADO DE MONTMITONNET (AZAR 2018) POR TAVARES (TAVARES 2019).	30
FIGURA 7. SUPERFÍCIE EM CONTATO, ADAPTAÇÃO DE FIGUEIREDO (AZUSHIMA 1995).	33
FIGURA 8. DUAS CONFIGURAÇÕES DE ENSAIO PARA AVALIAR COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DURANTE CONFORMAÇÃO: (A) ENSAIO DE VARREDURA CILINDRO-CILINDRO; (B) ENSAIO DE ESTIRAMENTO - BUDINSKI (FIGUEIREDO 2011).	36
FIGURA 9. ENSAIOS 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 KIRKHORN (PODGORNIK, HOGMARK ET AL. 2004).	37
FIGURA 10. ESQUEMATIZAÇÃO ILUSTRATIVA DO CONCEITO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO APRESENTADO POR KIRKHORN (KIRKHORN, FROGNER ET AL. 2012).	38
FIGURA 11. ENSAIO TRIBOLÓGICO DE ATRITO DE CHAPAS UTILIZADO.	39
FIGURA 12. PROPORÇÃO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E DA ADESÃO EM DIFERENTES VELOCIDADES DE DESLIZAMENTO, ADAPTADO BUDINSKI ET AL. (BONNET 2008).	40
FIGURA 13. MECANISMOS DE DESGASTE DE DESLIZAMENTO E ABRASÃO ADAPTADO DE HUTCHINGS (HUTCHINGS AND SHIPWAY 2017).	41
FIGURA 14. PERFIS DE RUGOSIDADE FILTRADOS OBTIDOS EM ETAPAS EQUIDISTANTES	42
FIGURA 15. RUGOSIDADE DE FERRAMENTAS NOVA E DESGASTADA E RESPECTIVAS RUGOSIDADES DOS CONTRAS- CORPOS APÓS ENSAIO ADAPTADO DE MONTMITONNET, P. (MONTMITONNET, DELAMARE ET AL. 2000).	43
FIGURA 16. 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) ADAPTADO DE FRANZ (HARLIN 2006).	44
FIGURA 17. MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTOS DEPOSITADOS A TEMPERATURAS DE 250E 330°C: (A) EVAPORAÇÃO POR FEIXE DE ELÉTRONS (B) SPUTTERING, (C) EVAPORAÇÃO ARCO ARC-PVD ADAPTADO DE LUGSCHEIDER ET AL. (LUGSCHEIDER, BARIMANI ET AL. 1996)	47
FIGURA 18. FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.	50
FIGURA 19. REPRESENTAÇÃO DO CORPO DE PROVA DE CHAPA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE ATRITO (TAVARES 2019).	51
FIGURA 20- CORPO DE PROVA DA FERRAMANTA, POR TAVARES (TAVARES 2019).	52
FIGURA 21. MICROESTRUTURA DENDRÍTICA DE FUSÃO- A) DE AÇO FUNDIDO, POR	53
FIGURA 22. EQUIPAMENTO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	55
FIGURA 23. ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA PARA	55
FIGURA 24. ESQUEMA DO CABEÇOTE MÓVEL E SISTEMA DE AQUISIÇÃO.	56
FIGURA 25. MICROSCOPIA ÓTICA DA AMOSTRA DE CHAPA RETIRADA DA BOBINA NBR 5915 APÓS ATAQUE COM NITAL 4%, 6S.	59
FIGURA 26. MICROSCOPIA ÓTICA DA AMOSTRA DE CHAPA RETIRADA DA BOBINA NBR 5915 APÓS ATAQUE COM NITAL 4%, 6S EVIDENCIANDO GRÃOS DE FERRITA E PERLITA.	59
FIGURA 27. MICROSCOPIA ÓTICA DA AMOSTRA DE CHAPA RETIRADA DA BOBINA NBR 5915 SEM ATAQUE QUÍMICO, EVIDENCIANDO INCLUSÕES NÃO METÁLICAS PRESENTES NA MICROESTRUTURA.	60
FIGURA 28. IMAGENS DAS CHAPAS ENSAIADAS CONTRA FERRAMENTAS SEM REVESTIMENTO (TEMPERADAS) MEDIDAS POR MEV: À ESQUERDA VIA ELÉTRONS SECUNDÁRIOS E À DIREITA VIA ELÉTRONS RETROESPALHADOS, RESPECTIVAMENTE (CHAPAS ENSAIADAS CONTRA AS FERRAMENTAS A, B- AÇO FUNDIDO 1; C, D- AÇO SINTERIZADO 2; E, F- AÇO SINTERIZADO 3; G, H- AÇO REFUNDIDO; I, J- AÇO FUNDIDO 2; K, L- AÇO SINTERIZADO 1).	62
FIGURA 29- IMAGEM OBTIDA VIA MEV DA CHAPA ENSAIDA.	63
FIGURA 30- IMAGEM DA CHAPA ENSAIDA CONTRA A FERRAMENTA	64
FIGURA 31. IMAGENS DAS CHAPAS ENSAIADAS CONTRA FERRAMENTAS	66

FIGURA 32. IMAGENS DAS CHAPAS ENSAIADAS CONTRA FERRAMENTAS DE REVESTIMENTO 1 OBTIDAS VIA MEV- A) AÇO SINTERIZADO 1 ; B) AÇO SINTERIZADO 2; C) AÇO SINTERIZADO 3; D) AÇO FUNDIDO 1; E) AÇO FUNDIDO 2; F) AÇO REFUNDIDO; G) AÇO LAMINADO 1; H) AÇO LAMINADO 2; I) AÇO LAMINADO 2.	68
FIGURA 33. IMAGENS DAS CHAPAS ENSAIADAS CONTRA FERRAMENTAS DE REVESTIMENTO 2 OBTIDAS VIA MEV - A) AÇO SINTERIZADO 1; B) AÇO SINTERIZADO 2; C) AÇO SINTERIZADO 3;	69
FIGURA 34. IMAGENS DAS CHAPAS ENSAIADAS CONTRA FERRAMENTAS DE REVESTIMENTO 3: A) AÇO SINTERIZADO 1; B) AÇO FUNDIDO 1; C) AÇO REFUNDIDO.....	70
FIGURA 35- IMAGEM OBTIDA VIA MEV, AÇO SINTERIZADO 1.....	70
FIGURA 36- IMAGEM VIA MEV, AÇO FUNDIDO 1.	71
FIGURA 37- IMAGEM OBTIDA VIA MEV- AÇO REFUNDIDO.	71
FIGURA 38. EXEMPLO DE MAPA TOPOGRÁFICO DA CHAPA ENSAIADA CONTRA FERRAMENTA SINTERIZADA 1 SEM REVESTIMENTO.	72
FIGURA 39. EXEMPLO DE MAPA TOPOGRÁFICO DA CHAPA ENSAIADA CONTRA FERRAMENTA DE REVESTIMENTO 1 SINTERIZADA.	73
FIGURA 40. EXEMPLO DE MAPA TOPOGRÁFICO DA CHAPA ENSAIADA CONTRA FERRAMENTA DE	73
FIGURA 41. EXEMPLO DE MAPA TOPOGRÁFICO DA CHAPA ENSAIADA CONTRA FERRAMENTA DE REVESTIMENTO 3 SINTERIZADA.	74
FIGURA 42- PARÂMETRO S_Q REFERENTE A CHAPAS E FERRAMENTAS ENSAIADAS COM E SEM REVESTIMENTO.	76
FIGURA 43- PARÂMETRO S_Z REFERENTE A CHAPAS E FERRAMENTAS ENSAIADAS COM E SEM REVESTIMENTO.	77
FIGURA 44- PARÂMETRO S_{BI} REFERENTE A CHAPAS E FERRAMENTAS ENSAIADAS COM E SEM REVESTIMENTO.	78
FIGURA 45- PARÂMETRO S_M PARA CHAPAS ENSAIADAS CONTRA FERRAMENTAS COM E SEM REVESTIMENTO.	79
FIGURA 46. PARÂMETRO S_{SK} DAS CHAPAS ENSAIADAS E FERRAMENTAS SEM E COM REVESTIMENTO.	80
FIGURA 47- PARÂMETRO S_{KU} PARA AS CHAPAS ENSAIADAS CONTRA AS FERRAMENTAS REVESTIDAS E NÃO REVESTIDAS.....	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CONTEÚDO RELATIVO DA COMPOSIÇÃO EM MASSA DE CADA COMPONENTE E MATERIADO AUTOMÓVEL - UNILIVRE, ANO 2005 KRUMENAUER E BATALHA [3].	12
TABELA 2. RUGOSIDADE DA FERRAMENTA E COEFICIENTES DE ATRITO DOS ENSAIOS DE ESTIRAMENTO E CILINDRO-CILINDRO - BUDINSKI [43].	33
TABELA 3. PROJETO DOS EXPERIMENTOS (DOE).....	45
TABELA 4. PARÂMETROS DO PROCESSO (DOE)	46
TABELA 5. FATORES CONTROLÁVEIS DO PROCESSO (DOE).....	46
TABELA 6. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS FERRAMENTAS SINTERIZADOS, LAMINADOS, ...	49
TABELA 7. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CHAPA NÃO ENSAIADA.....	55
TABELA 8. VALORES DE MEDIÇÃO DE DUREZA, MÉDIA DOS VALORES E DESVIO PADRÃO CALCULADOS.....	57
TABELA 9. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CHAPAS ENSAIADAS CONTRA AS FERRAMENTAS AÇOFUNDIDO 1 E AÇO SINTERIZADO 2 OBTIDAS VIA EDS.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

BSE: imagem obtida via elétrons retroespalhados

BUT: bending-under-tension

CA-PVD: deposição física a vapor por arco catódico

DLC: Diamond-like carbon

EDS: espectroscopia de energia dispersiva

FN: força normal

FA: força de atrito

MEV: microscópio eletrônico de varredura

P&D: Pesquisa e desenvolvimento

PVD: deposição física a vapor

S_{bi}: parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à capacidade de suporte mecânico da superfície

SE: imagem obtida via elétrons secundários

S_{ku}: parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo ao achatamento da curva de distribuição de alturas da topografia (Kurtosis)

S_m: parâmetro de rugosidade tri-dimensional volumétrico relativo ao volume de material da superfície

S_{pk}: parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à altura dos picos mais proeminentes da superfície

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

S_{sk}: parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à simetria da curva de distribuição de alturas da topografia (Skewness)

S_z: 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

μ : coeficiente de atrito

1. INTRODUÇÃO

A indústria metal mecânica no Brasil possui um mercado competitivo, o que exige produções de peças em larga escala, alta qualidade e baixo custo. Os processos de conformação de chapas metálicas são utilizados neste setor com a finalidade de mudar a forma original das mesmas, transformando-as em inúmeras outras formas significantes para o setor industrial (BRESCIANI 2011, BRESCIANI FILHO 1997). Geralmente, a fabricação de uma grande variedade de peças acabadas é alvo de indústrias automotivas, de máquinas agrícolas, aeronaves, construção civil e outras.

Inserida no mercado mundial, a indústria metal mecânica brasileira se depara com a busca de alternativas para minimizar custo de produção devido à existência de taxas cambiais, busca de tecnologia melhorada e matéria prima otimizada (Portella 2012). No ramo de veículos, pode-se mostrar, de acordo com a publicação feita pela Unilivre em 2005, como exemplo, a porcentagem de metal contida em um automóvel. Na Tabela 1 a seguir, é notada uma grande quantidade de metal na composição mássica do carro quando relacionada aos outros componentes existentes na fabricação do veículo.

Tabela 1. Conteúdo relativo da composição em massa de cada componente e material do automóvel - Unilivre, ano 2005 (Krumenauer and Batalha 2007).

Componentes / Materiais	Composição mássica relativa no carro
Metais	82,48%
Pneus	4,25%
Vidros	3,35%
Não Metálicos	2,96%
Plásticos	1,68%
Borracha	1,42%
Bateria	1,29%
Espuma	1,29%
Chicote Elétrico	0,52%
Óleos	0,42%
Tecido	0,31%

Na conformação de chapas, as ferramentas usadas para estampo de metais acabam sofrendo desgaste natural devido ao atrito existente no decorrer do processo. Por este motivo, a importância do estudo dos fenômenos de desgaste ocorrentes na estampagem torna-se essencial. Trabalhos na literatura têm mostrado que alguns tipos de revestimentos comerciais depositados pelo processo de deposição física a vapor (PDV) são eficazes e podem minimizar o desgaste.

Uma vez que o contato entre peça e ferramenta é fundamental na estampagem, o conhecimento das condições de atrito, das propriedades dos materiais e da geometria da peça a ser conformada e suas variáveis são importantes a fim de controlar ou reduzir o desgaste das ferramentas usadas no processo de estampagem, de forma que neste tipo de conformação de chapas metálicas, as forças de atrito retratam uma condição de extrema importância para a execução dos processos.

O ferramental utilizado em processos de conformação é de grande interesse da Engenharia de Superfícies devido às características tribológicas específicas encontradas nestes processos. Portanto busca-se sempre melhorar o ferramental para obter menores coeficientes de atrito, desgaste e adesão de material sobre a superfície da ferramenta, sendo empregadas diversas técnicas de tratamentos superficiais como a nitretação e os revestimentos depositados via PVD - (Kempski, dos Santos et al. 2014).

A geração de atrito é fundamental para que ocorra uma conformação mecânica e o desgaste por causa do contato ferramenta-peça torna-se inevitável. Logo, pode-se dizer que o desgaste diminui se a dureza superficial da peça for aumentada depositando sobre ela uma camada de filme fino, o qual é formado, geralmente, por materiais cerâmicos de dureza bastante elevada e baixa afinidade em relação às peças que serão conformadas - (MENDES 2009).

O atrito precisa ser controlado para garantir menor gasto de energia e condições de conformação mais estáveis, apesar do atrito ser fundamental para que a conformação possa ocorrer, e por esse motivo não deve ser reduzido excessivamente - (A.F. Tavares 2021).

Uma maneira eficaz de verificar atrito e desgaste no decorrer da conformação, é aumentar a resistência ao desgaste de ferramentas, revestindo-as com revestimentos duros. Os revestimentos duros têm como benefício melhorar a qualidade superficial do produto conformado, mas também diminuir o desgaste das ferramentas- (VETTER 1996).

Para a conformação a frio, as ferramentas de conformação são geralmente protegidas contra desgaste através de revestimentos depositados por PVD. A utilização deste processo de deposição é comumente empregado devido permitir temperaturas mais baixas para a deposição, em torno de 250°C a 500°C, mantendo assim, as propriedades mecânicas originais do substrato- (MENDES 2009).

O processo PVD, consiste em evaporar um material sólido por aquecimento, por feixe de elétrons ou por íons ou por íons positivos, e depois deposita-los no substrato- (Smith and Hoffman 1996). Na atualidade, a maioria dos revestimentos aplicados por PVD é formado por DLC, tendo como exemplo por Nitretos (TiN, CrN, TiAlN); Carbetos (TiC, CrC), Óxidos (alumina), ou ainda a combinação destes como TiAlN-(MENDES 2009).

Trabalhos na literatura têm mostrado que alguns tipos de revestimentos comerciais depositados por PDV são eficazes e podem minimizar o desgaste.

O comportamento e o desempenho tribológicos de ferramentas de conformação revestidas e não revestidas utilizadas em operações industriais de conformação foram analisados e uma metodologia para caracterização das superfícies das ferramentas antes, durante e depois dos ensaios de atrito foi desenvolvida no trabalho realizado por (TAVARES 2019). Neste estudo, oito ferramentas foram retificadas e depois revestidas através do processo PVD com três tipos de revestimentos: VN (Revestimento 1), TiCrN (Revestimento 2) e TiAlN (Revestimento 3), sendo cada ferramenta classificada de acordo com seu processo de fabricação primeiramente e após a avaliação da natureza dos revestimentos e o efeito da topografia dos mesmos. A caracterização topográfica inicial possibilitou Tavares a identificar uma condição mais rugosa para o Revestimento VN enquanto os Revestimentos TiCrN e TiAlN acompanharam a topografia do substrato. Já os ensaios de atrito mostraram um melhor desempenho para o TiCrN por apresentar menores coeficientes de atrito com valores bastante estáveis ao longo de todos os ensaios. O pior comportamento foi

observado para o revestimento TiAlN, embora este tenha apresentado uma superfície mais lisa inicialmente. Pelos motivos mencionados, hipóteses surgiram para descobrir como o material da chapa foi transferido para a ferramenta e vice-versa através dos fenômenos da adesão ou abrasão formando uma tribocamada. Devido ao surgimento destas hipóteses, a verificação dos fenômenos tribológicos ocorridos na superfície das chapas ensaiadas tornou-se uma incógnita.

Este trabalho tem o intuito de dar continuidade ao trabalho de Tavares (TAVARES 2019), de forma a analisar a evolução do atrito nas amostras de chapas para conformação a frio e submetidas a ensaios de atrito plano com ferramentas revestidas, visando correlacionar o desempenho tribológico de cada amostra de chapa em relação às ferramentas deslizadas em cada ensaio. O objetivo foi incrementar um método para caracterizar amostras antes, durante e depois de ensaios de atrito e correlacionar os resultados com o atrito das ferramentas utilizadas para os mesmos através de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão de raios-X (EDS) e informações topográficas das superfícies de amostras das chapas.

2. OBJETIVOS

Este trabalho intenciona constatar o quanto as condições de superfície da ferramenta e da chapa no atrito e os fenômenos de adesão e de transferência de material influenciam durante a conformação mecânica pelo método de ensaio de atrito plano do tipo *Strip Drawing Test* simulando processo de conformação de chapas, em especial a estampagem tendo como objetivo específico correlacionar os mecanismos de desgaste ocorridos nas chapas com os ocorridos nas ferramentas em ensaios de atrito. Para tanto, as etapas a seguir devem ser efetuadas:

- Analisar e caracterizar os mecanismos de desgaste, os quais ocorrem na superfície de chapas devido ao atrito, e os feitos de adesão ocorridos nas mesmas relacionando-os às condições tribológicas presentes em processos de estampagem;
- Definir uma sistemática a fim de aplicar os métodos de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Confocal para obter interferometrias das chapas e assim identificar os fenômenos de desgaste e definir parâmetros de superfícies das chapas;
- Comparar os mecanismos de desgaste identificados nas superfícies das chapas com os mecanismos de desgaste observados nas ferramentas;
- Calcular os resultados dos parâmetros de superfície das chapas e compará-los com os parâmetros de superfície calculados das ferramentas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Processos de Fabricação

Os Processos de Fabricação destinam-se a dar forma (geométrica, dimensional e acabada superficialmente) ao metal puro ou liga metálica. Além disso, visam conferir ao produto um conjunto de propriedades exigidas para aperfeiçoar seu desempenho: resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste -Breciani Filho (BRESCIANI FILHO 1997).

3.1.1. Processos de fabricação por conformação

Segundo a norma DIN8580 (1985), por conformação em geral entende-se a alteração controlada da forma, da superfície e das propriedades mecânicas do material de um determinado corpo, mantendo-se, porém, a sua massa e composições químicas originais. A Conformação Mecânica é um processo que altera a geometria do material através de forças aplicadas por ferramentas adequadas que podem variar desde pequenas matrizes até grandes cilindros, como os empregados na laminação.

A norma DIN- 8580 informa, ainda que os processos de fabricação dividem-se em seis grupos, de acordo com a Figura 1:

- Criação de Forma - com criação de volume (grupo 1);
- Modificação de Forma - com volume constante (grupo 2), com redução de volume (grupo 3), com aumento de volume (grupo 4 e grupo 5);
- Modificação das propriedades-Alteração das propriedades mecânicas sem mudança de forma (grupo 6).

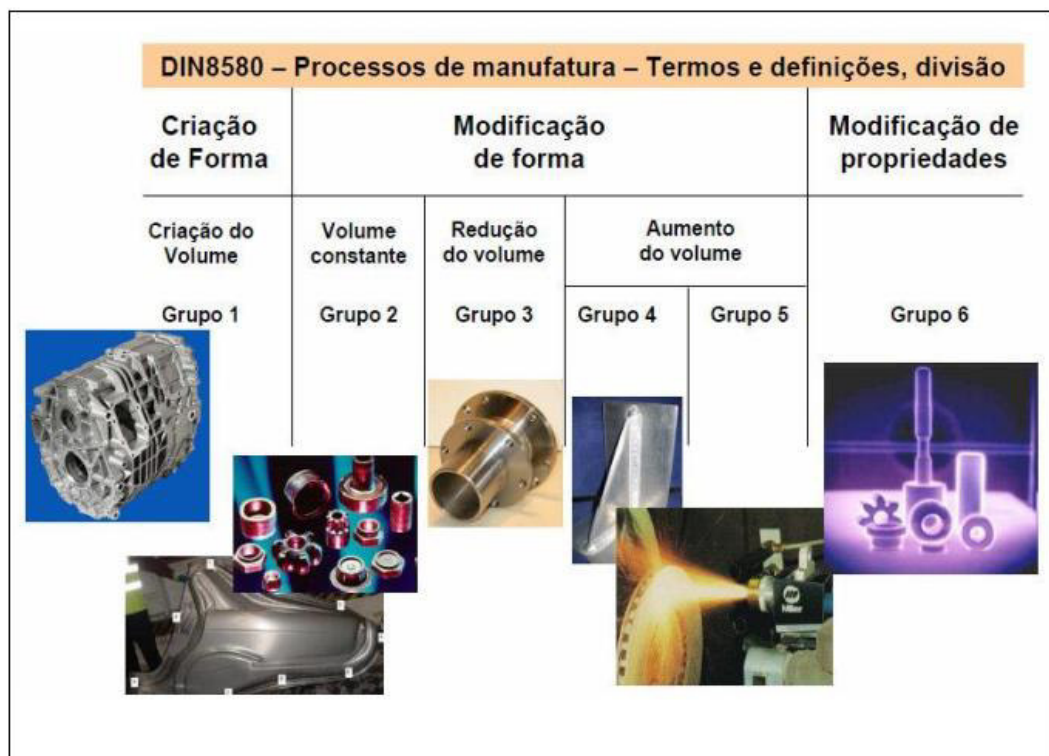


Figura 1. Classificação dos processos de conformação conforme a norma DIN-8580, adaptado de (SOUZA 2021).

A fim de fabricar um grande número de peças semelhantes, garantindo a alta produtividade a baixo custo, utiliza-se a conformação de chapa – (Voelkner 2000). Materiais de elevada dureza são pressionadas contra os componentes a serem deformados, para que tal conformação seja realizada. Escolher um material adequado para a fabricação de ferramentas de conformação requer cuidado, tendo em vista que as mesmas apresentam impacto direto e exigem um aumento vida útil da ferramenta a fim de evitar paradas no processo de fabricação industrial. Uma das maneiras de avaliar o desempenho de ferramentas é através do número de peças produzidas por ferramenta- (Martins 2019).

Na técnica de fabricação de peças por conformação plástica a partir de chapas, o processo de corte da chapa sempre está presente. Contudo, as operações de conformação plástica da peça são sempre feitas a partir de um pedaço de chapa cortada, que se pode denominar disco ou esboço - a segunda denominação se refere Brea uma forma qualquer. Normalmente as operações de conformação de chapas são efetuadas a frio, utilizando-se como matéria prima laminados delgados de aço, ligas

de alumínio, ligas de cobre e outros materiais- (BRESCIANI 2011).

Os processos de conformação podem ser classificados em quatro tipos: quanto ao produto semi -acabado, quanto ao tipo de solicitação, quanto à temperatura e quanto à aplicação da força. A conformação exige muito das ferramentas, o que gera desgaste excessivo -(Portella 2012).

3.1.2. Conformação de chapas ou estampagem

Na indústria metal- mecânica, a estampagem é usualmente utilizada como processo importante de conformação de chapas metálicas. As vantagens deste tipo conformação de metal consistem em alta produtividade, baixo custo por peça, consumo mínimo de materiais e energia e melhoria de qualidades materiais, que estimulam o aumento de sua aplicação-(Voelkner 2000).

A conformação de chapas ou estampagem envolve menores deformações, menores graus de encruamento e requer menores forças envolvidas, em relação à conformação massiva. São processos de estampagem: Corte, Dobramento, Embutimento e Estiramento. Nesse tipo de processo, verifica-se invariavelmente a ação de um dispositivo da ferramenta denominado prensa-chapas ou sujeitador, que ocasiona o surgimento de esforços adicionais- (SOUZA 2021).

Define- se processos de estampagem como uma sequência ou conjunto de processos de deformação plástica realizados sobre a matéria-prima, que consiste em uma chapa metálica plana, com o objetivo de alterar sua forma e propriedades mecânicas. A conformação de chapas pode ser feita através de diferentes temperaturas de processo. Normalmente as operações de conformação de chapas são efetuadas a frio, utilizando-se como matéria prima laminados delgados de aço, ligas de alumínio, ligas de cobre e outros materiais- (BRESCIANI 2011).

O processo de estampagem exige solicitações mecânicas que definem o comportamento da peça no decorrer do método. A cada momento do processo, estados de tensão e deformação são aplicados em diferentes regiões. Vários fatores de processo são responsáveis pelo tipo de comportamento do estado de tensão tais como: geometria das ferramentas, condições de atrito, tamanho da peça, que produz

um estado de tensão e deformação multiaxial- (BRESCIANI 2011).

As solicitações mecânicas que ocorrem em uma peça estampada por embutimento são mostradas em diferentes regiões na Figura 2.

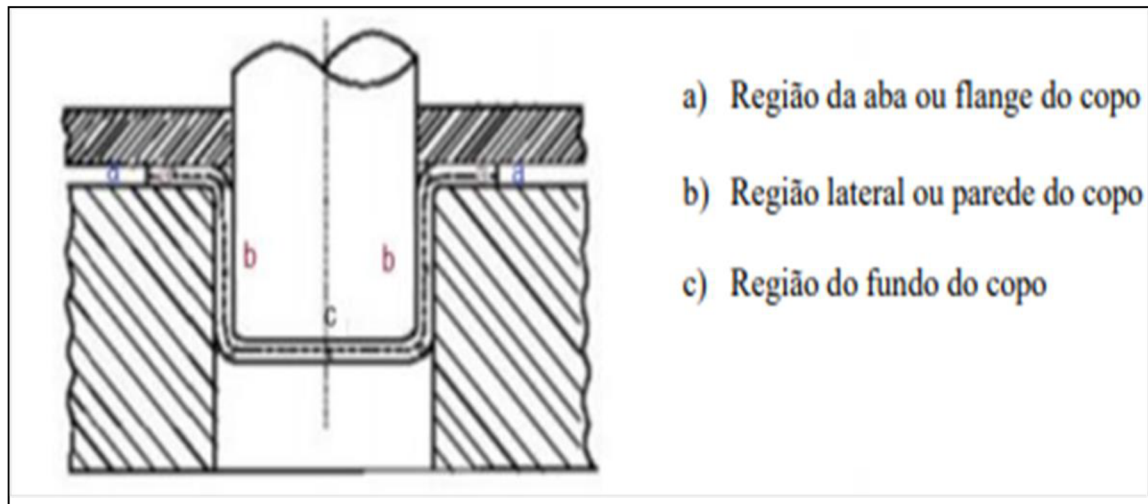


Figura 2. Solicitações mecânicas em uma peça estampada pelo método de embutimento. Adaptado de Bresciani Filho (BRESCIANI 2011).

O processo de estampagem mecânica é denominado um conjunto de operações de conformações mecânicas de chapas que produzem produtos acabados ou semiacabados por meio de deformação plástica, que distribui o material pela matriz de forma a não ocorrer nenhum tipo de falha. Porém, há fatores que serão significativos na qualidade do produto conformado, como o retorno elástico- conhecido como *springback*, a falta de rigidez, rugosidade da superfície entre outros- (CRIVELLARO 2003).

As partes ativas da máquina de estampagem são as ferramentas que realizam a operação de corte, isto é, são as partes da máquina que entram em contato direto com a chapa- (SOUZA 2021). De acordo com a Figura 3, as partes ativas são constituídas em punção, matriz e prensa-chapa.

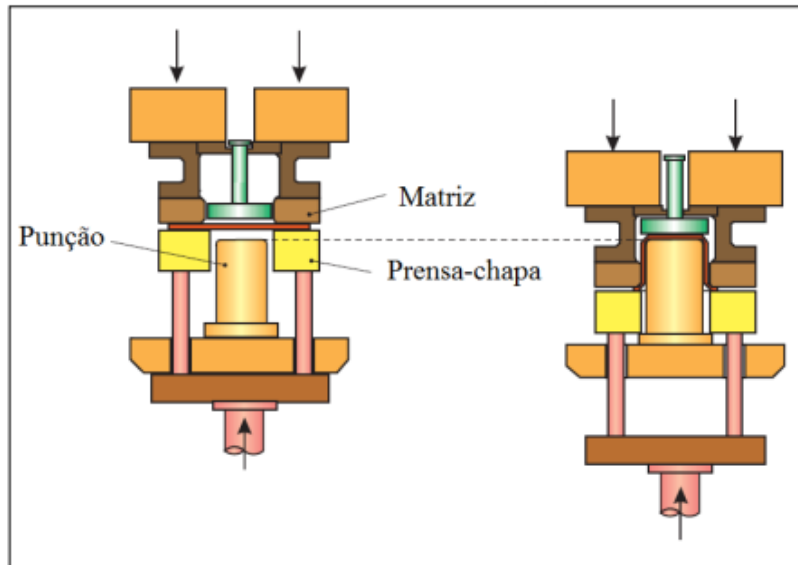


Figura 3. Partes ativas da máquina de estampagem que entram em contato com a chapa; Adaptado de Metal forming handbook (GmbH. 1998).

A técnica de estampagem requer conhecimento sobre os materiais a serem estampados, o manejo destes materiais, a fabricação de matrizes, as informações a respeito do projeto e dos limites de deformação e as tensões de contato dos materiais e o tipo de lubrificação viável aos mesmos porque envolve diversas variáveis de sistema referentes às características do material (mecânica da deformação plástica, ao equipamento, ao estado da interface ferramenta) e principalmente às condições ambientais.

3.1.3. Mecanismos de atrito de desgaste

Conforme o seu uso gradativo, as ferramentas de conformação desgastam devido ao atrito, adesão ou abrasão gerados entre peça e ferramenta durante o processo, embora o atrito seja essencial para que a conformação ocorra.

O atrito pode ser classificado como um trabalho redundante, mas extremamente necessário, a fim de empregar parte da energia na deformação plástica do material e não somente superar a resistência imposta pelo atrito.

Em 1699, Amontons propôs o atrito na forma de leis básicas, onde a primeira diz que força de atrito é proporcional à força normal e a segunda lei do atrito onde exalta que

a força de atrito é independente da área aparente, mas depende da área real de contato. 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. Na época atual, define-se o atrito como uma força de resistência tangencial entre a fronteira de dois corpos que tendem ao movimento relacionado às suas superfícies de contato, de acordo com Schey (SCHEY 1984).

Um modelo proposto por BOWDEN (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 junções apresentado por (Hutchings and Shipway 2017) considera a hipótese de que o estado de tensão na interface é uniaxial (em um único eixo) e representa o contato entre as durezas conforme a Figura 4.

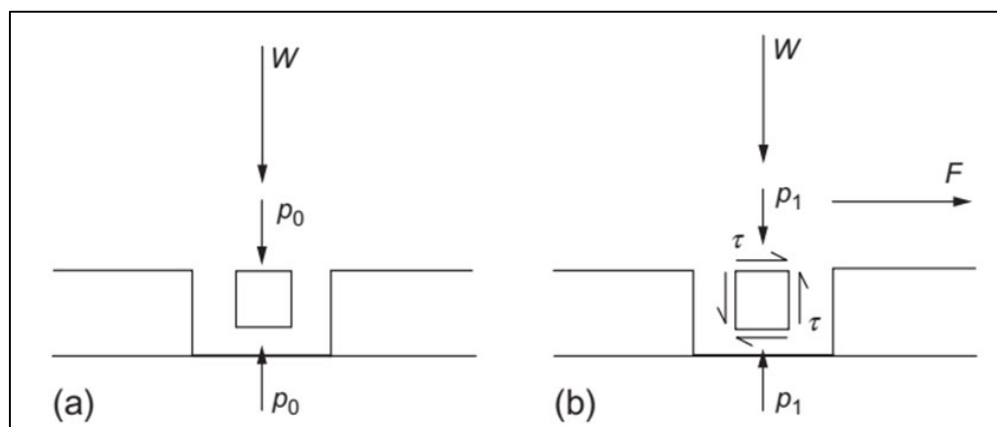


Figura 4. Modelo de atrito por crescimento de junção, proposto por Hutchings (Hutchings and Shipway 2017).

À medida em que a força Normal aumenta a área de contato também aumenta e os picos são atenuados. As junções das asperezas crescem até que sejam capazes de suportar a carga aplicada e, desta maneira, ligações adesivas formam-se nos pontos de contato, o que se chama de crescimento de junções. Quando uma força tangencial é aplicada, essas ligações adesivas devem ser quebradas, e superar a força de cisalhamento das ligações resulta na força de atrito- (Barcelos 2019).

Ao frisar que o coeficiente de atrito não é constante e que não é uma propriedade do material e sim do sistema, assumimos que, conseqüentemente, a força de atrito também é uma propriedade do sistema e que depende: das forças de adesão de origem interatômicas (Van der Waals, metálicas, eletrostáticas), da deformação elástica e plástica devido às forças mecânicas no contato, da química das superfícies, das condições de contato (velocidade, pressão e temperatura) e topografia das superfícies, além da presença de um terceiro corpo na interface do contato (contaminantes, óxidos, filmes absorvidos, partículas retidas, etc.) ou de lubrificantes- (Farias 2017). Todas as condições de sistema citadas são condições às quais um processo de conformação está sujeito. Devido à complexidade das mesmas, fica difícil correlatar todas as variáveis e ao mesmo tempo definir um modelo matemático significativo para definir o atrito ocorrido na interface ferramenta-metal, o que constantemente leva à necessidade da determinação do mesmo de modo experimental para propósitos distintos - Budinski (TAVARES 2019).

Sabendo que o desgaste é inevitável nos processos de estampagem e que a resistência ao mesmo é indispensável para o aumento da vida da ferramenta, é necessário avaliar o desempenho da ferramenta periodicamente. Para isto, quantificar o número de peças produzidas por ferramenta se torna uma alternativa para o controle do desgaste destas. Por conta disto verifica-se, periodicamente, o estado da ferramenta.

A vida útil da ferramenta chega ao fim, de acordo com Budinski (TAVARES 2019) , quando as suas peças conformadas possuem a rugosidade aumentada e o material desgastado é aderido, podendo danificar o produto.

3.1.4. Revestimentos para ferramentas

O processo PVD, que consiste em evaporar um material sólido por aquecimento por feixe de elétrons ou por íons positivos, e depositá-lo no substrato foi definido por HSIEH et al. (Smith and Hoffman 1996).

Uma alternativa, publicada por Vetter (VETTER 1996), a fim de avaliar o aumento da vida útil da ferramenta é usar ferramentas cobertas com revestimentos rígidos depositados por PVD (deposição física a vapor). Foi observada pelos autores, como benefícios do método, a redução do uso de lubrificantes em 85% da concentração de aditivo, o aumento da velocidade de trabalho em 2%, a redução dos custos de produção e dos processos de lavagem do processo.

Atualmente, o método de deposição física a vapor (PDV) é o mais utilizado para revestir as ferramentas de conformação a frio. O estudo feito por Mendes (MENDES 2009) que os filmes em ferramentas de conformação a frio são depositadas pelo método de deposição física a vapor, tendo em vista que este processo permite a deposição dos filmes a temperaturas de aproximadamente 250°C a 500°C, fazendo com que os substratos não percam suas propriedades mecânicas devido a um aquecimento excessivo.

Os revestimentos de TiN, bem como expõem os autores em Lugscheider et al. (HSIEH 2006), possuem baixa resistência a oxidação (aproximadamente 600°C), coeficiente de atrito moderadamente alto e dureza pouco elevada. Por estas razões, os revestimentos de TiN são pouco indicados para algumas situações e para otimizar as propriedades do mesmo, certos elementos químicos foram adicionados. A adição destes elementos resultou em revestimento tais como: TiCN, TiAlN, TiSiN, AlTiN, TiCNO.

Em conformidade com Lugscheider, Barimani et al. (1996), pode-se dizer que a qualidade de deposição dos revestimentos está associada aos benefícios contidos nas propriedades tribológicas dos revestimentos.

Na pesquisa de Panjan et al. (Eriksson 2011), foi mencionado que a dureza do substrato tem uma forte influência no desgaste dos revestimentos PVD e, conseqüentemente, nas características de atrito e na tendência de desgaste do

compósito revestimento/substrato. Segundo os autores, a baixa dureza do substrato, resultando em uma baixa capacidade de carga, aumenta a tendência a rachaduras e subsequentemente lascas do revestimento quebradiço.

Mesmo que a deposição de revestimentos seja uma ação benéfica às ferramentas de conformação, a proteção posta é incapaz de extinguir com todos os fatores causadores do desgaste nas superfícies revestidas- (Murakawa, Koga et al. 1995) e (Panjan, Čekada et al. 2009).. Defeitos como sulcos, picos, poros e vazios são originados durante o processo de deposição, além disso, seus tamanhos, formas e quantidades dependem das condições de deposição. Entretanto, deve-se salientar que os defeitos citados não são incentivados pela presença de riscos ou asperezas do substrato ou por resíduos de polimento (sujeiras) ou até mesmo pelo próprio processo de deposição.

O estudo de(Murakawa, Koga et al. 1995) refere-se à produção de 5000 peças de alumínio por estampagem sem lubrificação, com uma ferramenta revestida por DLC (Diamond- Like carbon) contra a produção de 5 peças sem lubrificação nem revestimento, confirmando que os revestimentos em ferramentas facilitam na produção de peças. Os autores mostram em seu trabalho que o revestimento DLC em ferramenta capacita a mesma a operar sem a necessidade de um agente lubrificante a fim de minimizar o desgaste.

O comportamento de revestimentos de TiN, TiAlN e AlCrN depositados sobre aços para ferramentas de usinagem deslizando contra AISI 4140 foi estudado por Carlsson et al. (Claudin, Rech et al. 2008). Ao observar a Figura 5, os autores constaram coeficientes de atrito menores nos revestimentos em que o Al está presente.

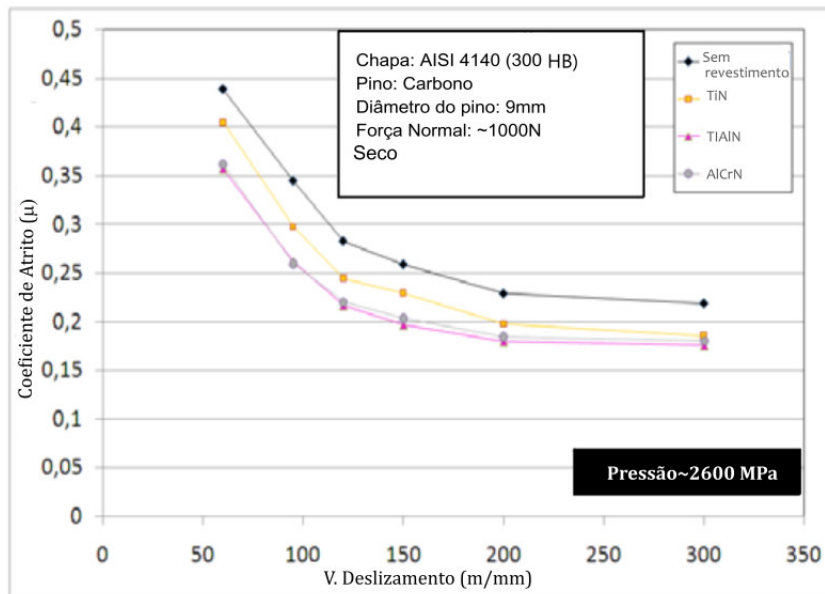


Figura 5. Influência da velocidade de deslizamento em diferentes Revestimentos adaptado de Carlsson (Claudin, Rech et al. 2008).

A dureza do revestimento foi conferida como um dos principais fatores na melhora do desempenho tribológico no ensaio de pino contra disco realizado por Birol (CARLSSON 2006). Neste ensaio tribológico, os autores compararam o desenvolvimento de revestimento de CrN e DLC (diamond-like-carbon) com contra-corpo de alumínio.

Revestimentos de CrN e TiAlN também foram confrontados utilizando o mesmo tipo de ensaio tribológico por Azar et al. (Birol 2013), de forma atribuir o melhor revestimento entre eles: TiAlN foi o revestimento conferido como o mais apropriado devido à sua maior dureza e à sua compatibilidade química com o contra-corpo.

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 propriedades estruturais foram realizadas por Montmitonnet et al. (AZAR 2018), no entanto, os autores não superfície rugosa inadequada, com inúmeras macropartículas (MPs), ilustradas pela figura 5. Para poderem e beneficiar-se dos efeitos favoráveis da corrente pulsada de alta tensão para ajustar as propriedades microestruturais dos revestimentos, a polarização de correntes contínua de alta tensão foi aplicada durante todo o processo de deposição do revestimento de forma constante para resolver o problema encontrado.

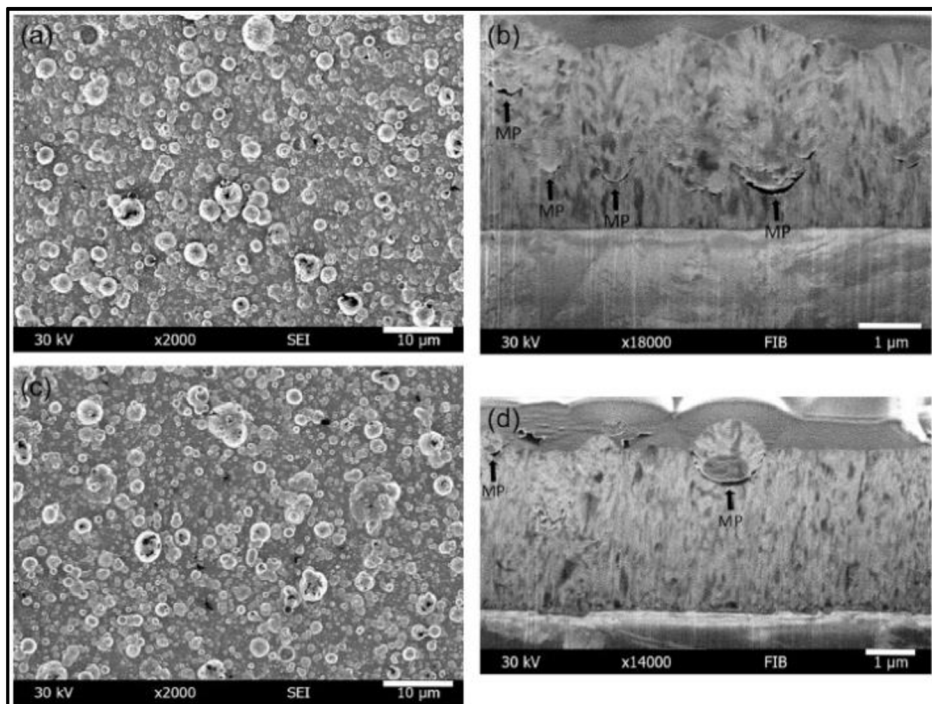


Figura 6. Micrografia da secção transversal das superfícies com revestimento depositado usando apenas alta voltagem de pulso polarizada. Imagens obtidas por elétrons secundários via MEV – adaptado de Montmitonnet (AZAR 2018) por Tavares (TAVARES 2019).

Como resultado, uma estrutura colunar mais densa e fina com redução substancial de MPs foi observada através deste modo de aplicação. Também notou-se que a temperatura do substrato aumentou proporcionalmente com aumento da magnitude do pulso, mas não aumentou acima de 460 °C. Em resposta, as macropátículas MP foram minimizadas e uma estrutura mais densa dos revestimentos foi obtida. Como resultado, obteve-se a diminuição das macropátículas MP e estrutura mais densa dos revestimentos, conforme apresentado na figura 6. Os autores concluíram que com o aumento da tensão sobreposta, este efeito tornou-se mais acentuado- (TAVARES 2019).

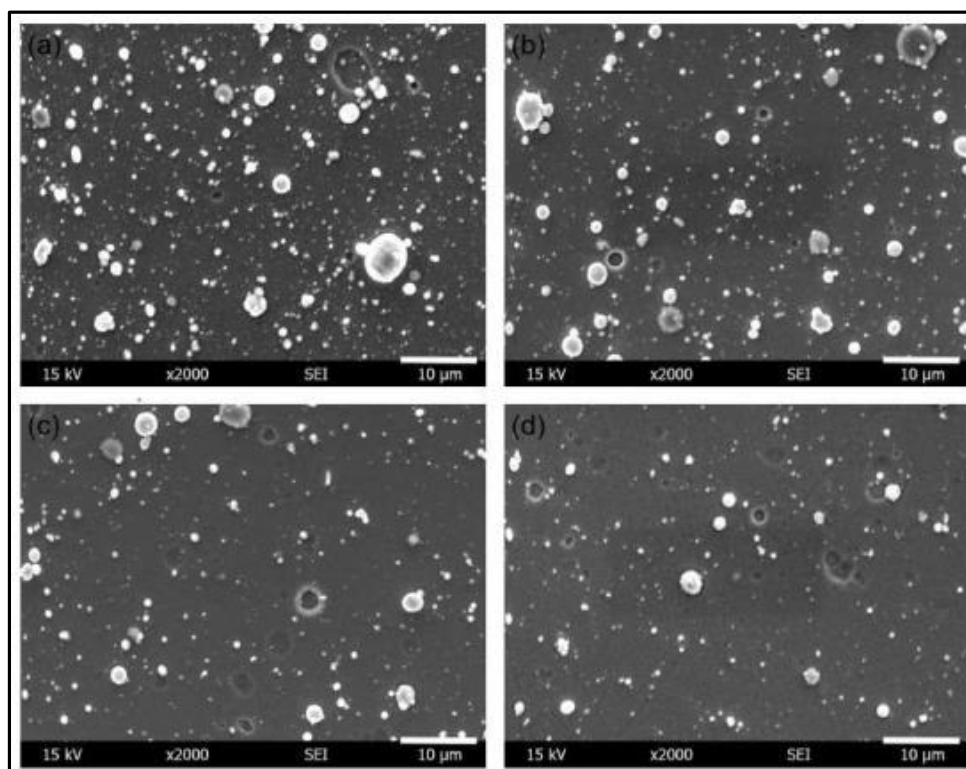


Figura 7. Imagens via MEV por elétrons secundários referentes às amostras revestidas com a técnica utilizada por {Montmitonnet, 2000 #55}.

3.2 Aspectos tribológicos da conformação

3.2.1 Atrito e desgaste

O controle do atrito e do desgaste são obtidos ao projetar as topografias da superfície da ferramenta nessas duas escalas para atender às condições tribológicas exclusivas de processos específicos de conformação de metal a granel- Podgornik et al. (Sheu, Hector Jr et al. 1998).

O atrito mostra-se presente através da interação que ocorre na interface no decorrer da conformação em função da velocidade de deslizamento, das reações químicas da temperatura e de outras condições que afetem o comportamento do lubrificante na interface provocando contínuas alterações no valor da força de atrito- Schey (SCHEY 1984).

Uma relação entre coeficiente de atrito com pressão de contato foi relacionada através do estudo de estudo de Figueiredo (AZUSHIMA 1995). No mesmo, os autores viram que o coeficiente de atrito diminuía com o aumento da pressão. A fim de visualizar e quantificar diretamente o contato real foi utilizado 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 8, 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.

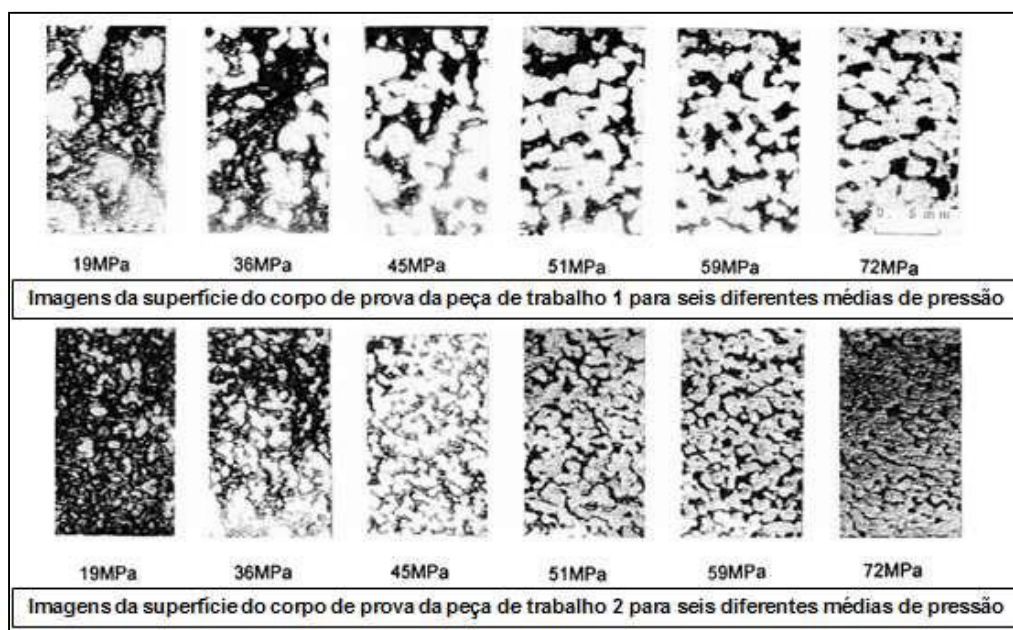


Figura 7. Superfície em contato, adaptação de Figueiredo (AZUSHIMA 1995).

A resistência ao desgaste é fundamental para o aumento da vida da ferramenta. Segundo Kirkhorn, L., et al. (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.

As características iniciais de desgaste por deslizamento na conformação de chapas para várias combinações de ferramentas e chapas foram observadas por Rigney (Schedin 1994). 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), foram observados pelo autor. 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, salienta o autor. No entanto, 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.

3.2.2 Camada de transferência

Segundo Sheu et al. (Montmitonnet, Delamare et al. 2000), a densidade e tamanho das partículas transferidas, dureza e rugosidade da camada de transferência dependem das condições de contato ferramenta-peça e as consequências tribológicas, em termos de atrito e aspecto da superfície da peça formada, também variam com as propriedades da camada de transferência.

A influência da rugosidade da ferramenta na resistência ao desgaste de ferramentas revestidas por TiN e WC foram estudadas durante a conformação de chapas de aço inoxidável. Um grande aumento da resistência ao desgaste com a redução da rugosidade superficial da ferramenta foram observados por Gonçalves Jr. Et al. (Podgornik, Hogmark et al. 2004).

Ensaio de laboratório que reproduzam os mesmos efeitos tribológicos que acontecem no contato encontrado em ferramentas de conformação são realizados para simular os fenômenos tribológicos que envolvem o contato entre ferramenta e peça Podgornik, B. et al. (Gonçalves Jr, de Mello et al. 2019). Isto se deve à alta complexidade existente na análise tribológica entre as superfícies para cada tipo de sistema tribológico.

Diversos tipos de ensaios para determinar o coeficiente de atrito são mostrados na literatura, como os ensaios propostos por Kirkhorn (Podgornik, Hogmark et al. 2004), que apresentam a uma única pista de desgaste, a qual facilita a análise gradativa do desenvolvimento do desgaste na superfície de contato. Outros exemplos são os equipamentos desenvolvidos por Azushima (KIRKHORN 2012) e por Figueiredo et al. (DE SOUZA 2010), os quais semelhantemente são equipamentos para a realização de ensaios de atrito por tiras de chapas, possibilitando um maior controle de variáveis de ensaio, como carga normal aplicada, velocidade de deslizamento e dimensão da ferramenta, o que permite a maior representatividade de contato durante a conformação de chapas, simulando a mesma.

É de extrema importância diminuir o desgaste de ferramentas e consequentemente obter uma maior produtividade. Para isto, entender os fenômenos de atrito é necessário para que se possa controlar ou estabilizar as forças de atrito. Foi observado por Rigney (Schedin 1994), que a ocorrência de transferência de material do material mais macio para o material mais duro estava sempre presente. O autor estudou os mecanismos de desgaste para várias combinações de materiais de ferramenta e chapa atribuindo o termo *galling* para quando esse fenômeno se intensificava e ocasionava alterações significativas nas superfícies em contato.

3.2.3 Experimentos de atrito na literatura

Experimentos simples de atrito de bancada com aplicações reais de conformação de chapas foram realizados por Figueiredo et al. (FIGUEIREDO 2011), com o propósito de avaliar o atrito, utilizando duas técnicas. Na primeira, os autores utilizaram o deslizamento unidirecional de cilindros cruzados com aumento linear da carga. Na segunda técnica, um equipamento que permite medir o coeficiente de atrito sob condições de estiramento de chapa foi utilizado, mostrados nas Figura 9(a) e 9(b), respectivamente. Como resultado dos experimentos, foram notados que os valores de coeficiente de atrito eram 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. As diferenças entre os resultados obtidos a partir das duas técnicas são apresentadas na Tabela 2. O maior desafio do método experimental é reproduzir mecanismos de desgaste em ensaios de laboratório que sejam compatíveis com a condição real de contato no processo de conformação.

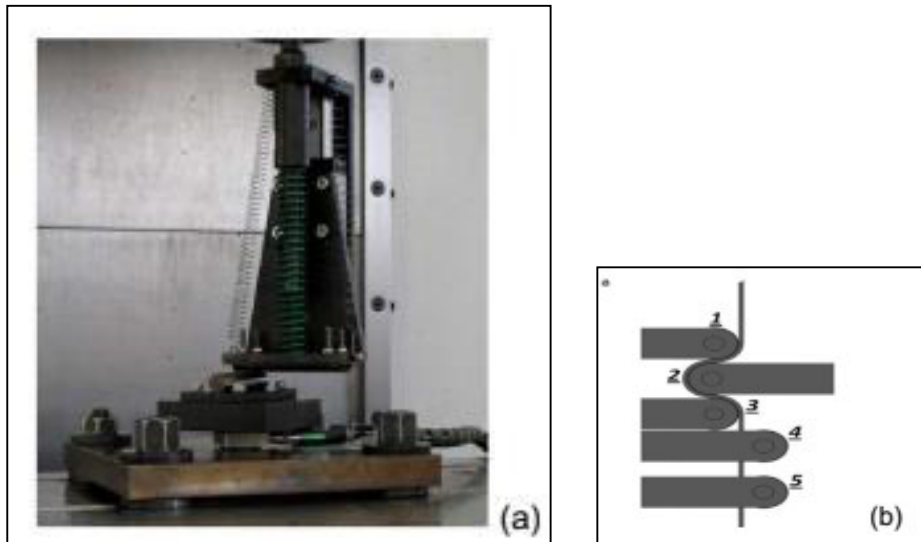


Figura 8. Duas configurações de ensaio para avaliar comportamento tribológico durante conformação: (a) ensaio de varredura cilindro-cilindro; (b) ensaio de estiramento - Budinski (FIGUEIREDO 2011).

Tabela 2. Rugosidade da ferramenta e coeficientes de atrito dos ensaios de estiramento e cilindro-cilindro - Budinski (FIGUEIREDO 2011).

Materiais	Rugosidade (μm)	Ensaio Estiramento	Ensaio Cilindros
AA1100-D3	1,66 - 0,22	$0,11 \pm 0,0014$	$0,75 \pm 0,018$
AA1100-D3	2,48 - 0,27	$0,13 \pm 0,0007$	$0,11 \pm 0,015$

Muitos modelos de ensaio são idealizados em bibliografias diversas para analisar a resistência ao desgaste das combinações de materiais comumente utilizados para conformação, em vista de que estes tipos de combinações são de extrema importância. 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 foram estudados por Kirkhorn (Podgornik, Hogmark et al. 2004). O estudo incluiu a configuração tipo pino sobre disco Figura 10 (a), um teste modificado utilizando dois cilindros cruzados com um sistema de carregamento de molas Figura 10(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 10(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 8(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.

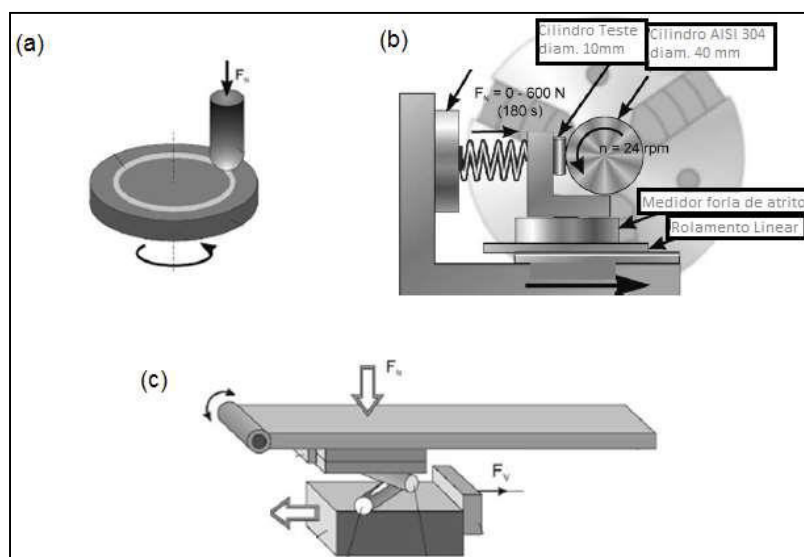


Figura 9. Ensaios de laboratório utilizados para simular desgaste em conformação: (a) Pino Disco; (b) Cilindro-cilindro com carregamento de molas; (c) Teste de varredura com cilindros cruzados; adaptado de Kirkhorn (Podgornik, Hogmark et al. 2004).

Um novo equipamento para ensaio tribológico para caracterizar as condições de atrito em aplicações de conformação de chapas metálicas foi construído por Kirkhorn (Kirkhorn, Frogner et al. 2012), como mostra a **Figura 11**.

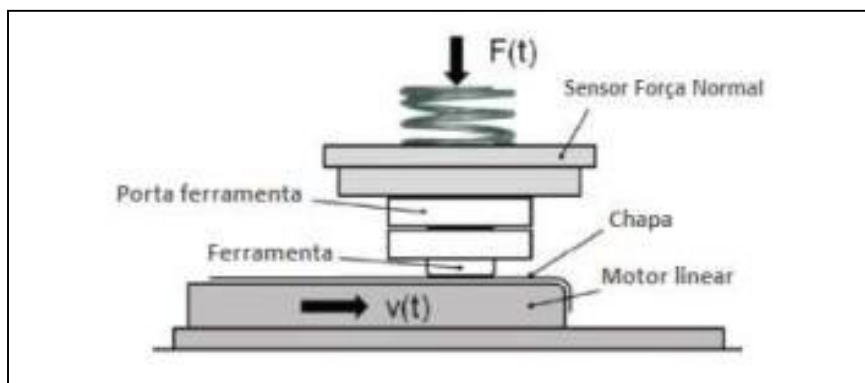


Figura 10. Esquematização ilustrativa do conceito do equipamento de ensaio apresentado por Kirkhorn (Kirkhorn, Frogner et al. 2012).

Um novo método de teste para avaliação do desgaste de materiais poliméricos para conformação de chapas metálicas utilizando um ensaio de atrito de chapas foi realizado por Azushima (DE SOUZA 2010) e é apresentado na Figura 12. O mesmo mostra 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 relacionaram os resultados do novo método com o ensaio tipo Bending-Under-Tension (BUT) mais tradicionalmente utilizado para avaliar desgaste em conformação mecânica. 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.

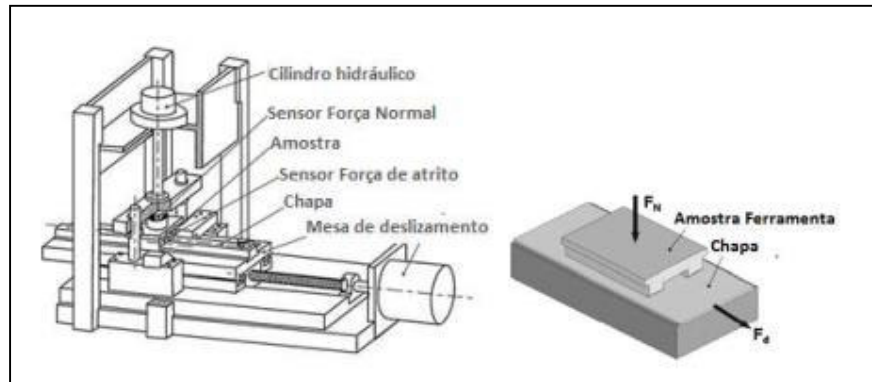


Figura 11. Ensaio tribológico de atrito de chapas utilizado por Azushima (DE SOUZA 2010).

3.2.4 Desgaste por deslizamento e desgaste abrasivo

As características iniciais de desgaste por deslizamento na conformação de chapas para várias combinações de ferramentas e chapas foram observadas por Rigney (Schedin 1994). 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), foram observados pelo autor. 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, salienta o autor. No entanto, 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.

O desgaste por deslizamento em situações de elevadas pressões de contato pode ser evitado. Para avaliar o fenômeno, Bonnet et al. (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.

Um ensaio numérico via “*software*” de elementos finitos (ABAQUS) foi feito por Budinski et al. (BONNET 2008), a fim de fazer medições envolvendo tensões, esforços, fluxos de calor e velocidade relativa do pino contra o material deformado; além disso, equacionaram uma componente de adesão do coeficiente de atrito. O resultado obtido é útil para dar uma ideia do comportamento dessa componente do atrito, como mostrado na Figura 12. Pode-se observar que a componente adesiva é mais evidente do que a deformação plástica e que a influência absoluta da adesão é maior quanto menor a velocidade de deslizamento. Já em relação à parcela de deformação plástica, nota-se pouca variação em função da velocidade de deslizamento.

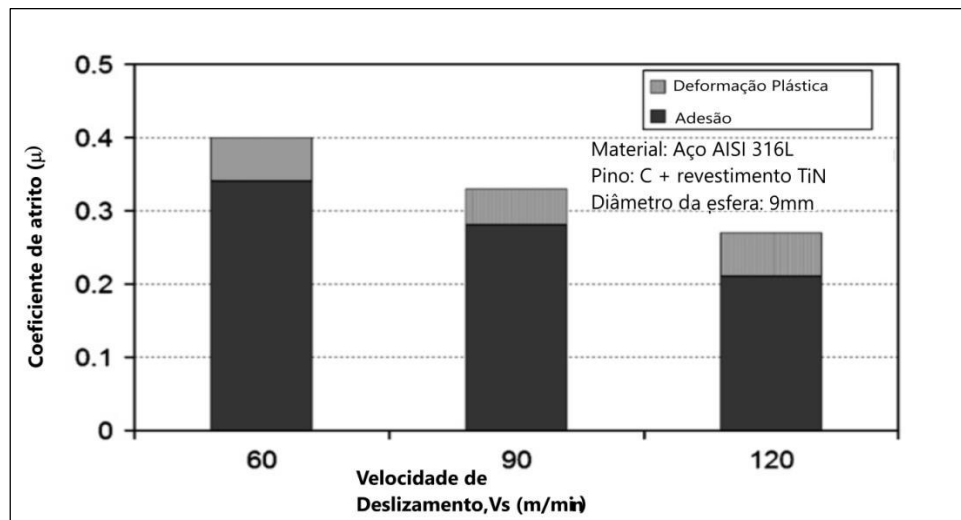


Figura 12. Proporção da deformação plástica e da adesão em diferentes velocidades de deslizamento, adaptado Budinski et al. (BONNET 2008).

A distinção entre desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento somente é clara no início do processo de conformação, sendo outro ponto importante a ser analisado: à medida que o processo de conformação avança, a presença de debris duros 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 (Hutchings and Shipway 2017) na Figura 14 é discutido. O mesmo sugere que a evolução do desgaste por deslizamento pode levar à abrasão devido às partículas encruadas removidas e posteriormente transferidas para a ferramenta atuarem como um abrasivo no contra corpo.

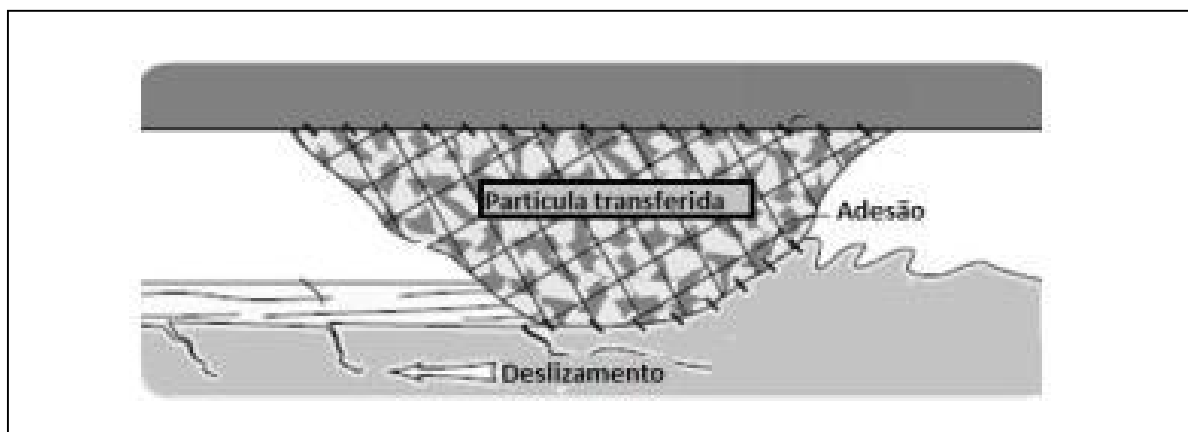


Figura 13. Mecanismos de desgaste de deslizamento e abrasão adaptado de Hutchings (Hutchings and Shipway 2017).

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*. Entretanto, na literatura podemos encontrar conceitos divergentes para determinado termo.

Para Hutchings (Hutchings and Shipway 2017) o conceito de *galling* está associado ao desgaste severo por deslizamento. De acordo com Budinski et al. (BONNET 2008), 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.

A Figura 14 mostra o que acontece quando ocorre *galling*. Neste caso, o dano é bem mais significativo e para os 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.

As interpretações de atrito dos modelos de adesão e crescimento de junções baseiam-se em um cenário em que duas superfícies ásperas são aproximadas, fazendo com que os picos mais altos (asperezas) se toquem -Blau (BLAU 2009).

Testes de tira (*strip drawing test*) em chapas de aço inoxidável com diferentes óleos lubrificantes utilizados para conformação foram realizados por Andersen et al. (ANDREASEN 1998) com o objetivo de identificar para qual lubrificante ocorria menos desgaste 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, os autores quantificaram o nível de *galling* em relação à distância deslizada, o que também é mostrado na Figura 15.

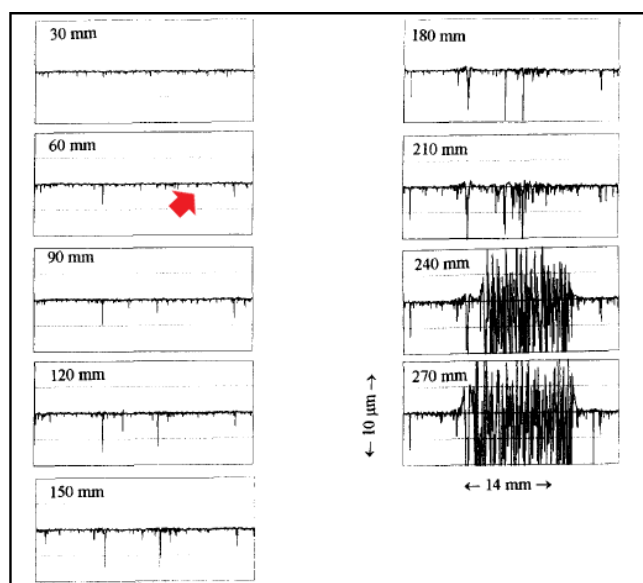


Figura 14. Perfis de rugosidade filtrados obtidos em etapas equidistantes de 30 mm ao longo do comprimento da tira, adaptado de Andersen et al. (ANDREASEN 1998).

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, foram apresentados por Montmitonnet, P. et al. (Montmitonnet, Delamare et al. 2000). Nos experimentos, observaram-se que as 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 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 16 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.

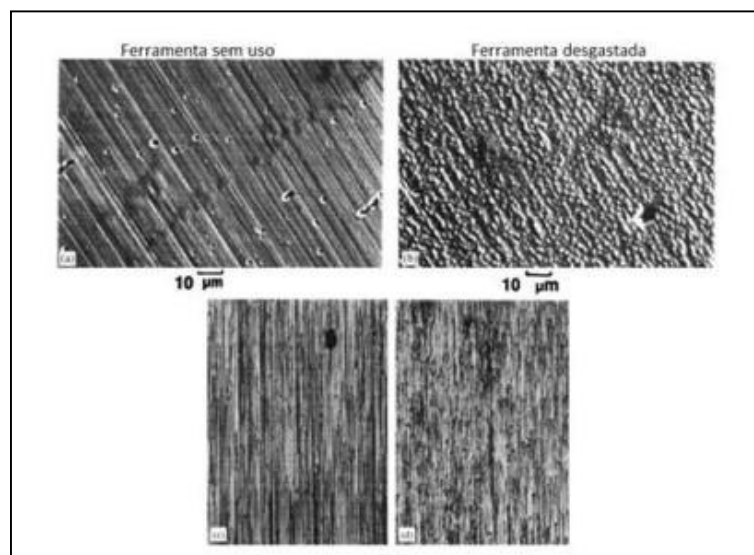


Figura 15. Rugosidade de ferramentas nova e desgastada e respectivas rugosidades dos contras- corpos após ensaio adaptado de Montmitonnet, P. (Montmitonnet, Delamare et al. 2000).

Embora a medição da topografia da superfície seja uma ciência de engenharia bem estabelecida e continue a evoluir, a tecnologia introduz novas técnicas de produção e instrumentos de medição, conforme Lonardo (Lonardo, Lucca et al. 2002).

Dois diferentes tipos de testes em laboratório para simular desgaste deslizante e a influência da rugosidade no desempenho tribológico de revestimentos em ferramenta, foram utilizados por HARLIN (HARLIN 2006). 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(EDS). Com isto, o campo da metrologia de superfície ampliou seu interesse para incluir tanto a análise topográfica tradicional quanto a caracterização próxima da superfície.

A Figura 17 mostra imagens de MEV e resultados de EDS 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.

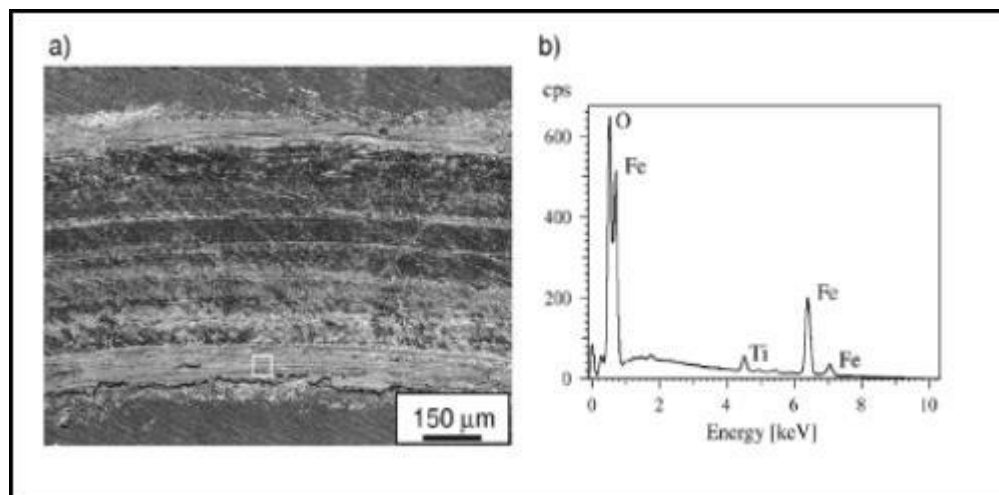


Figura 16. Análise de tribocamadas formadas em ferramentas de conformação revestidas rugosas: a) MEV da trilha de desgaste; b) resultado de análise EDS da área indicada na figura (a) adaptado de Franz (HARLIN 2006).

O termo compatibilidade tribológica, o que é extremamente importante no desgaste de ferramentas de conformação, sendo associado à compatibilidade química das superfícies em contato foi utilizado por Hutchings (Hutchings and Shipway 2017). 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*.

O grau de redução do coeficiente de atrito depende da morfologia, da espessura e da composição química da tribocamada formada Schey (SCHEY 1984). Em vista disto, 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 & Tabor (BOWDEN 2001).

3.2.5 Ensaios de deslizamento com ferramentas revestidas

Uma visão geral sobre pesquisas realizadas com revestimentos duros de nitretos contendo vanádio é apresentada no estudo de Franz et. al. (FRANZ 2013). Os revestimentos têm como objetivo reduzir o atrito a alta temperatura por meio da autoadaptação 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 de ligações fracas e baixas 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.

Ensaios de deslizamento tipo pino-sobre-disco foram realizados por Carlsson et al. (CARLSSON 2006) a fim de analisar 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. Foi observado pelos autores 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.

Semelhantemente, Birol (Birol 2013) fez a comparação do desempenho tribológico entre 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 à 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.

Uma comparação entre três diferentes processos de deposição de PVD foram feitas por Lugscheider et al. (Lugscheider, Barimani et al. 1996): 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 sobre condições diferentes de temperatura e energias de deposição. A Figura 18 mostra as microestruturas observadas. Cada figura compara as microestruturas resultantes da evaporação por feixe de elétrons: (a) por *magnetron sputtering*, (b) por pulverização catódica e (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 Figura 18(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.

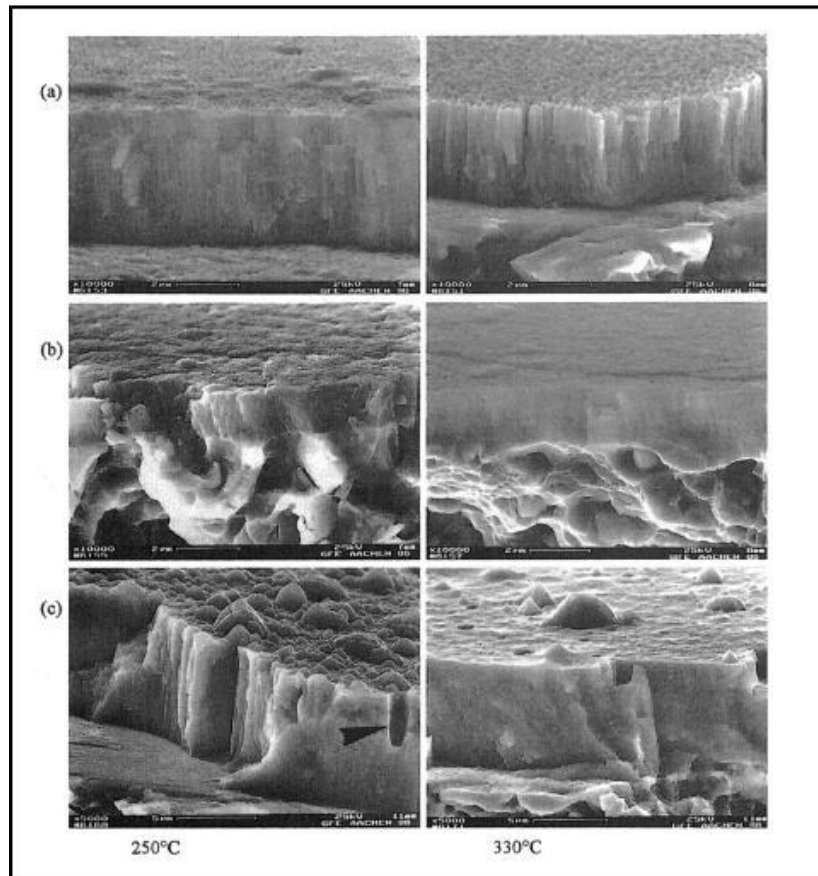


Figura 17. Microestrutura de revestimentos depositados a temperaturas de 250e 330°C: (a) evaporação por feixe de elétrons (b) *sputtering*, (c) evaporação arco Arc-PVD adaptado de Lugscheider et al. (Lugscheider, Barimani et al. 1996)

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais deste trabalho (ensaios de atrito) foram realizados por Tavares (TAVARES 2019) em parceria com a Empresa Bruning Tecnometal Ltda, com o intuito de verificar a evolução do atrito com os fenômenos de desgaste das ferramentas e avaliar a topografia de superfície nas amostras, de forma identificar os mecanismos de desgaste naquelas. Verificar as condições tribológicas das superfícies chapas, após a evolução do atrito e averiguar os fenômenos de adesão ocorridos são propostas deste trabalho, complementando o estudo realizado anteriormente. Além disso, os procedimentos efetuados nas chapas auxiliam na compreensão dos mecanismos de desgaste em ferramentas de conformação mecânica e contribuem para a escolha de melhores combinações de substrato e ferramenta.

As etapas a serem executadas neste projeto de pesquisa foram planejados com o auxílio e aplicação do DOE- *Design Of Experiments*. O DOE é uma ferramenta que auxilia pesquisadores a projetarem as etapas de procedimentos experimentais de acordo com a Voz do cliente- Problema, a Voz do Engenheiro- Resolução, parâmetros do processo- fatores controláveis, fatores não controláveis e fatores constantes. As Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 apresentam as etapas experimentais do projeto.

Tabela 3. Projeto dos experimentos (DOE)

Projeto dos experimentos	
A voz do Cliente	A Voz do Engenheiro
• Minimização do desgaste das ferramentas no ambiente produtivo; • Redução do custo da manutenção; • Melhoria na estabilidade do processo.	• Avaliação do comportamento do atrito; • Avaliação das condições superficiais na região de contato.

Tabela 4. Parâmetros do Processo (DOE)

Parâmetros do Processo		
Fatores Constantes	Fatores Controláveis	Fatores não Controláveis (Ruído)
- Força Normal (kN); - Velocidade de Deslocamento (mm/s); - Área aparente/ Geometria da Ferramenta; - Material da Chapa; - Superfície da Chapa; - Superfície da Ferramenta; - Lubrificação (g/m²); - Tipo de Lubrificante.	- Material da Ferramenta; - Tratamento Superficial da Ferramenta (revestimentos PVD).	- Temperatura do Ensaio (ambiente); - Ruído Eletromagnético (ambiente produtivo); - Umidade do Ar.

Tabela 5. Fatores controláveis do processo (DOE)

Fatores Controláveis do Processo		
Parâmetro do processo	Nº de Níveis	Níveis
Material da Ferramenta	8	- Aço Sinterizado 1 - Aço Sinterizado 2 - Aço Sinterizado 3 - Aço Laminado 1 - Aço Laminado 2 - Aço Fundido 1 - Aço Fundido 2 - Aço Refundido
Revestimentos PVD	4	- Sem Revestimento - Revestimento 1- VN - Revestimento 2- TiCrN - Revestimento 3- TiAlN

Após a descrição e organização das etapas a serem executadas no projeto, foi possível construir um fluxograma experimental para execução dos experimentos, de modo analisar o que ocorreu com a chapa no atrito.

A Figura 19 mostra o fluxograma dos procedimentos experimentais, onde a sequência dos experimentos e da análise dos resultados é evidenciada.

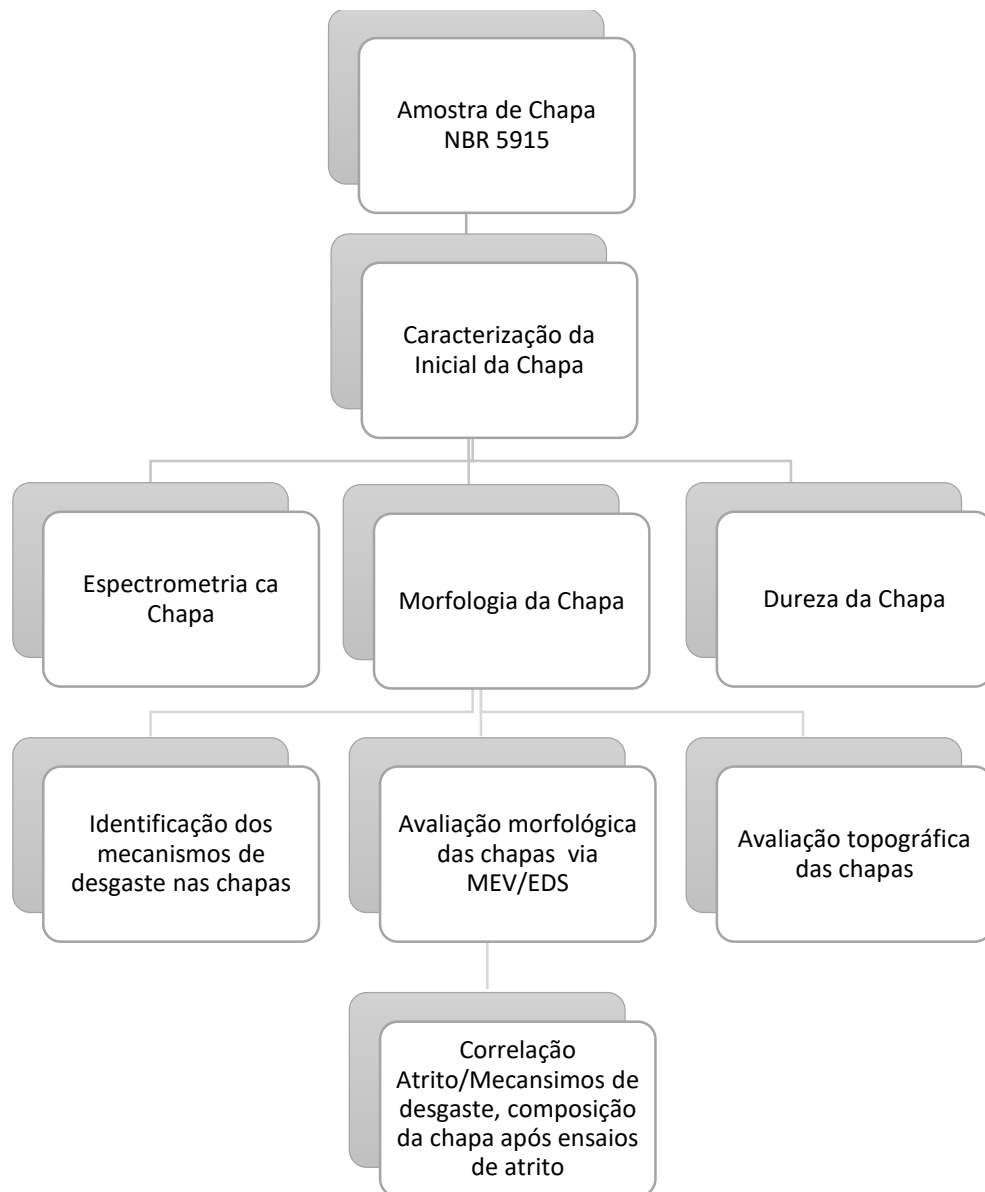


Figura 18. Fluxograma dos procedimentos experimentais.

4.1 Materiais e Métodos para os Ensaio de Atrito

4.1.1 Corpos de prova das chapas

Os corpos de prova de chapa utilizados nos ensaios de atrito foram retirados de uma bobina laminada a frio NBR 5915, na condição superficial decapada e oleada com espessura de 1,20mm. As dimensões em mm dos corpos de prova são destacadas na Figura 20 (TAVARES 2019).



Figura 19. Representação do corpo de prova de chapa submetidos ao ensaio de atrito (TAVARES 2019).

As amostras de chapas foram deslizadas contra as ferramentas revestidas e sem revestimento, os quais foram depositados nas ferramentas através do processo PVD com as seguintes composições: VN (Revestimento 1), TiCrN (Revestimento 2) e TiAlN (Revestimento 3).

A composição química das chapas foi avaliada através de um espectrômetro ótico para análise de ligas base Fe, Al e Cu da marca Oxford Foundry Master-Pro. A microestrutura das chapas também foi analisada por microscopia ótica após preparação metalografica convencional. As imagens foram obtidas através do Microscópio ótico de luz refletida com sistema de análise de imagens – da marca Olympus – modelo GX 51S. A dureza das chapas foi verificada em um durômetro universal modelo Zwick/Roell ZHU8187.ao 5LKV utilizando-se uma carga de 3 Kgf (3 repetições). As endentações foram feitas ao longo da superfície da chapa com uma distância de aproximadamente 1mm.

4.1.2 Corpos de prova das ferramentas

A empresa Bruning Tecnometal LTDA. disponibilizou todos os tipos de materiais de chapas para ensaio tribológico e materiais para a fabricação das ferramentas.

Cada ferramenta confeccionada para o trabalho de Tavares foi construída por um tipo de processo de fabricação, sendo a morfologia de ferramentas exibida na Figura 21.

Os corpos de provas das ferramentas foram projetados com um perfil geométrico de 3 áreas distintas (A1, A2 e A3) a fim de simular uma ferramenta simples de estampagem. Este tipo de perfil possibilita a formação de trilhas de desgaste nos corpos de prova de chapa provenientes das amostras das ferramentas. A Figura 20 é uma ilustração do corpo de prova da ferramenta, que possui diferentes áreas distintas, diferenciando a área de contato ferramenta- chapa. A Tabela 6, apresenta o método de fabricação e a composição química de cada ferramenta.

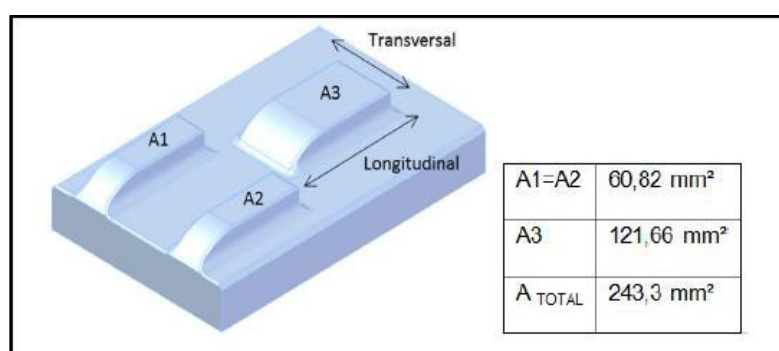


Figura 20- Corpo de prova da ferramenta, por Tavares (TAVARES 2019).

Tabela 6. Composição química dos aços ferramentas sinterizados, laminados, fundidos e refundidos, conforme informações disponibilizadas pela empresa 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	-

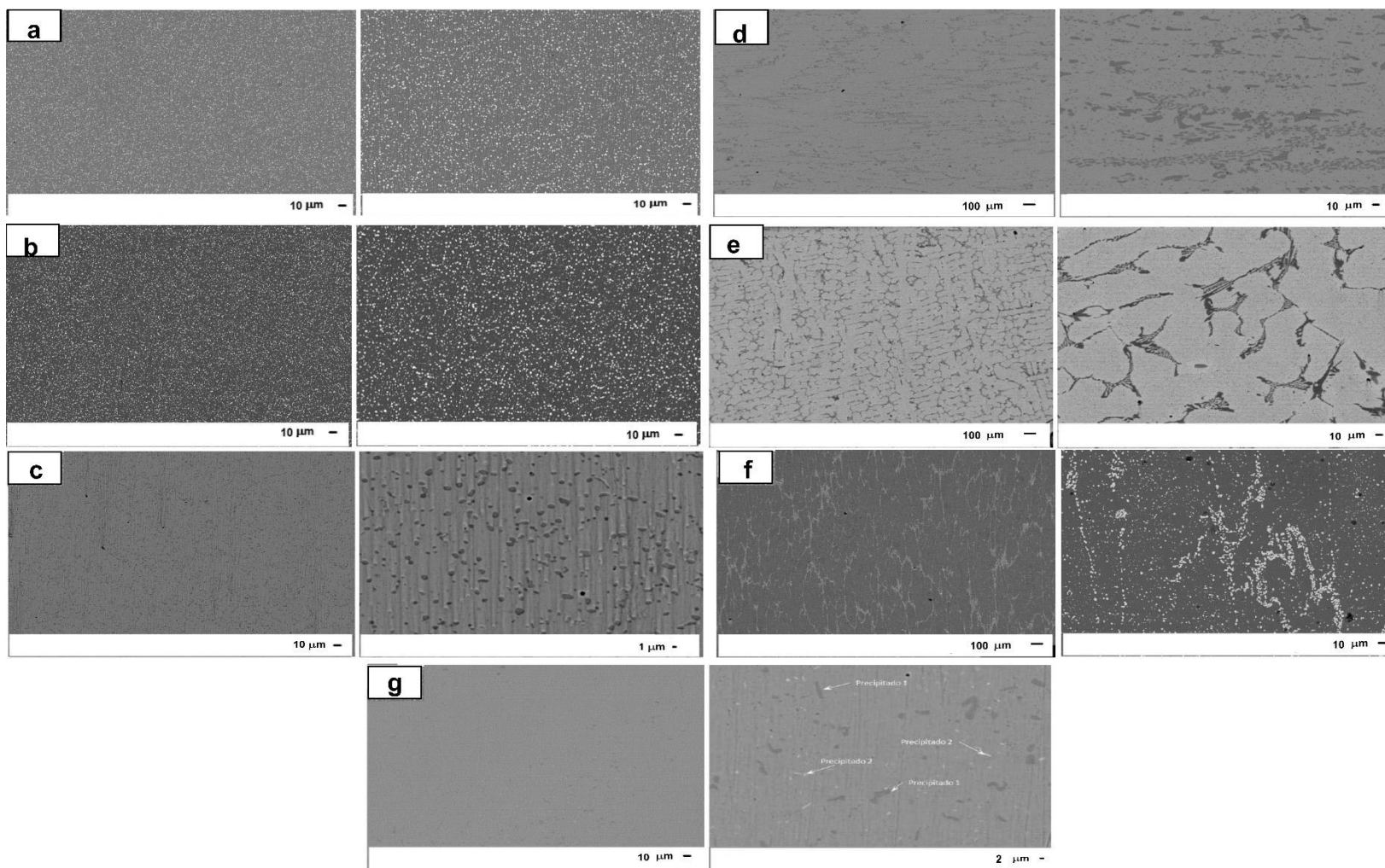


Figura 21. Morfologia das ferramentas de acordo com o processo de fabricação- a,b,c) aços sinterizados 1,2 e 3; d)aços laminados; e,f) aços fundidos 1 e 2; g) aço refundido.

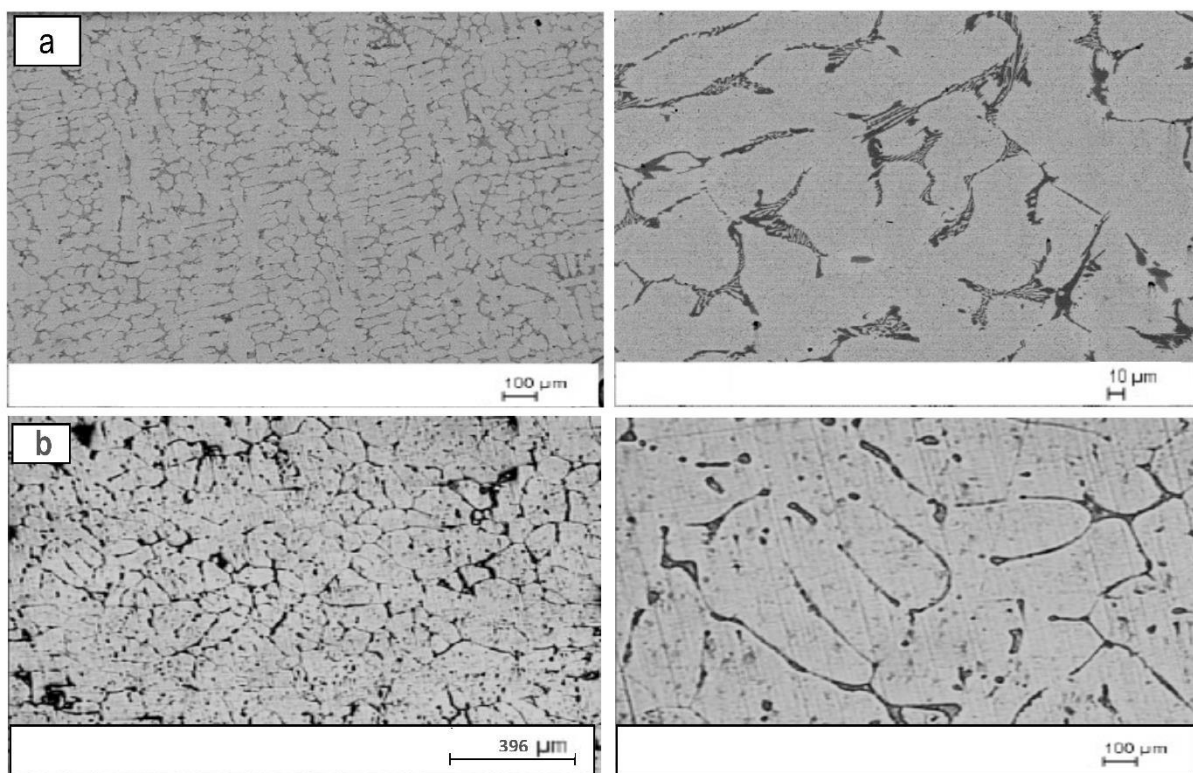


Figura 22. Microestrutura dendrítica de fusão- a) de aço fundido, por {TAVARES, 2019 #77}; b) de liga Al-Sn, por Osório et al (Osório 2009).

4.2 Ensaios de atrito

Antes dos ensaios de atrito, a fim de remover impurezas, as superfícies dos corpos de prova da chapa passaram por um processo de limpeza com pano de algodão embebido em acetona e posteriormente, lubrificante sintético mineral foi gotejado e pincelado para facilitar o deslizamento em ensaio.

Conforme Tavares (TAVARES 2019), os ensaios tribológicos foram avaliados sob condições de deslizamento lubrificadas, onde o lubrificante foi gotejado e pincelado a fim de preparar o corpo de provas para o ensaio. Foram determinados parâmetros constantes de ensaio para a força normal, ajustada para 5000 Kgf, velocidade constante de 100 mm/s e frequência de 1000 Hz. As forças de atrito (tangenciais) e normais foram registradas durante todos os ensaios de forma contínua. A condição final do ensaio foi determinada ao final do deslizamento de 25 chapas ou na condição

de travamento do ensaio. Foi definido também um ensaio de meia - vida (que corresponde ao deslizamento da metade do número de chapas da condição final), realizado a fim de entender melhor a evolução dos fenômenos tribológicos envolvidos. Finalizados os ensaios de atrito, verificou-se a formação de trilhas de desgaste nos corpos de prova decorrentes das amostras das ferramentas.

As trilhas de desgaste formadas nas superfícies das chapas foram examinadas na condição final do ensaio tanto por MEV/EDS quanto por Microscopia Confocal para avaliar a existência dos mecanismos de desgaste ocorridos. A partir destes exames, foi possível identificar parâmetros topográficos e aspectos da tribocamada gerados durante os ensaios de atrito, que se relacionados aos valores dos coeficientes de atrito medidos por Tavares (TAVARES 2019), servirão para caracterizar padrões que possam causar transtorno tribológico levando à severa adesão na ferramenta e ocorra um possível engripamento ou travamento do equipamento de estampagem. Com base nas propostas descritas, fundamentadas por Tavares (TAVARES 2019), objetivou-se estipular uma maneira de relacionar fenômenos de atrito, condições e danos superficiais ocorridos nas chapas. A Figura 21 mostra o equipamento onde os ensaios de atrito foram realizados evidenciando os principais componentes da máquina. Este foi desenvolvido pelo setor P&D da empresa Bruning Tecnometal Ltda e corresponde a uma infraestrutura formada por um cilindro hidráulico, o qual aplica a força normal (FN) e uma mesa sobreposta a um fuso, que quando em movimento linear e sob a força normal aplicada pelo cilindro hidráulico, converte-se em uma força de atrito- FA (força de reação contrária ao movimento da mesa). O esquema de funcionamento da máquina e o esquema do cabeçote móvel e sistema de aquisição encontram-se nas Figuras 23 e Figura 24, respectivamente.



Figura 23. Equipamento para a realização dos ensaios de atrito- Tavares (TAVARES 2019).

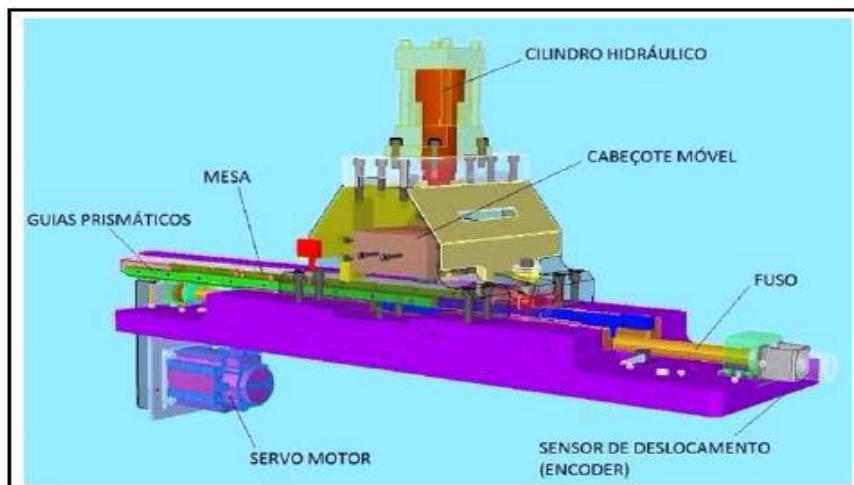


Figura 24. Esquema de funcionamento da máquina para os ensaios de atrito (TAVARES 2019).

A Figura 23 mostra o funcionamento da máquina de atrito a qual possui uma infraestrutura que conta com sensores resistivos montados a um cabeçote móvel preso ao flange do cilindro hidráulico. Vale a pena salientar que o cabeçote móvel comporta apenas um corpo de prova de ferramenta por ensaio.

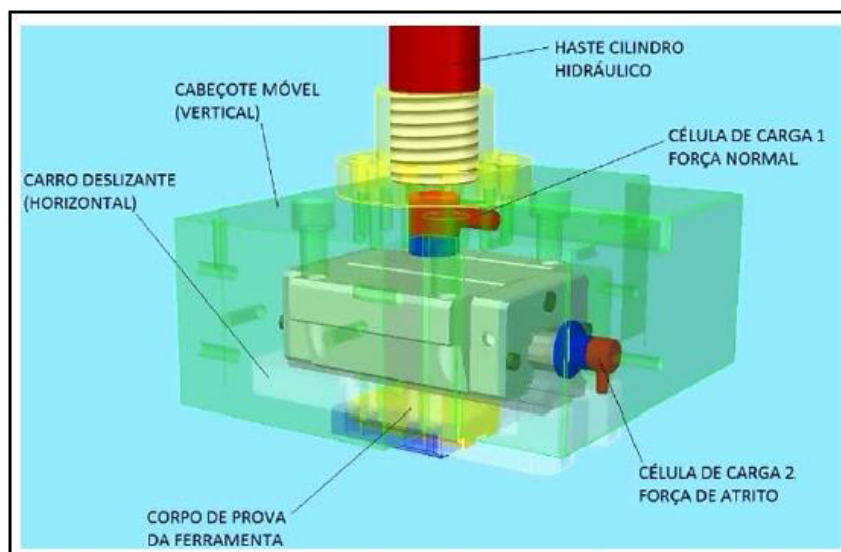


Figura 25. Esquema do cabeçote móvel e sistema de aquisição. Tavares (TAVARES 2019).

4.2.1 Caracterização Topográfica das Chapas

Para que a caracterização topográfica das fosse sucedida, as amostras foram submetidas a medições por microscopia confocal. O equipamento utilizado para realizar as medições foi o Microscópio Confocal Invertido de Varredura a Laser da marca Leica, modelo TCS SP8. Diferentemente de um interferômetro, onde primeiramente é selecionada uma área de medição em μm antes de realizar as medições, na microscopia confocal, ocorre uma seleção de um padrão de espessura das imagens tridimensionais, também em μm , visto que as imagens são medidas em espessura de fatias e automaticamente o software do microscópio une as fatias medidas formando uma superfície tridimensional.

A topografia de superfície tridimensional foi verificada pelo *software Mountains Map 8*, da empresa *DigitalSurf*, sendo que as superfícies utilizadas para as aferir os parâmetros se superfície necessários foram as medidas pela microscopia confocal. Para que fosse possível a caracterização das amostras, parâmetros de superfície foram selecionados: Sq (parâmetro de rugosidade tri-dimensional relativo à rugosidade superficial quadrática média), Sz (altura absoluta entre o pico mais elevado e o vale mais profundo dentro da área de medição), Sbi (parâmetro funcional

que representa a capacidade de apoio- suporte mecânico), S_m (parâmetro volumétrico que também fornece informações sobre a capacidade de apoio da superfície, quantificando o volume de material acima do plano médio), S_{ku} (parâmetro associado à agudez ou achatamento da curva de distribuição das alturas das irregularidades), sendo que valores de $S_{ku} = 3$ correspondem a uma curva de distribuição Gaussiana e S_{sk} (parâmetro que permite determinar se as superfícies apresentam predominância de picos, se $S_{sk} > 0$ ou de vales, se $S_{sk} < 0$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Organização, identificação e caracterização inicial das amostras

A iniciação do trabalho partiu do estudo e do entendimento da proposta do trabalho de Tavares (TAVARES 2019) e da identificação dos corpos de prova os quais foram redimensionados para o tamanho de aproximadamente 30 mm, separados, identificados de acordo com as ferramentas contra os quais foram deslizados e armazenados em local seco. As chapas foram caracterizadas inicialmente utilizando a espectrometria ótica. A Tabela 7 mostra a composição química da chapa não ensaiada.

Tabela 7. Composição química da chapa não ensaiada

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
97,6	0,196	0,0574	1,72	0,0142	0,0103	0,0177

De acordo com a composição, o material analisado trata-se de um aço SAE 1020. Verificar a composição química da chapa fez-se essencial devido ao fato de a composição da chapa necessitar ser verificada novamente, via MEV, a fim de encontrar traços da composição química dos revestimentos das ferramentas nas chapas após os ensaios de atrito. Além da verificação da composição química, a chapa foi submetida a um procedimento metalográfico com a finalidade de verificar sua microestrutura.

A Figura 25 apresenta a microestrutura da chapa, mostrando a presença de ferrita e perlita e a textura de laminação da chapa promovida pela deformação a frio. Na observa-se ainda inclusões metálicas na microestrutura.

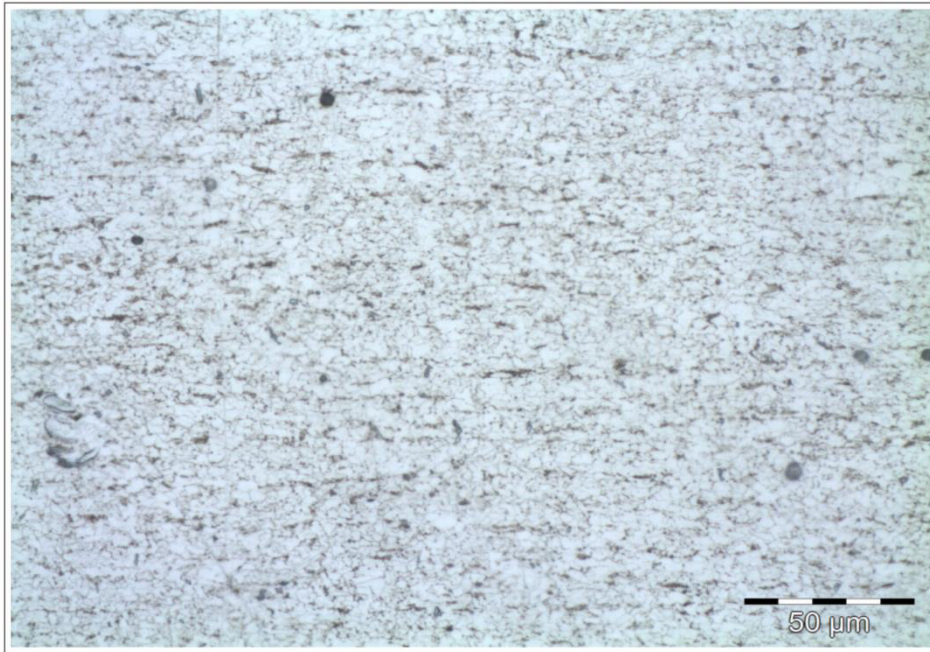


Figura 26. Microscopia ótica da amostra de chapa retirada da bobina NBR 5915 após ataque com Nital 4%,6s.

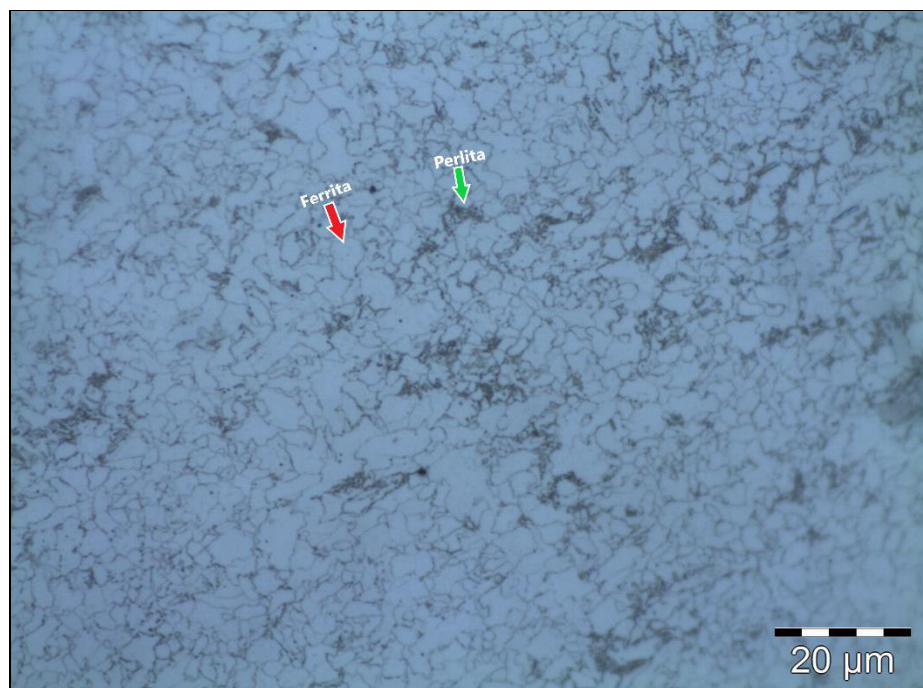


Figura 27. Microscopia ótica da amostra de chapa retirada da bobina NBR 5915 após ataque com Nital 4%, 6s evidenciando grãos de Ferrita e Perlita.



Figura 28. Microscopia ótica da amostra de chapa retirada da bobina NBR 5915 sem ataque químico, evidenciando inclusões não metálicas presentes na microestrutura.

A dureza da chapa foi realizada de modo a confirmar o tipo de material da chapa. Seis medições superficiais em diferentes pontos foram feitas e a partir destas, calculado a média e o desvio padrão. A Tabela 8 mostra os valores de medição da dureza obtidos, a média dos valores e o desvio padrão calculados a partir dos dados obtidos. A média dos valores de dureza calculada é compatível com a de um aço 1020 no estado encruado devido ao processo de laminação da chapa.

Tabela 8. Valores de medição de dureza, média dos valores e desvio padrão calculados

Medições	1	2	3	4	5	6
HV	233,8	186,6	236	204,8	214,6	214,6
Média	215,06					
Desvio Padrão	18,47					

Os ensaios de atrito do tipo *Strip Drawing Test* foram efetuados na empresa Bruning tecnometal Ltda. O deslizamento de 25 chapas ou o travamento do ensaio foi determinado como a condição final do corpo de prova foi determinada. Após a determinação da condição final foi realizado um ensaio definido como meia-vida, correspondendo ao deslizamento da metade do número de chapas da condição final, a fim de melhor entender a evolução dos fenômenos tribológicos envolvidos (TAVARES 2019). Inicialmente, as chapas foram avaliadas via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a fim de identificar os fenômenos de desgaste nas chapas. Posteriormente, imagens em três dimensões foram obtidas utilizando Microscopia Confocal com a finalidade de quantificar a topografia de chapas ensaiadas.

5.2 Mecanismos de desgaste para as chapas ensaiadas contra ferramentas não revestidas

As primeiras amostras de chapa avaliadas usando o MEV foram as ensaiadas contra as ferramentas não revestidas (Temperadas). As imagens obtidas por MEV mostraram uma diferença significativa dependendo do material do das ferramentas para o caso das ferramentas não revestidas. Por este motivo, as imagens obtidas foram reunidas de acordo com a severidade de desgaste, já que o próprio material da ferramenta definiu a existência de pouca ou muita adesão na chapa, mostrando que o substrato da ferramenta causa um efeito da ferramenta ensaiada contra a chapa. A Figura 29 mostra imagens das chapas ensaiadas contra ferramentas não revestidas. Para cada material temos duas imagens obtidas: à esquerda via elétrons secundários as quais apresentam principalmente características da morfologia da chapa e à direita via elétrons retroespalhados que mostra um contraste nas cores indicando composição química- em regiões da amostra onde a composição química é diferente, a coloração será diferente. Para que a análise visual das imagens obtidas seja caracterizada de acordo com o tipo de ferramenta, deve-se referenciar as informações previamente fornecidas na Tabela 6.

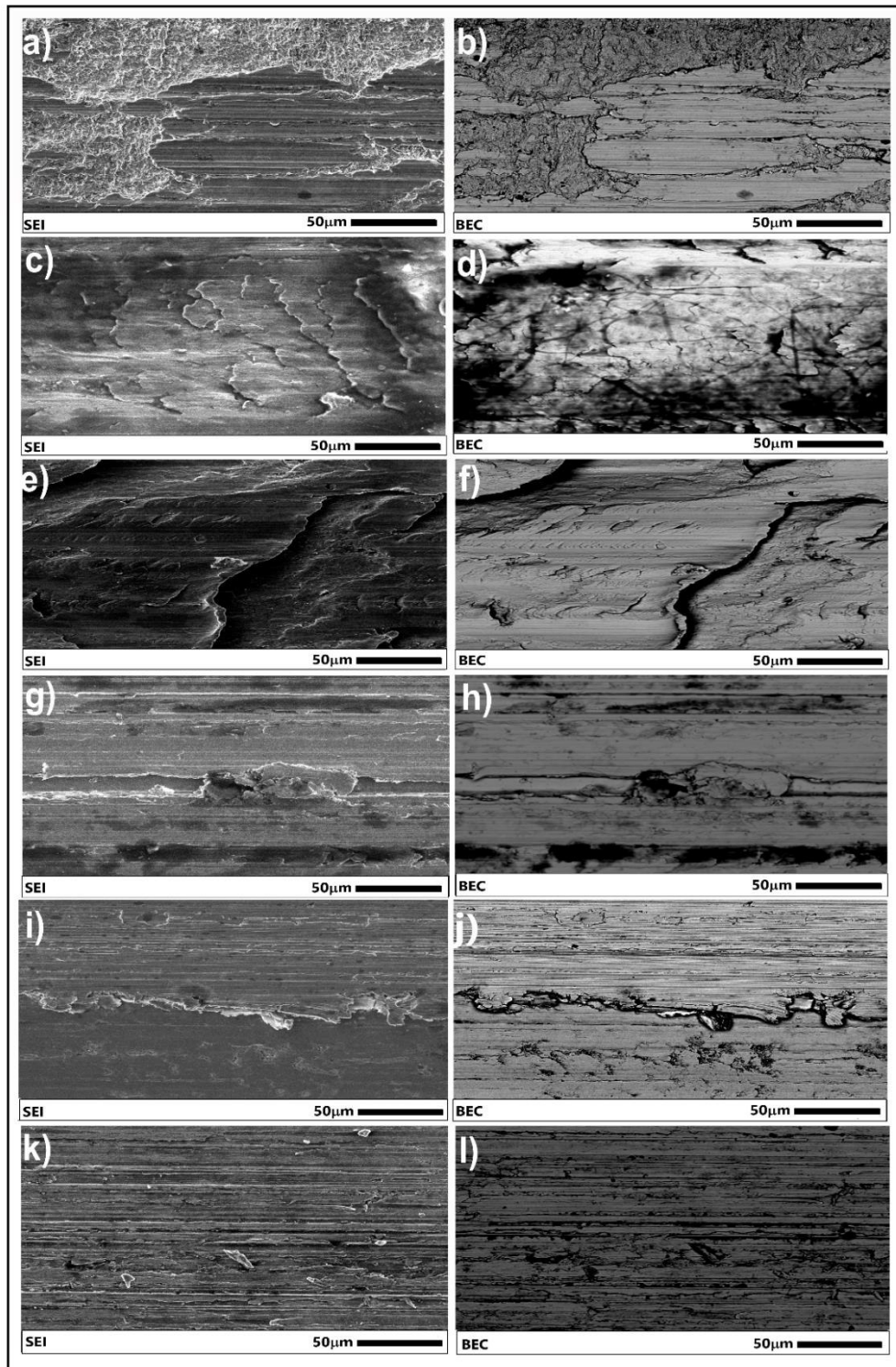


Figura 29. Imagens das chapas ensaiadas contra ferramentas sem revestimento (temperadas) medidas por MEV: à esquerda via Elétrons Secundários e à direita via Elétrons Retroespalhados, respectivamente (chapas ensaiadas contra as ferramentas a, b-Aço fundido 1; c, d- Aço sinterizado 2; e,f- Aço sinterizado 3; g,h- Aço refundido; i,j- Aço fundido 2; k,l- Aço sinterizado 1).

As Figura 29(a,b) e Figura 29(c,d), onde evidentemente o desgaste foi mais severo, apresentam mecanismos de desgaste semelhantes. Estas imagens mostram que ocorreu arrancamento de grandes regiões da chapa, provavelmente consequência da grande adesão ocorrida pelo contato entre a ferramenta e a chapa. Este fenômeno é o que chamamos de *galling*. Isto significa que nesta região houve uma falha na lubrificação entre a ferramenta e a chapa, o que leva a uma adesão entre as mesmas e a um grande crescimento de junções. Estas circunstâncias resultam em uma remoção de grandes porções de material. As Figuras 30 e Figuras 31 mostram a adesão entre a ferramenta e a chapa das Figura 29(a) e Figura 29(c) na versão original.

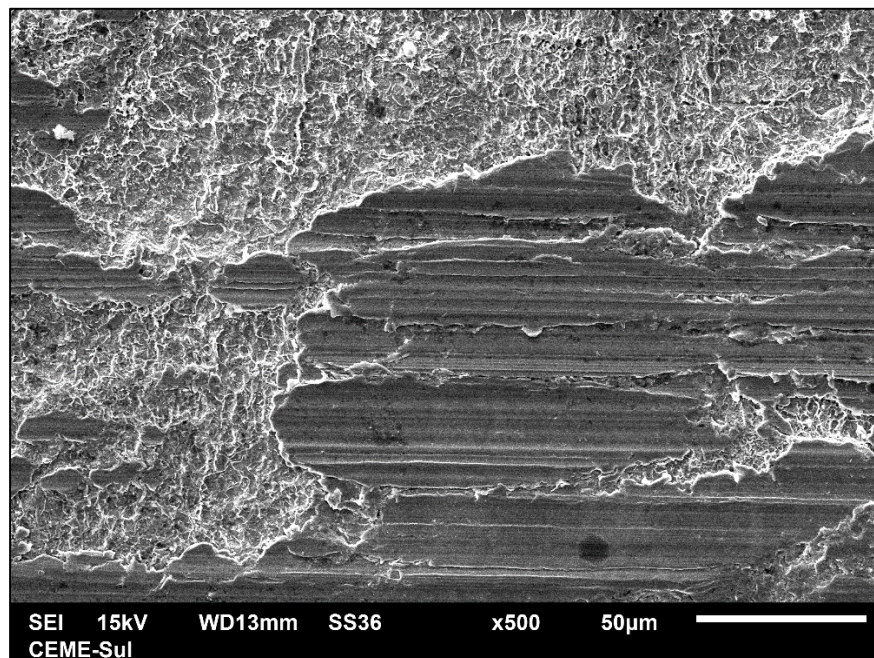


Figura 30- Imagem obtida via MEV da chapa ensaída contra ferramenta aço fundido 1 sem revestimento.

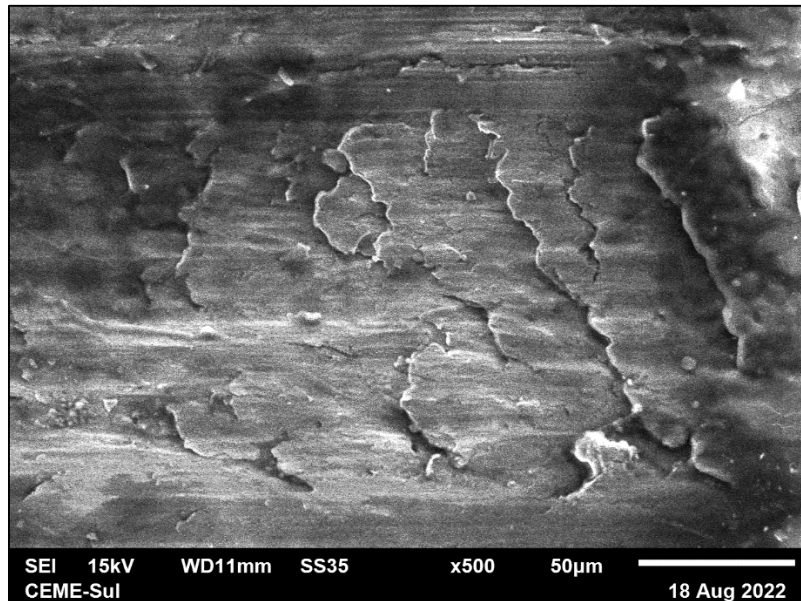


Figura 31- Imagem da chapa ensaiada contra a ferramenta aço sinterizado 2 sem revestimento.

Embora o galling observado na Figura 29(a) e Figura 27(c) sejam semelhantes, na Figura 29(a) nota-se uma severidade um pouco maior. É bem possível que isso ocorra devido ao fato do material utilizado na ferramenta aço fundido 1 sem revestimento exibir uma estrutura bruta de fusão. A Figura 29(a) mostra a microestrutura do aço fundido 1. Esta estrutura apresenta uma matriz dendrítica e nas regiões interdendríticas forma-se um eutético, que são as últimas regiões a se solidificar. O eutético formado na região interdendrítica é composto pela matriz rica em ferro e carbonetos de cromo e vanádio. Já que as regiões da matriz são regiões de baixa dureza e que o endurecimento ocorre nas regiões interdendríticas, a grande adesão que ocorre no contato ferramenta-chapa provavelmente acontece na região da matriz. Como a resistência da chapa é menor que da ferramenta, a ruptura das junções leva ao desgaste, removendo material da chapa, que é transferido à ferramenta. A microestrutura evidenciando a matriz dendrítica do aço fundido 1 é mostrada na Figura 22(a) por {TAVARES, 2019 #77} e na Figura 22(b) a imagem é de uma estrutura dendrítica de fusão da liga de Al-Sn, por {Osório, 2009 #88;} a qual foi adicionada a fim de referenciar a estrutura dendrítica de fusão. As imagens via MEV das microestruturas dos aços conforme o processo de fabricação são mostradas no item 4.1.2. (Corpos de prova das ferramentas) deste trabalho e foram disponibilizadas pela empresa Bruning Tecnometal LTDA para o estudo de {TAVARES, 2019 #77}.

Na Figura 29(c) foi observada uma severidade de desgaste um pouco menor, se comparada à Figura 29(a), mas ainda bastante elevada. A causa do desgaste severo ocorrida foi possivelmente devido à alta porosidade dos aços sinterizados. A porosidade nos aços, mostrada na Figura 21(b), contribui para uma resistência mecânica inferior das ferramentas, possivelmente aumentando a adesão entre ferramenta e chapa, o que pode levar a remoção e transferência do material da chapa para a ferramenta.

Porém, as demais ferramentas sinterizadas (aço sinterizados 1 e 3) não levaram a mecanismos de desgaste na chapa tão severos quanto à ferramenta sinterizada 2. Observando-se a composição química das ferramentas (Tabela 6), as ferramentas sinterizadas 1 e sinterizadas 3 possuem um teor de elementos de liga como V, W, Mo (e Co para a aço sinterizado 1) muito superiores aos da ferramenta aço sinterizado 2. O endurecimento promovido por estes elementos de liga provavelmente contribuiu para a redução da adesão entre ferramenta e chapa, mesmo sendo fabricadas por sinterização. Para a ferramenta aço sinterizado 1, que possui a maior quantidade de elementos de liga, ao invés de arrancamento observou-se prevalência de sulcos de abrasão, provavelmente causados pelo riscamento promovido pelos abrasivos. As imagens da morfologia das ferramentas são mostradas na Figura 21. Deve-se considerar o tipo de processo de fabricação de cada ferramenta previamente expostos na Tabela 6, para auxiliar a observação visual das imagens.

Os mecanismos de desgaste observados nas Figuras 28(a) e Figuras 28(c) foram severos, embora o material das ferramentas seja diferente. Provavelmente a existência de galling em ambos os contatos seja influenciada pelo processo de fabricação do material que constitui cada uma das ferramentas: aço fundido 1 e aço sinterizado 2 e a composição química de cada um dos materiais, conforme mostrado na Tabela 9.

Para avaliar regiões com possíveis diferenças de composição química nas chapas ensaiadas, por exemplo por formação de camada transferida, tribooxidação, dentre outros, foram selecionados diferentes regiões da chapa que apresentaram contraste de coloração na imagem de elétrons retroespalhados.

A Figura 32 exemplifica uma análise de EDS por pontos. Os pontos selecionados na figura são as áreas onde composição química das chapas ensaiadas contra ferramentas aço fundido 1 e aço sinterizado 2 foram analisadas. A Tabela 9 mostra a

composição química dos pontos marcados na Figura 32.

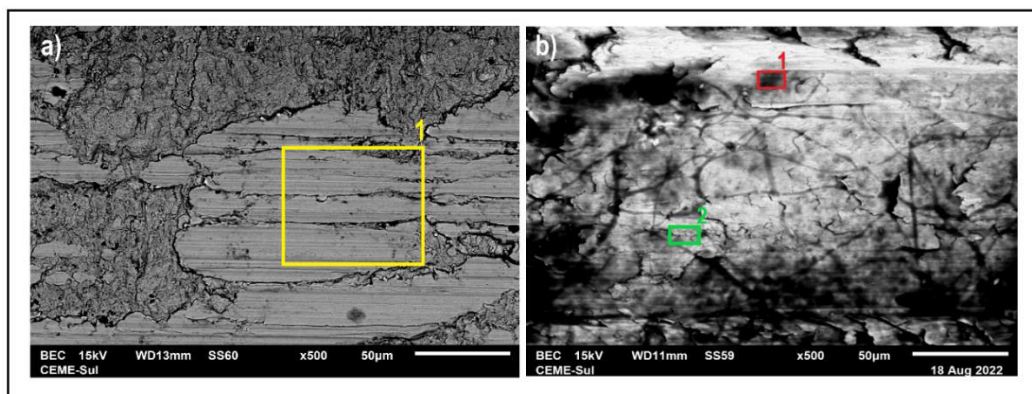


Figura 32. Imagens das chapas ensaiadas contra ferramentas
a) aço fundido 1 e b) aço sinterizado 2 sem revestimento (temperadas)
b) obtidas via EDS mostrando os pontos destacados para análise.

Tabela 9. Composição química das chapas ensaiadas contra as ferramentas Aço fundido 1 e Aço sinterizado 2 obtidas via EDS.

	C	Al	Si	Mn	Fe	O	Na	Ca
Aço fundido 1	1,57	0,24	0,12	1,46	96,51	-	-	-
Aço sinterizado 2	35,29	-	-	1,27	63,16	-	0,18	0,11
Aço sinterizado 2	16,83	0,18	0,19	1,27	78,77	2,15	0,36	0,26

5.3 Mecanismos de Desgaste para as Chapas Ensaçadas Contra as Ferramentas Revestidas

5.3.1 Chapas Ensaçadas contra Ferramentas de Revestimento 1

As chapas ensaiadas contra as ferramentas com Revestimento 1 foram posicionadas lado a lado de modo comparar os mecanismos de desgaste ocorridos entre cada uma das chapas ensaiadas com a mesma ferramenta.

A Figura 32 permite observar que, além da influência do revestimento, ocorre a influência do processo de fabricação e do material do substrato nos mecanismos de

desgaste. Também mostra que, independentemente do material do substrato, houve uma tendência de alisamento da superfície dentro da trilha de desgaste, a qual mostrou alguns sulcos na direção de estiramento. Observa-se em algumas trilhas e presença de pequenos debris que foram aderidos à chapa (setas azuis). Em especial, chama-se a atenção para regiões de intenso arrancamento de material da chapa (elipses vermelhas), resultante de adesão entre ferramenta e chapa. Como a dureza da chapa é bem inferior à da ferramenta revestida, o arrancamento com a quebra das junções pode ocorrer preferencialmente na chapa. No trabalho de Tavares (TAVARES 2019) observou-se intensa camada transferida nos ensaios realizados com ferramentas revestidas.

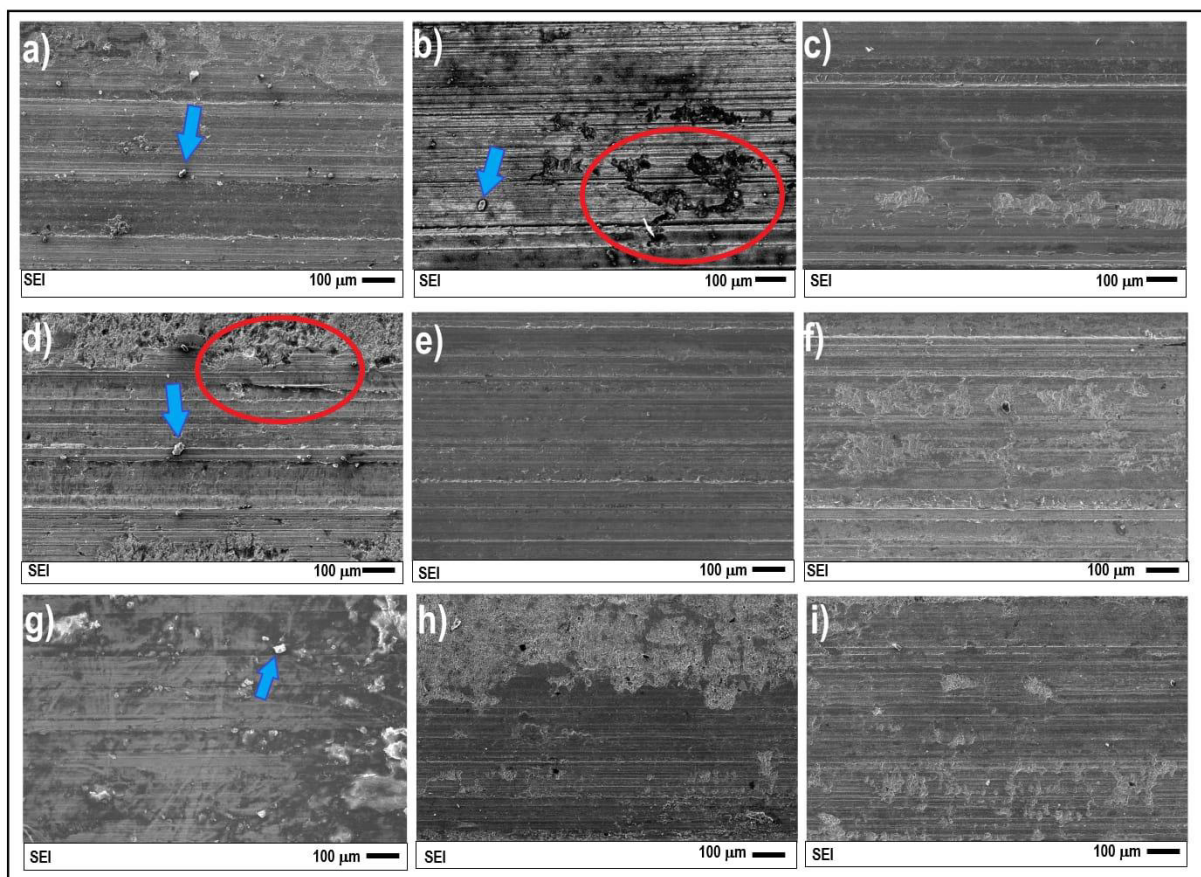


Figura 33. Imagens das chapas ensaiadas contra ferramentas de revestimento 1 obtidas via MEV- a) aço sinterizado 1 ; b) aço sinterizado 2; c) aço sinterizado 3; d) aço fundido 1; e) aço fundido 2; f) aço refundido; g) aço laminado 1; h) aço laminado 2; i) aço laminado 2.

5.3.2 Mecanismos de Desgaste para as Chapas Ensaçadas contra Revestimento 2

Da mesma forma que as chapas ensaiadas contra a ferramenta de Revestimento 1, as chapas ensaiadas contra ferramentas revestidas com revestimento 2 foram posicionadas lado a lado. As imagens das chapas são mostradas na Figura 32.

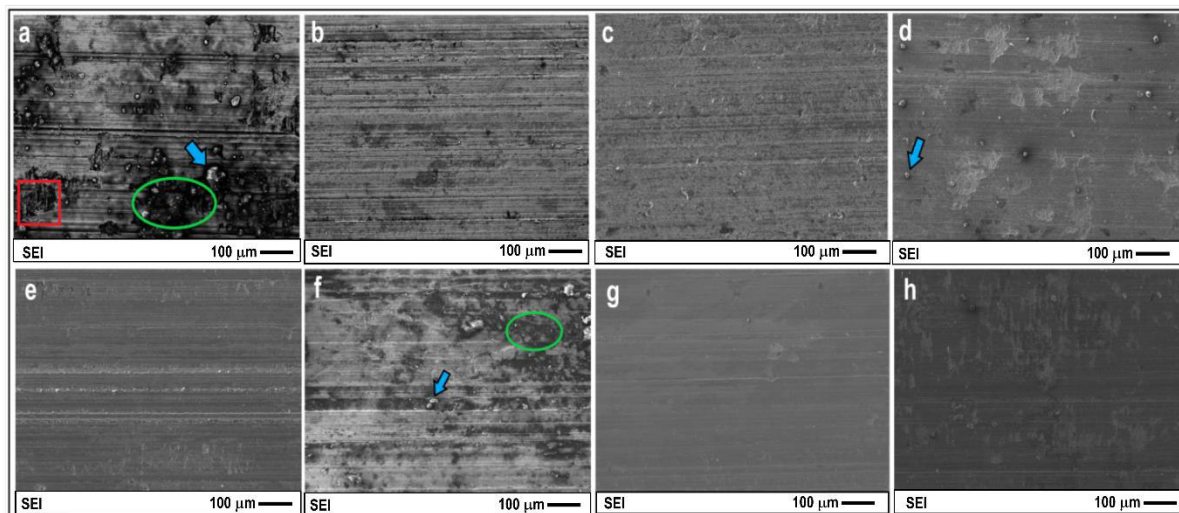


Figura 34. Imagens das chapas ensaiadas contra ferramentas de revestimento 2 obtidas via MEV - a) aço sinterizado 1; b) aço sinterizado 2; c) aço sinterizado 3; d) aço fundido 1; e) aço fundido 2; f) Aço laminado 1; g) Aço laminado 2; h) Aço laminado 2.

Na Figura 33 pode-se observar que há a presença de alguns debris aderidos (setas azuis) em algumas chapas, pontos escuros em diversas regiões (elipses verdes), provavelmente decorrentes da oxidação em algumas chapas e também uma pequena região de arrancamento na Figura 33a (quadrado vermelho). Além disso, nota-se que, dentro da trilha de desgaste, há uma predisposição ao alisamento da superfície revestida, independentemente do substrato, como observado para o revestimento 1.

5.3.3 Mecanismos de Desgaste para Chapas Ensaçadas Contra Ferramentas de Revestimento 3

Os critérios de ensaio para o revestimento 3 não foram todos concluídos, sendo deslizadas somente 17 chapas ao invés das 25 estabelecidas como critério de fim do ensaio estipulado por (TAVARES 2019). Vale a pena salientar que o ensaio de atrito foi concluído para somente 3 peças de chapas ensaiadas contra o revestimento 3. Para as demais, ocorreu erro de ensaio provavelmente por engripamento da máquina ou do travamento do ensaio. As imagens obtidas por MEV são mostradas na Figura 35.

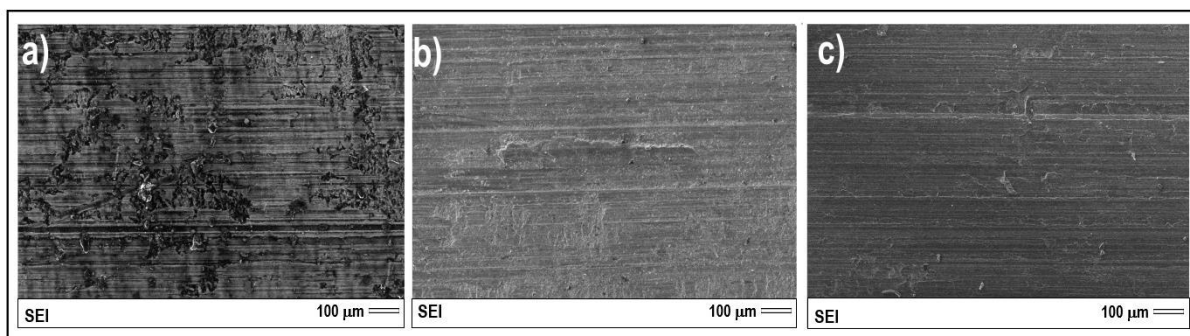


Figura 35. Imagens das chapas ensaiadas contra ferramentas de revestimento 3: a) aço sinterizado 1; b) aço fundido 1; c) aço refundido.

As imagens mostradas nas Figuras 35, 36 e 37 são as imagens originais da figura Figura 34 e pode-se reparar que ambas apresentam uma tendência ao alisamento. Porém, na Figura 35 pode-se observar material arrancado e áreas de coloração mais escura, provavelmente pela oxidação da superfície.

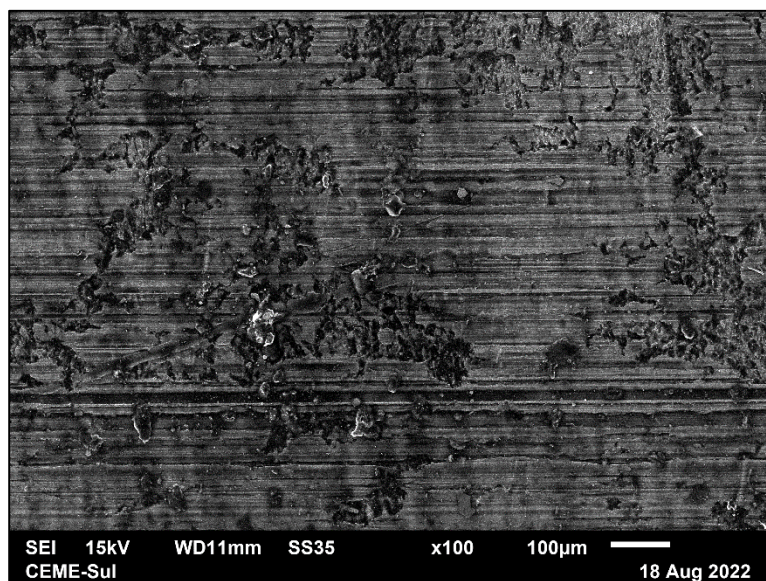


Figura 36- Imagem obtida via MEV, aço sinterizado 1.

Entretanto, nas Figuras 36 e Figuras 37 na nota-se uma superfície riscada, provavelmente por conta de abrasão na direção do estiramento. Além disso, na Figura 37 visualiza-se uma pequena região de protuberância na chapa, que sugestivamente também resulta de algum material transferido para a chapa.

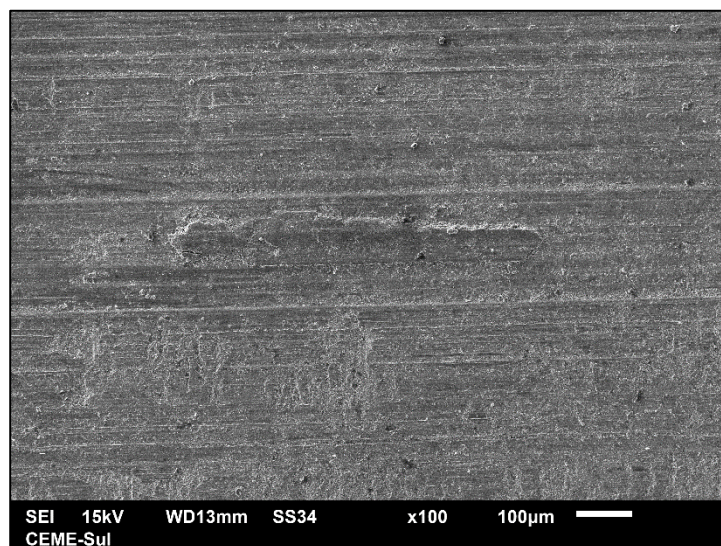


Figura 37- Imagem via MEV, aço fundido 1.

Na Figura 37 observa-se também a presença de alguma adesão na chapa (em menor quantidade que em (b)), supostamente por material transferido resultante da aglomeração, deformação e transferência de debris. Tavares observou em seu estudo uma intensa ocorrência de material transferido da chapa para a ferramenta.

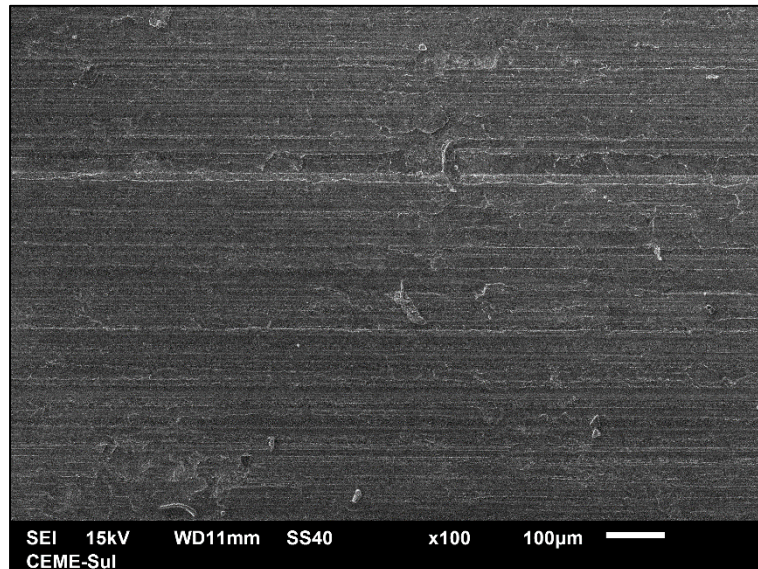


Figura 38- Imagem obtida via MEV- aço refundido.

O presente trabalho confirma a hipótese de Tavares mostrando que o arrancamento intenso se dá, preferencialmente, do material das chapas transferido para a ferramenta. Porém, observa-se uma pequena quantidade de material transferido às chapas, mesmo que em quantidade muito menor que a observada por Tavares para as ferramentas..

5.3.4 Topografia de superfície das chapas

Foram obtidas imagens via Microscopia Confocal (interferometrias) em três dimensões com o intuito de avaliar as superfícies das chapas. Para tanto, a elaboração de mapas topográficos das superfícies das chapas ensaiadas contra as ferramentas revestidas e sem revestimento tornou-se necessária. Também foram calculados os parâmetros topográficos de superfície 3D plotada. As figuras a seguir exemplificam mapas topográficos das superfícies das chapa ensaiadas contra ferramentas sinterizadas em revestimento e revestidas.

a. Mapas topográficos das chapas

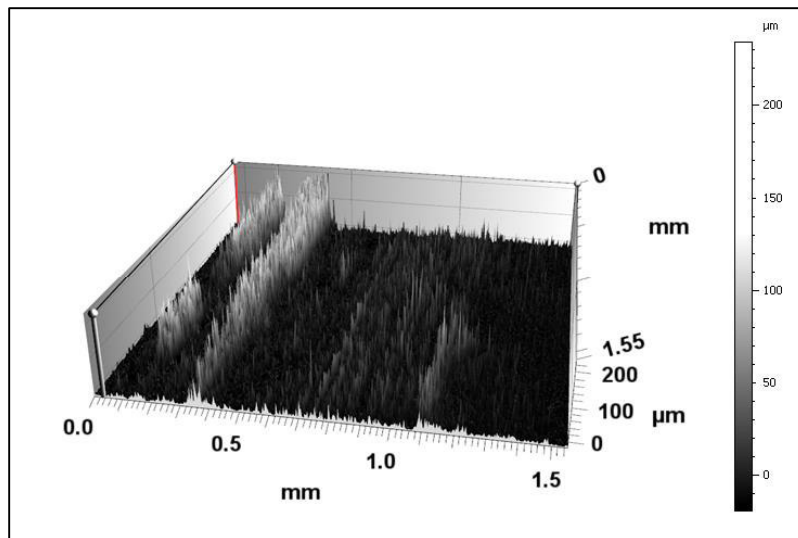


Figura 39. Exemplo de mapa topográfico da chapa ensaiada contra ferramenta sinterizada 1 sem revestimento.

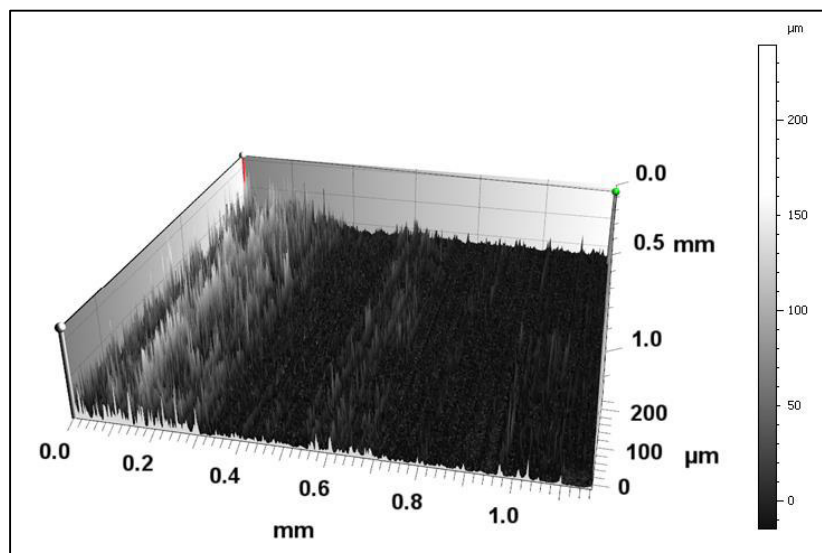


Figura 40. Exemplo de mapa topográfico da chapa ensaiada contra ferramenta de revestimento 1 sinterizada.

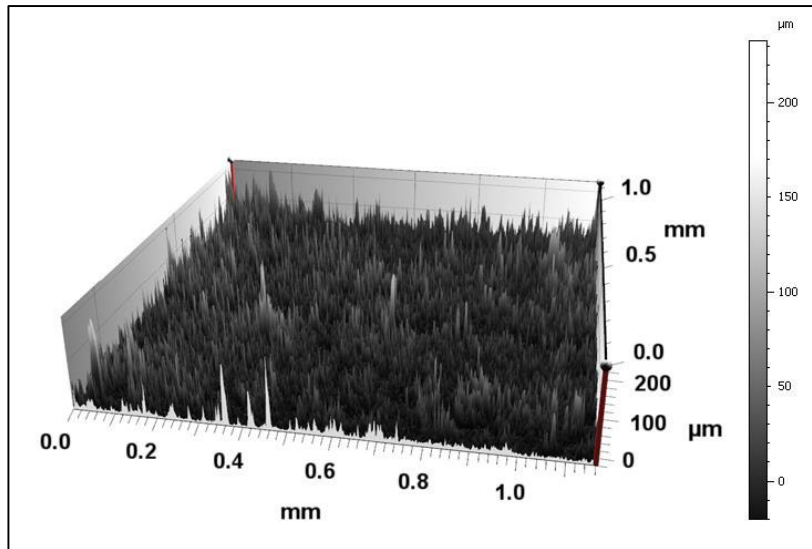


Figura 41. Exemplo de mapa topográfico da chapa ensaiada contra ferramenta de revestimento 2 sinterizada.

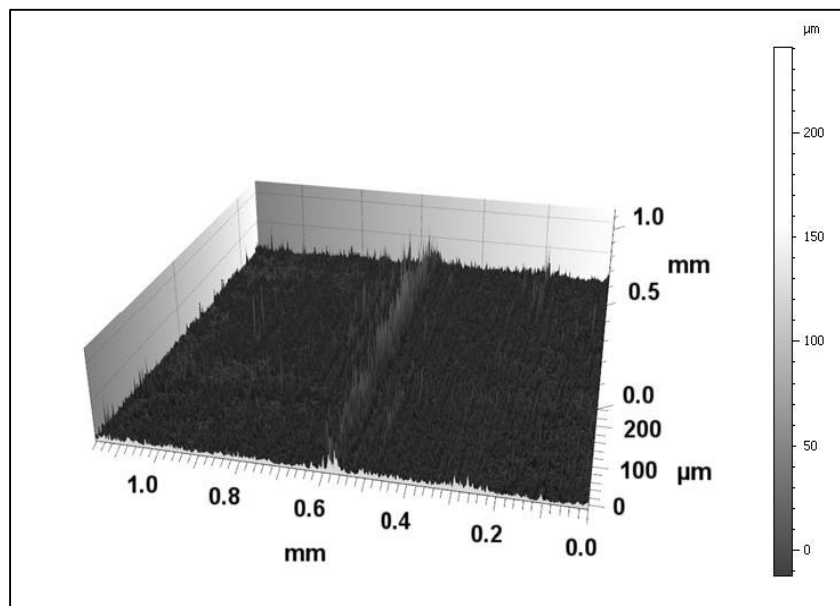


Figura 42. Exemplo de mapa topográfico da chapa ensaiada contra ferramenta de revestimento 3 sinterizada.

b. Parâmetros Superfície das chapas ensaiadas

A topografia superficial das ferramentas foi quantificada por Tavares (TAVARES 2019) antes dos ensaios e os valores dos parâmetros de superfície em função do tipo de substrato (sinterizado, laminado, fundido ou refundido) foram comparados. Neste

trabalho, as topografias das superfícies das chapas ensaiadas contra as ferramentas não revestidas (temperadas) confirmam a hipótese de que o desgaste tipo de desgaste das chapas ocorreu de acordo processo de fabricação das ferramentas (ver Tabela 6).

Para comparar as quantificações das superfícies desgastadas das chapas ensaiadas com as superfícies da ferramentas, parâmetros topográficos de superfície das chapas (S_q , S_z , S_{sk} , S_{ku} , S_m e S_{bi}) foram calculados e comparados com os resultados obtidos por Tavares(TAVARES 2019).

A topografia superficial das ferramentas foi quantificada por Tavares (TAVARES 2019) antes dos ensaios e os valores do parâmetro S_q em função do tipo de substrato (sinterizado, laminado, fundido ou refundido) foram comparados. A fim de permitir uma comparação do efeito dos diferentes revestimentos no parâmetro S_q das chapas com o efeito no S_q das ferramentas previamente investigado por Tavares, os mesmos são comparados na Figura 42. Para isso, inicialmente foram resumidos e reproduzidos os valores de S_q das ferramentas do estudo de Tavares antes dos ensaios (a) e depois dos ensaios em (b). Nota-se o aumento dos valores do parâmetro S_q para todas as ferramentas, com e sem revestimento. A razão deste ocorrido sugere o arrancamento de material da chapa, corroborando as observações de (TAVARES 2019), que identificou aumento da camada de transferência devido à adesão do material da chapa na ferramenta.

Observando-se as rugosidades das chapas obtidas no presente trabalho é notada uma diferença de valores de S_q muito alta entre as chapas e as ferramentas. Provavelmente isto se deva ao processo de fabricação das ferramentas. As chapas ensaiadas contra as ferramentas sinterizadas apresentaram uma rugosidade com valor mais alto que a rugosidade das chapas ensaiadas contra as ferramentas fundidas, exceto para as chapas ensaiadas contra a ferramenta sinterizada 3 e fundida 2 que apresentaram rugosidades semelhantes (ver Tabela 6). A resposta para estes valores obtidos para as ferramentas retificadas por sinterização é a presença de poros provenientes do processo (ver Figura 21).

Comparando os resultados dos valores de S_q das ferramentas com os valores de S_q das chapas ensaiadas contra as ferramentas revestidas com revestimento 1, estas mostram-se muito maiores que as rugosidades das ferramentas. As chapas ensaiadas

contra as ferramentas sinterizadas e refundidas, ambas com revestimento 1, mostram condições de valores de rugosidade mais estáveis para o parâmetro Sq na condição final de ensaio. Somente observou-se efeito do substrato no caso das ferramentas sinterizadas, que levaram a maior rugosidade das chapas, possivelmente associado à porosidade das ferramentas. Para os revestimentos 2 e 3, não foi observado efeito significativo do substrato da ferramenta nos valores de Sq das chapas. Comparando-se os revestimentos 1, 2 e 3 entre si, o revestimento 1 apresentou rugosidade mais alta para os substratos sinterizados. Já para os demais substratos, o revestimento 2 apresentou valores de Sq da chapa ligeiramente mais altos. Porém, de forma geral, o parâmetro Sq não foi capaz de diferenciar a morfologia das chapas ensaiadas contra diferentes ferramentas revestidas.

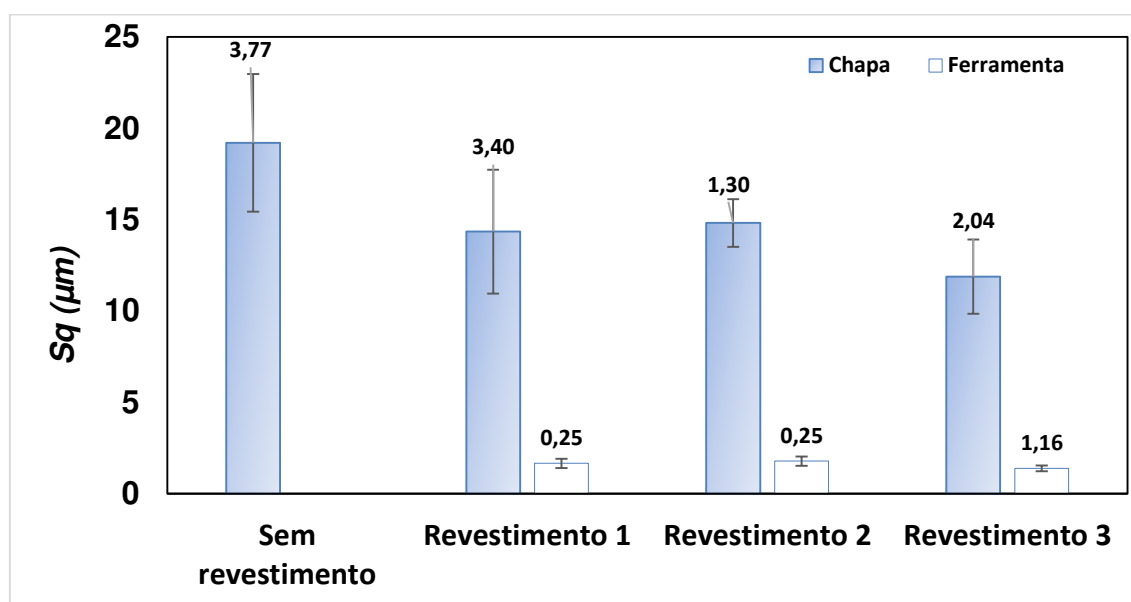


Figura 43- Parâmetro Sq referente a chapas e ferramentas ensaiadas com e sem revestimento.

Os valores relacionados ao parâmetro Sz , os quais são relativos aos picos mais altos e vales mais profundos, são apresentados na Figura 43. Este parâmetro pode ser adequado para verificar a existência de transferência ou não de material nas superfícies. Tavares (TAVARES 2019) diz em seu trabalho que a transferência de material para a ferramenta foi observada em todas as condições testadas, ou seja, em todas as condições de ensaio. Além disso, os maiores valores de Sz foram evidenciados para o Revestimento 1, podendo estar associado tanto à sua rugosidade

inicial quanto a uma maior quantidade de material transferido. Para as chapas, porém, não foi observado um efeito significativo nos valores de S_z .

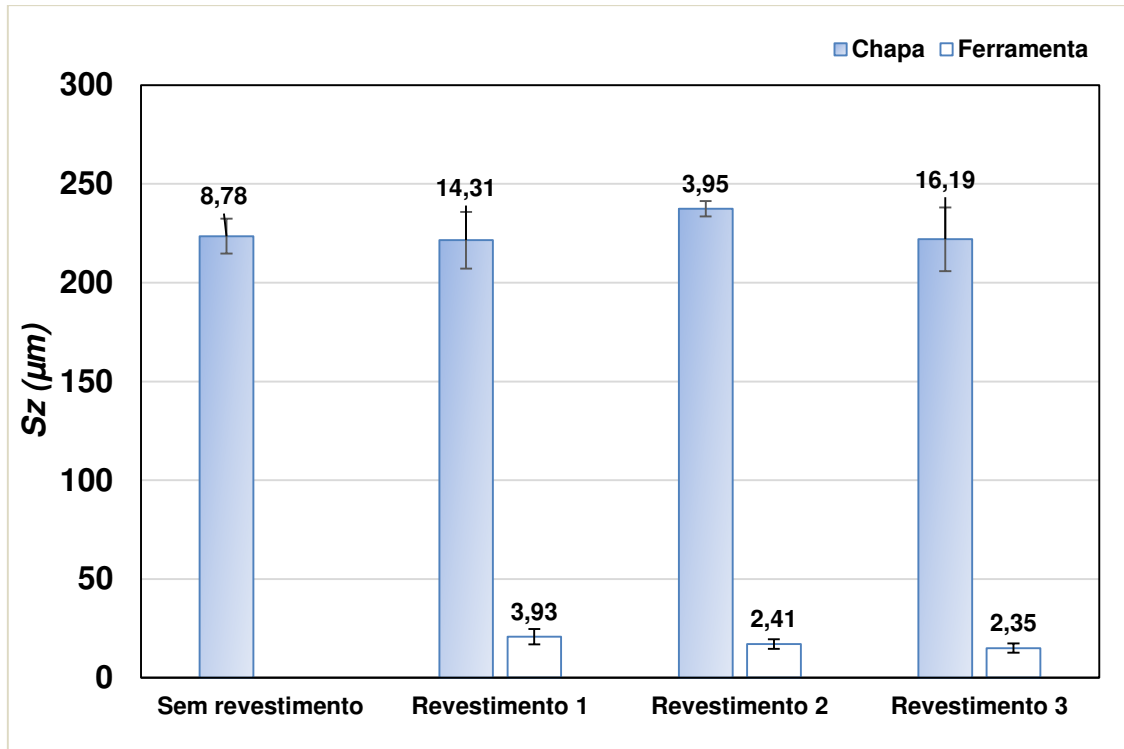


Figura 44- Parâmetro S_z referente a chapas e ferramentas ensaiadas com e sem revestimento.

Os valores calculados referentes ao parâmetro S_{bi} , que está associado à capacidade de apoio mecânico da superfície, são mostrados na Figura 44. Para as ferramentas, os valores de S_{bi} nas condições finais de não foram significativos de acordo com {TAVARES, 2019 #77}, no entanto é interessante salientar que para a condição intermediária de ensaio Tavares enfatizou que as variações dos valores de S_{bi} para esta condição poderiam estar associadas ao material transferido. Já para as chapas, foi observado que os valores de S_{bi} são todos estatisticamente semelhantes, com exceção da chapa ensaiada contra as ferramentas sinterizadas sem revestimento.

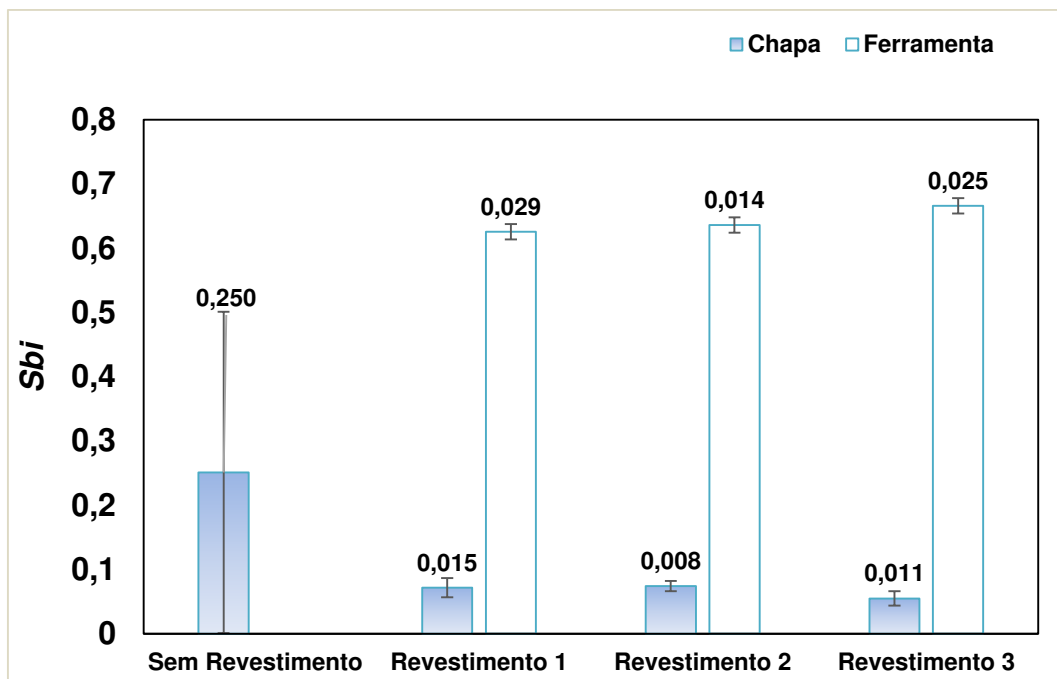


Figura 45- Parâmetro S_{bi} referente a chapas e ferramentas ensaiadas com e sem revestimento.

Para quantificar a quantidade de material existente na superfície das chapas, o parâmetro de rugosidade tri-dimensional volumétrico relativo ao volume de material na superfície S_m foi calculado. A Figura 45 exibe o gráfico para o parâmetro S_m .

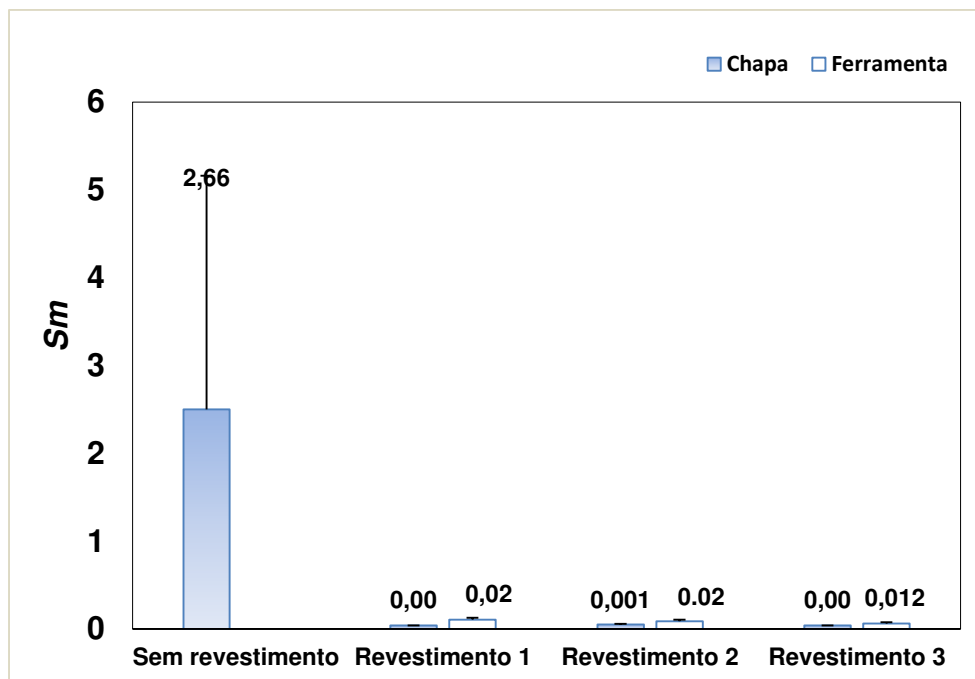


Figura 46- Parâmetro S_m para chapas ensaiadas contra ferramentas com e sem revestimento.

Nota-se no gráfico que os valores de S_m encontrados nas chapas foram muito menores que nas ferramentas, exceto para a chapa ensaiada contra as ferramentas sem revestimento, o que confirma que a ocorrência de material transferido ocorreu majoritariamente para a ferramenta e não para a chapa, conforme o que normalmente ocorre em conformação mecânica {Montmitonnet, 2000 #55}.

No que tange ao parâmetro S_{sk} (Figura 46), que permite determinar se as superfícies apresentam predominância de picos, se $S_{sk} > 0$ ou de vales, se $S_{sk} < 0$, observa-se, para as ferramentas de revestimento 1 que para todas as condições ensaiadas levaram a valores de S_{sk} positivos, mostrando uma predominância de platô-picos, mesmo nas condições desgastadas. Isso confirma que não ocorre a formação de uma camada transferida lisa na superfície da chapa, como havia sido observado nas ferramentas por Tavares para algumas ferramentas revestidas.

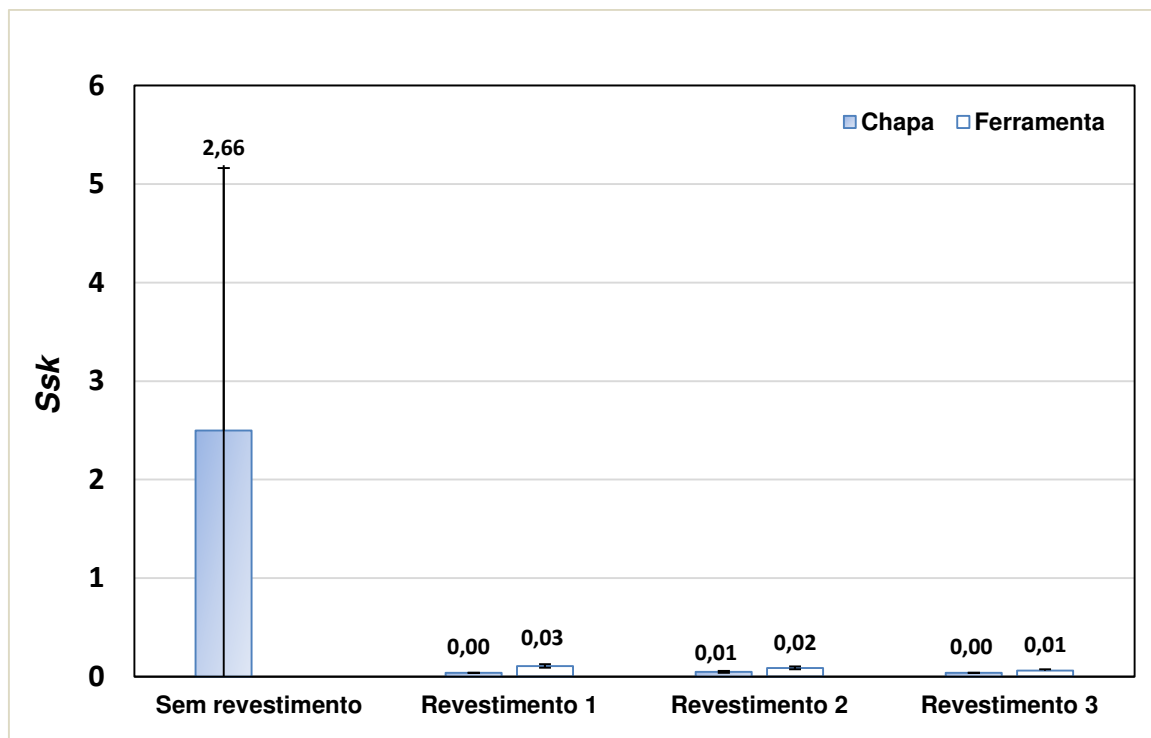


Figura 47. Parâmetro *Ssk* das chapas ensaiadas e ferramentas sem e com revestimento.

Para o parâmetro *Sku*, parâmetro associado à agudez ou achatamento da curva de distribuição das alturas das irregularidades, foi observado por {TAVARES, 2019 #77} nas ferramentas que para o revestimento 1, o desgaste tendeu a reduzir um pouco os valores de *Sku*, particularmente na condição final, provavelmente em função do material transferido levar à formação de protuberâncias relativamente lisas ao invés de mais pontiagudas, o que deve tornar a distribuição das alturas um pouco mais gaussiana. Tavares não observou tendências de variação quanto aos valores de *Sku* em função dos ensaios de desgaste para o revestimento 2. Para o revestimento 3, 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. Para as chapas, em todas as condições, os valores de *Sku* (Figura 49) apresentam valores acima de 3, o que evidencia a tendência de que há um desvio em relação a uma curva gaussiana no sentido de ter uma curva de distribuição mais pontiaguda, mas sem variação significativa dependendo do tipo de ferramenta.

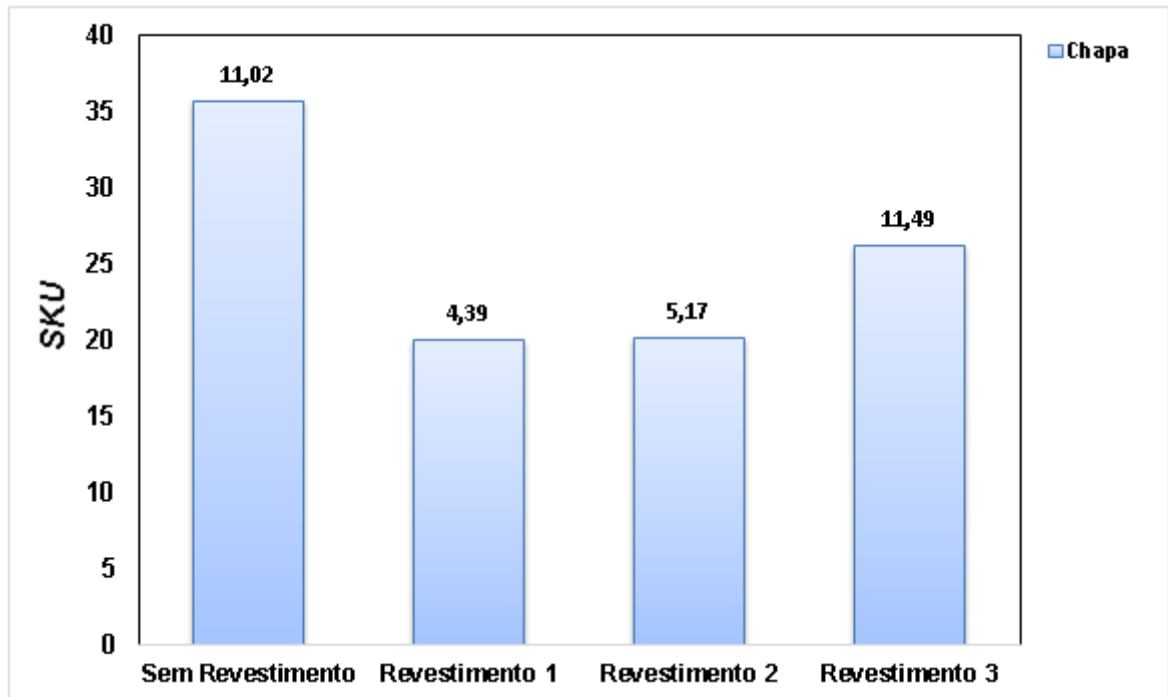


Figura 48- Parâmetro *Sku* para as chapas ensaiadas contra as ferramentas revestidas e não revestidas.

Resumindo, este trabalho utilizou chapas ensaiadas contra ferramentas contendo diferentes revestimentos depositados por PVD. Em trabalhos anteriores, o atrito e o desgaste da ferramenta foram avaliados e observou-se que o revestimento diminuiu drasticamente o atrito e o desgaste da ferramenta. Além disso, este trabalho anterior havia mostrado que o revestimento à base de TiAlN levou a maior atrito entre os três revestimentos, o que foi associado ao fato de não se formar uma camada transferida lisa, homogênea e oxidada na ferramenta. Porém, o presente trabalho mostrou que, no caso das chapas ensaiadas, somente ocorreu diferença na morfologia das chapas para o caso das ferramentas não revestidas. Em particular, as ferramentas sinterizadas tenderam a levar a maior arrancamento de material das chapas. Além disso, as chapas ficaram mais rugosas (*Sq*) quando as ferramentas não eram revestidas. Para o caso de ferramentas revestidas, nem o material do substrato nem o tipo de revestimento alteraram significativamente a morfologia final das chapas. Acredita-se que isso ocorre porque o arrancamento de debris das chapas durante o processo de conformação se dá de forma relativamente semelhante para todas as

ferramentas revestidas. O que altera dependendo do tipo de revestimento é a forma como esses debris, após aglomerados e deformados, são transferidos à superfície da ferramenta e oxidados. Por esse motivo, acredita-se que para ferramentas revestidas por PVD, em geral a variação da morfologia superficial das chapas dependendo do tipo de substrato e/ou revestimento não é muito significativa em processos de conformação, apenas pode-se alterar a morfologia superficial da ferramenta.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou dar continuidade ao trabalho de (TAVARES 2019), que estudou e analisou o comportamento tribológico de ferramentas de conformação a frio revestidas comercialmente, sendo os mecanismos de desgaste provocados através de ensaio do tipo *Strip Drawing Test*, desenvolvido pelo setor de P&D da empresa Bruning Tecnometal Ltda. O entendimento do trabalho de (TAVARES 2019) foi fundamental compreender os mecanismos de desgaste ocorridos na chapa e correlacioná-los com os mecanismos obtidos nas ferramentas. Utilizando os mesmos materiais e métodos utilizados no estudo de (TAVARES 2019), chegaram-se às seguintes conclusões para o presente trabalho:

- A chapa laminada extraída da bobina NBR 5915 através dos resultados obtidos, é compatível com um aço SAE 1020.
- As chapas ensaiadas contra as ferramentas sem revestimento Fundidas (D2) e sinterizadas (S790), no geral, apresentaram mecanismos de desgaste semelhantes com arrancamento de grandes regiões da chapa e a ocorrência de desgaste severo (*galling*). As demais ferramentas sinterizadas e fundidas não levaram a mecanismos de desgaste na chapa tão severos quanto a ferramenta sinterizada S790 devido ao endurecimento promovido pelos elementos de liga existentes em sua composição.
- Para as chapas ensaiadas contra o revestimento VN, observou-se uma tendência ao alisamento na trilha de desgaste, sulcos na direção do estiramento, presença de debris em algumas trilhas e em especial, intenso arranchamento em algumas regiões da chapa.
- O ensaio das chapas contra o revestimento TiCrN resultou na presença de alguns debris aderidos na chapa e em algumas chapas, pode-se observar pontos escuros, provenientes de oxidação e também uma pequena região de arranchamento da chapa. Foi observado também uma predisposição ao alisamento da superfície da chapa, independentemente do substrato da ferramenta.
- Tendência ao alisamento, presença de protuberâncias, áreas de superfície riscada na direção do estiramento e adesão na chapa foram observados para as chapas ensaiadas contra o revestimento 3.

- É notada uma diferença de valores de Sq muito altas das chapas em relação às ferramentas. Provavelmente isto se deva ao processo de fabricação das ferramentas.
- As chapas ensaiadas contra as ferramentas sinterizadas não revestidas apresentaram valores de parâmetro Sq com valores mais altos que os parâmetros Sq das chapas ensaiadas contra as ferramentas fundidas, exceto para as chapas ensaiadas contra a ferramenta sinterizada 3 e fundida 2 que apresentaram rugosidades semelhantes.
- Os valores de Sq para as ferramentas com revestimento VN mostraram-se muito menores que os valores de Sq das chapas ensaiadas contra as ferramentas de mesmo revestimento apresentando uma superfície mais rugosa. No entanto, as chapas ensaiadas contra as ferramentas fundidas e sinterizadas apresentaram os valores de Sq mais estáveis e as chapas ensaiadas contra as ferramentas laminadas e refundidas apresentaram um valor de Sq mais baixo. Os valores de Sq para as chapas ensaiadas contra os demais tipos de revestimentos e substratos obtiveram valores semelhantes.
- Para as chapas, os parâmetros Sz não obtiveram efeito significativo por apresentar valores extremamente semelhantes.
- Foi observado que os valores para o parâmetro Sbi para as chapas são todos semelhantemente próximos.
- O parâmetro Sm mostrou que o revestimento das chapas tem o efeito de reduzir desgaste nas chapas.
- O parâmetro Ssk apresentou somente valores maiores que zero para as chapas observa-se que, para as ferramentas, para todas as condições ensaiadas os valores de Ssk são positivos, o que indica que a formação platô-picos nas superfícies são formadas, mesmo nas condições desgastadas, ao invés da ocorrência de arrancamento do material da chapa. Já para o parâmetro Sku , os valores observados são acima de 3, o que evidencia a tendência de que há um desvio em relação a uma curva gaussiana no sentido de ter uma curva de distribuição mais pontiaguda.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de dar continuidade a esta pesquisa, sugere-se as seguintes possibilidades:

- Utilizar maiores áreas de medição da topografia de superfícies que possam cobrir uma área mais significativa da superfície das chapas ensaiadas, possivelmente utilizando-se técnicas de *stitching*.
- Avaliar o efeito da topografia de superfície da ferramenta antes da deposição dos revestimentos. Em particular, cita-se a identificação dos mecanismos de desgaste em chapas ensaiadas contra ferramentas texturizadas com diversos tipos de texturização utilizando nos ensaios corpos de prova em alumínio e aço inoxidável.
- Realizar o uso da mesma metodologia usando a microscopia confocal para obter interferometrias para outros tipos de metais, tanto chapas quanto ferramentas, em especial o alumínio e os aços inoxidáveis.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1. REFERÊNCIAS NOMINAIS

- A.F. Tavares, A. P. O. L., E.A. Mesquita, D.T. Almeida, J.H.C. Souza, H.L. Costa (2021). "Effect of transfer layers on friction and wear mechanisms in strip drawing tests of commercially coated forming tools." wear ;476; 2021.
- ANDREASEN, J. L. B., N.; DE CHIFFRE, L. (1998). "Quantification of galling in sheet metal forming by surface topography characterization." International Journal of Machine Tools & Manufacture . 503-510.
- AZAR, G. T. P. E., D; ÜRGEN, M. (2018). "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
- .AZUSHIMA, A. K., H. (1995). "Direct Observation of Contact Behaviour to Interpret the Pressure Dependence of the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming. ." CIRP Annals 44: 209-212.
- Barcelos, D. J. (2019). "Caracterização tribológica do revestimento ta-C/DLC (carbono tipo diamante/amorfo tetraédrico não hidrogenado) sobre aço ABNT 52100 em contato e movimento relativo com esfera de Si₃N₄."
- Birol, Y. (2013). "Sliding wear of CrN, AlCrN and AlTiN coated AISI H13 hot work tool steels in aluminium extrusion." Tribology International 57: 101-106.
- BLAU, P. J. (2009). Friction science and technology: from concepts to applications.
- BONNET, C. V., F;Rech,J;Claudin,C;Hamdi,H;Bergheau,J.M;Gilles,P (2008). "Identification of a friction model- Application to the context of dry cutting of an AISI 316L austenitic stainless steel with a TiN coated carbide tool." International Journal of Machine Tools and Manufacture 48(11): 1211-1223.
- BOWDEN, F. P. B., F. P.; TABOR, D. (2001). The friction and lubrication of solids. Oxford, England, Oxford university press.
- BRESCIANI, E. e. a. C. p. d. m. (2011). Conformação plástica dos metais. São Paulo.
- BRESCIANI FILHO, E. E. a., Ed. (1997). Conformação Plástica dos Metais Ed. Da Unicamp.

- Budinski, K. G. (1981). "Incipient galling of metals." wear 74(1): 93-105.
- CARLSSON, P. O., M. (2006). " PVD coatings for sheet metal forming processes- a tribological evaluation." Surface and Coatings Technology 200: 4654-4663.
- Claudin, C., J. Rech, W. Grzesik and S. Zalisz (2008). "Characterization of the frictional properties of various coatings at the tool/chip/workpiece interfaces in dry machining of AISI 4140 steel." International Journal of Material Forming 1(1): 511-514.
- CRIVELLARO, R. S. (2003). Estudo da Estampabilidade de Tailored Blanks soldadas a laser Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DE SOUZA, J. L., M. (2010). "Analysis of the tribological behaviour of polym composite tool materials for sheet metal forming." Wear 268: 241-248.
- DIN8580 (1985). Fertigungsverfahren–Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag Berlin.
- Eriksson, J., & Olsson, M. (2011). "Tribological testing of commercial CrN, (Ti,Al)N and CrC/C PVD coatings — Evaluation of galling and wear characteristics against different high strength steels." Surface and Coatings Technology.
- Farias,P.D.M.CM.(2017)."TRIBOLOGIA."2022,from https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/18_04_Palestras_Tribologia_Profa_MCristinaMFarias.pdf.
- FIGUEIREDO, L. e. a. E. s. o. f. i. s. m. f. W., Percentil Scopus: 87%; v.271, n. 9-10, p. 1651-1657, 2011. ISSN 0043-1648. (2011). "Experimental study of friction in sheet metal forming." Wear 271: 1651-1657.
- FRANZ, R. M., C. (2013). "Vanadium containing self-adaptive low- friction hard coatings for high-temperature applications: A review. " Surface and Coatings Technology 228: 1-13.
- GmbH., S. (1998). Metal forming handbook, Springer Science & business media.
- Gonçalves Jr, J. L., J. D. B. de Mello and H. L. Costa (2019). "Wear in cold rolling milling rolls: A methodological approach." wear 426: 1523-1535.]]
- HARLIN, P. e. a. (2006). " Influence of surface roughness of PVD coatings on tribological performance in sliding contacts." Surface and coatings Technology v. 201: 4253-4259.
- HSIEH, J. T., A.; ZENG, X. (2006). " Oxidation and wear behaviors of Ti-based thin

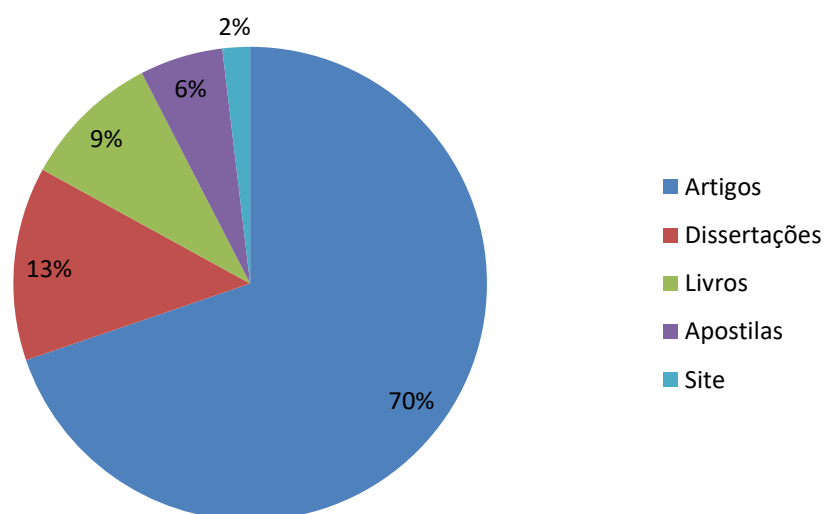
films." Surface and Coatings Technology 201: 4094-4098.

- Hutchings, I. and P. Shipway (2017). Tribology: friction and wear of engineering materials, Butterworth-heinemann.
- Kempski, L. A., G. R. dos Santos, A. da Silva Rocha, U. Boff, R. A. Hatwig and G. C. Rosa (2014). Ensaio tribológicos para obtenção do coeficiente de atrito de um aço ferramenta com tratamentos superficiais de nitretação a plasma e revestimento TiCN. São Paulo, Brazil, 69º Congresso Anual da ABM-International.
- Kirkhorn, L., K. Frogner, M. Andersson and J.-E. Ståhl (2012). "Improved tribotesting for sheet metal forming." Procedia CIRP 3: 507-512.
- Krumenauer, F. Z. and G. F. Batalha (2007). "ENGENHARIA SIMULTÂNEA E PROJETO ORIENTADO PARA A MANUFATURABILIDADE E MONTAGEM DE PORTAS AUTOMOTIVAS 3."
- Lonardo, P., D. Lucca and L. De Chiffre (2002). "Emerging trends in surface metrology." CIRP Annals 51(2): 701-723.
- Lugscheider, E., C. Barimani, C. Wolff, S. Guerreiro and G. Doepper (1996). "Comparison of the structure of PVD-thin films deposited with different deposition energies." Surface and Coatings Technology 86: 177-183.
- Martins, T. (2019). "Desgaste de Ferramenta de Corte – Processos de Usinagem." Retrieved 2022, June, from <https://tuliomartins.com.br/desgaste-de-ferramenta-de-corte/>.
- MENDES, M. A. R. S. (2009). Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimentos de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Montmitonnet, P., F. Delamare and B. Rizoulières (2000). "Transfer layer and friction in cold metal strip rolling processes." wear 245(1-2): 125-135.
- Murakawa, M., N. Koga and T. Kumagai (1995). "Deep-drawing of aluminum sheets without lubricant by use of diamond-like carbon coated dies." Surface and Coatings Technology 76: 553-558.
- Osório, W. R., Peixoto, L. C., & Garcia, A. (2009). "Efeitos da agitação mecânica e de adição de refinador de grão na microestrutura e propriedade mecânica de fundidos da liga Al-Sn." Revista Matéria- RJ 14(3): 906–917.
- Panjan, P., M. Čekada, M. Panjan and D. Kek-Merl (2009). "Growth defects in PVD

hard coatings." Vacuum 84(1): 209-214.

- Podgornik, B., S. Hogmark and J. Pezdinik (2004). "Comparison between different test methods for evaluation of galling properties of surface engineered tool surfaces." wear 257(7-8): 843-851.
- Podgornik, B., S. Hogmark and O. Sandberg (2004). "Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel." Surface and Coatings Technology 184(2-3): 338-348.
- Portella, S. A. (2012). PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA PARA TESTES DE HIDROCONFORMAÇÃO DE CHAPAS Masters dissetation, UNIJUÍ- Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- Rigney, D. (1997). "Comments on the sliding wear of metals." Tribology International 30(5): 361-367.
- Schedin, E. (1994). "Galling mechanisms in sheet forming operations." wear 179(1-2): 123-128.
- SCHEY, J. A. (1984). "Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear." Journal of Applied Metalworking 3: 173.
- Sheu, S., L. G. Hector Jr and O. Richmond (1998). "Tool surface topographies for controlling friction and wear in metal-forming processes."
- Smith, D. L. and D. W. Hoffman (1996). "Thin-Film Deposition: Principles and Practice." Physics Today 49(4): 60-62.
- SOUZA, J. H. C. d. (2021). "Processos de Conformação ".
- SOUZA, J. H. C. d. (2021). Processos de conformação, Introdução II.
- TAVARES, A. F. (2019). ATRITO E MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS PARA CONFORMAÇÃO A FRIO, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE.
- VETTER, J. e. a. (1996). "Hard coatings for lubrication reduction in metal forming." Surface and Coatings Technology 86: 739-747.
- Voelkner, W. (2000). "Present and future developments of metal forming: selected examples." Journal of Materials Processing Technology 106(1): 236-242.

8.2. REFERÊNCIAS POR ESTRATO



8.3. REFERÊNCIA POR QUALIS PERCENTUAL

