

MARIO VITOR LEITE

CONFORMAÇÃO MECÂNICA: EFEITO DA TOPOGRAFIA NA
TRANSFERÊNCIA DE MATERIAL E NO ATRITO

São Paulo

2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MARIO VITOR LEITE

CONFORMAÇÃO MECÂNICA: EFEITO DA TOPOGRAFIA NA
TRANSFERÊNCIA DE MATERIAL E NO ATRITO

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como requisito
parcial para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia

Área de concentração: Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Titular Amilton Sinatora

São Paulo

2010

*À minha mulher que é tão importante para
mim quanto à adesão para a transferência
de material.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo pão de cada dia.

Agradeço minha mãe que abriu mão da companhia dos seus filhos para vê-los, de longe, crescer.

Agradeço meus orientadores: Prof. Deniol Katsuki Tanaka pelos incontáveis questionamentos, Prof. Roberto Martins de Souza por cobrar um método científico e o Professor Amilton Sinatora, que me ajudou na construção da rede semântica.

Agradeço também os co-orientadores: Vanderlei, que ensinou a importância do rigor experimental e o Philip que me apresentou a engenharia.

Agradeço a Claudia pelas discussões e também, assim como agradeço o Cannizza, pela confiança e grande incentivo.

Agradeço o Prof. Jose Manuel Ramos Gomes, da Universidade do Minho, e aos colegas Sergio, Alexandra e Mihaela pela grande atenção e pelas discussões do outro lado do Atlântico.

Agradeço o incentivo dos meus Professores da Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Julio, Giuseppe, Paulo Borges, Ossimar, Aloisio, Marcio Mafra, Carlos Cziulik e Daniel Hioki, que me deixou um belo trabalho para inspiração. Ainda em Curitiba, agradeço o Joel (me ajudou muito com a usinagem das superfícies), Israel, Euclides e Cristiano, mesmo a distância, sempre dispostos a discutir.

Agradeço o Professor Carlos Figueroa, da Universidade de Caxias do Sul, responsável pelo primeiro trabalho que realizei sobre desgaste por deslizamento.

Agradeço a Silene o Sidney e o Ricardo, pela ajuda nos fatores extra laboratoriais.

Agradeço o Leandro, a Raquel, o Francisco e o Fidel pela ajuda nas questões laboratoriais.

Como se não fosse suficiente as pessoas já citadas, o LFS ainda proporcionou momentos de discussões e distração com as seguintes pessoas: Prof. Izabel, Maria Cristina, Marcio Cuppari, Marcia Maru, Marcelo Acacio, Marcio Matos, Felipe Bernardes, Felipe Carneiro, Pedro, Pablo, Diego, Carlos, Leonardo, Jovanio, Jovinilo, Ronaldo, Lagata, Adriana, Edger, Sara, John Jairo, John, Cristian, Martins, Eleir e Charles, esse um grande parceiro de estudos. A todos, muito obrigado.

Agradeço a amizade, o incentivo e a confiança dos meus amigos Alex, Alexandre, Ezigomar, José, Leandro, Nelson, Roberto e Wender.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado de acordo com o processo número 142812/2006-4 e ao banco Santander pelo apoio financeiro recebido no âmbito do Programa de Mobilidade Internacional Santander / Banespa – 2007.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro que viabilizou a construção do tribômetro LFS06 de acordo com o processo número 476051/2008-8.

Agradeço a Aços Villares pela bolsa de doutorado durante o ano de 2008.

“Voz do que clama no deserto: Preparai o caminho do Senhor, endireitai as suas veredas: Todo o vale será terraplanado, e todo o monte e colina serão arrasados; os caminhos tortuosos tornar-se-ão direitos, e os escabrosos planos; e todo o homem verá a salvação de Deus”.

(Lucas, capítulo 3 versículos de 4 – 6, Bíblia Sagrada).

RESUMO

Com a evolução dos processos de fabricação, aumenta o emprego de topografias engenheiradas com o objetivo de aumentar o desempenho dessas superfícies sob vários aspectos. Apesar do bom desempenho comprovado em algumas aplicações, existem outras em que o desempenho é questionável, como, em condições não lubrificadas e com elevadas pressões de contato. Neste cenário de dúvidas sobre a utilização de superfícies engenheiradas, o presente trabalho objetiva contribuir com as discussões por meio de um estudo do efeito de topografias anisotrópicas na transferência de material e resistência ao movimento em condições de deslizamento a seco com deformação plástica micro e macroscópica. O método utilizado contempla ensaios tribológicos que consistem, basicamente, em deslizar um material sobre superfícies engenheiradas de outro material com maior dureza, em duas condições de deformação plástica: i/ localizada no pico das asperezas em contato (ensaio pino-sobre-disco) e ii/ volumétrica (ensaio de compressão do anel).

Os resultados permitiram concluir que os mecanismos de desgaste podem ser reproduzidos nos dois ensaios. Com deformação plástica microscópica (pino-sobre-disco) constatou-se que: i/ os vales e cavidades da topografia atuam de forma a evitar o contato das partículas de desgaste com o corpo em deslizamento; e ii/ os maiores valores do coeficiente de atrito foram obtidos com a superfície com maior quantidade de cavidades, a mesma condição topográfica que apresentou maior área com transferência de material. Com deformações plásticas macroscópicas (ensaio de compressão do anel) constatou-se que os vales da topografia da ferramenta atuaram como bloqueios para o deslizamento do anel conformado, o que resultou num aumento do coeficiente de atrito e redução da transferência de material.

Palavras-chave: tribologia, superfícies engenheiradas, desgaste por deslizamento, adesão, coeficiente de atrito, conformação mecânica.

ABSTRACT

The evolution of manufacturing progresses increases the use of engineered surfaces, seeking the improvement of the overall performance of these surfaces. Despite the enhanced performance under some circumstances, uncertainties still exist in conditions such as unlubricated and high contact pressure conditions. This work aims contributing to these discussions by studying the effect of anisotropic topographies on the material transfer and resistance to movement under dry sliding conditions including micro and macroscopic plastic deformation. The method consisted of tribological tests by sliding a material against engineered surfaces of higher hardness. Tests were conducted under two plastic deformation conditions: i/ localized on surface asperities contact (pin-on-disc test) and ii/ volumetric (ring test).

Results allowed concluding that wear mechanisms can be reproduced on both tests. Under microscopic plastic deformation (pin-on-disc test) it was possible to verify that: i/ grooves and cavities have contributed to avoid the contact between wear debris and sliding body; and ii/ the higher friction coefficient was obtained when testing the surface with high amount of cavities, a condition that presented the larger area of material transfer. Under macroscopic deformation (ring test), grooves from tool topography played the role of blocking the ring material sliding, increasing friction coefficient and decreasing material transfer.

Keywords: tribology, engineered surface, sliding wear, adhesion, friction coefficient, metal forming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de superfícies engenheiradas pelo homem ou encontrada na natureza que desempenham função.	18
Figura 2 – Desgaste da coluna de sustentação da estátua de Santiago de Compostela resultado do contato com as palmas das mãos de milhares de peregrinos.	21
Figura 3 – Representação esquemática dos elementos de um tribossistema, adaptado de Zum Gahr, (1987).	23
Figura 4 – Principais teorias para a adesão (ZUM GAHR, 1987).....	26
Figura 5 – Exemplos de transferência de material do corpo para o contra-corpo e vice versa (RIGNEY, CHEN, NAYLOR, 1984).	28
Figura 6 – Exemplo de transferência de material após alguns ciclos de deslizamento (RIGNEY, et al., 1984).....	29
Figura 7 – Exemplo de representação dos componentes topográficos (a) forma, (b) ondulação e (c) rugosidade. A linha preta representa o perfil topográfico.....	32
Figura 8 – Classificação das superfícies utilizadas em componentes mecânicos e exemplos de processos de manufatura respectivos a cada tipo de superfície (STOUT, BLUNT, 2001).	34
Figura 9 – Classificação das topografias utilizadas em componentes mecânicos e exemplos de processos de manufatura e padrões topográficos respectivos a cada classe topográfica.	35
Figura 10 – Utilização de topografias anisotrópicas em cilindros laminadores de diferentes tipos de material.	36
Figura 11 – Características topográficas dos estudos direcionados a sistemas lubrificados.	37
Figura 12 – Alteração da área de contato no campo elástico de uma superfície esférica idealmente lisa para uma superfície esférica rugosa (ARCHARD, 1957). ...	38
Figura 13 – Representação esquemática do efeito de uma topografia anisotrópica sobre o número de pontos de contato.....	39
Figura 14 – Classificação dos diferentes tipos de ensaios tribológicos (UETZ; WIEDEMEYER, 1984).....	40

Figura 15 – Representação dos ensaios tribológicos para o estudo de um elemento do tribossistema de forjamento. De forma ilustrativa, a linha tracejada passa pela interface entre corpo e contra-corpo.	41
Figura 16 – Representação esquemática das condições de resistência ao movimento em condições de conformação mecânica.	46
Figura 17 – Fatores que afetam as medidas relacionadas a resistência ao movimento.	48
Figura 18 – Representação esquemática das diferentes formas do anel em função do atrito após ensaio de conformação.	50
Figura 19 – Método para obtenção das curvas de calibração (MALE; COCKCROFT, 1965). (a) coeficiente de atrito para vários metais em diferentes condições de lubrificação à 20°C, valores obtidos a partir das análises de Schroeder e Webster dos resultados experimentais realizados com discos. (b) variações na geometria dos anéis ensaiados nas mesmas condições dos discos. (c) curvas de calibração para um anel de geometria padrão (6:3:2).	52
Figura 20 – Comportamento de deformação do anel durante ensaio de compressão (adaptada de Avitzur, 1978).	53
Figura 21 – Curva teórica de calibração para o anel com geometria padrão (6:3:2) (MALE; DePIERRE, 1970).	54
Figura 22 – Representação esquemática do ensaio experimental para avaliação das topografias anisotrópicas.	57
Figura 23 – Características das topografias estudadas produzidas conforme Hioki (2006).	57
Figura 24 – Desenho de fabricação do disco (a), desenho de fabricação do pino (b) e desenho de montagem do pino sobre o disco (c). Todas as dimensões estão em mm.	58
Figura 25 – Características topográficas do pino, após lixamento, e dos discos com topografia estruturada.	59
Figura 26 – Representação esquemática do ensaio com deformação plástica macroscópica.	60
Figura 27 – identificação das topografias anisotrópicas utilizadas no estudo. A) topo1, profundidade dos vales de 0,1 mm e b) topo2, profundidade dos vales de 0,2 mm	61

Figura 28 – Representação esquemática do tribômetro LFS 06 e variáveis do ensaio de deformação plástica macroscópica.	62
Figura 29 – Evolução dos danos promovidos nas topografias de estudo durante os ciclos de deslizamento.	65
Figura 30 – Características dos danos causados na superfície dos pinos após deslizamento contra a topografia em rede (a) e com a topografia em linha (b).....	66
Figura 31 – Superfície do primeiro e do octogésimo pino utilizados no ensaio com o disco de topografia em rede. Acima das fotos apresentam-se os perfis topográficos realizados na direção perpendicular ao deslizamento dos respectivos pinos.	67
Figura 32 – Análise qualitativa dos elementos químicos presentes no disco (a), no disco, sobre uma partícula aderida (b) e na superfície do pino.	68
Figura 33 – Superfície dos discos apresentando partículas de adesão oriundas do pino, indicadas pelas setas.	68
Figura 34 – Detalhe do disco com topografia em rede apresentando evolução de um sulcamento durante um único ciclo de deslizamento.	70
Figura 35 – Variação do coeficiente de atrito medido no final de cada ciclo de deslizamento para a topografia em rede (linha contínua) e topografia em linha (linha tracejada).	71
Figura 36 – Distribuição dos valores do coeficiente de atrito em função da topografia em rede (a) e topografia em linha (b).	72
Figura 37 – Superfície da ferramenta inferior inicialmente polida (a) e do anel (b) após ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.....	74
Figura 38 – Perfil topográfico na região com deformação plástica das asperezas do anel antes (a) e após o ensaio (b).....	74
Figura 39 – Detalhe da região interna da ferramenta inferior após ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.....	75
Figura 40 – Perfil topográfico da região com marcas radiais do anel (a) e da ferramenta (b) após ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.	76
Figura 41 – MEV da região externa da ferramenta (b) e do anel (e) e EDS das regiões sem transferência de material (áreas a e c) e com transferência de material	

(áreas b e d). Ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.	77
Figura 42 – Superfície da ferramenta inferior inicialmente polida (a) e do anel (b) após ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 3 mm/s.....	78
Figura 43 – Superfície da ferramenta inferior inicialmente polida (a) e do anel (b) após ensaio com redução em altura de 20% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.....	80
Figura 44 – Representação esquemática do deslizamento do anel durante conformação em 20% (a) e 50% (b).....	82
Figura 45 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com 20% de redução em altura e velocidade de 0,3 mm/s.....	83
Figura 46 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com 50% de redução em altura e velocidade de 0,3 mm/s.....	84
Figura 47 – Deslocamento da marca lateral interna do anel (a) após ensaio com 20% (c) e 50% (e). Deslocamento da marca lateral externa (b) após ensaio com 20% (d) e 50%(f) de redução em altura. Velocidade de 0,3 mm/s.....	85
Figura 48 – Perfil topográfico dos anéis testados na ferramenta topo 1 com 20% (a) e 50% (b) e dos anéis testados na ferramenta topo 2 com 20% (c) e 50% (d).	87
Figura 49 – Alterações superficiais na ferramenta topo 1 (a) e topo 2 (b) após ensaio com 50% de redução em altura do anel e velocidade de descida da ferramenta superior de 3 mm/s.....	88
Figura 50 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com 50% de redução em altura e ferramenta topo1.	90
Figura 51 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com 50% de redução em altura e ferramenta topo2.	91
Figura 52 – Impressão das marcas do anel no fundo das ranhuras das ferramentas topo1 (a) e topo2 (b) após ensaio com 50% de redução em altura.....	91
Figura 53 – Deslocamento da marca lateral interna do anel (a) após ensaio com 20% (c) e 50% (e). Deslocamento da marca lateral externa (b) após ensaio com 20% (d) e 50%(f) de redução em altura. Ferramenta topo1.....	92
Figura 54 – Deslocamento da marca lateral interna do anel (a) após ensaio com 20% (c) e 50% (e). Deslocamento da marca lateral externa (b) após ensaio com 20% (d) e 50%(f) de redução em altura. Ferramenta topo2.....	93

Figura 55 – Representação esquemática do deslizamento do anel durante conformação em 20% (a) e 50% (b) com ferramenta de topografia anisotrópica.....	94
Figura 56 – Modificação do padrão de deformação com 50% de redução do anel e velocidade de 3 mm/s em função da topografia da ferramenta.....	95
Figura 57 – Diferença nas características de deformação dos anéis conformados com 50% de redução e velocidade de 3 mm/s.....	96
Figura 58 – Superfície da ferramenta polida (a), ferramenta topo1 (b) e ferramenta topo2 (c) após a conformação de 10 anéis sucessivos com força máxima de compressão de 490,3 kN.....	98
Figura 59 – Perfil topográfico da ferramenta polida (a) e ferramenta topo 1 (b) após a conformação de 10 anéis sucessivos com força máxima de compressão de 490,3 kN.....	99
Figura 60 – Microscopia óptica da região com maior intensidade de alterações superficiais da ferramenta polida, ferramenta topo1 (platô 11) e ferramenta topo2 (platô 9) em função do número de anéis conformados com 490,3 kN.	100
Figura 61 – Perfil topográfico da ferramenta polida (a), da ferramenta polida após a conformação do 1° anel (b), 2° (c), 3° (d), 4° (e), 5° (f), 6° (g), 7° (h), 8° (i), 9° (j) e 10° (k).....	101
Figura 62 – Presença de cavacos durante os ensaios conduzidos com a ferramenta topo2.	103
Figura 63 – Curvas de calibração de Male e Cockcroft (1964-65) para anel com geometria 6:3:2 e valores de redução do diâmetro interno do anel das condições estudadas.....	106
Figura 64 – Correlação entre as marcas superficiais e deformações plásticas na seção transversal com o modelo de distribuição da tensão de cisalhamento interfacial proposta por Bay e Wanheim (1976).	108
Figura 65 – Força de compressão em função do deslocamento da ferramenta superior. Perfil da curva (a) e detalhe do ponto da força máxima de compressão (b) para a condição com ferramenta polida e ferramenta polida mais material aderido. 50% de redução do anel e velocidade de 3 mm/s.	110
Figura 66 – Correlação entre as marcas superficiais e deformações plásticas na seção transversal com o modelo de distribuição da tensão de cisalhamento interfacial constante em função da pressão de conformação.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de mestrados e doutorados realizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície e sua classificação quanto ao processo de desgaste.....	24
Tabela 2 – Modelos para a distribuição da tensão interfacial em condições de conformação mecânica, adaptado de Tan (2002).	47
Tabela 3 – Valores do atrito interfacial constante (m) para anéis com geometria padrão (6:3:2) de uma liga de Al-Si conformados em $45\% \pm 5\%$ a temperatura ambiente e sem lubrificante (RAO; SIVARAM, 1990).	55
Tabela 4 – Perda de massa dos anéis após ensaio com 50% de redução em altura, velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s e ferramenta polida a cada anel conformado.	77
Tabela 5 – Perda de massa dos anéis após ensaio com 50% de redução em altura, velocidade de descida da ferramenta superior de 3 mm/s e ferramenta polida a cada anel conformado.	79
Tabela 6 – Perda de massa dos anéis após ensaio com 20% de redução em altura, velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s e 3 mm/s e ferramenta polida a cada anel conformado.	80
Tabela 7 – Resumo dos resultados encontrados em função das variáveis de redução em altura dos anéis (20% e 50%) e velocidade de descida da ferramenta superior (0,3 mm/s e 3 mm/s).	86
Tabela 8 – Variação de massa dos anéis após ensaio com diferentes níveis de redução em altura (20% e 50%) e diferentes topografias estruturadas (topo1 e topo2).	89
Tabela 9 – Resumo dos resultados encontrados em função das variáveis de redução em altura dos anéis (20% e 50%) e características topográficas das ferramentas (polida, topo1 e topo2).	96
Tabela 10 – Variação de massa dos anéis conformados sucessivamente na ferramenta polida com força máxima de 490,3 kN.	102
Tabela 11 – Variação de massa dos anéis conformados sucessivamente na ferramenta topo2 com força máxima de 490,3 kN.	103
Tabela 12 – Diâmetro interno dos anéis após ensaio de compressão com diferentes condições topográficas e de redução em altura.	105

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Relação entre a área real e a área aparente de contato
ΔT	Varição na redução de espessura do anel [m]
$\Delta\phi_i$	Varição no diâmetro interno do anel [%]
μ	Coefficiente de atrito
σ_e	Tensão de escoamento em tração [Pa]
τ	Resistência ao cisalhamento [Pa]
τ_e	Tensão de escoamento em cisalhamento [Pa]
τ_i	Tensão de cisalhamento interfacial [Pa]
ϕ_i	Diâmetro interno inicial [m]
ϕ_f	Diâmetro interno final [m]
a	Raio da aspereza [m]
A_{real}	Área real de contato [m ²]
F	Força movente [N]
$F_{adesão}$	Força devido à adesão [N]
$F_{sulcamento}$	Força devido à deformação plástica que ocorre no sulcamento entre asperezas [N]
$F_{resistência}$	Força de resistência ao movimento [N]
$H_{aspereza}$	Dureza da aspereza [Pa]
m	Fator de cisalhamento de atrito
p	Pressão normal de contato [Pa]
P	Força normal [N]
r	Raio do disco [m]
R	Raio do anel [m]
R_i	Raio interno do anel [m]
R_n	Raio neutro do anel [m]
R_o	Raio externo do anel [m]
x	Profundidade de penetração da aspereza [m]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA: DESGASTE, TOPOGRAFIA E RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO	21
2.1	DESGASTE	21
2.1.1	Desgaste por deslizamento	25
2.1.2	Topografia anisotrópica	31
2.1.3	Ensaio tribológicos.....	39
2.2	RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO – ATRITO	42
2.2.1	Modelos de atrito (resistência ao movimento)	43
2.2.2	Métodos para caracterizar o atrito (resistência ao movimento)	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1	ENSAIO COM DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS MICROSCÓPICAS (PINO-SOBRE-DISCO)	56
3.2	MÉTODO DO ENSAIO EM CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MACROSCÓPICA	59
3.2.1	Preparação das superfícies de contato das ferramentas e dos anéis ...	60
3.2.2	Ensaio com deformação plástica macroscópica do anel	62
3.3	TÉCNICAS DE ANÁLISE	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	DESGASTE E RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO EM CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS MICROSCÓPICAS.....	64
4.1.1	Alterações superficiais do disco e pino	65
4.1.2	Medidas de resistência ao movimento no ensaio pino sobre disco	70
4.2	DESGASTE E RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO EM CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MACROSCÓPICA	73
4.2.1	Alterações superficiais da ferramenta polida e do anel	73
4.2.2	Estudo com topografias anisotrópicas	86
4.2.3	Estudo do efeito das topografias anisotrópicas em função dos ciclos de deslizamento	97

4.2.4	Discussões sobre o atrito (resistência ao movimento) no ensaio de compressão do anel.....	104
5	CONCLUSÕES	114
6	TRABALHOS FUTUROS	117
	APÊNDICE A – Projeto e construção de um tribômetro para ensaios de conformação mecânica em condições controladas.....	129
	APÊNDICE B – Alterações superficiais das ferramentas utilizadas no ensaio de compressão do anel.....	144
	APÊNDICE C – Padrão de deformação dos anéis com lubrificação.....	145

1 INTRODUÇÃO

As superfícies engenheiradas são aquelas com características topográficas capazes de desempenhar uma função durante sua utilização. Os exemplos são diversos e bastante distintos. A Figura 1 apresenta dois exemplos de superfícies com características topográficas que desempenham a função de remover o excesso de água.

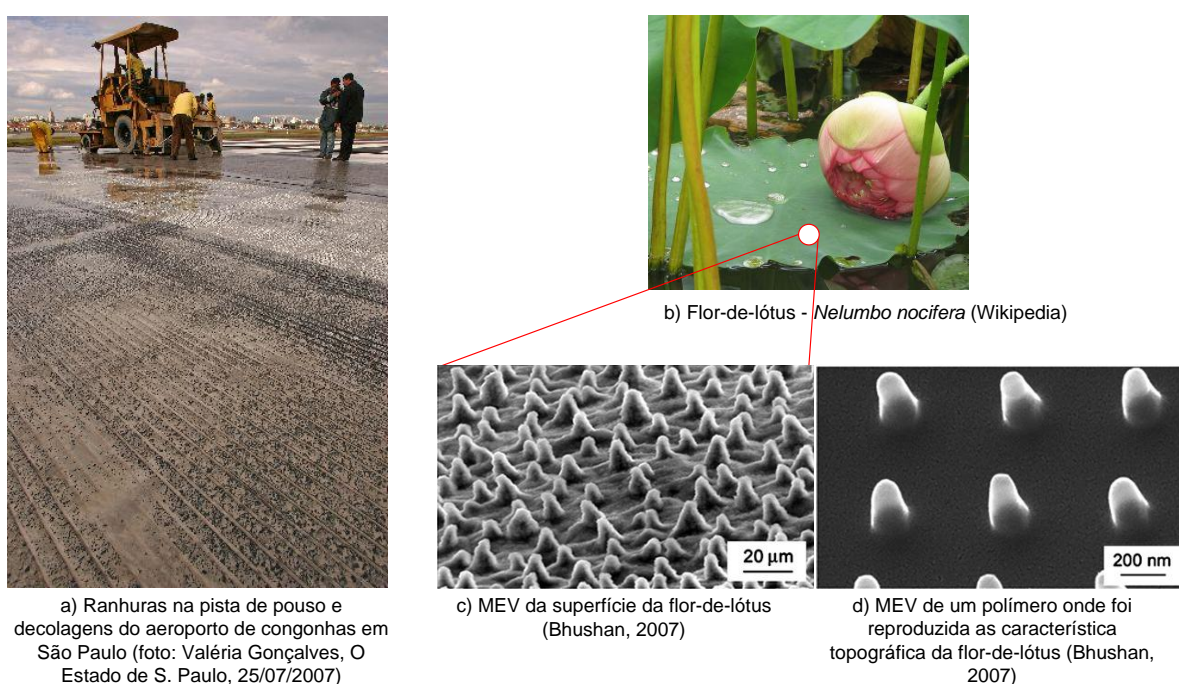


Figura 1 – Exemplos de superfícies engenheiradas pelo homem ou encontrada na natureza que desempenham função.

Nos exemplos da Figura 1 as superfícies possuem características topográficas que facilitam o escoamento da água. A grande diferença entre os exemplos é que no caso da pista do aeroporto as ranhuras foram engenheiradas pelo homem enquanto que as características topográficas da flor-de-lótus são obra da natureza.

Copiar padrões topográficos observados na natureza tem sido o foco de vários estudos sobre superfícies que desempenham função, no exemplo apresentado na Figura 1, busca-se engenheirar uma superfície tal como a da flor de lótus visando sua hidrofobicidade. Outros exemplos podem ser encontrados nos estudos sobre a superfície das patas das lagartixas que objetivam aplicações onde a adesão é

requerida, ou ainda os estudos sobre a topografia das peles de alguns peixes para reproduzi-las sobre a superfície dos maios dos nadadores visando a diminuição na força de arraste.

A evolução das técnicas para engenheirar superfícies tem possibilitado reproduzir características topográficas observadas na natureza cada vez mais específicas e isso é consequência do constante desenvolvimento das técnicas de caracterização de superfícies que permitem o detalhamento das características topográficas.

Uma parte dos estudos direcionados a engenharia de superfícies está voltada para o desenvolvimento de sistemas mecânicos em escala micrométrica, mas por outro lado há também a aplicação dessas superfícies em sistemas mecânicos comuns, como por exemplo, nos motores de combustão interna, no qual se encontram em desenvolvimento anéis raspadores com superfícies engenheiradas, produzidas com microcavidades, que são capazes de aumentar a eficiência da lubrificação.

O melhor desempenho das superfícies engenheiradas quando comparadas às superfícies aleatórias, em alguns sistemas mecânicos, tem motivado a aplicação daquelas para qualquer sistema onde existam superfícies em contato com movimento relativo. Porém, sua disseminação ainda não é ampla uma vez que há divergências sobre os resultados obtidos em aplicações específicas.

Uma condição que encontra divergência nos estudos sobre o desempenho de superfícies engenheiradas é aquela com deslizamento não lubrificado. Nessa condição há resultados onde uma superfície engenheirada atua como sorvedouros das partículas de desgaste, evitando o contato dessas com os corpos em contato o que pode resultar na redução do desgaste por abrasão. Porém, há estudos em condições de deslizamento não lubrificado onde o efeito sorvedouro não foi observado. Dessa forma, observa-se a necessidade de estabelecer relações entre as características topográficas com as condições na qual são testadas, para verificar os potenciais benefícios de sua utilização.

A fim de verificar mais uma condição na qual possa ser utilizada uma superfície engenheirada o presente trabalho tem como objetivo estudar o efeito de uma topografia produzida para desempenhar uma função em condições de deslizamento a seco e com elevadas pressões de contato. Tais condições são comuns em processos de conformação mecânica. Espera-se com esse estudo aumentar o entendimento sobre o efeito da topografia podendo até resultar numa aplicação tecnológica.

Partindo deste objetivo apresentam-se os objetivos específicos:

- ⇒ Verificar o efeito sorvedouro de partículas de desgaste;
- ⇒ Verificar o efeito de distribuição dos pontos de contato sobre os danos superficiais;
- ⇒ Descrever o comportamento de resistência ao movimento quando utilizadas topografias com características topográficas engenheiradas.

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos e um apêndice. Após a **Introdução** apresenta-se a **Revisão da Literatura**, composta por assuntos como desgaste, topografia e atrito. O Capítulo 3 apresenta os **Materiais e Métodos** utilizados para o desenvolvimento desse trabalho e o Capítulo 4 contém os **Resultados e Discussões**, divididos em duas partes, primeiro os ensaios conduzidos com deformações plásticas microscópicas e o segundo com deformações plásticas macroscópicas. Em seguida são apresentados os Capítulos 5, com a **Conclusão**, o Capítulo 6, com **Trabalhos Futuros** e o Capítulo com a lista de **Referências**. O apêndice possui informações sobre o equipamento construído durante a condução deste estudo.

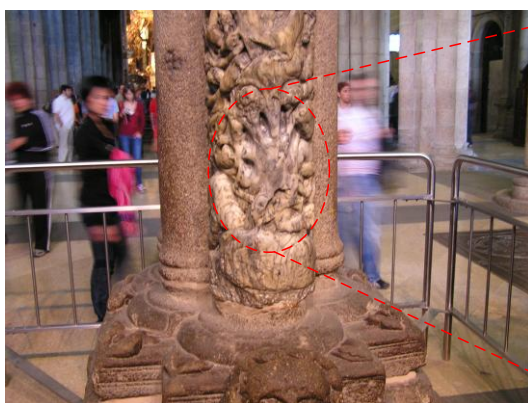
2 REVISÃO DA LITERATURA: DESGASTE, TOPOGRAFIA E RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO

2.1 DESGASTE

O significado comum e perceptível do desgaste pode ser resumido em: modificações da forma original de um corpo por ação do tempo ou frequência de contato com outro corpo. Esta percepção é maior à medida que o tempo passa, pois essa variável é diretamente proporcional à intensidade das alterações da forma original. A Figura 2 apresenta um exemplo de desgaste onde a variável tempo de contato foi predominante no desgaste.



a) estátua de Santiago de Compostela



b) base da coluna que sustenta a imagem de Santiago de Compostela



c) detalhe da região da coluna que sofreu o desgaste.

Figura 2 – Desgaste da coluna de sustentação da estátua de Santiago de Compostela resultado do contato com as palmas das mãos de milhares de peregrinos.

A evidência do desgaste, apresentada na Figura 2, é a presença de rebaixos na coluna que moldam os dedos da mão de um ser humano. Segundo relatos de moradores da cidade de Santiago de Compostela, o desgaste ocorreu ao longo de séculos em virtude dos frequentes contatos das mãos dos milhares de peregrinos que visitam a igreja.

A combinação da variável tempo com outras variáveis, como por exemplo, força de contato, pode resultar num aumento do desgaste. No caso apresentado da Figura 2, a força não é a variável de maior importância, uma vez que a máxima força aplicada é aquela suportada pelas mãos de um ser humano, e este é um valor baixo quando comparado à máxima força que o material da coluna pode suportar sem sofrer danos. Porém, o ser humano tem a capacidade de manipular ferramentas com materiais mais resistentes que o material da coluna e assim pode facilmente acelerar o desgaste, exemplo disso é a própria estátua, esculpida em material semelhante ao material da coluna que a suporta.

Este exemplo mostra que a intensidade na qual se observa o desgaste depende basicamente dos materiais que estão em contato e das características na qual estes se interagem. Outra observação a respeito dos exemplos citados é que na primeira descrição o desgaste ocorreu de forma não controlada, isto é, os peregrinos não puseram suas mãos de forma a provocar o desgaste, diferente do escultor que utilizou suas ferramentas para moldar a estátua. Sendo assim, dificilmente atribuem-se as alterações da forma original realizadas de maneira controlada ao desgaste.

Mas se o desgaste é um processo sem controle, como saber, por exemplo, se as pastilhas de freio de um carro estão desgastadas? Para responder perguntas semelhantes a estas surgiu a Tribologia, ciência dedicada ao estudo da interação entre corpos com movimento relativo.

A palavra tribologia, do grego *tribos* que significa roçar-esfregar, foi enunciada pela primeira vez no Comitê do Departamento Britânico da Educação e Ciência, em 9 de março de 1966 e definida como a “Ciência e Tecnologia de superfícies que se interagem em movimento relativo – e práticas e assuntos correlatos (JOST, 1990).

Um dos grandes desafios da tribologia é antecipar a forma e a intensidade com a qual irá ocorrer o desgaste em um dado componente (ASM HANDBOOK, VOL. 18, 1992). Conhecer a forma na qual ocorre o desgaste permite eleger adequadamente o material para cada aplicação e estabelecer critérios que determinam a vida em desgaste de um dado componente. Graças a este conhecimento é possível utilizar

os freios do carro tranquilamente, pois as pastilhas de freio podem ser substituídas em intervalos de tempo conhecidos e menor que o tempo necessário para desgastá-las a ponto de comprometer o funcionamento do sistema de frenagem.

Para compreender a forma pela qual o desgaste ocorre é importante conhecer dois aspectos do problema. Um é o tipo de movimento que causa o desgaste, como se vê na norma DIN 50320 (ZUM GAHR, 1987), ou seja: o deslizamento, o rolamento, o movimento oscilatório, o de impacto e o erosivo. O segundo aspecto a ser considerado são os mecanismos de desgaste, que são: a adesão (deformação plástica e ruptura das junções entre corpos), a abrasão, as reações triboquímicas e a fadiga superficial (ZUM GAHR, 1987).

A descrição do tipo de movimento e mecanismo de desgaste é realizada em duas etapas, primeiro com a descrição detalhada dos corpos e a forma na qual se interagem e segundo por meio de análises das entradas e saídas do sistema de controle. Este conjunto é denominado por tribossistema e a Figura 3 apresenta os elementos que devem ser identificados num tribossistema.

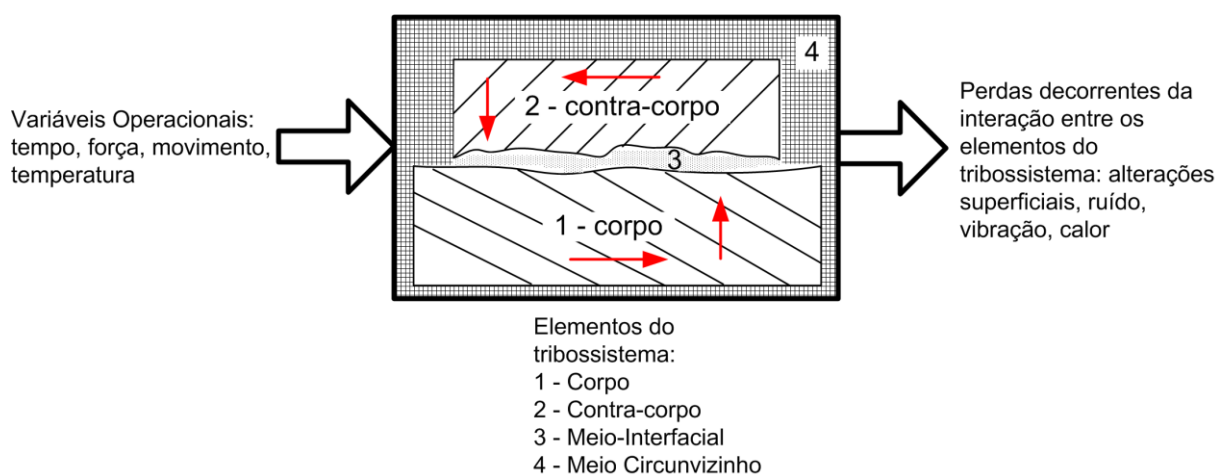


Figura 3 – Representação esquemática dos elementos de um tribossistema, adaptado de Zum Gahr, (1987).

Os elementos do tribossistema são definidos da seguinte forma: i/ corpo, elemento do tribossistema que é o objetivo de estudo; ii/ contra-corpo, elemento com força e movimento relativo em relação ao corpo; iii/ meio interfacial, elemento sólido, líquido ou gasoso presente entre o corpo e contra-corpo; iv/ meio circunvizinho, ambiente que envolve o corpo e contra-corpo.

As respostas do tribossistema permitem identificar o tipo de movimento e mecanismo de desgaste. A combinação destes determina o processo de desgaste,

que por sua vez pode ser classificado como: desgaste por deslizamento, desgaste abrasivo, desgaste erosivo e desgaste corrosivo.

As combinações entre os elementos do tribossistema e suas respectivas saídas resultam num grande número de comportamentos, e se para cada tribossistema existe um comportamento, conclui-se que há uma grande necessidade por estudos tribológicos. O Laboratório de Fenômenos de Superfícies (LFS) tem se dedicado a estes estudos. A Tabela 1 apresenta os trabalhos de conclusão de pós graduação em nível de mestrado e doutorado desenvolvidos no LFS. Observa-se que os estudos foram classificados em função do processo de desgaste e que a maior quantidade está no processo de desgaste por deslizamento, isto pode ser atribuído a três fatores: i/ o processo de desgaste por rolamento e deslizamento está contemplado no desgaste por deslizamento; ii/ o desgaste por deslizamento possui o maior número de mecanismos que os demais processos (adesão, reações triboquímicas e fadiga superficial); iii/ o LFS direcionou os estudos para a Engenharia Mecânica (área na qual o desgaste por deslizamento predomina sobre os tribossistemas).

Tabela 1 – Lista de mestrados e doutorados realizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície e sua classificação quanto ao processo de desgaste.

DESGASTE POR DESLIZAMENTO	DESGASTE ABRASIVO	DESGASTE EROSIVO E CORROSIVO
Demarchi, W. (1994); Maru, M. M. (1998); Farias, M. C. M. (1999); Silva, C. H. (1999); Alves, L. H. D. (2000); Guimarães, M. S. (2002); Medeiros, J. T. N. (2002); Silva, C. H. (2003); Maru, M. M. (2003); Vásquez, D. H. G. (2003); Ferrarese, A. (2004); Mordente, P. J. R. (2004); Farias, M. C. M. (2004); Pantaleón, E. (2004); Border, C. (2005); Uehara, S. (2005); Hioki, D. (2006); Neves, J. C. K. (2006); Souza, L. (2006); Muniz, J. M. (2007); Campanha, M. V. (2007); Ferreira, V. (2008); Sena, C. H. C. (2008); Saladarriaga, P. A. C. (2008); Santos, D. F. G. (2008); Mendes, M. A. R. (2009); Gimenez, R. L. (2010).	Pintaúde, G. (1998); Pintaúde, G. (2002); Ramos, L. V. (2005); Santos, M. M. (2005); Bernardes F. G. (2005); Maranhão, O. (2006); Cozza, R. C. (2006); Rosário, J. F. A. (2006); Schuitek, A. J. (2007).	Cuppari, M. G. V. (1998); Ranzan, A. (1999); Cuppari, M. G. V. (2002); Rovai F. F. (2005).

Mesmo sendo consideravelmente maior a lista dos estudos sobre o desgaste por deslizamento, o presente trabalho visa contribuir para o entendimento dos mecanismos deste processo de desgaste por meio de mais uma combinação entre os elementos do tribossistema. Apresenta-se a seguir uma síntese do desgaste por deslizamento.

2.1.1 Desgaste por deslizamento

O processo de desgaste por deslizamento ocorre em condições de deslizamento entre corpos em contato. O que separa o desgaste por deslizamento do desgaste abrasivo é que no primeiro caso não há abrasivo exógeno entre o contra-corpo e o corpo. Entretanto, há casos onde a abrasão ocorre num processo de desgaste por deslizamento.

Assim como discutido anteriormente, todo processo de desgaste resulta em alterações do corpo quando considerado seu estado inicial, seja por alterações de massa ou por alterações de suas características superficiais (e.g topografia, energia livre de superfície). A diferença entre os processos de desgaste está nos mecanismos responsáveis por estas alterações. Para o desgaste por deslizamento, os mecanismos são: a adesão (deformação plástica e ruptura das junções entre corpos), as reações triboquímicas, a fadiga superficial e até mesmo a abrasão. A descrição detalhada de cada um destes mecanismos está estabelecida e pode ser encontrada nos livros clássicos de tribologia, tais como: Bowden e Tabor (2001), Rabinowicz (1965), Halling (1978), Zum Gahr (1987), Bhushan (2002) e Hutchings (1992). O presente trabalho concentra-se na revisão destas e outras literaturas sobre o mecanismo de adesão (deformação plástica e ruptura de junção). O mecanismo de adesão pode ser descrito como: elevadas pressões que resultam em deformação plástica de alguns picos das asperezas em contato, seguida por adesão – colamento e conseqüentemente formação de junção. O deslizamento causa a deformação plástica desta junção que pode resultar em ruptura onde, frequentemente, há transferência de material de um corpo para outro.

A transferência de material depende da intensidade da adesão, isto é, se a energia necessária para romper a adesão for maior que a energia para cisalhar o material, então haverá a ruptura numa superfície paralela àquela de contato e interna ao material. Em situação oposta, haverá ruptura na superfície de junção sem transferência de material.

A Figura 4 apresenta quatro diferentes teorias para a ocorrência da adesão, referenciadas em Zum Gahr (1987). A primeira é a teoria do bloqueio mecânico, descrito por ensaios com polímeros fibrosos e em metais com influência topográfica. A segunda é a teoria da difusão, onde átomos ou moléculas podem difundir através da interface, desde que haja mobilidade suficiente e solubilidade mútua. A terceira teoria propõe que a adesão se deve a forças eletrostáticas que surgem através da interface dos corpos em contato que possuem diferentes estruturas de ligação interatômica. A quarta se refere à adsorção química, onde fortes ligações, como a metálica, iônica ou covalente, são estabelecidas na interface de contato entre os corpos.

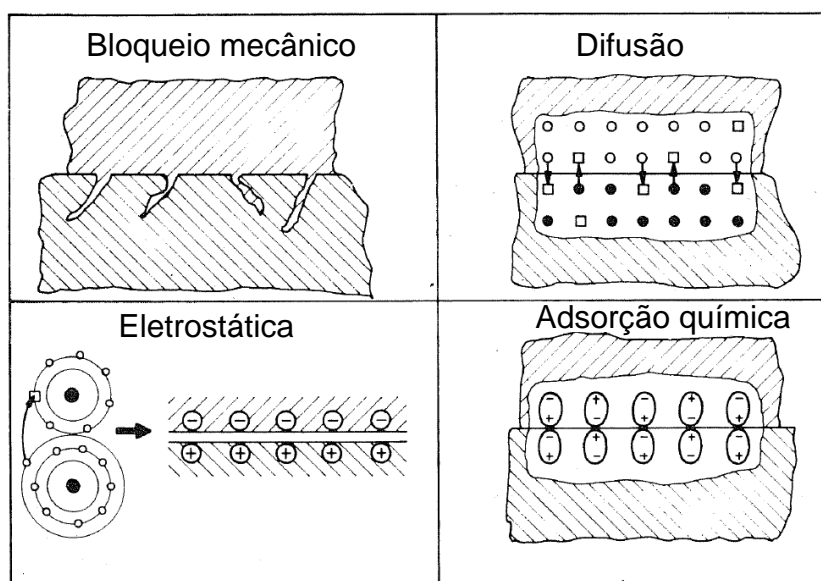


Figura 4 – Principais teorias para a adesão (ZUM GAHR, 1987)

Considerando corpos metálicos, as forças de adesão são tão mais efetivas quanto menor a quantidade de um meio interfacial, tal como os óxidos formados sobre a superfície de todos os metais (exceto os metais nobres como ouro e platina). Além disso, a adesão ocorre somente quando as superfícies limpas se aproximam com distâncias de ordem atômica de 1 nm (Stachowiak e Batchelor, 2001).

Além da dependência com as propriedades dos materiais, condições superficiais e proximidade dos corpos em contato deslizante, outro fator fundamental para o desgaste por deslizamento é a área real de contato, pois são nestas regiões que eventualmente ocorrerá à adesão seguida da transferência de material.

Os primeiros e principais trabalhos a estudar o comportamento da área real de contato em condições favoráveis ao desgaste por deslizamento foram aqueles conduzidos por Bowden e Tabor (1939) e Holm na década de 1930 (1967).

A área real de contato é, na maioria das vezes, inferior à área aparente de contato. Determinar seu valor em função das variáveis que a afetam, tais como, pressão de contato, propriedades dos materiais em contato e condições topográficas é outro grande desafio inserido na tribologia em virtude da sua estreita relação com os diversos mecanismos de desgaste.

Segundo Bhushan (1998), a dificuldade em desenvolver modelos teóricos para determinar a área real de contato está no fato de que a maioria das superfícies apresenta estruturas aleatórias.

O modelo clássico de contato estático, elástico e plástico de superfícies rugosas é o de Greenwood e Williamson (1966) que serviu de base para outros modelos como aqueles referenciados em Bhushan (1998).

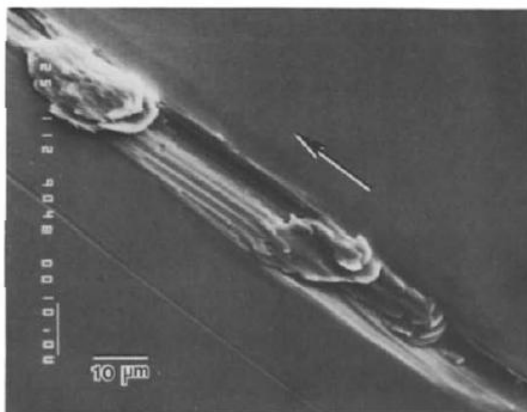
A importância dos modelos para a determinação da área real de contato é contribuir para o aprimoramento de outros modelos, os modelos de desgaste. Entre estes, cita-se o de Archard (1953), talvez o mais difundido na tribologia, que relaciona uma medida do desgaste, baseada na perda de massa de um dos corpos em contato, de forma direta com a força normal e com uma fração dos contatos que efetivamente resultam em partículas de desgaste.

Durante o desenvolvimento do seu modelo Archard (1953) considerou a transferência de material, produto do mecanismo de adesão, pois havia observado este mecanismo no trabalho de Rabinowicz e Tabor (1951). Tais considerações motivaram o desenvolvimento de novos modelos de desgaste, uma vez que a transferência de material pode ou não resultar na perda de massa, e assim tornando pouco adequado o modelo de Archard.

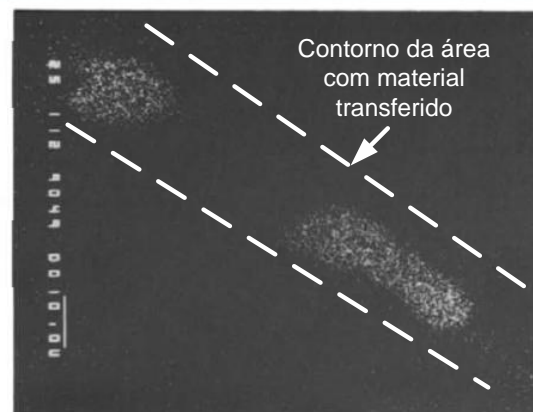
A perda de massa foi a medida do desgaste utilizada por Archard. Porém, conforme apresentado anteriormente, o desgaste não deve necessariamente estar associado apenas à perda de massa. O resultado do desgaste por deslizamento pode ser tanto

a perda de massa como também o ganho de massa, resultado da transferência de massa de um corpo para outro por adesão seguida de ruptura da junção.

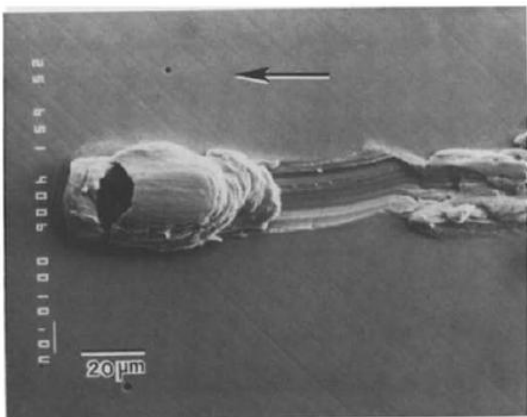
Rigney, Chen e Naylor (1984) mostraram que a transferência pode ocorrer de um corpo para outro e vice versa, além disso, mostraram também que a transferência de material é proporcional à quantidade de ciclos de deslizamento. No estágio inicial de deslizamento a transferência é menor. A Figura 5 apresenta um exemplo dos resultados obtidos por estes pesquisadores, que conduziram ensaios tribológicos do tipo pino sobre disco, sob vácuo e com diferentes combinações entre os materiais do pino e do disco. Observa-se na Figura 5(a) que houve transferência de material do pino de Fe para o disco de Ni e na Figura 5(c) observa-se Cu do material do pino sobre o disco de Fe. Este é um exemplo onde a medida de massa de apenas um dos componentes em contato poderia resultar na perda ou no ganho de massa.



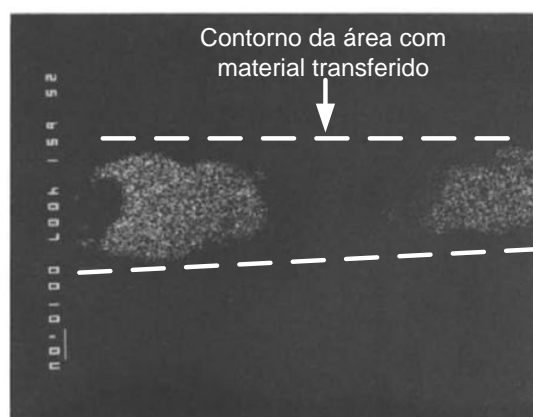
a) marca de desgaste com transferência de material sobre um disco de Ni que deslizou contra um pino de Fe



b) Fe $K\alpha$ mapa por WDS da região apresentada em (a).



c) transferência de material de um pino de Cu sobre um disco de Fe



d) Cu $K\alpha$ mapa por WDS da região apresentada em (c).

Figura 5 – Exemplos de transferência de material do corpo para o contra-corpo e vice versa (RIGNEY, CHEN, NAYLOR, 1984).

O papel da área real de contato no desgaste por deslizamento é ser a origem da transferência de material. Observa-se na Figura 5(a) e Figura 5(b) que a região com transferência de material é apenas uma fração da área aparente de contato, uma vez que a área aparente do contra-corpo é maior que a área total apresentada nas figuras. Adicionalmente, embora seja pequena, esta porção de material transferido é suficiente para modificar as condições de contato.

Segundo Kerridge e Lancaster (1956) durante o estudo com ensaio pino-sobre-disco dos estágios do desgaste metálico severo, uma vez que uma partícula é transferida para uma superfície durante um ciclo de deslizamento, no deslizamento subsequente, os pontos de contato estarão concentrados sobre esta partícula, assim como a força entre os corpos em contato, o que resulta no coalescimento dessa partícula durante o deslizamento.

A evolução dos danos sobre a superfície dos pares em contato ocorre com as sequências de contato deslizante. A Figura 6, obtida dos resultados de Rigney et al. (1984), mostra que após poucos ciclos de contato com deslizamento há uma área com material transferido maior que àquela dos primeiros instantes de contato, conforme apresentado na Figura 5.

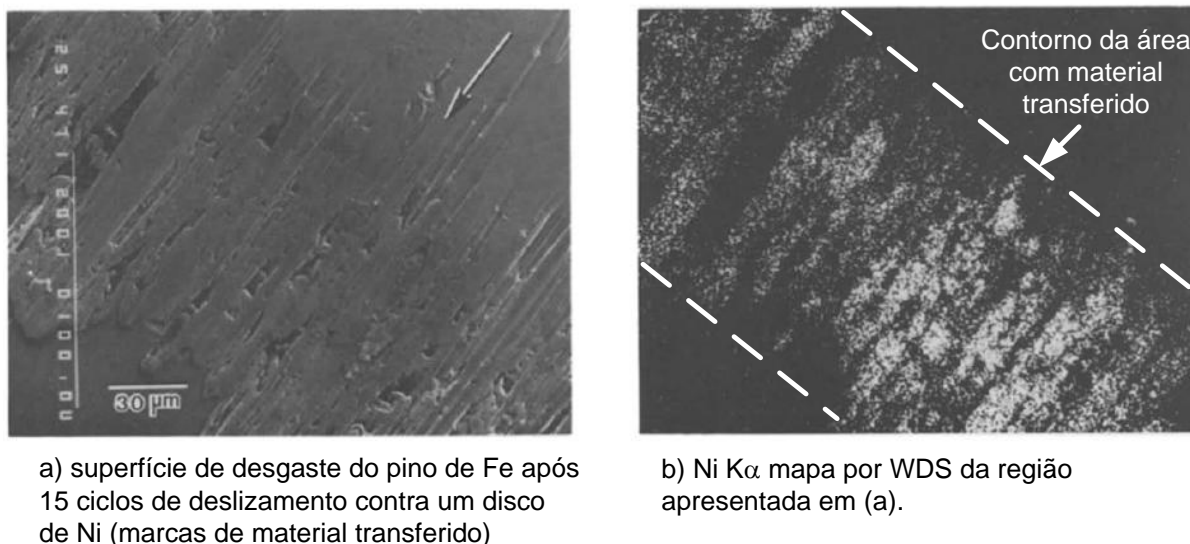


Figura 6 – Exemplo de transferência de material após alguns ciclos de deslizamento (RIGNEY, et al., 1984).

A evolução dos danos com as sequência de contato deslizante pode ser intensa a ponto de destacar outros mecanismos de desgaste além da adesão, como, por exemplo, o mecanismo de abrasão. No desgaste por deslizamento a abrasão surge da aglomeração das partículas transferidas que podem em algum momento ter sua

junção rompida. A partícula desprendida possuiu elevada dureza, resultado do encruamento que ocorre devido aos grandes níveis de deformação na interface de contato, e assim pode causar o sulcamento ou corte de um dos corpos, preferencialmente aquele com menor dureza.

Devido a esta alteração de comportamento do processo de desgaste, observam-se variações das suas medidas em função da quantidade de ciclos de contato deslizante. Estas alterações podem ser classificadas em três estágios: i/ formação da área real de contato ou amaciamento das asperezas; ii/ desgaste em regime estacionário; iii/ desgaste catastrófico dos componentes do tribossistema (ZUM GAHR, 1987).

O mecanismo de adesão é suficiente para causar danos catastróficos nos componentes do tribossistema e grandes quantidades de material transferido podem ser observadas a olho nu. Nas condições onde há formação de saliência em um dos corpos e no outro surgimento de vales representativamente maiores que os originais, o processo de desgaste é frequentemente denominado pela palavra de origem inglesa “*galling*”. Mendes (2009) propôs a palavra esfolamento como tradução e que será utilizada neste trabalho.

As medidas deste tipo de desgaste por deslizamento podem ser realizadas por variações de massa ou, como utilizado nos trabalhos de Peterson et al. (1985) e Andreasen, Bay e Chiffre (1998), por medidas das variações topográficas.

As variáveis do processo de desgaste por deslizamento que resulta no esfolamento são aquelas que afetam os mecanismos de adesão, e.g propriedades dos materiais em contato. O trabalho de Peterson et al. (1985), entre outras variáveis, apresenta o efeito da topografia no esfolamento de aços inoxidáveis. Os resultados mostraram que superfícies com menor rugosidade apresentaram maior desgaste. Este resultado foi atribuído ao fato de que os danos sobre as superfícies inicialmente polidas são resultado da transferência de material e concentram o contato na região em que estão presentes, resultando na sua aglomeração. Nota-se que esta formulação retoma os conceitos de Kerridge e Lancaster (1956).

Outro resultado obtido por Peterson et al. (1985) e relacionado à topografia foi que a orientação das asperezas desempenha um papel importante no desgaste por deslizamento. Este papel foi evidenciado, pois a transferência de material foi menor quando a direção do deslizamento foi paralela a orientação das asperezas agrupadas num formato linear, enquanto que o desgaste foi maior na condição onde

o deslizamento foi perpendicular a orientação das asperezas. Este resultado foi atribuído à restrição do movimento do corpo mais mole na região onde ocorre a transferência de material.

Uma vez que no desgaste por deslizamento a adesão com transferência de material é mais intensa quanto maior a similaridade entre os pares, fica óbvio que a presença de um meio interfacial, como um lubrificante, reduz sensivelmente a ocorrência deste mecanismo. Porém, a presença de um meio interfacial não é a garantia de que não haverá adesão. Durante o deslizamento, pode ocorrer o encontro entre as asperezas mais altas das superfícies opostas e o resultado são elevadas pressões que podem ser suficientes para romper o meio interfacial.

A falha do meio interfacial é predominante em tribossistemas onde estão envolvidas elevadas pressões de contato e que ocorre nas seguintes condições: i/ contato não-conforme (área pequena), como nos rolamentos; ii/ grandes deformações plásticas (força elevada), como nos processos de conformação mecânica.

Referências da presença do desgaste por deslizamento do tipo esfolamento em ferramentas de forjamento podem ser encontradas nos trabalhos de Lange et al (1992), Subramanian e Strafford (1993), Deidel, Stock e Mayr (1996), Lazzarotto et al. (1997), Dubar, Dubois e Dubar (2005), Mesquita e Barbosa (2005) e Podgornik, Hogmark, Sandberg (2006) e Mendes (2009). Os trabalhos recentes relacionados ao desgaste e ferramentas de conformação, como o de Podgornik e Hogmark (2006), estão voltados para o estudo de revestimentos que atuam na superfície de contato da ferramenta de forma diminuir sua afinidade com a superfície do material a ser conformado.

O presente trabalho é conduzido também no cenário do desgaste por deslizamento de ferramentas para forjamento, porém, como uma abordagem focada nas condições topográficas da sua superfície.

2.1.2 Topografia anisotrópica

Topografia (do idioma grego *topos*, lugar e *graphein*, descrever) é o termo utilizado para a descrição das dimensões em comprimento de uma área. Outros termos como

topologia e rugosidade não devem ser utilizados como sinônimos, pois a topologia é o estudo das medidas topográficas e a rugosidade é o termo utilizado para um componente da topografia.

Os componentes topográficos podem ser separados em função da frequência na qual são detectados numa determinada área. A rugosidade, por exemplo, é o sinal de maior frequência, seguido pela ondulação e pela forma.

A frequência de cada um dos componentes representa o número de eventos de uma característica topográfica para um dado intervalo amostral. A Figura 7 apresenta um exemplo de separação dos componentes topográficos. Observa-se na Figura 7(a) um copo plástico comum de 0,2 l. Sua descrição topográfica tem início com a inclinação que descreve o formato de tronco de cone, este é o maior evento observado e representa a forma. Na Figura 7(b) observam-se pequenos relevos sobre a forma inclinada do copo, que representa a ondulação. Por fim, a Figura 7(c) apresenta a região entre dois relevos da superfície inclinada do mesmo copo, observa-se que há variações topográficas num número maior que os demais eventos observados, caracterizando a rugosidade. Além do aumento do número de eventos, outra característica da descrição de cada componente é que a observação de cada um foi realizada com diferentes ampliações. Quanto maior a ampliação, maior a frequência da característica topográfica.

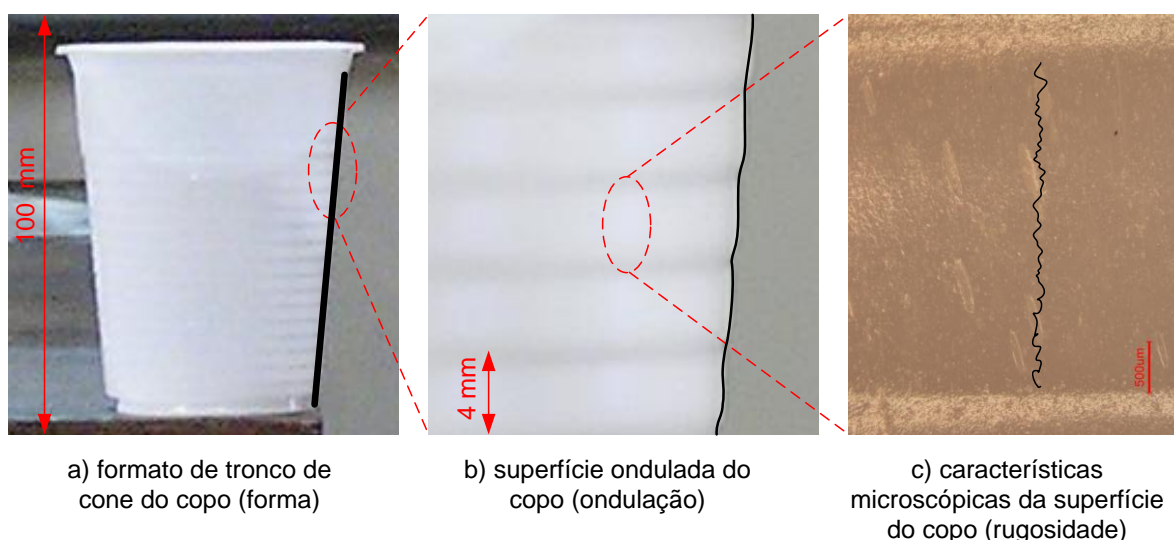


Figura 7 – Exemplo de representação dos componentes topográficos (a) forma, (b) ondulação e (c) rugosidade. A linha preta representa o perfil topográfico.

A escolha de um ou outro componente topográfico para descrever uma topografia é determinada de acordo com a função que esta topografia estará submetida, pois

cada componente topográfico está associado a uma função. A Figura 7 apresenta um exemplo onde são descritas as funções de cada componente. Neste exemplo, observa-se que a forma tem como função reduzir o volume de armazenamento, pois o formato cônico permite que um copo seja inserido no outro. A ondulação pode atuar aumentando a rigidez do copo e facilitando sua separação enquanto armazenados, evitando a formação de vácuo. A rugosidade é importante para a sensibilidade ao toque e a aparência. Superfícies rugosas refletem menos a luz do que aquelas pouco rugosas.

A quantificação dos componentes topográficos é feita por unidade de comprimento e representam as amplitudes e espaçamentos entre características topográficas. Thomas (1999) e Whitehouse (1994) escreveram livros que são referência sobre a classificação e determinação dos parâmetros desenvolvidos para quantificar os componentes topográficos. O parâmetro mais conhecido nas engenharias é o Ra, que são as iniciais das palavras inglesas *Roughness* e *Average*, traduzida por rugosidade média.

Uma vantagem dos parâmetros é estabelecer padrões das características topográficas de componentes mecânicos. Como descrito na seção anterior, as características topográficas desempenham um papel importante no processo de desgaste por deslizamento. Contudo, um único parâmetro topográfico não é suficiente para descrever a topografia de um componente mecânico, pois duas superfícies podem apresentar um único valor médio de rugosidade e orientações diferentes de suas características topográficas, o que resulta num comportamento diferente durante o processo de desgaste.

Os processos de manufatura, tais como o torneamento, fresamento, mandrilhamento e retífica são os responsáveis por determinar as características topográficas dos componentes mecânicos. Porém, estes processos não são utilizados deliberadamente para produzir topografias que desempenham uma função. Um exemplo de processos específico para produzir topografias que desempenham função é o brunimento, utilizado para controlar as características topográficas da face interna da camisa de um motor de combustão, produzindo vales que atuam como reservatórios de fluido lubrificante.

A escolha de uma topografia que desempenhe função e conseqüentemente seu processo de manufatura, mais uma vez, dependerá da aplicação. Stout e Blunt (2001) estabeleceram uma classificação das superfícies utilizadas em componentes

mecânicos em função de suas características topográficas e respectivos processos de manufatura, conforme apresentado na Figura 8.

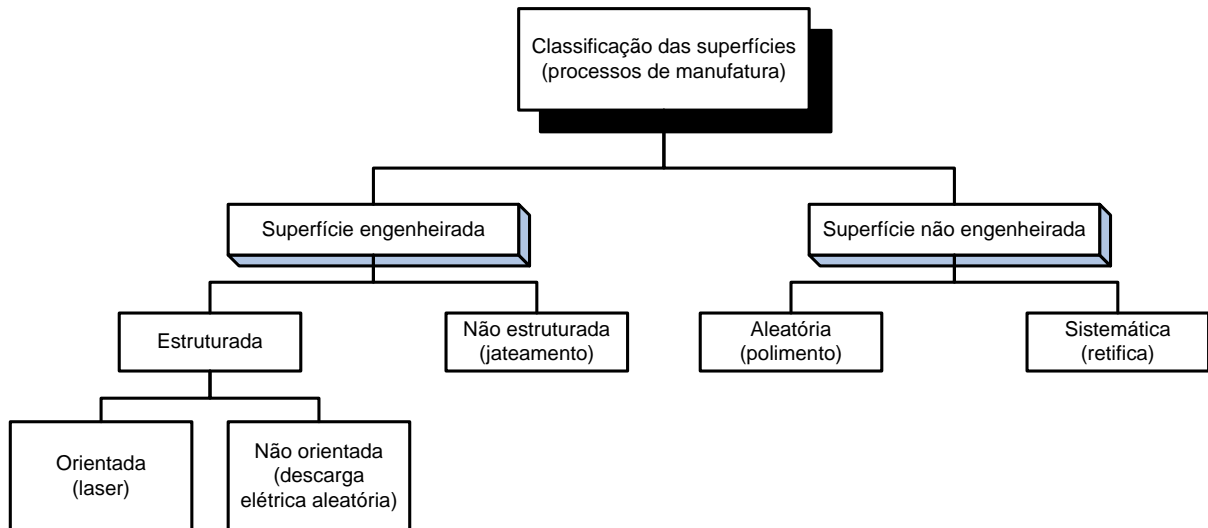


Figura 8 – Classificação das superfícies utilizadas em componentes mecânicos e exemplos de processos de manufatura respectivos a cada tipo de superfície (STOUT, BLUNT, 2001).

A seguir, descrevem-se as classes apresentadas na Figura 8.

→ superfície não engenheirada – superfícies produzidas como uma consequência direta do processo de manufatura, onde o objetivo é apenas atender as especificações geométricas. Estas superfícies podem ser divididas em:

→ → não engenheirada e aleatória: superfície obtida por processos de remoção de material de forma aleatória. Estas superfícies são frequentemente associadas a superfícies planas com pequena amplitude topográfica.

→ → não engenheirada e sistemática: superfícies obtidas por processos que removem material com uma determinada orientação.

→ superfície engenheirada – produzidas de forma a desempenhar uma função durante aplicação e são divididas da seguinte forma:

→ → não estruturada: superfície produzida com deliberada intenção de modificar as propriedades do material numa região abaixo da superfície de forma parcialmente controlada sem obter uma característica topográfica específica.

→ → estruturada: superfícies com características geométricas específicas, engenheiradas para uma determinada função. Que ainda são divididas em:

→ → → estruturada direcional: superfícies com características e orientação específicas.

→ → → estruturada não direcional: superfícies com características específicas porem sem orientação determinada.

Observa-se que Stout e Blunt (2001) usaram a palavra superfície ao invés de topografia e supõe-se que assim fizeram por considerar as alterações subsuperficiais como resultado do processo de modificações topográficas. Exemplo disso é a superfície engenheirada não estruturada, obtida por jateamento, que em termos topográficos é semelhante a uma superfície polida, isto é, as características topográficas são obtidas de forma aleatória, porém este processo é utilizado deliberadamente para promover o encruamento subsuperficial.

No presente trabalho, o foco é a topografia, e dessa forma, conforme Stout (1981), superfícies que não apresentam uma orientação predominante de suas características topográficas, como as superfícies jateadas, são classificadas como topografia isotrópica, e por outro lado, topografias que apresentam uma orientação determinada, característica, e sistemática ao processo de manufatura são consideradas como topografias anisotrópicas, que pode ainda ser divididas em unidirecional e multidirecional. A Figura 9 apresenta a classificação das topografias conforme adotada no presente trabalho.

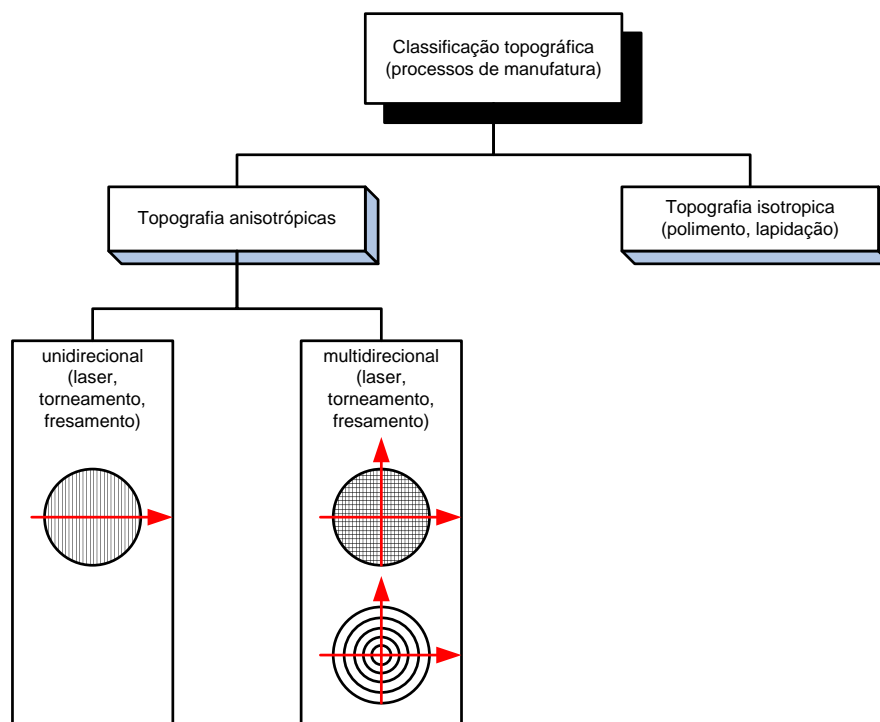
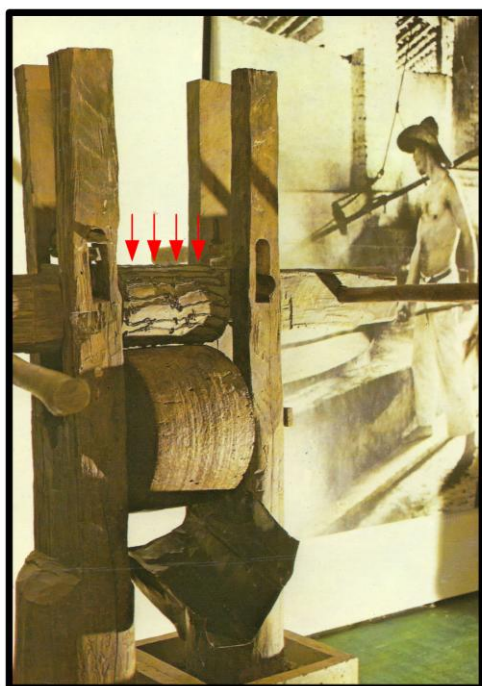
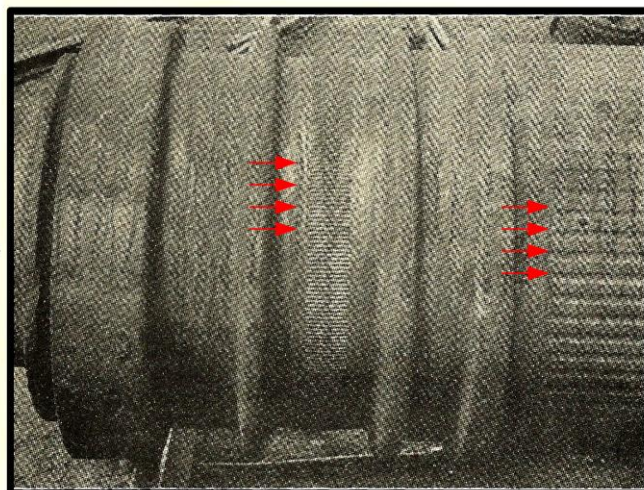


Figura 9 – Classificação das topografias utilizadas em componentes mecânicos e exemplos de processos de manufatura e padrões topográficos respectivos a cada classe topográfica.

Costa e Hutchings (2007) resumem referências bibliográficas que descrevem possíveis aplicações de superfícies engenheiradas estruturadas (conforme definição de Stout e Blunt (2001) ou simplesmente topografia anisotrópica, conforme abordado no presente trabalho) segundo suas possíveis funções, como: aumentar o atrito, atuar como bloqueio mecânico, aumentar a adesão, atuar como sorvedouros de partículas de desgaste, aumentar a resistência mecânica, melhorar o desempenho de mancais, aprimorar a transferência de calor, aprimorar o desempenho aerodinâmico e hidrodinâmico. A Figura 10 apresenta dois exemplos de topografias anisotrópicas engenheiradas para desempenhar a função de agarre da cana, no caso do cilindro motor utilizado na moenda e agarre de barras de aço, como no caso do cilindro laminador de perfis. Em ambos os cilindros, há características topográficas horizontais entre si e perpendicular à direção de deslizamento do material laminado, o que facilita o agarre.



a) moenda com dois cilindros horizontais de tração manual “quebra-peita” (Museu do Homem do Nordeste, Recife, PE, foto de Anísio Magalhães).



b) cilindro laminador de tarugos “*billet*” apresentando ranhuras horizontais (Trinks, 1941)

Figura 10 – Utilização de topografias anisotrópicas em cilindros laminadores de diferentes tipos de material.

Mais recentemente, uma grande parte dos trabalhos dedicados ao estudo de topografias anisotrópicas (PETTERSSON; JACOBSON, 2003, WANG et al. 2003,

RYK; ETSION, 2006 e COSTA; HUTCHINGS, 2007) tem se dedicado ao aprimoramento de componentes submetidos a sistemas lubrificadas, como no caso dos mancais. Uma característica comum entre os trabalhos realizados com este objetivo são as dimensões das características topográficas, que estão na ordem de unidades de micrometros, como apresentado na Figura 11.

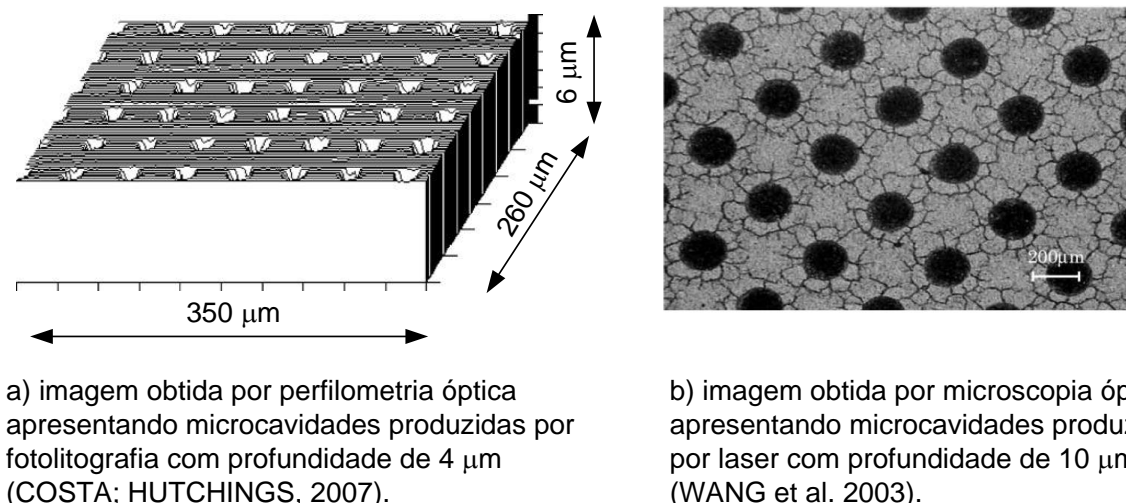


Figura 11 – Características topográficas dos estudos direcionados a sistemas lubrificadas.

Outra área onde são encontradas aplicações de topografias anisotrópicas está nas ferramentas de usinagem (Lima et al. 2006) e nas ferramentas de conformação (Lima et al. 2009). Nestas aplicações a principal função das características topográficas é aumentar a aderência dos revestimentos aplicados sobre as ferramentas.

Como exemplo de estudos com topografias anisotrópicas destinadas a suportar solicitações tribológicas de processos de conformação tem-se: i/ Aspinwall et al. (1992) que modificou a microestrutura da região próxima à superfície de cilindros para laminação a frio pelo processo descarga elétrica e ii/ Pawelski et al. (1994) que engenheirou topografias nos cilindros de laminação capaz de transferir suas características para as chapas laminadas destinadas a linha automotiva.

No desgaste por deslizamento a seco as topografias com microcavidades podem ser vantajosas quando houver o desprendimento de uma partícula de desgaste e esta for retida numa das cavidades, evitando o sulcamento. Este resultado foi observado

no trabalho de Dubrujeaud, Vandavoulias e Jeadin (1994) quando estudaram o efeito da fração de poros de ligas ferrosas sinterizadas.

Hioki (2006) observou o efeito das cavidades na retenção de um lubrificante sólido durante o período de deslizamento, o que promoveu um melhor desempenho tribológico desta topografia (manutenção do coeficiente de atrito num determinado valor por maior intervalo de tempo que outras topografias).

A revisão da literatura sobre o efeito de topografias anisotrópicas em aplicações tribológicas não encontrou estudos sobre a relação entre o mecanismo de adesão com aglomeração de partículas transferidas. De acordo com as características destas topografias supõe-se que exista uma modificação no número de regiões de contato devido à presença de microcavidades ou microasperezas para manter constante a área real de contato, salvo considerações do contato de um corpo rígido sobre outro elástico com condições iguais de carregamento. Archard (1957) em um de seus estudos sobre deformação elástica e as leis do atrito apresentou formulações para o contato de superfícies rugosas e mostrou que a presença de asperezas distribui os pontos de contato (representado esquematicamente na Figura 12).

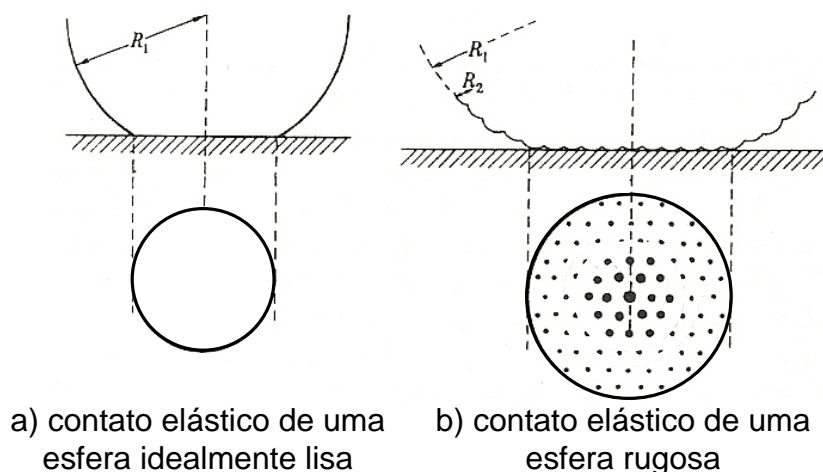


Figura 12 – Alteração da área de contato no campo elástico de uma superfície esférica idealmente lisa para uma superfície esférica rugosa (ARCHARD, 1957).

A Figura 13 apresenta uma representação esquemática da manutenção da área real de contato em função do aumento do número de contatos. Este comportamento permite formular a hipótese de que o aumento do número de pontos de contato

diminui a aglomeração sobre as partículas transferidas, uma vez que as partículas transferidas estarão mais afastadas quanto maior o número de pontos de contato.

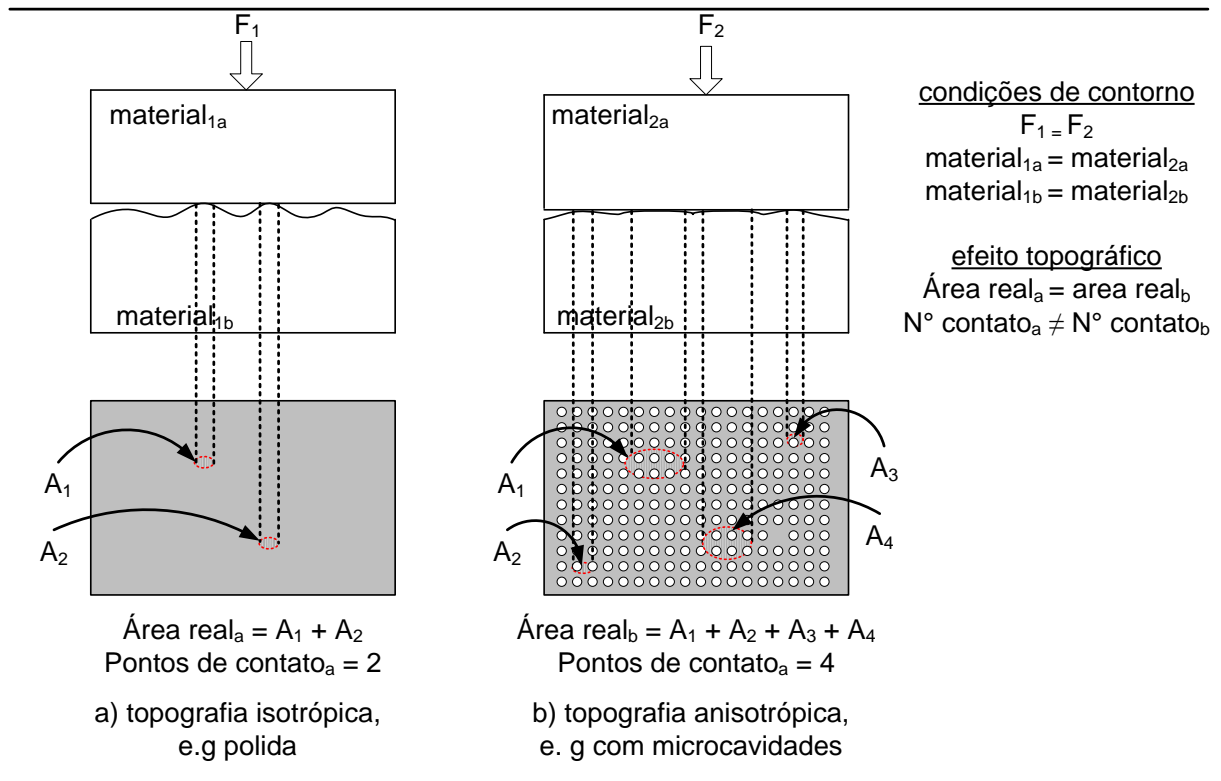


Figura 13 – Representação esquemática do efeito de uma topografia anisotrópica sobre o número de pontos de contato.

Um dos objetivos deste trabalho é verificar a hipótese de que topografias anisotrópicas podem aumentar o número de pontos de contato distribuindo sobre estes pontos os eventuais materiais transferidos durante o processo de desgaste por deslizamento. Esta hipótese será testada neste trabalho por meio de ensaios tribológicos.

2.1.3 Ensaios tribológicos

Os ensaios tribológicos foram desenvolvidos para auxiliar os estudos tribológicos por meio da reprodução do processo de desgaste em escala laboratorial obtendo uma

grande quantidade de resultados em intervalos curtos de tempo. Porém, a maior quantidade de resultados caminha na direção oposta da sua aplicação, uma vez que o grande número de resultados é decorrente das simplificações do tribossistema assumidas durante a configuração do ensaio (ZUM GAHR, 1987).

A única forma de utilizar integralmente os resultados é por meio de ensaios de campo, porém estes requerem um grande tempo de análise. Realizar ensaios laboratoriais, representando grande parte das variáveis envolvidas no tribossistema, pode acelerar o estudo. Uetz e Wiedemeyer (1984) classificaram os ensaios tribológicos de acordo com sua representatividade do tribossistema de interesse. A Figura 14 apresenta a classificação dos ensaios tribológicos e utiliza como exemplo o desenvolvimento de algum elemento do tribossistema de um sistema de transmissão de um caminhão.

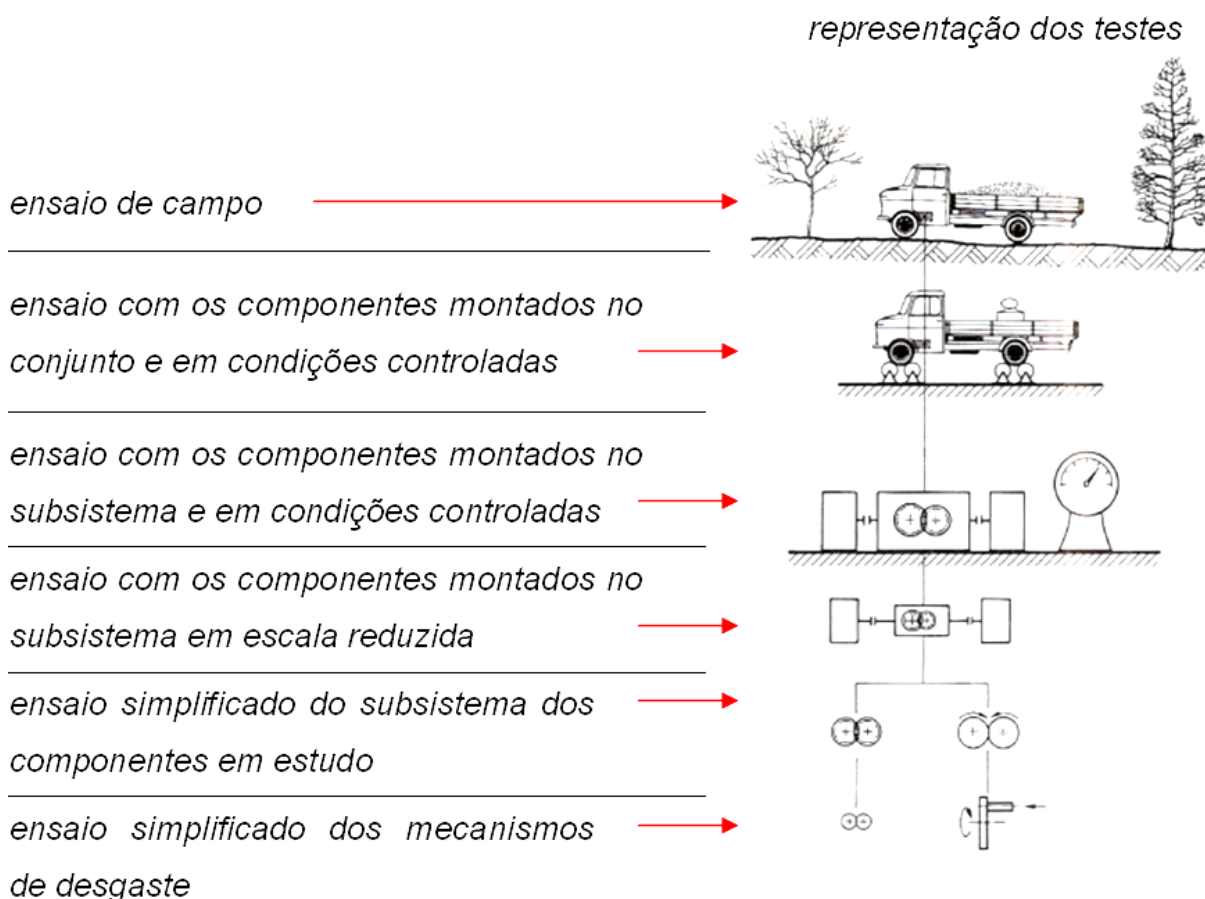


Figura 14 – Classificação dos diferentes tipos de ensaios tribológicos (UETZ; WIEDEMEYER, 1984).

Os ensaios tribológicos que visam reproduzir os mecanismos de desgaste por meio de sistemas simplificados do tipo pino-sobre-disco, fornecem uma grande quantidade de resultados por permitirem aumentar a frequência dos eventos em virtude da possibilidade de realizar os testes em maiores velocidades e pressões, quando comparadas àquelas do sistema real.

Um dos objetivos deste trabalho é verificar o efeito de topografias anisotrópicas em condições de deformação plástica microscópica e macroscópica. Para isso foram utilizados dois diferentes ensaios tribológicos que podem ser classificados conforme proposto por Uetz e Wiedemeyer (1984). A Figura 15 apresenta um comparativo com o exemplo destes autores para o caso do estudo do processo de desgaste de um elemento do tribossistema do forjamento.

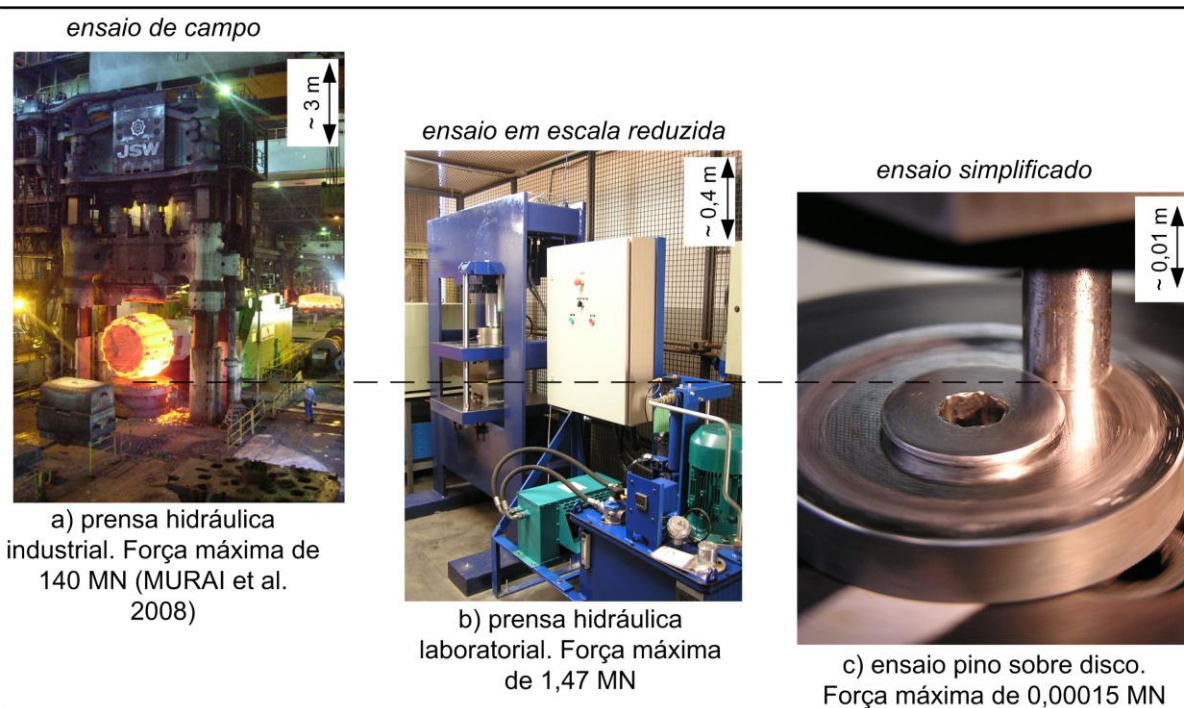


Figura 15 – Representação dos ensaios tribológicos para o estudo de um elemento do tribossistema de forjamento. De forma ilustrativa, a linha tracejada passa pela interface entre corpo e contra-corpo.

Além das características dos danos de desgaste, outro resultado obtido por meio dos ensaios tribológicos são medidas do atrito. A seção a seguir apresenta uma revisão sobre o atrito em condições de desgaste por deslizamento e deformações plásticas macroscópicas.

2.2 RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO – ATRITO

O atrito, em sua definição mais básica, é a resistência ao movimento e é em geral associado ao desgaste em virtude de decorrerem frequentemente dos mesmos mecanismos e dependerem ambos da configuração e da cinemática do sistema.

Ao contrário do desgaste o atrito não é visível, porém sua presença é percebida mesmo para aqueles que não são dedicados ao seu estudo. Basta uma simples ação como virar a página deste texto e o atrito será observado. Se não houvesse o atrito, isto é, a resistência ao movimento de deslizamento da superfície de um dedo sobre a superfície da folha, seria impossível virar a página dessa forma. Aumentar o atrito, ou a resistência entre o movimento da superfície do dedo sobre a folha facilita a ação de virar a página e duas variáveis que podem ser utilizadas para modificar o atrito neste exemplo são: i/ aumentar força normal aplicada sobre o dedo e ii/ modificar as condições de contato introduzindo um meio interfacial (molhar a ponta do dedo).

Segundo Dowson (1979) o atrito e os fatores que o afetam são familiares mesmo aos povos da antiguidade, como no caso dos Filósofos gregos. Porém, só em 1495 que surgiram as primeiras leis do atrito, resultado dos estudos de Leonardo da Vinci. Sinatora e Tanaka (2007) destacam que da Vinci referia-se ao atrito como esfregamento, embora houvesse a palavra *attrito* em latim. Talvez o motivo pelo qual da Vinci utilizasse a palavra esfregamento seja pelo seu significado. Uma pesquisa no dicionário de latim (SHELLER, 1835) sobre a palavra *attritus* resultou na palavra *adtēro*, que segundo o autor deriva do grego $\tau\epsilon\rho\omega$, que pode ser traduzido para o português como esfregar alguma coisa sobre outra.

Contrariando a genialidade de da Vinci, os trabalhos dedicados ao estudo da resistência ao movimento, utilizam a palavra atrito. Segundo Sinatora e Tanaka (2007) o uso da palavra atrito pode resultar em confusões quando se atribui a estas palavras significados distintos, como: força de atrito, coeficiente de atrito, fenômeno do atrito e energia dissipada na região do contato.

No presente trabalho, a palavra atrito, terá o significado de resistência ao movimento e sua definição será como aquela definida no “*Glossary of terms and definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrications: Tribology*” (SCHEY, 1984) onde o atrito

é definido como uma força resistente tangencial à interface que surge entre dois corpos quando, sob a ação de uma força externa, um corpo se movimenta ou tende a se movimentar em relação à superfície do outro.

2.2.1 Modelos de atrito (resistência ao movimento)

Os modelos de resistência ao movimento dependem do tribossistema. Neste estudo serão tratados apenas os modelos dedicados a tribossistemas não lubrificados. Dessa forma a resistência ao movimento está fortemente relacionada aos mecanismos de adesão com formação de junção seguida por deformação plástica e ruptura da junção.

As primeiras leis da resistência ao movimento datam de 1699, foram obtidas de forma empírica e são atribuídas a Amontons e Coulomb, apesar de Leonardo da Vinci tê-las descrito 200 anos mais cedo (HUTCHINGS, 1992 e SINATORA; TANAKA, 2007):

1ª Lei da resistência ao movimento: a força de resistência ao movimento $F_{resistência}$ é proporcional à força normal (P), que pode ser representada pela eq.(1);

$$F_{resistência} = \mu P \quad (1)$$

2ª Lei da resistência ao movimento: A força de resistência ao movimento é independente da área aparente de contato.

3ª. Lei da resistência ao movimento: A força de resistência ao movimento é independente da velocidade de deslizamento. Esta lei foi atribuída a Coulomb (HUTCHINGS, 1992 e SINATORA; TANAKA, 2007).

Ainda conforme Sinatora e Tanaka (2007), os estudos sobre as obras tribológicas de da Vinci descrevem que da Vinci havia registrado o efeito de outras variáveis sobre a força de resistência ao movimento, tais como:

- ⇒ A força de resistência ao movimento depende da natureza dos materiais em contato;
- ⇒ A força de resistência ao movimento depende do grau de acabamento das superfícies em contato;
- ⇒ A força de resistência ao movimento depende da presença de um fluido ou outro material interposto entre as superfícies; e
- ⇒ A força de resistência ao movimento aumenta com a pressão aplicada por um corpo contra outro.

Na eq.(1), μ representa a relação entre a força de resistência ao movimento e a força normal aplicada sobre os corpos em contato e pode assumir valores que oscilam entre 0,001 para sistemas lubrificados e 10 para condições sem lubrificante, com superfícies metálicas isentas de contaminações e meio circunvizinho isento de oxigênio (HUTCHINGS, 1992).

Nos livros de conformação mecânica (ALTAN; OH; GEGEL, 1999; AVITZUR, 1968; SCHAEFFER, 1983; SCHEY, 1984;) é comum associar as principais leis da resistência ao movimento a Coulomb, sem mencionar Amontons ou da Vinci. Entretanto, todos consideram os importantes trabalhos entre os anos de 1930 e 1940 de Bowden e Tabor (2001) e Holm (1967) no entendimento dos mecanismos que atuam na resistência ao movimento. Esses trabalhos atribuem a resistência ao movimento que ocorre a seco como uma resultante da soma de uma força devido a adesão ($F_{adesão}$) mais uma força devido a deformação plástica que ocorre no sulcamento ($F_{sulcamento}$) entre asperezas, que podem ser representadas pela eq.(2).

$$F_{resistência} = F_{adesão} + F_{sulcamento} \quad (2)$$

Onde a força de adesão é igual ao produto da área real de contato (A_{real}) pela resistência ao cisalhamento (τ), conforme eq. (3). A força de deformação devida ao sulcamento da aspereza de maior dureza pode ser expressa em termos da dureza

da aspereza ($H_{aspereza}$), do seu tamanho (representada por a que é igual ao raio de uma única aspereza) e profundidade de penetração (x), ver eq.(4).

$$F_{adesão} = A_{real} \tau \quad (3)$$

$$F_{sulcamento} = H_{aspereza} ax \quad (4)$$

A forma empregada para descrever a resistência ao movimento nos livros de conformação mecânica citados anteriormente sugere que não há a parcela de sulcamento; ou seja, a resistência ao movimento é totalmente atribuída a parcela de adesão, expressa pela relação entre a força de resistência ao movimento e o limite de cisalhamento interfacial (τ_i), representado na eq.(5).

$$\mu = \frac{F_{resistência}}{P} = \frac{\tau_i}{p} \quad (5)$$

A tensão de cisalhamento interfacial (τ_i) e a pressão normal de contato (p) são obtidos, respectivamente, pela divisão da força de resistência ($F_{resistência}$) e força normal (P) pela área real de contato (A_{real}).

Na conformação mecânica, segundo Schey (1984), A Lei de Atrito de Coulomb é satisfeita enquanto τ_i aumentar proporcionalmente ao aumento de p e sob estas condições existe o deslizamento entre os corpos. Quando τ_i atinge o valor da tensão de escoamento em cisalhamento (τ_e) do material conformado, este ao invés de deslizar contra a superfície de conformação irá cisalhar numa região interna do material, a uma determinada distância a partir da superfície de contato, conforme representação esquemática da Figura 16. Nestas condições, onde $\tau_i > \tau_e$, não se observa deslizamento entre as superfícies e a Lei de atrito de Coulomb não é satisfeita, condição denominada na literatura por colamento (do inglês *sticking*) (SCHEY, 1984).

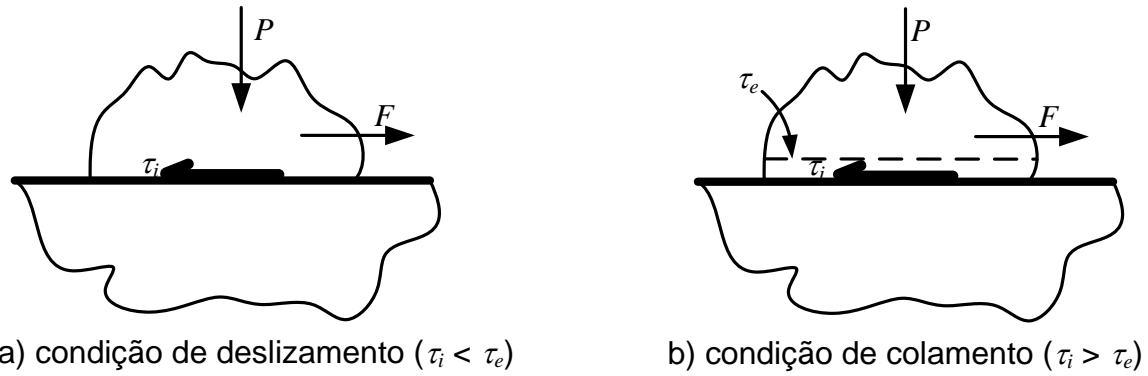


Figura 16 – Representação esquemática das condições de resistência ao movimento em condições de conformação mecânica.

Na Figura 16 F é a força movente e (τ_e) a tensão de escoamento em cisalhamento. De acordo com o critério de escoamento de von Mises, eq.(6),

$$\tau_e = 0,577\sigma_e \quad (6)$$

onde:

σ_e é a tensão de escoamento em tração e considerando uma condição comum na conformação mecânica que é pressão de contato (p) igual à tensão de escoamento em tração (σ_e), obtem-se:

$$\tau_e = 0,577p \quad (7)$$

Considerando a condição de colamento, onde (τ_i) é igual a (τ_e) , tem-se:

$$\tau_i = 0,577p \quad (8)$$

Igualando a Eq.(5) a eq.(8) obtem-se o valor do coeficiente de atrito onde ocorre o colamento, $\mu = 0,577$.

Como na maioria dos processos de conformação mecânica, p atinge valores múltiplos de σ_e e como τ_e permanece constante com o aumento de p , o valor de μ aparentemente diminui. Segundo Schey (1984) considerar a redução no coeficiente de atrito é melhor do que abordar o colamento interfacial.

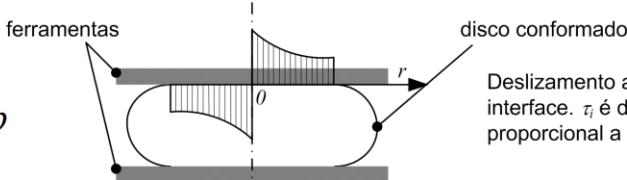
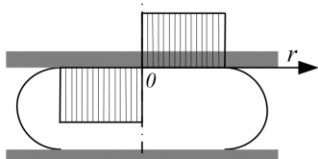
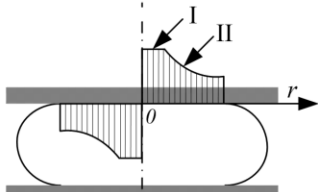
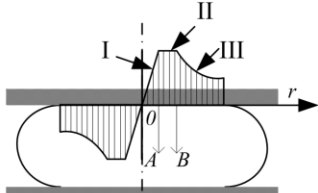
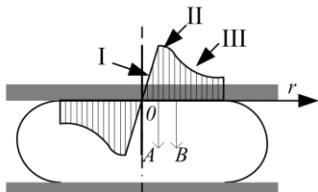
As dificuldades em estabelecer valores adequados de μ em condições de colamento levaram vários pesquisadores (SCHEY, 1984) a descrever τ_i da seguinte forma:

$$\tau_i = m\tau_e \quad (9)$$

onde m é o fator de cisalhamento de atrito o qual tem um valor de $m=0$ para uma interface livre de atrito e $m=1$ para a condição de atrito por colamento (SCHEY, 1984).

Carter, (1994) e Tan (2002) listaram referências com modelos para descrever a resistência ao movimento principalmente para condições de conformação mecânica. A Tabela 2 apresenta um resumo dos modelos listados por Tan (2002), observa-se que a evolução dos modelos objetiva detalhar o comportamento da tensão interfacial em diferentes regiões da superfície de conformação.

Tabela 2 – Modelos para a distribuição da tensão interfacial em condições de conformação mecânica, adaptado de Tan (2002).

Modelo de resistência ao movimento	Distribuição da tensão interfacial τ_i	Principais considerações	Autores, data
$\tau_i = \mu p$		Deslizamento a seco em toda a interface. τ_i é diretamente proporcional a pressão de contato.	von Karman, 1925; Kunogi, 1954; Kudo, 1960
$\tau_i = m \tau_e$		Condição de colamento em toda a interface. Usado em conformação a frio, a seco de metais com baixa dureza.	Siebel, 1930; Orowan, 1946; Sims, 1954; Alexander, 1955
I- $\tau_i = m \tau_e$ II- $\tau_i = \mu p$		A superfície do disco é dividada e duas regiões: I – colamento, próxima a zona neutra, II- deslizamento.	Orowan, 1943
I- $\tau_i = m \tau_e \frac{r}{0A}$ II- $\tau_i = m \tau_e$ III- $\tau_i = \mu p$		A superfície do disco é dividada e três regiões: I e II – colamento, tendendo a zero no centro, III- deslizamento.	Tselikov, 1958; Unksov, 1961
I- $\tau_i = m \tau_e \frac{r}{0A}$ II- $\tau_i = m \alpha \tau_e$ III- $\tau_i = \mu p$		A superfície do disco é dividada e três regiões: I colamento, tendendo a zero no centro, II e III- deslizamento.	Bay e Gerved, 1984

Segundo Tan (2002) o modelo de Bay e Gerved (1984) é um dos mais utilizados pelo método dos elementos finitos. Neste modelo, α , utilizado na região onde a tensão interfacial é mais elevada, representa uma relação entre a área real e a área aparente de contato.

Além dos modelos utilizados para antever o atrito, outro ponto importante são suas medidas. Assim como os modelos de atrito, existe uma série de métodos utilizados para determinar o atrito. A seguir serão apresentados dois métodos que foram utilizados no presente trabalho.

2.2.2 Métodos para caracterizar o atrito (resistência ao movimento)

Devido ao fato da resistência ao movimento ser uma resposta do tribossistema, existe numerosos ensaios para sua caracterização. No ASM HANDBOOK VOL. 18 (1992) listam-se 23 ensaios normatizados para medir a força de resistência ao movimento, sendo que cada configuração de ensaio corresponde a uma determinada condição tribológica. O grande número de ensaios é devido ao grande número de variáveis que afetam suas medidas. Budinski (2001) apresenta uma lista de variáveis que podem afetar o coeficiente de atrito, conforme apresentado na Figura 17.

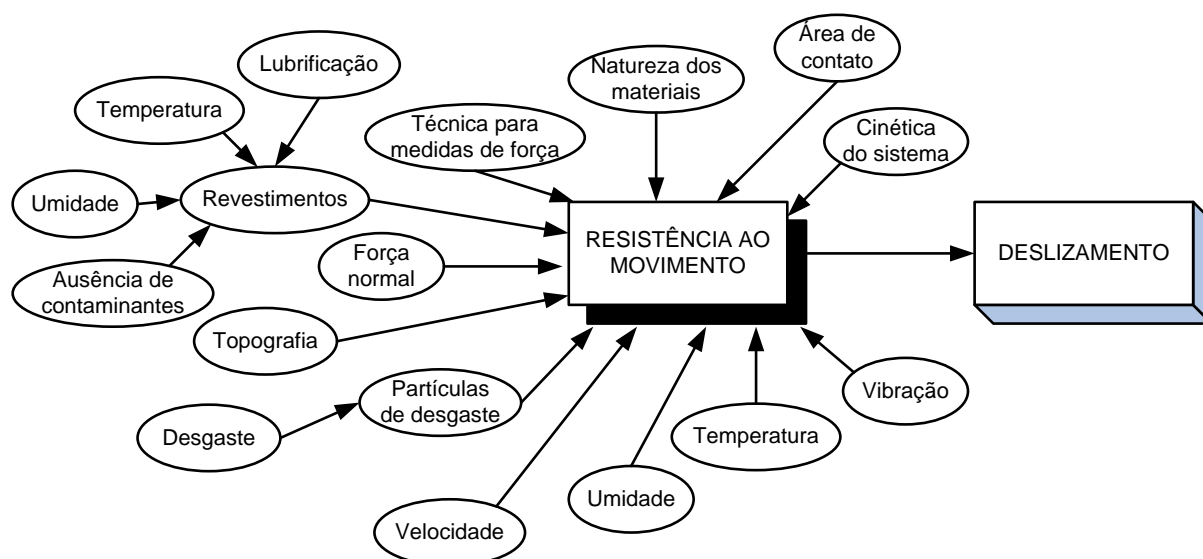


Figura 17 – Fatores que afetam as medidas relacionadas a resistência ao movimento.

Uma característica comum aos ensaios normatizados é o fato de que a resistência ao movimento é caracterizada, como alta ou baixa, em função da medida da força de resistência ao movimento, que é obtida diretamente, com o auxílio, por exemplo, de células de carga, ou indiretamente, como no caso da medida do ângulo correspondente ao início de movimento de um corpo inicialmente em repouso sobre um plano inclinado.

A segunda característica é o fato de que os corpos em contato não experimentam deformação plástica volumétrica, mas apenas localizada, como ocorre no caso das deformações plásticas sofrida pelas asperezas. Um método comumente utilizado nestas condições é aquele do ensaio pino-sobre-disco. Neste ensaio, em sua configuração clássica, um corpo de prova no formato de disco gira na posição horizontal sob um contra-corpo no formato de pino, montado na posição vertical e fixo numa haste que está apoiada sobre um sensor de força, responsável por medir a força de resistência ao movimento.

Por lado, no campo de deformações plásticas volumétricas, embora não sejam normatizados, existem configurações de ensaios que são utilizadas para medir a resistência ao movimento em condições aproximadas dos processos de conformação mecânica, a citar o ensaio do tubo cônico (BRITO; SCHAEFFER, 2008).

Entre os ensaios utilizados destaca-se o ensaio de compressão do anel que caracteriza a resistência ao movimento por meio de alterações na geometria do anel, onde uma pequena contração (ou expansão) no diâmetro interno indica uma condição de alto (ou baixo) coeficiente de atrito. Devido a esta simplicidade este ensaio é o mais utilizado para a caracterização da resistência ao movimento em condições de deformações plásticas de grandes volumes (ALTAN; OH; GEGEL, 1999; ASM HANDBOOK, VOL. 18, 1992; DIETER, 1988; SCHAEFFER, 1999 e SCHEY, 1984).

O ensaio de compressão do anel consiste em conformar um corpo-de-prova no formato de anel (Figura 18a) contra ferramentas de faces planas. O coeficiente de atrito (μ) ou coeficiente de atrito interfacial (m) é determinado em função da mudança no diâmetro interno do anel para um dado nível de deformação em sua espessura. Se μ for muito baixo o anel se deforma como um disco e cada ponto em seu interior escoar no sentido radial em direção ao raio externo (Figura 18b). Se, por outro lado,

μ excede um determinado valor crítico, há uma condição tal que se torna energeticamente favorável para uma parte do anel escoar no sentido radial e em direção ao raio interno (Figura 18c), enquanto a outra parte escoa na direção oposta (ALTAN; OH; GEGEL, 1999; ASM HANDBOOK, VOL. 18, 1992; DIETER, 1988; SCHAEFFER, 1999 e SCHEY, 1984).

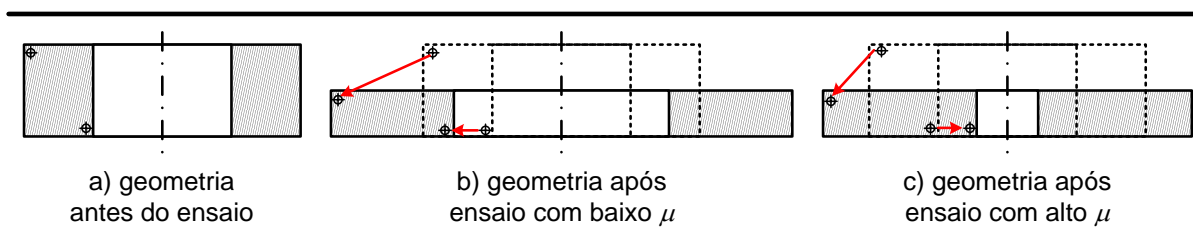


Figura 18 – Representação esquemática das diferentes formas do anel em função do atrito após ensaio de conformação.

Estas características do ensaio de compressão do anel permitem estabelecer valores de coeficiente de atrito de uma forma simples, sem a necessidade de conhecer propriedades dos materiais ou ainda dos parâmetros do processo de conformação.

Seguindo o exemplo dos métodos estabelecidos para determinar o coeficiente de atrito na laminação a frio, o ensaio de compressão do anel foi desenvolvido para determinar valores de coeficiente de atrito para os demais processos de conformação mecânica a quente ou a frio (MALE; COCKCROFT, 1964-65). Kunogi, em 1956, foi o primeiro a utilizar o ensaio do anel para comparar lubrificantes utilizados no processo de extrusão a frio, como relatado por Kudo (1960) e Male e Cockcroft (1964-65).

Male e Cockcroft (1965-65) foram os primeiros a apresentar valores de μ obtidos a partir do ensaio de compressão do anel. Estes autores estabeleceram com seus resultados duas condições limites para o valor do coeficiente de atrito: a primeira é a condição em que o anel se comporta como um disco e o coeficiente de atrito é dito ser igual a zero, condição obtida experimentalmente realizando ensaios com anéis de cera à temperatura próxima de sua fusão, o que resulta numa excelente condição de lubrificação; a segunda é a condição onde se assume a aderência total entre todos os pontos de contato, esta condição foi obtida experimentalmente realizando ensaios com anéis de alumínio deformados a 600°C. O coeficiente de atrito na

segunda condição deve ser superior ou igual a 0,57, de acordo com o critério de escoamento adotado.

Para Male e Cockcroft (1965-65) os valores intermediários entre 0 e 0,57 foram identificados devido à presença de marcas de abrasão, semelhante as marcas resultantes dos ensaios de laminação a frio com chapas de alumínio realizados por Capus e Cockcroft (1961-62). Os valores do coeficiente de atrito na condição intermediária foram estabelecidos da seguinte forma:

i/ foram realizados ensaios de compressão para determinar a força necessária para conformar discos de vários materiais em vários níveis de redução e então calcular o coeficiente de atrito por meio da análise de Schroeder e Webster (1949), ver Figura 19(a) onde observa-se que o coeficiente de atrito é aproximadamente constante para reduções entre 20% e 50%, exceto o aço e o cobre em condições não lubrificadas.

ii/ foram realizados ensaios de compressão de anéis nas mesmas condições dos ensaios preliminares com discos, e dessa forma, foram obtidas as curvas de variação geométrica do anel (Figura 19b) em função do tipo de material e do nível de redução em altura. Assim surgiu a primeira curva de calibração (Figura 19c) decorrente da correlação entre os valores de μ , obtidos pelo método de Schroeder e Webster (1949), com as variações geométricas do anel obtidas experimentalmente por Male e Cockcroft (1964-65).

Os resultados dos valores de atrito nas condições estudadas por Male e Cockcroft (1964-65) foram semelhantes aos valores observados em práticas industriais e permitiram identificar variações nos valores do coeficiente de atrito de diferentes materiais, em diferentes condições de temperatura, lubrificação e taxa de deformação. A desvantagem do método citada pelos autores é o fato de, até aquela data, não haver métodos teóricos satisfatórios para converter as mudanças geométricas do anel conformado em coeficiente de atrito.

No período entre 1960 e 1970, surgiram análises matemáticas dedicadas à solução teórica para o problema relatado por Male e Cockcroft (1964-65). Estas análises tornaram-se clássicas e foi base dos aprimoramentos desenvolvidos até os dias atuais. Os principais trabalhos a citar são: Kunogi apud Kudo (1960), Kudo (1960), Avitzur (1968), Hawkyard e Johnson (1967) e Burgurdof (1967) apud Rao e Sivaran (1993). Male e DePierre (1970) apresentaram uma solução matemática baseada no método de Avitzur.

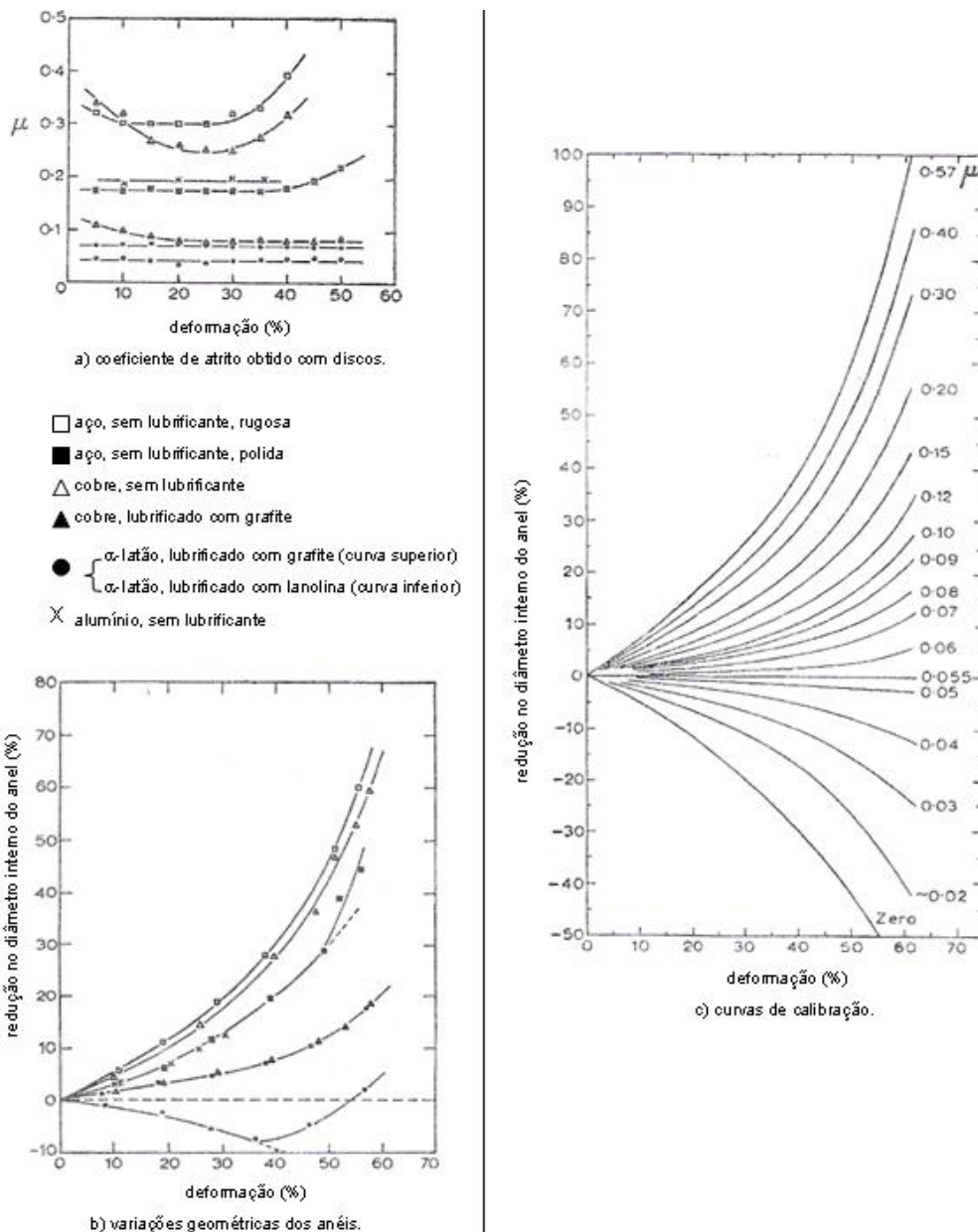


Figura 19 – Método para obtenção das curvas de calibração (MALE; COCKCROFT, 1965). (a) coeficiente de atrito para vários metais em diferentes condições de lubrificação à 20°C, valores obtidos a partir das análises de Schroeder e Webster dos resultados experimentais realizados com discos. (b) variações na geometria dos anéis ensaiados nas mesmas condições dos discos. (c) curvas de calibração para um anel de geometria padrão (6:3:2).

Avitzur (1968) apresenta uma solução analítica para condições onde a tensão interfacial é constante entre o coeficiente de atrito interfacial (m), e o padrão de deformação do anel. A Figura 20 apresenta as características de deformação de dois anéis idênticos reduzidos em proporções idênticas (ΔT_0). Um anel é lubrificado e conformado em condições de baixo coeficiente de atrito enquanto que o outro não foi lubrificado, ou seja, conformado em condições de coeficiente de atrito elevado.

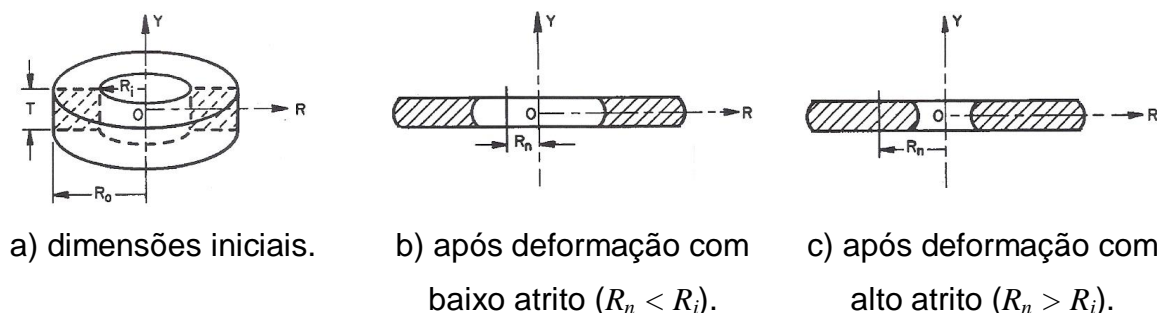


Figura 20 – Comportamento de deformação do anel durante ensaio de compressão (adaptada de Avitzur, 1978).

Pode ser observado na Figura 20(c) que em condições de elevada resistência ao movimento, todos os pontos com raio $R > R_n$ são deslocados radialmente para fora e sua posição radial aumenta enquanto que todos os pontos de raio $R < R_n$ são deslocados em direção ao centro. Os pontos localizados onde o raio $R = R_n$ permanecem estacionários, e assim este raio é chamado de raio neutro (R_n). Na condição de elevado atrito $R_n > R_i$.

Na condição de baixo atrito (Figura 20b) $R_n < R_i$ e dessa forma todos os pontos são deslocados radialmente para fora (AVITZUR, 1968).

Male e DePierre (1970) apresentaram uma solução combinada entre resultados experimentais obtidos por Male e Cockcroft (1964-65) com os resultados analíticos de Avitzur (1968) que resultou nas curvas de calibração do atrito interfacial m com as variações dimensionais de um anel com geometria padrão (6:3:2 – que representa a relação entre os diâmetros externo, interno e altura) (Figura 21). Porém, Male e DePierre (1970) mostraram que as curvas de calibração para o anel com geometria padrão fornecem valores de m superior ao valor obtido experimentalmente, determinado pelo método de Schroeder e Webster (1949). Dessa forma recomendaram que, para o modelo de Avitzur (1968), fossem utilizados anéis com 1/6 da espessura daquele da geometria padrão, pois quanto menor a espessura menor o efeito das deformações na região equatorial.

A Figura 21 é encontrada em diversos livros de conformação mecânica, contudo, considera-se importante destacar que no livro de Dieter (1988), há um erro de digitação nos valores das curvas de calibração para um anel com geometria 6:3:1. Entre os valores de 0,1 e 0,2 há o valor 0,5 onde o correto é 0,15.

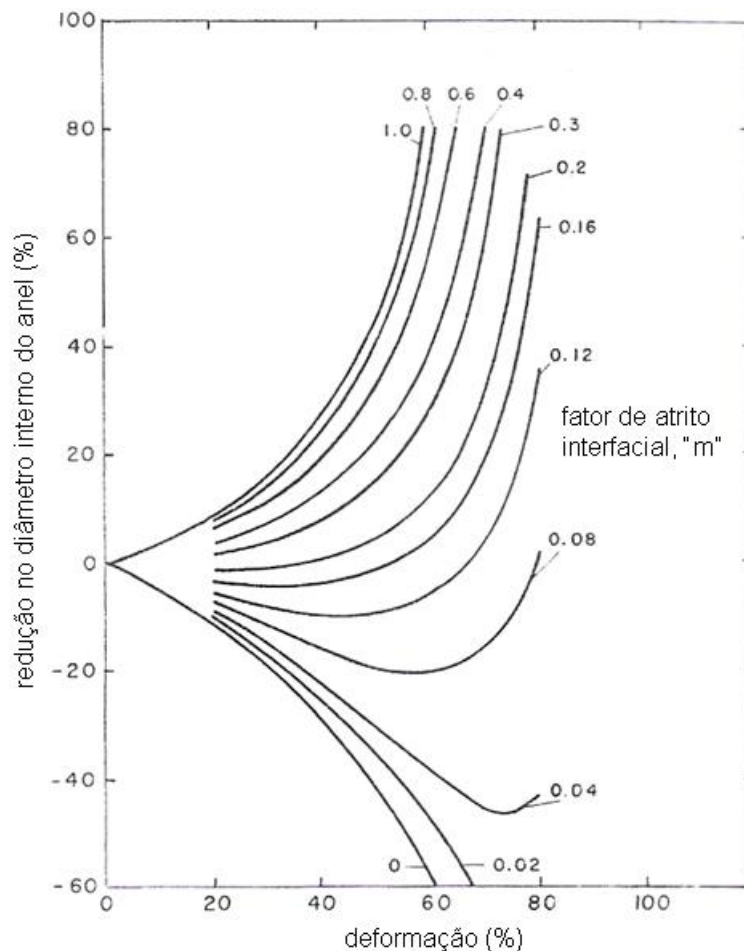


Figura 21 – Curva teórica de calibração para o anel com geometria padrão (6:3:2) (MALE; DePIERRE, 1970).

Trabalhos dedicados a soluções analíticas para o padrão de deformação dos anéis apresentam modelos resultantes de aprimoramentos daquele proposto por Avitzur (1968). Estes modelos consideram e realizam análises com fatores não considerados por Avitzur (1968), como por exemplo: i/ consideração do encruamento, (HAWKYARD; JOHNSON, 1967); ii/ consideração da deformação na região equatorial (LIU, 1972) e iii/ desenvolvimento do modelo com base nas velocidades de deformação, (LEE; ALTAN, 1972). Rao e Sivaram (1990) realizaram uma revisão sobre os métodos disponíveis para a determinação do atrito interfacial (m) e a Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos. Os autores atribuem as diferenças entre os modelos às considerações específicas de cada um deles, contudo não discutem qual o melhor modelo de calibração, apenas destacam que os resultados obtidos com os métodos estabelecidos por Liu (1972) e Abdul (1981) são semelhantes aos resultados experimentais obtidos por Male e Cockcroft (1968).

Tabela 3 – Valores do atrito interfacial constante (m) para anéis com geometria padrão (6:3:2) de uma liga de Al-Si conformados em $45\% \pm 5\%$ a temperatura ambiente e sem lubrificante (RAO; SIVARAM, 1990).

	Referências				
	Hawkyard e Johnson (1967)	Male e DePierre (1970)	Lee e Altan (1972)	Liu (1972)	Abdul (1981)
atrito interfacial (m)	0,85	0,78	0,77	0,44	0,42

A revisão da literatura sobre o ensaio de compressão do anel permitiu identificar que os maiores esforços no estabelecimento deste ensaio foram dedicados ao desenvolvimento de um modelo analítico capaz de estabelecer valores de atrito interfacial em função das variações geométricas de anéis. Contudo, não se observou, nesta revisão, discussões sobre a relação entre os valores obtidos de atrito interfacial com a força de resistência ao movimento presente nos processos de conformação. O único trabalho a traçar este paralelo foi o trabalho pioneiro, desenvolvido por Male e Cockcroft (1968) que comparou os valores obtidos com anéis de aço, sem lubrificante e ferramentas polidas ($\mu = 0,17$) com valores de coeficiente de atrito do processo de laminação a frio para cilindros polidos ($\mu = 0,085$).

Com o auxílio das análises realizadas no presente trabalho, que serão apresentadas no capítulo 4, e pelo modelo de distribuição da tensão interfacial, apresentada na Tabela 2, optou-se pelas curvas de calibração de Male e Cockcroft (1964-65) para determinar o coeficiente de atrito dos ensaios realizados, porém, constatou-se que para condição com topografia isotrópica o melhor modelo é aquele proposto por Bay e Wanheim (1976), não incluído na revisão de Tan (2002), resumida na Tabela 2.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para estudar o efeito de superfícies com topografia isotrópica e anisotrópica foram utilizados dois tipos de ensaios tribológicos classificados segundo Uetz e Wiedemeyer (1984): o primeiro representa o tribossistema de forma simplificada (deformações plásticas microscópicas) e o segundo representa o tribossistema em condições próximas de um processo real de conformação mecânica, o forjamento a frio (deformações plásticas macroscópicas), porém em condições controladas.

3.1 ENSAIO COM DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS MICROSCÓPICAS (PINO-SOBRE-DISCO)

Estudou-se o efeito de topografias anisotrópicas no desgaste por deslizamento utilizando um tribômetro do tipo pino-sobre-disco. Os parâmetros do ensaio e seus respectivos valores foram determinados em ensaios preliminares, estabelecidos no trabalho de Leite; Gomes e Sinatora (2008) e são descritos a seguir:

- i/ materiais do corpo e contra-corpo: disco de aço ABNT* H13 e pino de aço ABNT 4140;
- ii/ tempo de permanência em contato: 2 segundos;
- iii/ número de ciclos de deslizamento: 80 ciclos;
- iv/ velocidade linear: 0,05 m/s.
- v/ tipo de movimento: deslizamento;
- vi/ meio interfacial: a seco;
- vii/ morfologia do contato: contato do tipo conforme, típica de superfícies planas;
- viii/ força de contato: 150 N;
- ix/ meio ambiente: temperatura de 22 °C e umidade relativa de 50%.

A única variável do ensaio foi a topografia do disco, sendo uma topografia anisotrópica em rede e outra topografia anisotrópica em linha (detalhadas na Figura

* Associação Brasileira de Normas Técnicas

23). A resposta do ensaio foi a evolução dos danos superficiais de cada uma das topografias estudadas em função do número de pinos que deslizaram sobre cada uma delas. A cada ciclo de deslizamento a superfície do disco era submetida a limpeza com jato de ar e papel embebido em álcool. A Figura 22 apresenta de forma esquemática a evolução do ensaio no tribômetro pino-sobre-disco, destaca-se que a cada ciclo de deslizamento, que tem duração de 2 segundos ou uma volta completa no disco, troca-se o pino.

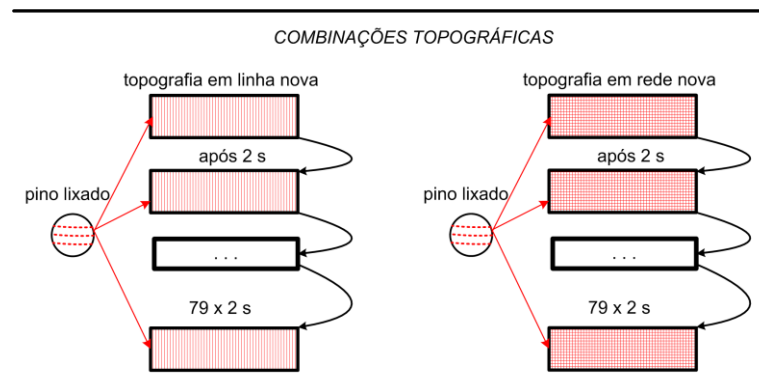


Figura 22 – Representação esquemática do ensaio experimental para avaliação das topografias anisotrópicas.

As topografias anisotrópicas apresentadas na Figura 23 foram obtidas num centro de usinagem e os parâmetros de usinagem (velocidade e profundidade de corte, penetração de trabalho e avanço) foram iguais aos utilizados por Hioki (2006).

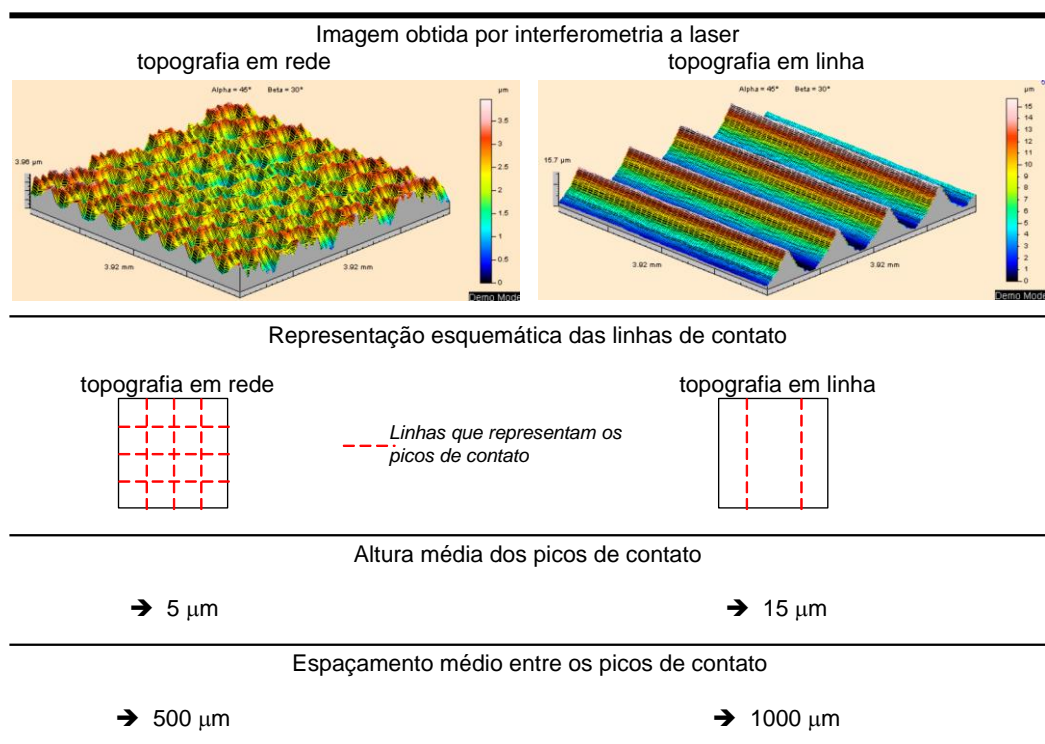


Figura 23 – Características das topografias estudadas produzidas conforme Hioki (2006).

As topografias anisotrópicas foram produzidas na superfície plana de discos obtidos de uma barra de aço ABNT H13. Os discos foram previamente tratados por têmpera seguida de duplo revenimento, conferindo uma dureza média ao disco de $570 \pm 6 \text{ HV}_{0,1}$. Após o tratamento térmico os discos foram retificados para receber a topografia estruturada.

O tribômetro do tipo pino-sobre-disco, da marca Plint modelo TE67, está instalado em uma sala climatizada e atende às variáveis de controle listadas anteriormente. Um pino de topo plano, produzido em aço ABNT 4140 com dureza média de $255 \pm 4 \text{ HV}_{0,1}$, foi montado no tribômetro de modo a proporcionar um contato conforme nas condições de força desejada. Além disso, este equipamento possibilita controlar o movimento do disco na velocidade e tempo especificados. A Figura 24 apresenta as dimensões do disco e do pino além de uma representação esquemática da montagem na configuração do ensaio.

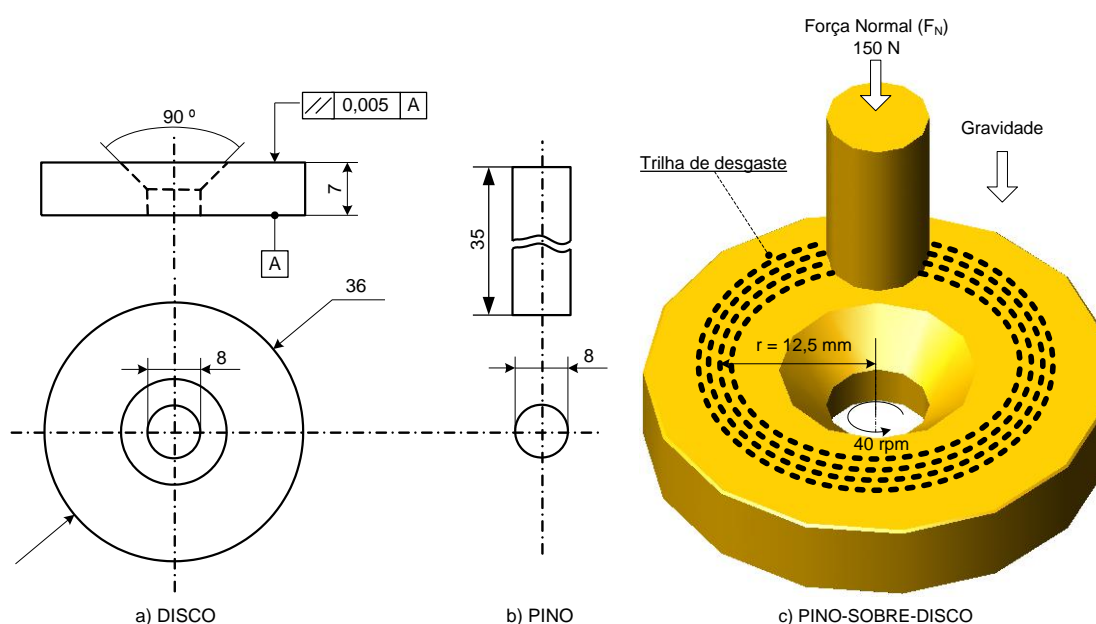


Figura 24 – Desenho de fabricação do disco (a), desenho de fabricação do pino (b) e desenho de montagem do pino sobre o disco (c). Todas as dimensões estão em mm.

As superfícies dos pinos foram preparadas utilizando lixas com tamanho médio do abrasivo de $12,2 \mu\text{m}$ (grana 800). A Figura 25(a) mostra a superfície do pino e a Figura 25(b) o perfil topográfico obtido na direção perpendicular à direção de lixamento. A Figura 25(c) e Figura 25(d) apresentam os perfis das topografias

anisotrópicas em rede e em linha, respectivamente. O perfil topográfico da topografia em rede foi obtido na direção perpendicular às linhas.

Para comparação entre as diferentes morfologias topográficas, apresentam-se os valores da rugosidade média do pino ($0,2 \mu\text{m}$), do disco com topografia em rede ($1,5 \mu\text{m}$) e do disco com topografia em linha ($3,8 \mu\text{m}$).

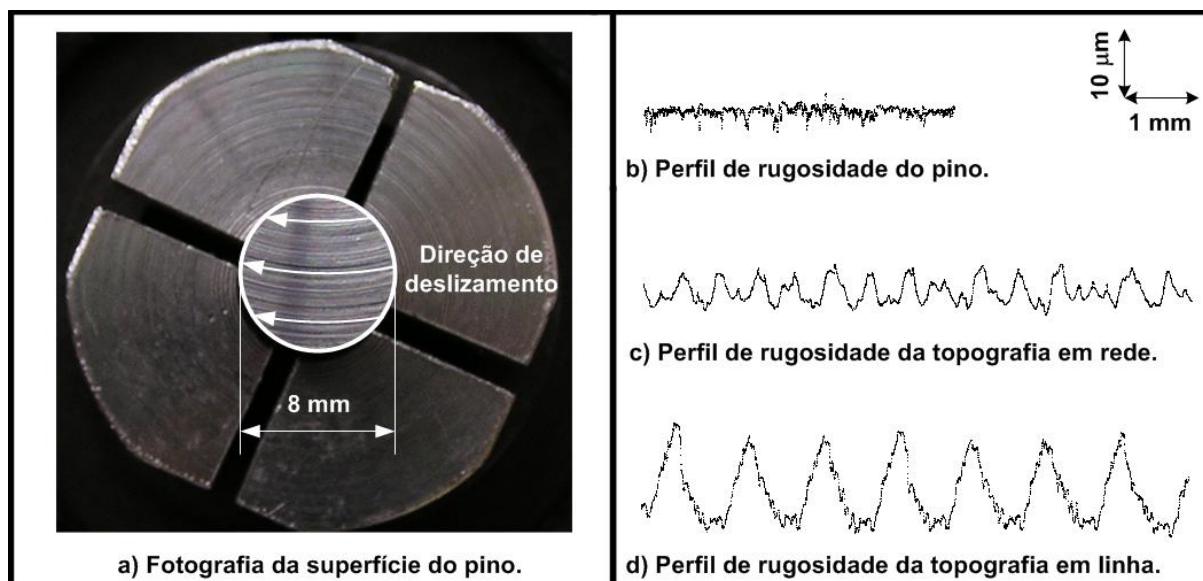


Figura 25 – Características topográficas do pino, após lixamento, e dos discos com topografia estruturada.

3.2 MÉTODO DO ENSAIO EM CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MACROSCÓPICA

Os ensaios com deformações plásticas macroscópicas foram conduzidos no tribômetro LFS-06. Suas características estão apresentadas no apêndice A. A Figura 26 apresenta um diagrama que descreve o ensaio com deformação plástica macroscópica, que pode ser dividido em três etapas: i/ preparação das superfícies de contato, ii/ ensaios com deformação plástica macroscópica do anel e iii/ análises do corpo e contra-corpo. Cada etapa será descrita com detalhes a seguir.

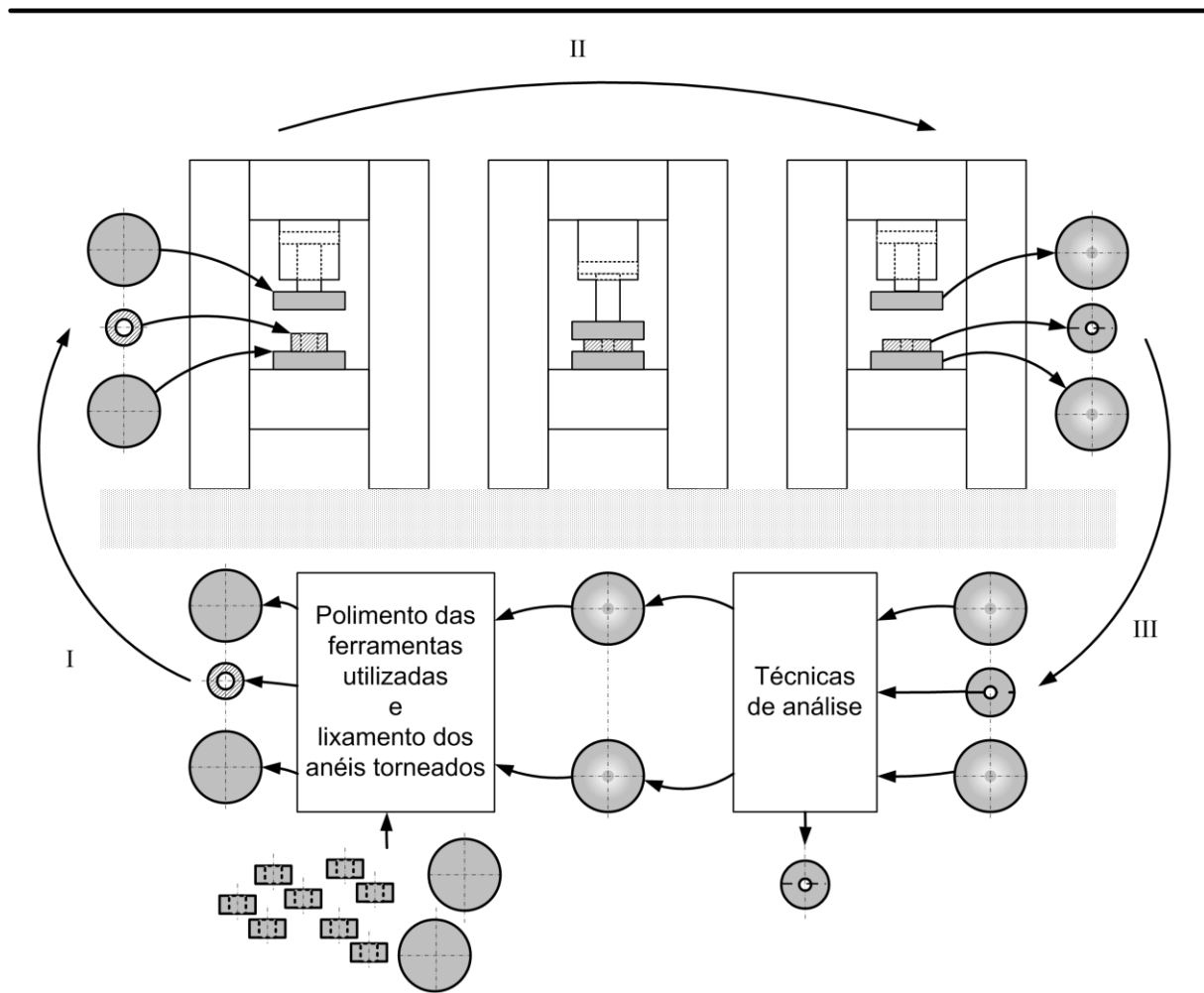


Figura 26 – Representação esquemática do ensaio com deformação plástica macroscópica.

3.2.1 Preparação das superfícies de contato das ferramentas e dos anéis

Nesta etapa as ferramentas passam pelo processo de polimento com pasta de diamante de grãos abrasivos com tamanho médio de $3\ \mu\text{m}$ e os anéis foram lixados com uma lixa na qual o tamanho médio dos seus grãos abrasivos é de $66\ \mu\text{m}$ (grana 220).

O polimento das ferramentas, posterior ao processo de retífica das ferramentas com topografia isotrópica, garantiu uma planicidade de $2\ \mu\text{m}$ num comprimento de $28\ \text{mm}$ e amplitude das asperezas em torno de $0,05\ \mu\text{m}$ (aproximadamente $0,01\ \mu\text{m}$ de rugosidade média).

As ferramentas com topografia anisotrópica também foram polidas, mas apenas para garantir a amplitude das asperezas dos platôs em $0,05 \mu\text{m}$. A topografia anisotrópica dessas ferramentas (ver Figura 27) foi produzida por torneamento em dois níveis diferentes de profundidade dos vales ($0,1 \text{ mm}$ e $0,2 \text{ mm}$) e espaçamento médio entre os platôs de ($0,7 \text{ mm}$ e $0,9 \text{ mm}$). As topografias foram denominadas como topo1 e topo2, respectivamente.

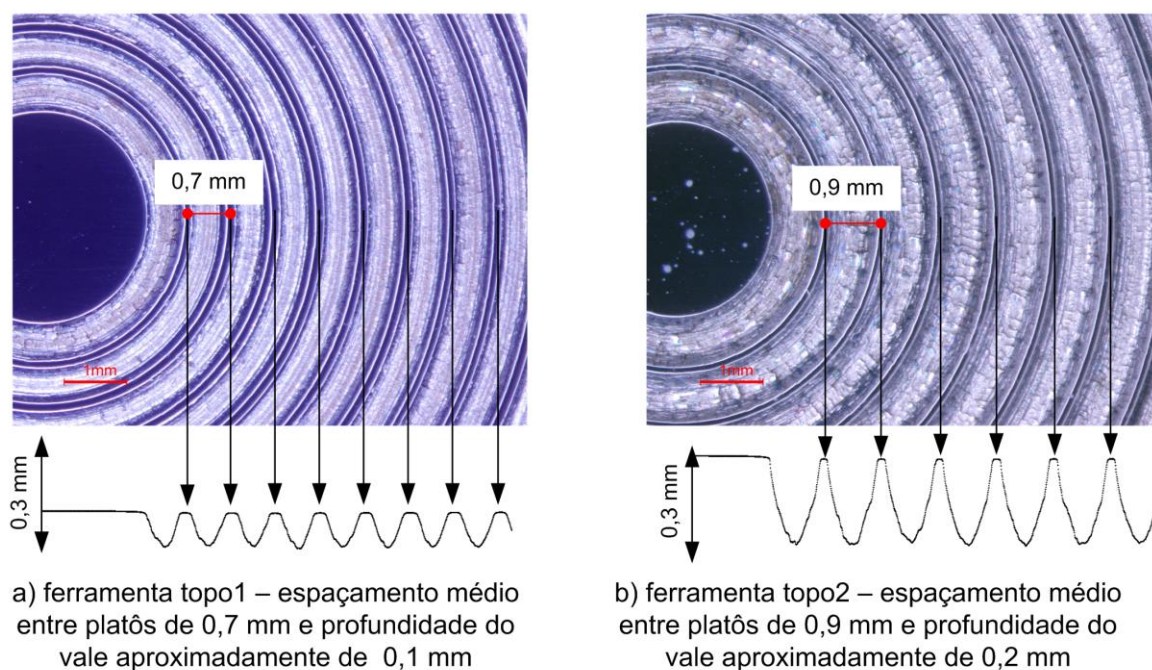


Figura 27 – identificação das topografias anisotrópicas utilizadas no estudo. A) topo1, profundidade dos vales de $0,1 \text{ mm}$ e b) topo2, profundidade dos vales de $0,2 \text{ mm}$

Após cada ensaio, as ferramentas com topografia anisotrópica foram polidas. Cabe destacar que não foi necessário toronar os vales uma vez que os ensaios de deformação plástica do anel não foram suficientes para provocar danos nas suas características topográficas.

O lixamento dos anéis removeu as marcas do torneamento de suas superfícies planas e conferiu amplitudes das asperezas de aproximadamente $4 \mu\text{m}$ ($0,5 \mu\text{m}$ de rugosidade média). Outro cuidado durante a realização do lixamento foi garantir o paralelismo das faces planas, controlado por meio de medidas da sua espessura em quatro diferentes pontos equidistantes 90° . A máxima variação de espessura permitida foi de $\pm 3 \mu\text{m}$.

Após o polimento as ferramentas foram limpas com detergente e álcool enquanto que os anéis foram limpos em banho ultrassônico, imersos num béquer com álcool.

As ferramentas possuem formato cilíndrico com diâmetro de 75 mm e altura de 45 mm. O material utilizado para fabricá-las foi o aço ABNT H13, temperado e revenido para uma dureza média de $561 \pm 5 \text{ HV}_{30}$.

Os anéis utilizados foram fabricados em aço ABNT 1020, com dureza média de $138 \pm 19 \text{ HV}_5$, diâmetro externo de 18 mm, diâmetro interno de 9 mm e espessura de 6 mm.

3.2.2 Ensaios com deformação plástica macroscópica do anel

Além das características topográficas das ferramentas verificou-se o efeito de outras variáveis do ensaio de deformação plástica macroscópica do anel que estão apresentadas na Figura 28. A combinação dessas variáveis resultou em três séries de ensaios que são descritos a seguir.

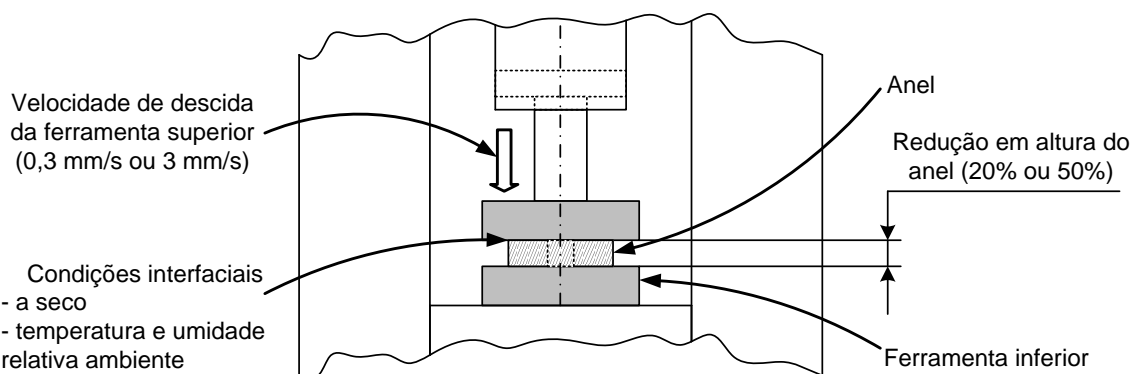


Figura 28 – Representação esquemática do tribômetro LFS 06 e variáveis do ensaio de deformação plástica macroscópica.

A primeira série de ensaio consistiu em caracterizar os danos superficiais das ferramentas polidas e dos anéis conformados com essas ferramentas em função de um ciclo de conformação, duas diferentes velocidades de descida da ferramenta

superior (0,3 mm/s e 3 mm/s) e dois níveis de redução em altura do anel (20% e 50%).

A segunda série de ensaios consistiu em caracterizar os danos superficiais das ferramentas polidas, topo1, topo2 e dos respectivos anéis em função de uma velocidade de descida da ferramenta superior (0,3 mm/s), uma redução em altura do anel (50%) e dez ciclos de conformação.

A terceira série de ensaios consistiu em: i/ caracterizar os danos superficiais das ferramentas polidas, topo1, topo2 e dos respectivos anéis; ii/ caracterizar o padrão de deformação plástica dos anéis conformados com as diferentes ferramentas e iii/ caracterizar o atrito. Todas estas características foram observadas em função de uma velocidade de descida da ferramenta superior (3 mm/s), um ciclo de conformação e dois níveis de redução em altura do anel (20% e 50%).

3.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE

As técnicas de análise utilizadas neste estudo foram:

i/ perfilometria de contato; equipamento da marca Kosaka modelo surfcorder 1700 α que possui capacidade de resolução vertical entre 0,05 μm e 0,001 μm para aberturas verticais de 800 μm e 8 μm respectivamente. O apalpador possui formato cônico com raio de 2 μm . As medidas utilizadas consistem do perfil primário, isto é, o perfil topográfico analisado não possui nenhum tipo de filtro. A velocidade de deslocamento do apalpador foi de 0,1 mm/s.

ii/ macroscopia, iii/ microscopia óptica, iv/ microscopia eletrônica de varredura com espectrômetro de energia dispersiva (EDS[†]).

Os instrumentos utilizados para medir as variações geométricas dos anéis após conformação foram: i/ projetor de perfil e ii/ micrômetro.

[†] Sigla do inglês *Energy Dispersive Spectrometry*

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As hipóteses investigadas nesse trabalho são:

- a) o ensaio tribológico em escala simplificada do tipo pino-sobre-disco permite reproduzir os mecanismos de danos encontrados em condições de ensaio tribológico semelhantes de uma aplicação prática.
- b) topografias anisotrópicas permitem distribuir os pontos de contato e eventuais danos superficiais de forma homogênea sobre a área aparente de contato o que reduz a intensidade dos danos, uma vez que esses estão fortemente associados a sua concentração.
- c) topografias anisotrópicas possuem características que evitam o contato de partículas produzidas pelo processo de desgaste com os corpos em contato.

Essas hipóteses foram verificadas por meio de ensaios com deformação plástica microscópica (pino-sobre-disco) e deformação plástica macroscópica (compressão do anel) com foco no objetivo principal que é estudar o desgaste e resistência ao movimento de superfícies com topografia anisotrópica em deslizamento a seco.

Os objetivos específicos de cada ensaio foram:

- ensaio pino-sobre-disco: verificar o efeito do espaçamento entre os picos de contato; o efeito dos vales e cavidades e o efeito da orientação topográfica com a direção de deslizamento.
- ensaio de compressão do anel: caracterizar o desgaste, identificar seu mecanismo e verificar o efeito da profundidade e espaçamento dos vales na distribuição dos danos superficiais.

Apresentam-se a seguir os resultados desses ensaios.

4.1 DESGASTE E RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO EM CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS MICROSCÓPICAS

Os ensaios com o tribômetro do tipo pino-sobre-disco foram conduzidos para verificar o efeito de duas topografias com diferentes características em condições de deformação plástica microscópica, ou seja, deformação plástica apenas do pico das asperezas em contato.

4.1.1 Alterações superficiais do disco e pino

A Figura 29 apresenta as modificações das superfícies dos discos com as diferentes topografias com o decorrer dos ensaios. Os números marcados no parafuso que fixa o disco correspondem à quantidade de pinos que deslizou sobre este. Foi observado que a evolução dos danos superficiais ocorre de forma gradual, intensificando com os ciclos de deslizamento e independente da topografia em estudo.

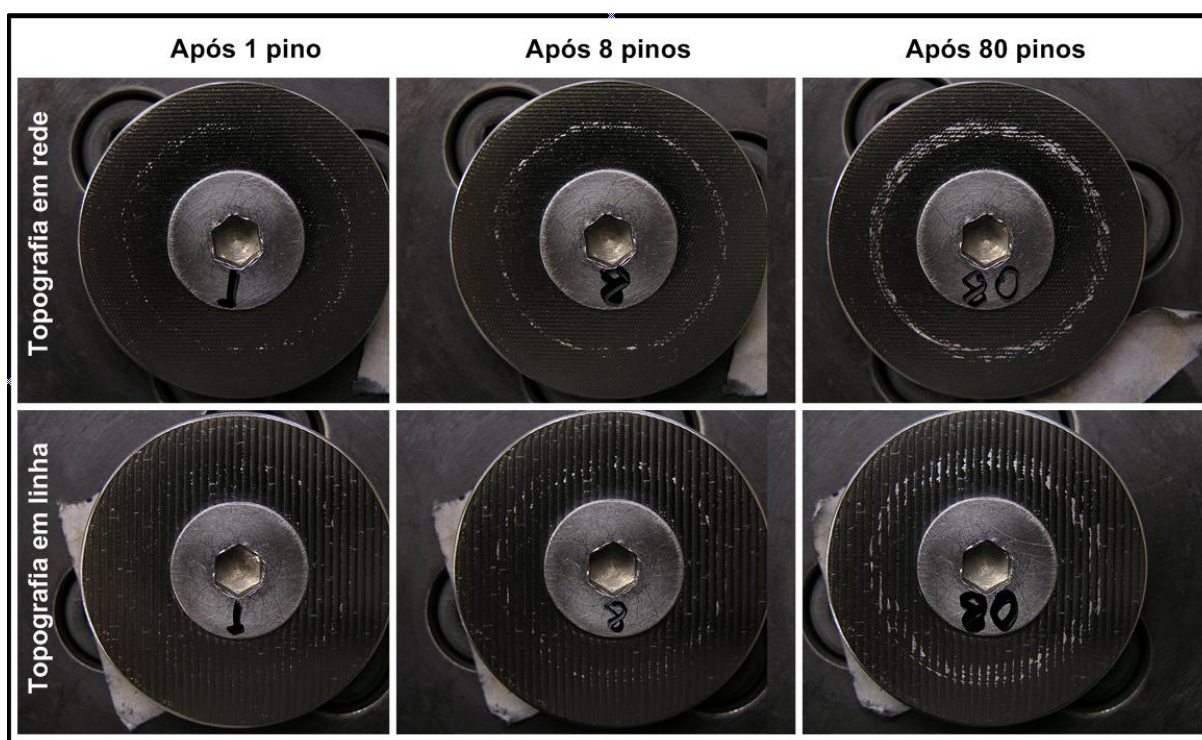


Figura 29 – Evolução dos danos promovidos nas topografias de estudo durante os ciclos de deslizamento.

Os danos causados nos pinos apresentaram resultado semelhante àqueles observados nos discos, isto é, danos semelhantes para as diferentes topografias. A Figura 30 apresenta a superfície de contato dos pinos após o ensaio. A Figura 30(a) apresenta os 80 pinos que deslizaram sobre a topografia em rede, o número 1, no canto superior esquerdo, refere-se ao primeiro pino que deslizou sobre a superfície do disco ainda nova e o número 80 no canto inferior direito, o octogésimo pino que deslizou sobre o disco desgastado.

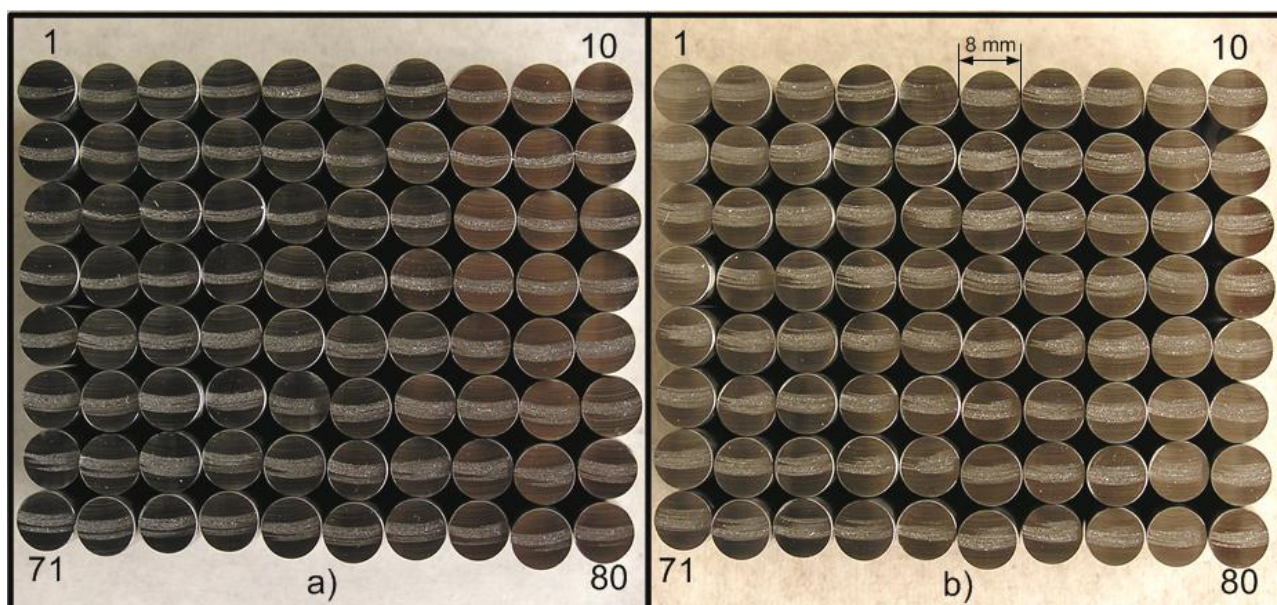


Figura 30 – Características dos danos causados na superfície dos pinos após deslizamento contra a topografia em rede (a) e com a topografia em linha (b).

A Figura 31 apresenta com maior ampliação os danos e seus respectivos perfis topográficos do primeiro e do último pino do ensaio contra a topografia em rede. Os danos estão concentrados na região central da superfície do pino em virtude do abaulamento que este sofre durante o processo de lixamento. Constatou-se pelo perfil topográfico dos pinos após o ensaio que os danos que causam a oscilação na amplitude topográfica são maiores no octogésimo pino. Este é o resultado do acúmulo de danos sobre o disco refletido nos danos da superfície do pino.

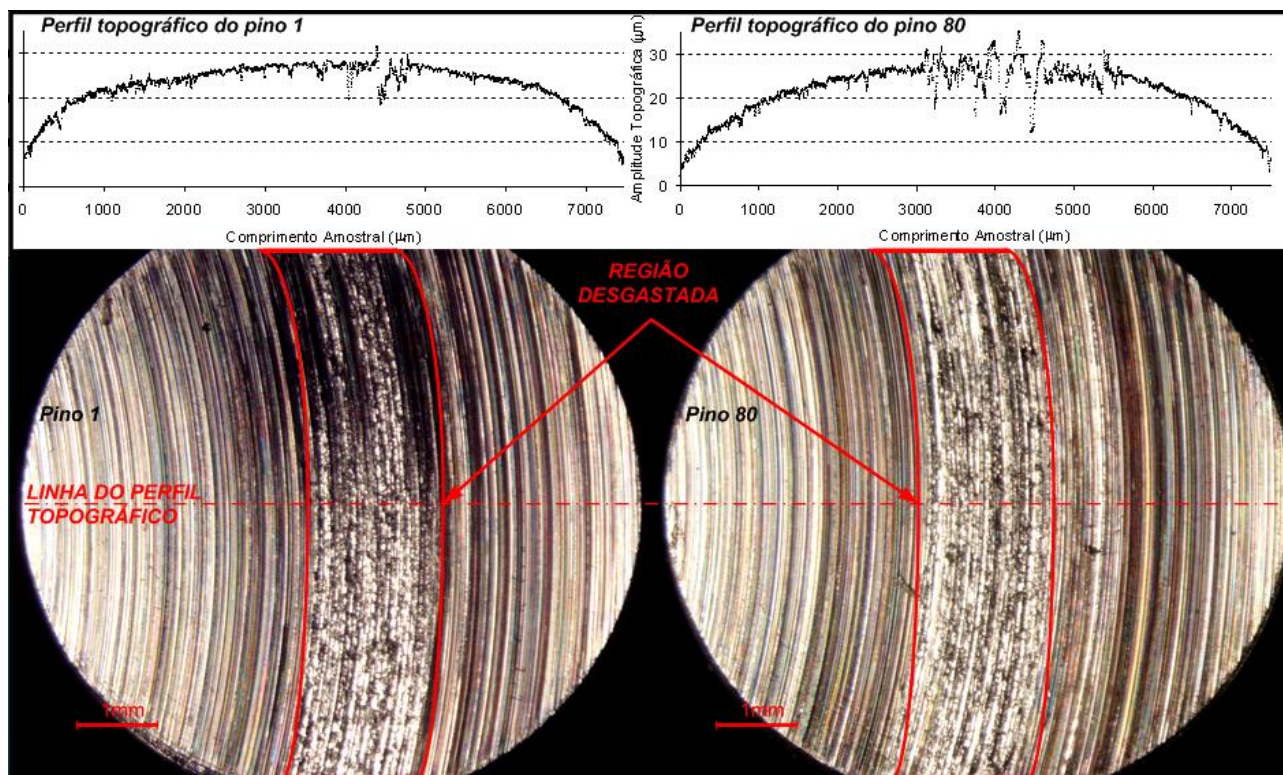


Figura 31 – Superfície do primeiro e do octogésimo pino utilizados no ensaio com o disco de topografia em rede. Acima das fotos apresentam-se os perfis topográficos realizados na direção perpendicular ao deslizamento dos respectivos pinos.

As modificações superficiais apresentadas na Figura 29 e Figura 30 são características de superfícies que sofreram desgaste do tipo esfolamento, pelo fato de que os danos no disco são formados por partículas do material do pino e os danos no pino são o resultado da saída do seu material que ficou aderido na superfície do disco. Nestas condições de ensaio a interação entre pino e disco é intensa, constante e não há a presença de uma camada de óxido na região circunvizinha a cada uma das partículas aderidas na interface do contato.

O fato que suporta a afirmação da presença de partículas do pino sobre o disco é o resultado da análise qualitativa dos elementos químicos por espectrometria de energia dispersiva (EDS) de três regiões de interesse: i) no disco, fora da trilha de desgaste; ii) no disco, sobre uma partícula aderida e iii) no pino, numa região modificada pelo desgaste. A Figura 32 apresenta os gráficos de intensidade de energia absorvida nos comprimentos de onda referente aos elementos comuns a cada uma das amostras.

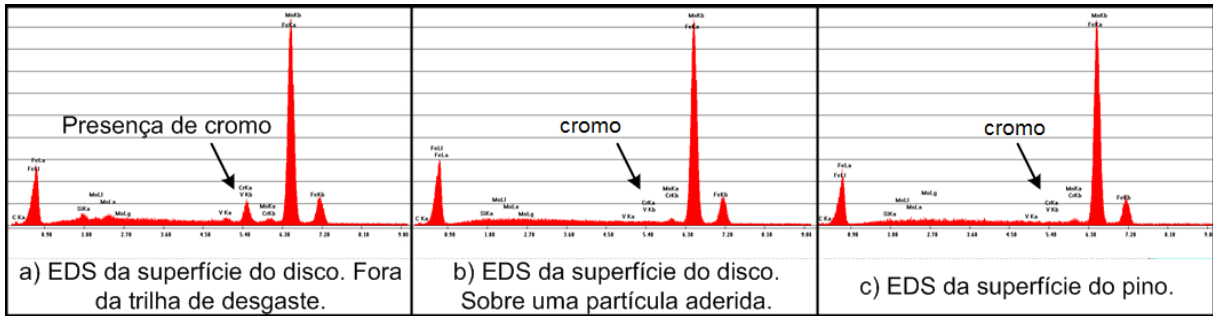


Figura 32 – Análise qualitativa dos elementos químicos presentes no disco (a), no disco, sobre uma partícula aderida (b) e na superfície do pino.

A comparação entre os gráficos da Figura 32 permite concluir que são materiais com composição química diferenciáveis, evidenciada pela presença de cromo no gráfico referente à amostra do disco, Figura 32(a). Por outro lado, não se observa diferença significativa entre os gráficos correspondentes a partícula aderida, Figura 32(b), com aquele do pino, Figura 32(c), comprovando o fato da transferência de material do pino para o disco.

Os principais modelos propostos para os mecanismos de desgaste por deslizamento, referenciados em Zum Gahr (1987), consideram que as interações entre os corpos ocorrem nos picos das asperezas e que destas interações pode haver a transferência de material de um corpo para outro. A Figura 33 apresenta com detalhe uma região da trilha de desgaste das topografias estudadas com indicações das partículas transferidas do contra-corpo (menor dureza) pino para o corpo (maior dureza) disco nos picos das suas asperezas.

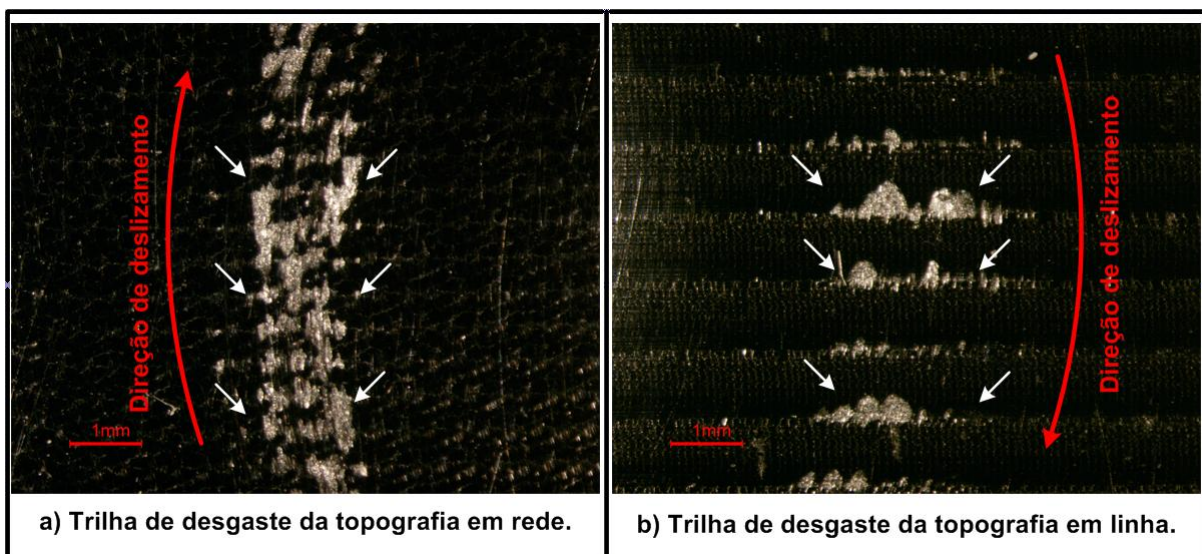


Figura 33 – Superfície dos discos apresentando partículas de adesão oriundas do pino, indicadas pelas setas.

As regiões claras sobre a superfície dos discos, indicadas pelas setas, correspondem às partículas transferidas do pino para o disco, resultado da adesão – colamento – soldagem entre os picos topográficos do disco com aqueles do pino, seguido por deformação plástica desta junção até o limite de resistência do material de menor dureza e conseqüente transferência de material.

As áreas correspondentes às partículas transferidas foram quantificadas com o auxílio de um microcomputador e um aplicativo analisador de imagens. Com aumento de 20 vezes foram observadas 4 regiões da trilha de desgaste, equidistantes de 90°. Após 80 ciclos de deslizamento, a topografia em rede apresentou uma área com partículas transferidas entre 17% e 21% enquanto que para a topografia em linha a variação foi de 12% a 14%.

A maior área correspondente às partículas transferidas nos discos com topografia em rede se deve a sua maior densidade de picos. Por outro lado, a topografia em linha apresentou menor quantidade de material transferido por possuir uma única orientação das suas características topográficas.

A influência da orientação das asperezas de contato havia sido descrita por Peterson et al. (1985) que identificaram o efeito da orientação de características topográficas no desgaste por deslizamento com transferência de material. Estes pesquisadores observaram que a transferência de material foi menor quando a direção do deslizamento foi paralela a orientação das asperezas, enquanto que o desgaste foi maior na condição onde o deslizamento foi perpendicular a orientação das asperezas. A redução na transferência de material foi atribuída a restrição da região onde ocorre.

Uma característica atribuída às topografias anisotrópicas é a capacidade de alojar as eventuais partículas de desgaste em cavidades evitando-as de uma provável interação com os corpos em contato podendo causar o sulcamento. Nos ensaios realizados não foram observadas partículas desprendidas, mas o aglomerado de material transferido gerou dano semelhante ao de uma partícula. No ensaio conduzido com a topografia em rede, durante o décimo oitavo ciclo de deslizamento, um aglomerado de material transferido para o disco foi arrastado causando o sulcamento, conforme apresentado na Figura 34. Como a topografia em rede apresenta menor profundidade de suas cavidades, este resultado indica que as cavidades podem atuar como alojamento da porção de material transferido, evitando o sulcamento.

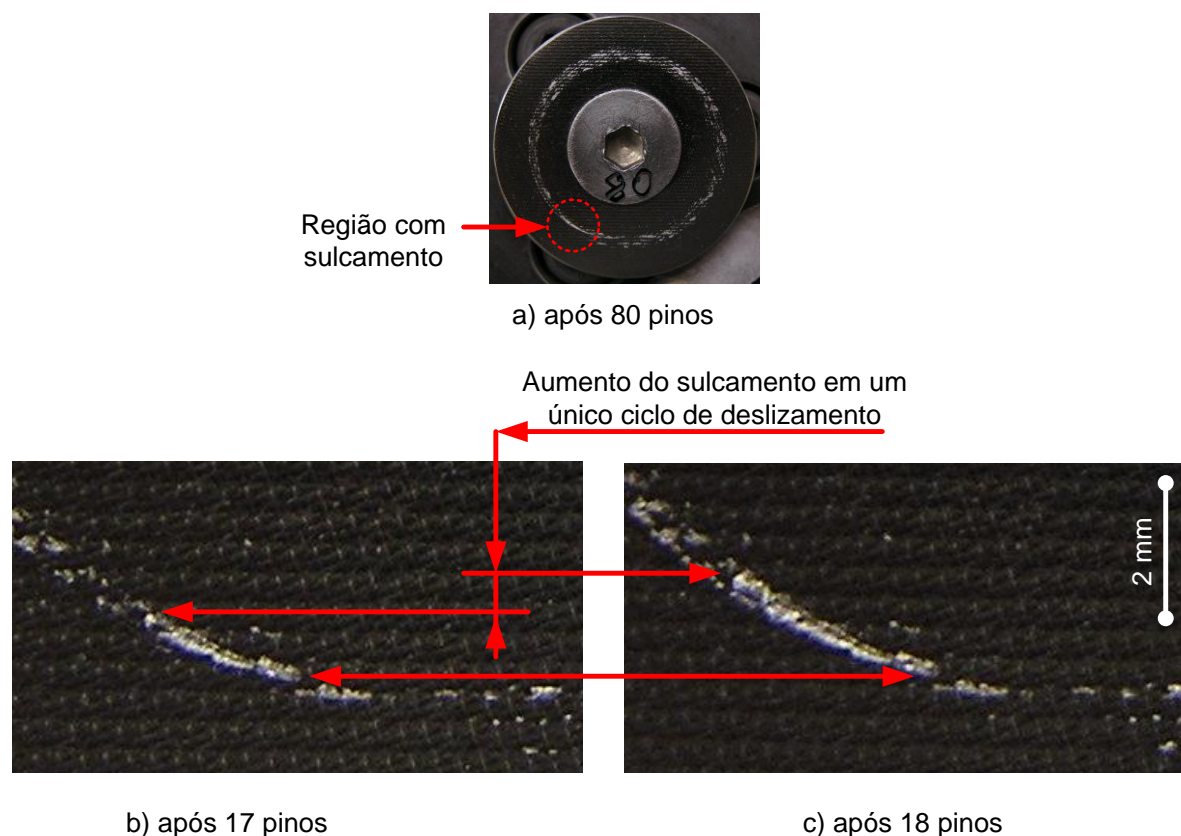


Figura 34 – Detalhe do disco com topografia em rede apresentando evolução de um sulcamento durante um único ciclo de deslizamento.

Com base nos resultados obtidos pode ser constatado o efeito das características topográficas no desgaste por deslizamento com transferência de material. Porém não foi possível verificar a hipótese de que a maior quantidade de pontos de contato resulta na maior área de material transferido e conseqüentemente menor volume. Para isso, sugere-se realizar ensaios onde possa ser quantificada a massa ou volume das partículas transferidas.

4.1.2 Medidas de resistência ao movimento no ensaio pino sobre disco

Outra forma para verificar o efeito de que a maior quantidade de pontos de contato resulta na maior quantidade de material transferido é por meio das medidas de resistência ao movimento. Neste caso a resistência ao movimento foi medida pelo

coeficiente de atrito, que expressa a relação entre a força tangencial, que surge durante o deslizamento do disco sob o pino, e a força normal aplicada sobre o pino. A relação entre a topografia, o desgaste e a resistência ao movimento pode ser interpretada neste caso por meio do mecanismo de resistência ao movimento. A forma na qual foi conduzido este estudo tribológico sugere que o principal mecanismo de resistência ao movimento deve ser aquele resultante da junção entre os pontos de contato do pino e disco por adesão, seguida por deformação plástica até a ruptura do ponto de junção. Portanto, quanto maior a quantidade de pontos de contato, possivelmente será maior a resistência ao movimento. A Figura 35 apresenta o valor médio de dois ensaios do coeficiente de atrito medido no final de cada ciclo de deslizamento para as topografias em rede e em linha. Optou-se pelo último valor medido durante o deslizamento de um único ciclo por considerá-lo menos afetado pelas limitações do sistema de aquisição da força tangencial. Uma limitação é a taxa de aquisição dos sinais emitidos pelo sensor de força tangencial, que é de 10 Hz, outra limitação é a inércia do conjunto rotacional.

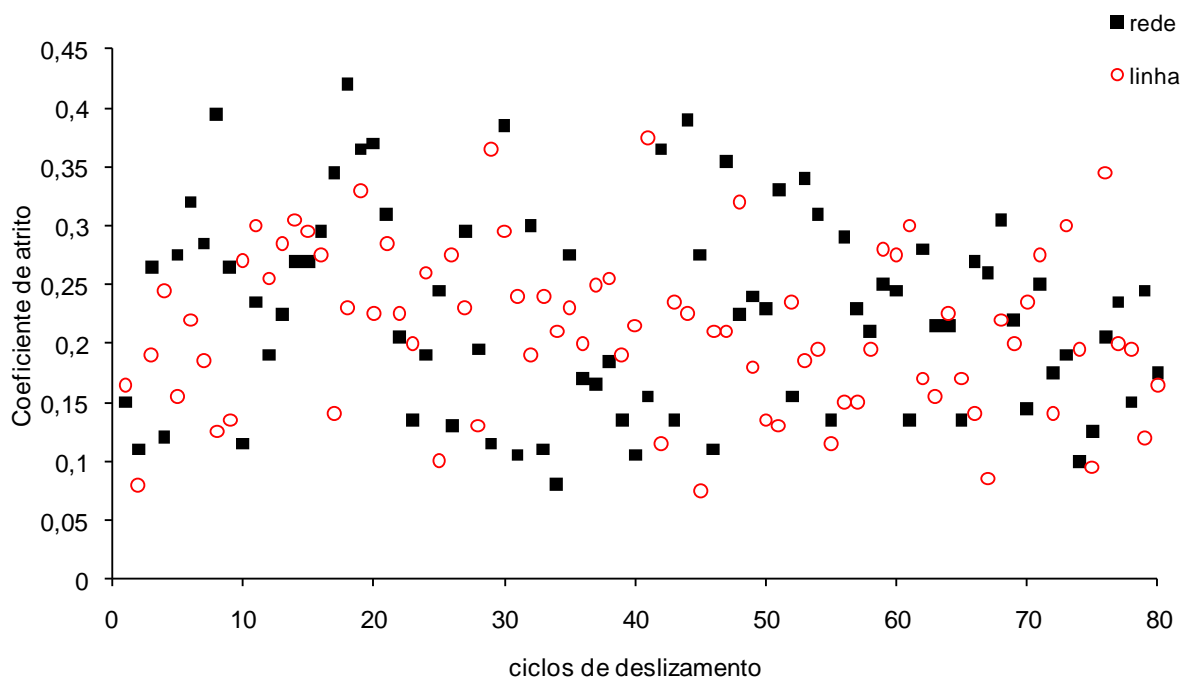


Figura 35 – Variação do coeficiente de atrito medido no final de cada ciclo de deslizamento para a topografia em rede (linha contínua) e topografia em linha (linha tracejada).

O coeficiente de atrito apresentou variações entre 0,05 e 0,45, independente da topografia ou dos ciclos de deslizamento. Conforme discutido anteriormente, a quantidade de material transferido aumentou com o número de ciclos de deslizamento para as duas topografias. Contudo, não pôde ser encontrada uma

relação entre o coeficiente de atrito em função do ciclo de deslizamento com a evolução dos danos do processo de desgaste. Por outro lado a topografia que apresentou maior área com material transferido apresentou maior quantidade de ciclos com valores de coeficiente de atrito entre 0,41 e 0,6, conforme apresentado na Figura 36. Este resultado sugere que a maior quantidade de pontos de contato da topografia em rede resulta na modificação da distribuição dos valores de coeficiente de atrito para valores mais altos que aqueles obtidos com a topografia em linha, aquela que apresenta menor quantidade de pontos de contato. Além disso, o coeficiente de atrito mostra-se independente dos ciclos de deslizamento, ou seja, independente da intensidade dos danos resultantes do processo de desgaste.

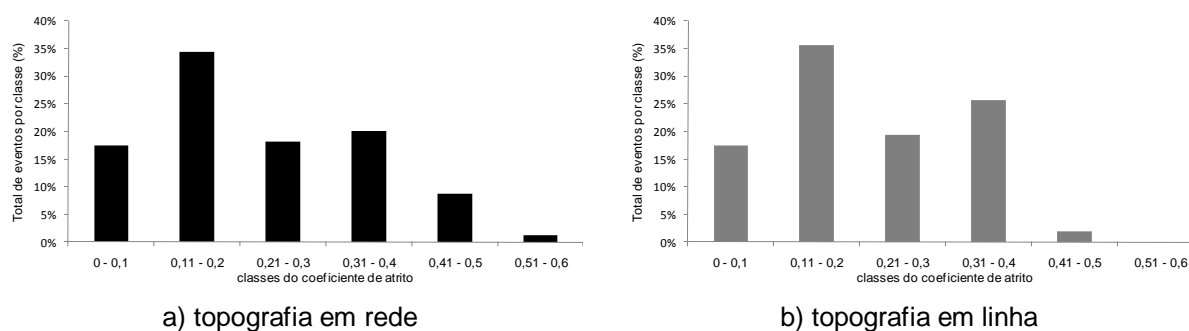


Figura 36 – Distribuição dos valores do coeficiente de atrito em função da topografia em rede (a) e topografia em linha (b).

Os resultados obtidos em condições de deformações plásticas microscópicas permitiram identificar uma relação entre as características topográficas com as características dos danos do processo de desgaste por deslizamento. Constatou-se que o aumento do número de pontos de contato resultou no aumento dos pontos onde houve transferência de material, caracterizando o esfolamento.

A hipótese de distribuir as regiões de contato com o objetivo de distribuir as regiões com transferência de material pôde ser confirmada. Porém, a hipótese que a maior quantidade de pontos com transferência de material diminuiria a intensidade desse dano por evitar sua concentração numa determinada região, não foi verificada nestes experimentos, uma vez que não se determinou o volume ou a massa do material transferido.

A hipótese de que a transferência de material é maior quanto maior a concentração da região onde há material transferido será testada por meio de ensaios com deformações plásticas macroscópicas, que visa aumentar a área sujeita a

transferência de material, tornando os mecanismos mais evidentes. Para isso foram utilizadas topografias anisotrópicas e isotrópicas e deformação plástica volumétrica do contra-corpo.

4.2 DESGASTE E RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO EM CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA MACROSCÓPICA

Os ensaios conduzidos com deformação plástica macroscópica do contra-corpo resultaram em danos superficiais do corpo e contra-corpo que podem ser atribuídas a dois fatores: i/ deformações plásticas das asperezas, identificadas principalmente pela alteração das amplitudes topográficas do anel; e ii/ transferência de material da superfície do anel para a ferramenta, identificada principalmente pela redução de massa do anel.

Os resultados dos ensaios com topografia anisotrópica mostraram que a intensidade dos danos, relacionados à transferência de material, é menor, quando comparada aquelas decorrentes dos ensaios com a ferramenta polida. A fim de discutir os resultados que permitiram realizar esta comparação, optou-se por apresentá-los partindo dos resultados obtidos com a ferramenta polida.

4.2.1 Alterações superficiais da ferramenta polida e do anel

4.2.1.1 Resultados com 50% de redução em altura do anel e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s

As alterações superficiais identificadas nas ferramentas polidas e nos anéis após ensaio são iguais para todas as diferentes condições e suas características são: i/

deformações plásticas das asperezas e ii/ transferência de material da superfície do anel para a ferramenta. A Figura 37 apresenta as superfícies de contato entre a ferramenta e o anel bem como a identificação das regiões com alterações superficiais.

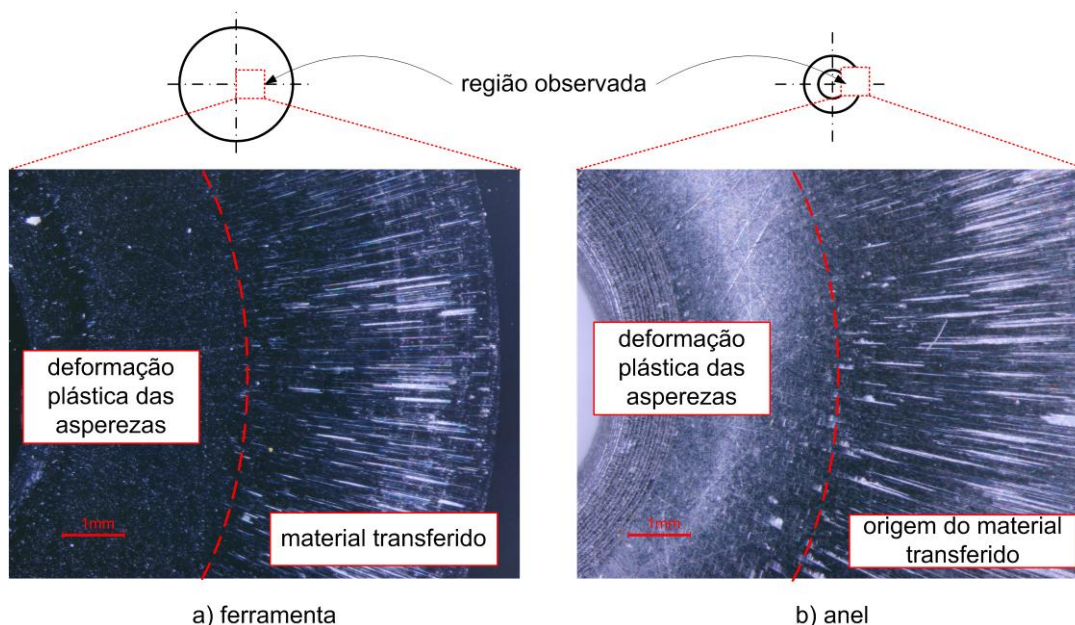


Figura 37 – Superfície da ferramenta inferior inicialmente polida (a) e do anel (b) após ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.

A principal característica da região com deformação plástica das asperezas é a alteração da amplitude topográfica, mais evidente no anel. A amplitude topográfica nesta região do anel antes do ensaio é de aproximadamente 4 μm e após o ensaio de 1,5 μm . A Figura 38(a) e Figura 38(b) apresentam os perfis topográficos desta região do anel antes e após o ensaio.

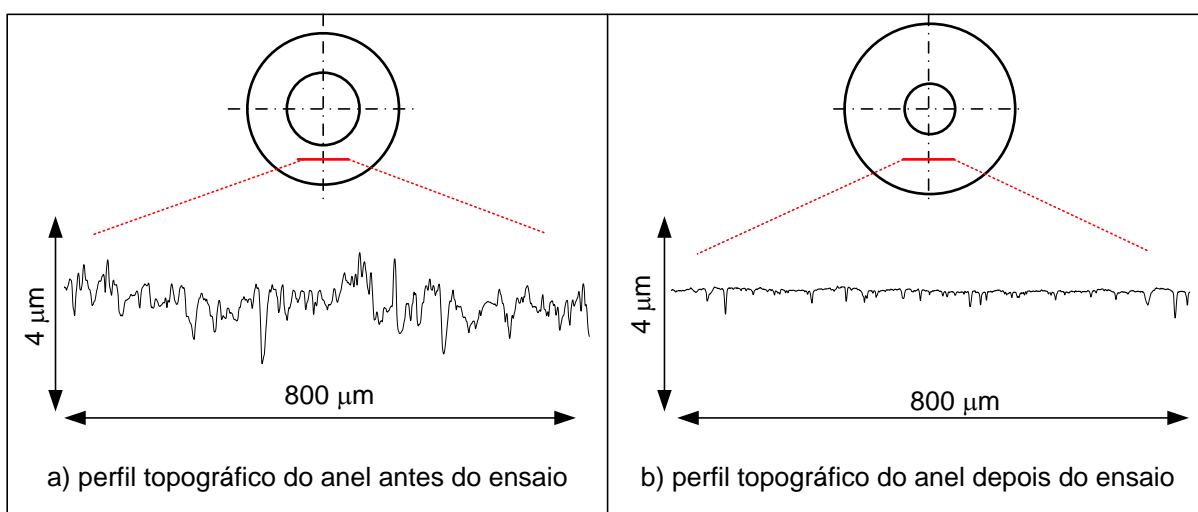


Figura 38 – Perfil topográfico na região com deformação plástica das asperezas do anel antes (a) e após o ensaio (b).

A deformação plástica das asperezas da ferramenta polida não apresenta alteração topográfica significativa e isto se deve a menor amplitude topográfica inicial (em torno de $0,05 \mu\text{m}$) e maior dureza ($561 \pm 5 \text{HV}_{30}$) quando comparada aquela do anel ($138 \pm 19 \text{HV}_5$).

Em relação à modificação topográfica das regiões com material transferido suas características são marcas radiais. Estas são observadas na ferramenta e no anel e possuem comprimento semelhante. Porém, o comprimento é diferente entre a região interna (próxima ao raio interno do anel) e a região externa (próxima ao raio externo do anel), na primeira as marcas possuem comprimento menor, aproximadamente $0,1 \text{ mm}$ e na segunda são superiores a 1 mm . A Figura 39 apresenta com detalhes as marcas radiais da região interna da ferramenta inferior após ensaio.

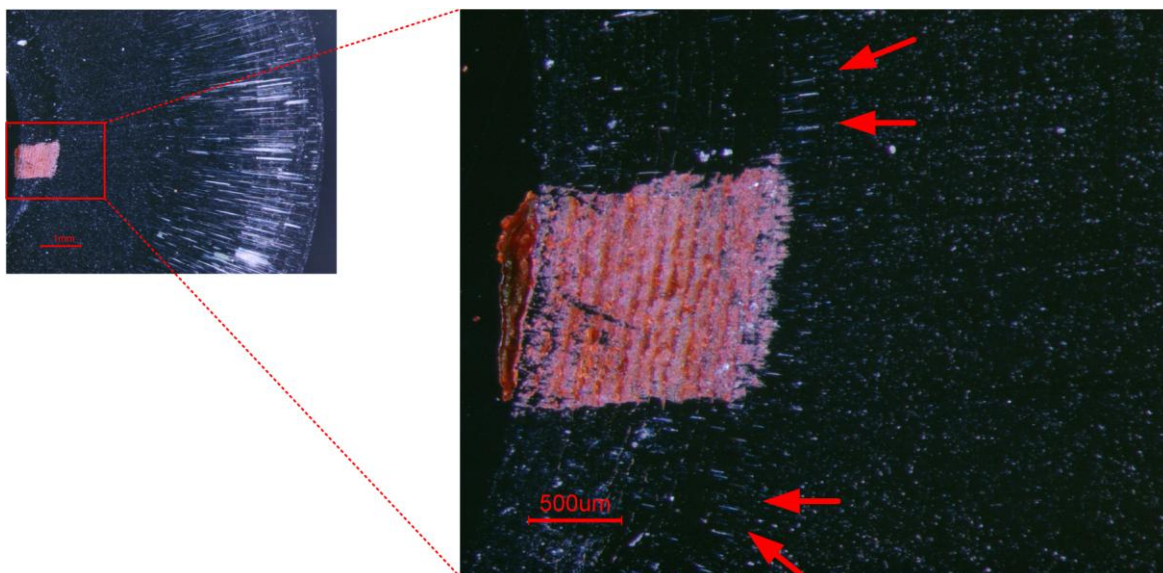


Figura 39 – Detalhe da região interna da ferramenta inferior após ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de $0,3 \text{ mm/s}$.

As marcas radiais na região externa, seja no anel ou na ferramenta, possuem amplitude topográfica maior (aproximadamente $3 \mu\text{m}$) que a região com deformação plástica do pico das asperezas. Porém, são diferentes entre o anel e a ferramenta. No anel a amplitude topográfica das marcas radiais decorre principalmente de sulcos enquanto que na ferramenta são picos (Figura 40).

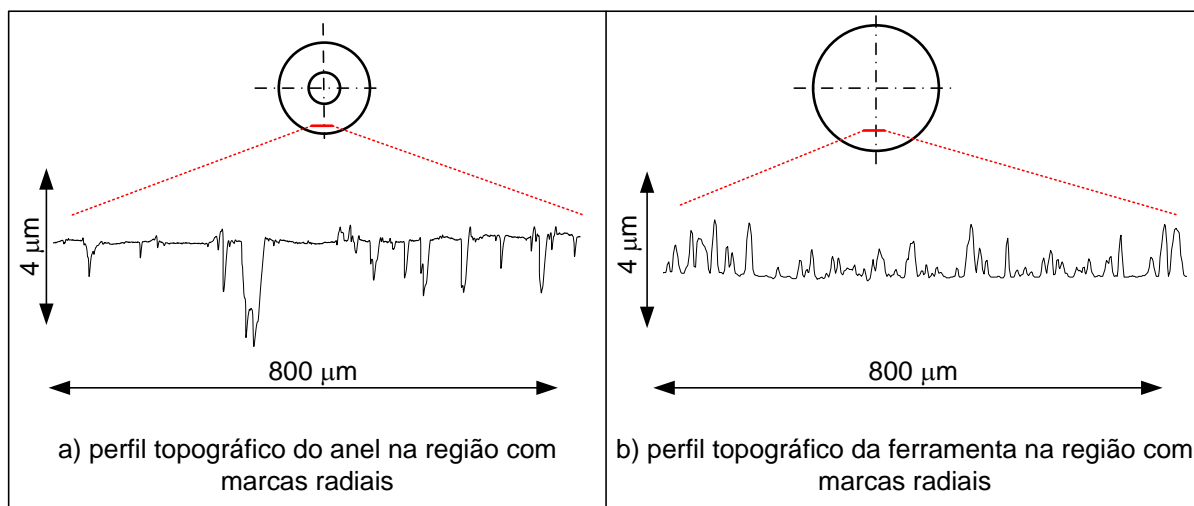


Figura 40 – Perfil topográfico da região com marcas radiais do anel (a) e da ferramenta (b) após ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.

Os sulcos do anel e os picos da ferramenta são a primeira evidência que durante o processo de deformação plástica do anel houve a transferência de material deste para a ferramenta, ou seja, os sulcos são o resultado do material que saiu do anel e aderiu na ferramenta, formando os picos.

A segunda evidência da transferência de material do anel para a ferramenta pôde ser observada com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura e espectrômetro de energia dispersiva (EDS), ver Figura 41. Observa-se que o pico de cromo tem menor intensidade na área (ii) quando comparado a área (i); esta redução pode ser justificada pela presença de uma camada de material do anel que não possui cromo, conforme apresentado pelo EDS das áreas (iii) e (iv).

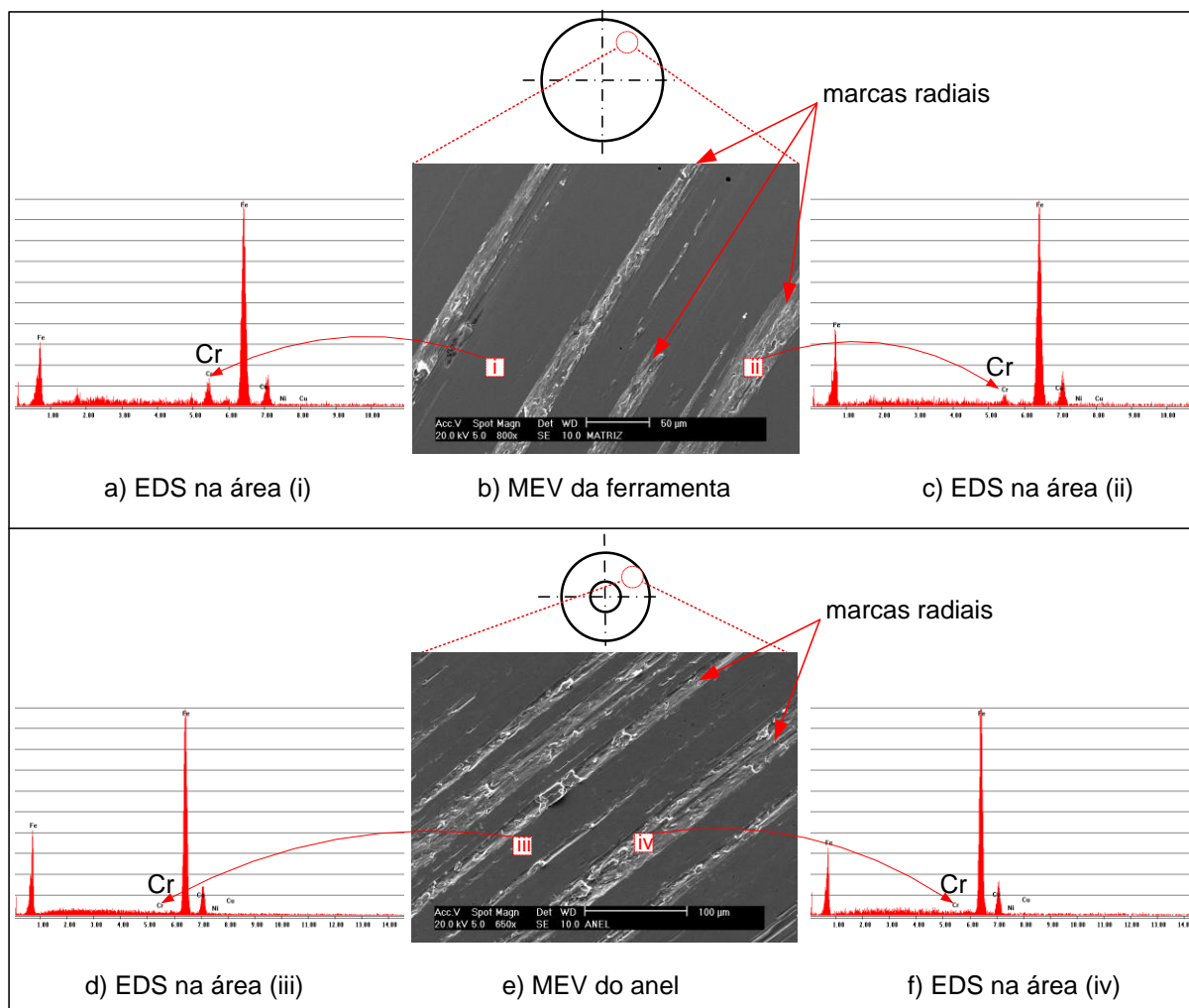


Figura 41 – MEV da região externa da ferramenta (b) e do anel (e) e EDS das regiões sem transferência de material (áreas a e c) e com transferência de material (áreas b e d). Ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.

A terceira e última evidência que reforça a característica da região com transferência de material é a redução de massa do anel após o ensaio de compressão, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Perda de massa dos anéis após ensaio com 50% de redução em altura, velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s e ferramenta polida a cada anel conformado.

Anel	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Diferença de massa (g)
1	8,99786	8,99768	0,00018
2	9,01335	9,01308	0,00027
3	9,00155	9,00149	0,00006

4.2.1.2 Efeito das variáveis de redução em altura e velocidade de descida da ferramenta superior nas características das alterações superfícies das ferramentas polidas e dos anéis

Uma comparação entre a Figura 37 e a Figura 42 permite concluir que as características das alterações superficiais, para 50% de redução em altura dos anéis e ferramentas polidas, são as mesmas para os dois níveis de velocidade de descida da ferramenta superior (0,3 mm/s e 3 mm/s).

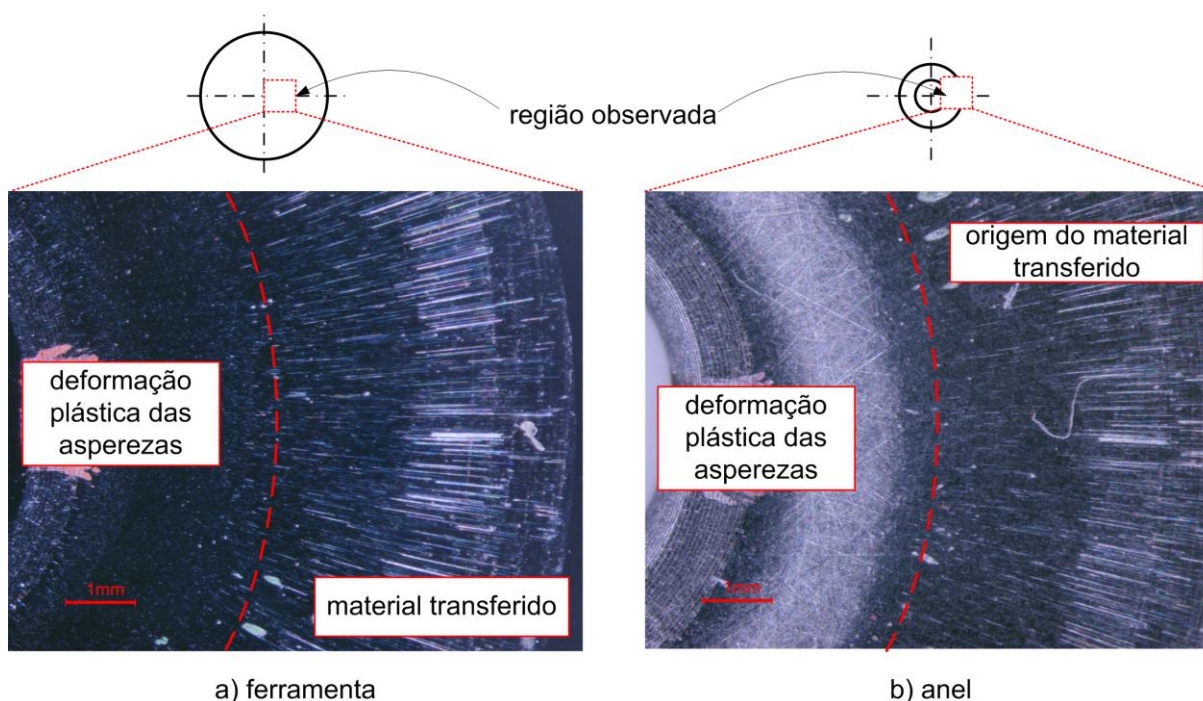


Figura 42 – Superfície da ferramenta inferior inicialmente polida (a) e do anel (b) após ensaio com redução em altura de 50% e velocidade de descida da ferramenta superior de 3 mm/s.

Outra característica comum observada nas condições onde houve alteração da velocidade de descida da ferramenta superior, para 50% de redução e ferramenta polida, é a perda de massa. A confirmação deste resultado é com base nos valores de perda de massa de 7 anéis. A Tabela 5 apresenta os valores de massa do anel antes e após o ensaio. Observa-se que todos os 7 anéis apresentaram massa menor após o ensaio; a menor diferença foi de 0,09 mg e a maior de 0,31 mg.

Tabela 5 – Perda de massa dos anéis após ensaio com 50% de redução em altura, velocidade de descida da ferramenta superior de 3 mm/s e ferramenta polida a cada anel conformado.

Anel	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Diferença de massa (g)
1	8,98457	8,98448	0,00009
2	8,98944	8,98915	0,00029
3	9,00675	9,00661	0,00014
4	9,01045	9,01014	0,00031
5	8,98886	8,98864	0,00022
6	9,01445	9,01427	0,00018
7	8,97331	8,97321	0,00010

A balança utilizada para estas medições possui resolução de 0,01 mg, considerando este erro pode-se afirmar que cinco dos sete anéis apresentam perda de massa superior a 0,1 mg. Diferenças de massa inferiores a 0,1 mg foram desprezadas em virtude de eventuais contaminações dos anéis por objetos estranhos as condições de ensaio.

A principal fonte de contaminações está na própria ferramenta, pois seu processo de limpeza entre um polimento e outro é pouco eficiente. Dessa forma, considera-se que cinco anéis sofreram perda de massa e dois estão na incerteza de medição da balança.

Os ensaios conduzidos com 20% de redução em altura dos anéis apresentaram as mesmas características de alterações superficiais descritas para os ensaios com 50% de redução, porém foi notória a redução em intensidade dessas alterações. A Figura 43 apresenta a superfície da ferramenta, inicialmente polida, e do anel, inicialmente lixado, após ensaio com 20% de redução e velocidade de 0,3 mm/s. Constatou-se que as maiores alterações estão na ferramenta e que nesta é possível identificar apenas a região com transferência de material, porém com menor intensidade quando comparada aquela observada com 50% de redução em altura.

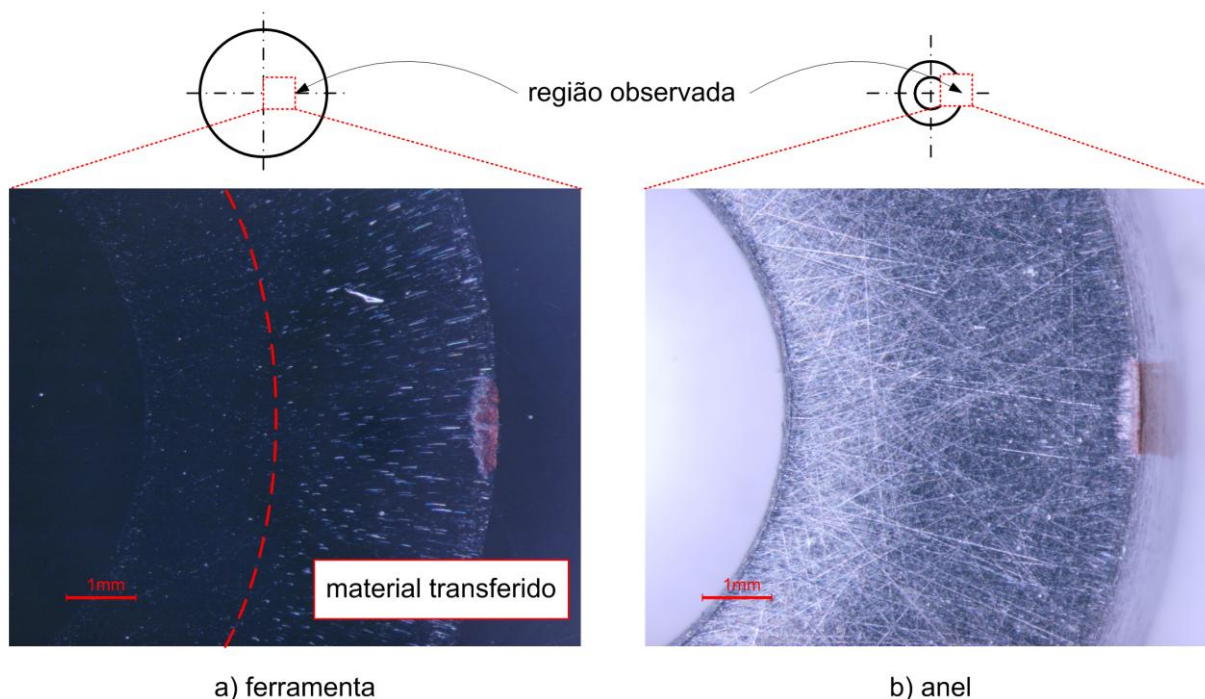


Figura 43 – Superfície da ferramenta inferior inicialmente polida (a) e do anel (b) após ensaio com redução em altura de 20% e velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s.

A semelhança entre as marcas radiais obtidas com 20% e 50% de redução sugere que essas são o resultado da transferência de material do anel. Porém, não foi possível identificar alterações topográficas associadas a estas marcas assim como não foi possível identificar variação de massa dos anéis, conforme a Tabela 6, que apresenta as medidas de massa antes e após o ensaio com 20% de redução e velocidade de 0,3 mm/s e 3 mm/s.

Tabela 6 – Perda de massa dos anéis após ensaio com 20% de redução em altura, velocidade de descida da ferramenta superior de 0,3 mm/s e 3 mm/s e ferramenta polida a cada anel conformado.

	Anel	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Diferença de massa (g)
v = 3 mm/s	1	8,98024	8,9802	0,00004
	2	8,98233	8,9823	0,00003
	3	8,99735	8,99734	0,00001
v = 0,3 mm/s	1	9,00005	8,99985	0,00020
	2	8,98307	8,983	0,00007
	3	8,99804	8,998	0,00004

Exceto pelo anel número 1, testado na condição de menor velocidade (0,3 mm/s), conclui-se que, independente da velocidade, quanto menor o grau de redução menor as alterações superficiais do anel e da ferramenta.

A diferença entre a intensidade dos danos entre os ensaios conduzidos com 20% e 50% de redução deve ser atribuída ao deslizamento. Como discutido em seções anteriores, os danos resultantes da transferência de material são dependentes da formação, deformação plástica e ruptura dos pontos de junções. O maior deslizamento é favorável para a formação de novas junções por possibilitar a formação de novas áreas de contato entre corpo e contra-corpo. Apresenta-se a seguir as características de deformação plástica dos anéis conformados com ferramentas polidas e sua relação com as alterações superficiais.

4.2.1.3 Relação entre as alterações superficiais com a deformação plástica dos anéis conformados com ferramentas polidas

A Figura 44 apresenta esquematicamente a alteração dimensional do anel após 20% e 50% de redução em altura. Constatou-se que em ambos há o deslizamento da face plana do anel, representado pelas setas horizontais, e um aumento da área plana promovido pelo deslocamento curvilíneo (de material), representado pelas setas em curva, resultando no contato da face interna e externa do anel com a superfície da ferramenta superior e inferior.

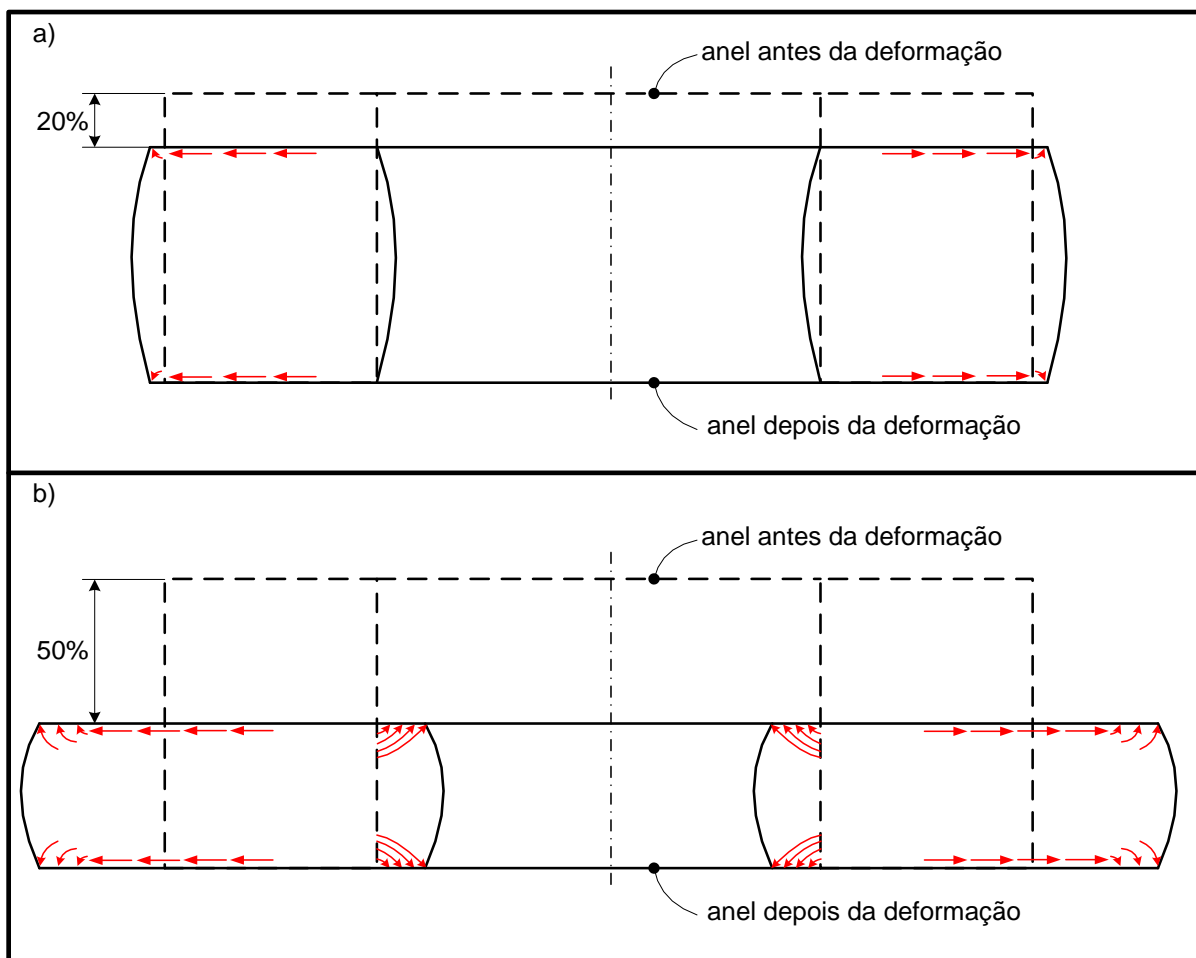


Figura 44 – Representação esquemática do deslizamento do anel durante conformação em 20% (a) e 50% (b).

O experimento que possibilitou descrever o deslizamento do anel foi por meio de marcas com espaçamento conhecido feitas no anel antes do ensaio. A Figura 45 mostra os deslocamentos de cada marca após o ensaio com 20% e velocidade de 0,3 mm/s. Para obter os valores de deslocamento de cada ponto foi realizado o seguinte procedimento:

- 1) ajuste do paralelismo entre as linhas verticais tracejadas que passam pelo centro das marcas no anel antes e após o ensaio.
- 2) traçar linhas horizontais paralelas entre si, perpendiculares as linhas tracejadas verticais e com origem no centro das marcas do anel antes do ensaio.
- 3) observar que na região caracterizada como aquela onde não há marcas radiais, não há diferença de forma entre o ponto identificado como (i) no anel antes do ensaio e o ponto correspondente (i') no anel após o ensaio, o que evidencia não haver deslizamento neste ponto. Uma vez identificada esta região, movimentar-se

verticalmente a Figura 45 (b) de forma que o centro da marca (i') esteja colinear com o centro da marca (i).

3) traçar linhas (vermelha) paralelas e colineares as linhas horizontais com origem na linha vertical que passa pelo centro das marcas no anel após o ensaio.

4) traçar linhas (vermelha) paralelas as linhas colineares (vermelha) com origem na linha vertical e no ponto onde está o centro das marcas no anel após o ensaio.

5) assume-se como referência o centro das marcas antes e após o ensaio para quantificar o deslizamento. Conforme apresentado na Figura 45(b) o deslizamento é maior próximo ao raio externo.

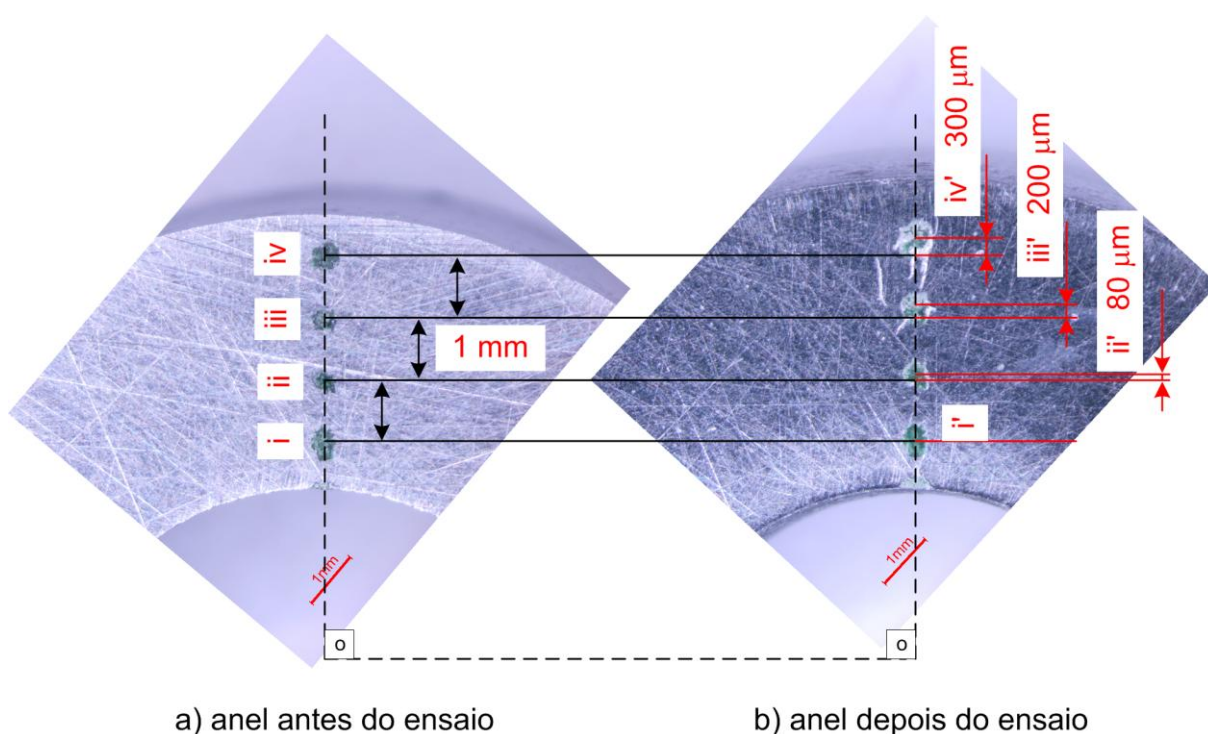


Figura 45 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com 20% de redução em altura e velocidade de 0,3 mm/s.

Foi realizado o mesmo procedimento descrito para o ensaio com 50% de redução em altura e conforme apresentado na Figura 46 o deslizamento foi 70% maior para a condição com 50% de redução em altura nos pontos iii-iii' e iv-iv' e no ponto ii-ii' o deslizamento é aproximadamente 50% maior que o deslizamento da região correspondente no ensaio com 20% de redução.

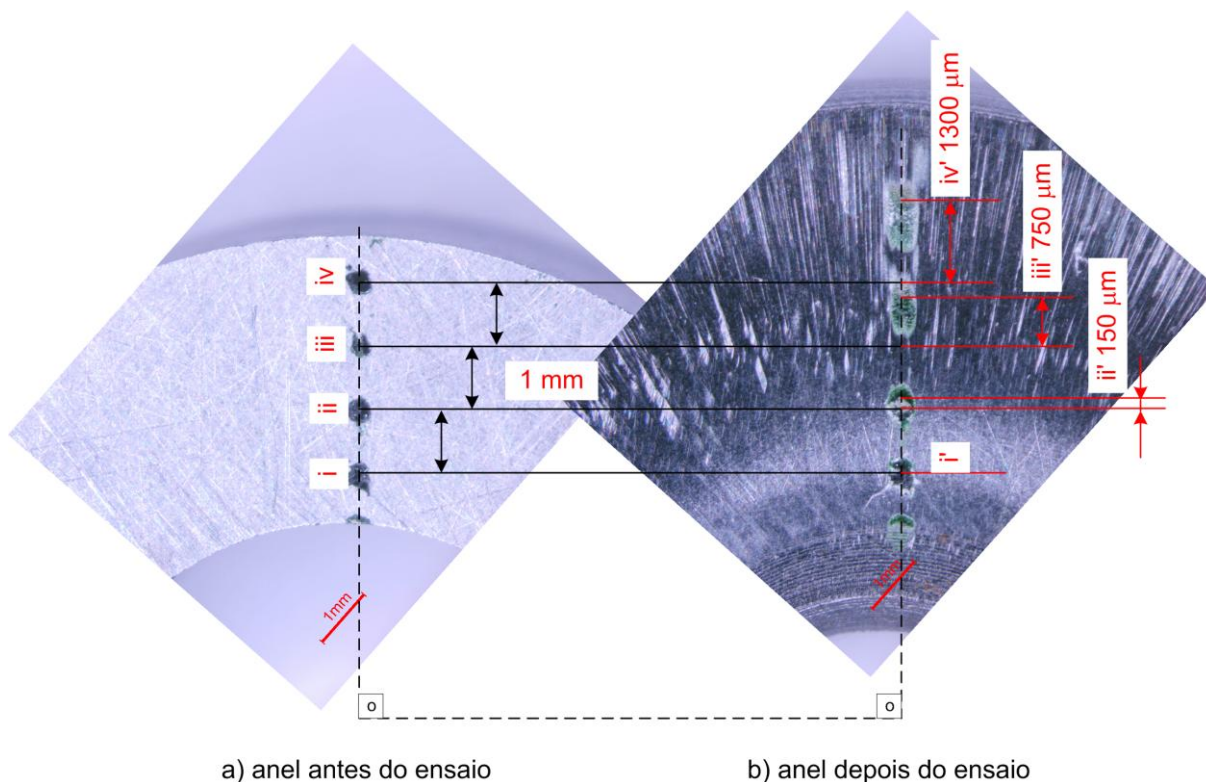


Figura 46 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com 50% de redução em altura e velocidade de 0,3 mm/s.

Além do maior deslizamento foi constatado que nos anéis conformados com 50% de redução em altura houve um aumento da área de contato do anel com a ferramenta devido à projeção da face interna e externa, seguindo um movimento curvilíneo, como apresentado na Figura 44, sobre a face plana da ferramenta. Para provar este aumento de área, foi realizada uma marca na face interna e externa do anel antes do ensaio e constatou-se que depois do ensaio a região marcada estava presente na face plana, tanto da superfície de contato com a ferramenta superior como na superfície de contato com a ferramenta inferior. Observa-se na Figura 47 que o aumento da área decorrente do movimento curvilíneo é maior na condição com 50% de redução em altura e não há diferença entre o crescimento de área com origem no raio interno e externo. Por outro lado, na condição com 20% de redução em altura do anel, o aumento de área foi somente devido à projeção da face externa e não pôde ser identificado aumento de área resultante da projeção face interna do anel. Em ambos os casos o deslocamento da região pintada decorre da superposição de dois movimentos, o curvilíneo e o de translação que resulta em marcas radiais nesta região.

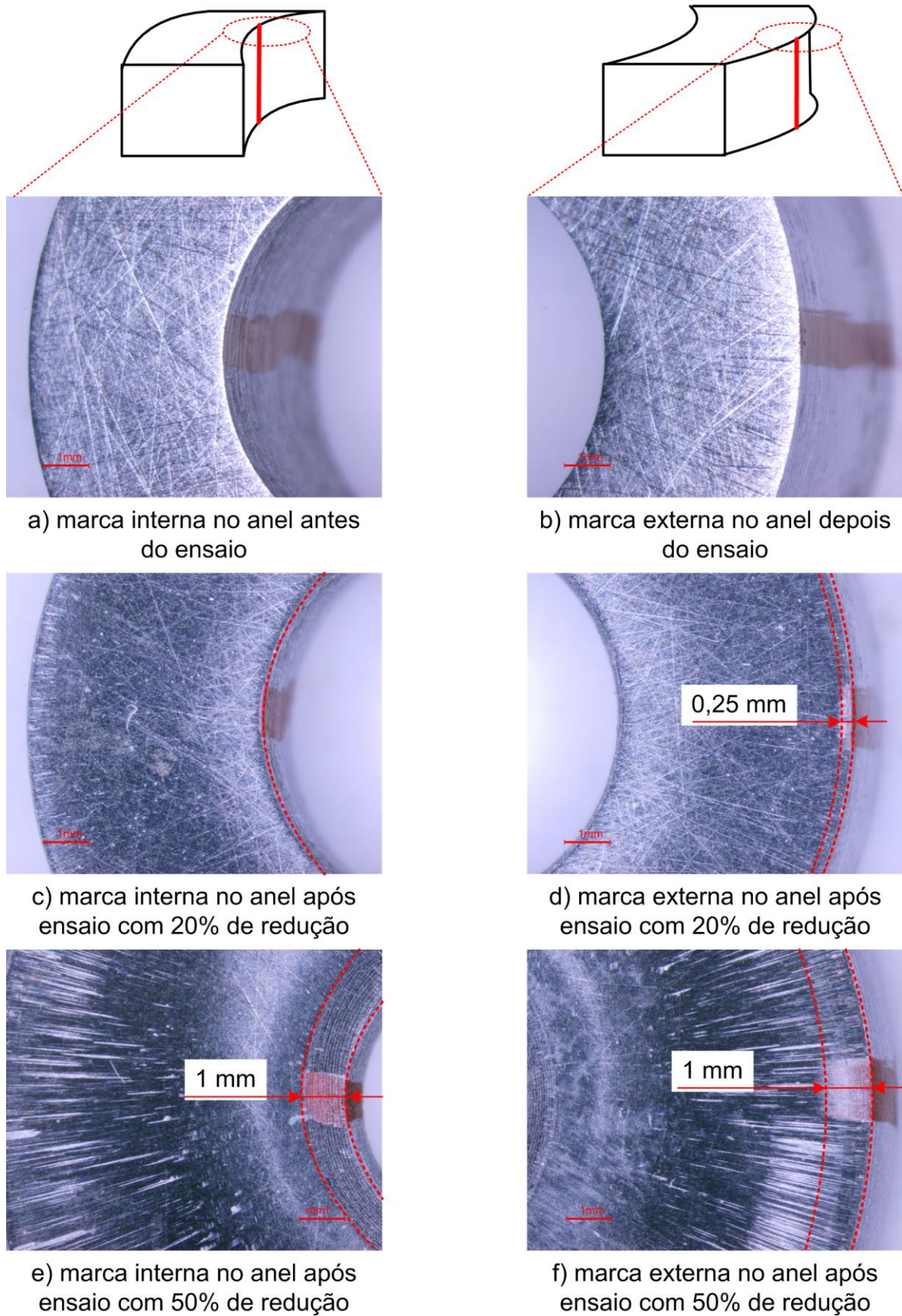


Figura 47 – Deslocamento da marca lateral interna do anel (a) após ensaio com 20% (c) e 50% (e). Deslocamento da marca lateral externa (b) após ensaio com 20% (d) e 50% (f) de redução em altura. Velocidade de 0,3 mm/s.

A variável velocidade não apresentou influencia na extensão de deslizamento da face plana e na projeção das áreas laterais do anel.

A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados encontrados em função das variáveis testadas. Observa-se que a variável velocidade não apresenta efeito sobre os resultados obtidos nos diferentes níveis de redução em altura dos anéis.

Tabela 7 – Resumo dos resultados encontrados em função das variáveis de redução em altura dos anéis (20% e 50%) e velocidade de descida da ferramenta superior (0,3 mm/s e 3 mm/s).

Resultados encontrados	Combinação das variáveis testadas (redução em altura e velocidade)			
	50% e 3 mm/s (+ +)	50% e 0,3 mm/s (+ -)	20% e 3 mm/s (- +)	20% e 0,3 mm/s (- -)
intensidade das alterações topográficas	forte	forte	fraca	fraca
perda de massa	sim	sim	não	não
deslizamento	grande	grande	pequeno	pequeno

Com os resultados apresentados acima se conclui que a velocidade de descida da ferramenta superior não altera a intensidade das alterações topográficas, a perda de massa e o deslizamento. Dessa forma, para verificar o efeito da variável topografia (superfícies com topografia anisotrópica), os ensaios foram conduzidos com apenas um nível de velocidade de descida da ferramenta superior (3 mm/s).

4.2.2 Estudo com topografias anisotrópicas

Foram utilizadas duas diferentes topografias anisotrópicas multidirecionais para verificar seu efeito nas alterações superficiais do anel e da ferramenta durante ensaio de redução em altura de 20% e 50% e velocidade de 3 mm/s. Os resultados mostraram que as características das alterações superficiais são semelhantes àquelas encontradas com a ferramenta de topografia isotrópica (polida), isto é, há duas regiões distintas nas superfícies após o ensaio: i/ deformações plásticas das asperezas e ii/ marcas radiais com aparente transferência de material da superfície do anel para a ferramenta. Contudo, existem algumas diferenças entre os resultados, a iniciar pelas alterações superficiais do anel. Como as amplitudes

topográficas das ferramentas são duas ordens de grandeza maior que as alterações na amplitude topográfica resultante do ensaio, considerou-se que nos anéis, independente do nível de redução ou topografia da ferramenta, houve apenas deformações plásticas superficiais. A Figura 48 apresenta a alteração da superfície do anel em função dos ensaios com as diferentes topografias anisotrópicas e níveis de redução. Observa-se que não há alteração topográfica significativa entre os diferentes níveis de redução em altura.

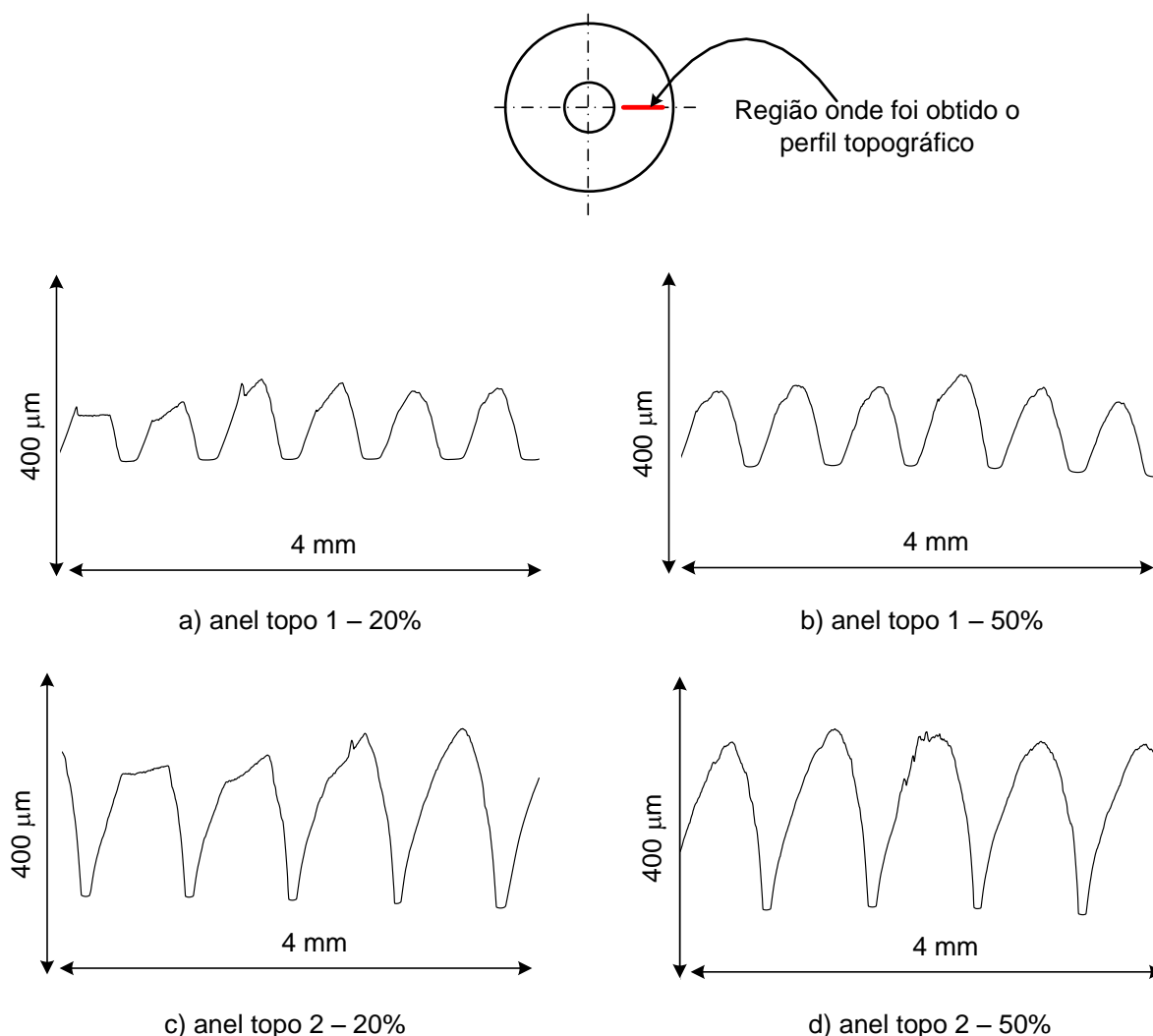


Figura 48 – Perfil topográfico dos anéis testados na ferramenta topo 1 com 20% (a) e 50% (b) e dos anéis testados na ferramenta topo 2 com 20% (c) e 50% (d).

Mesmo não tendo sido medidas alterações na amplitude topográfica dos anéis decorrentes das marcas radiais características da transferência de material como observado nos ensaios com a ferramenta polida, foi possível identificar estas marcas nos platôs das ferramentas das duas topografias anisotrópicas após ensaio com

50% de redução em altura, ver Figura 49. Tais características não foram identificadas no ensaio com 20% de redução.

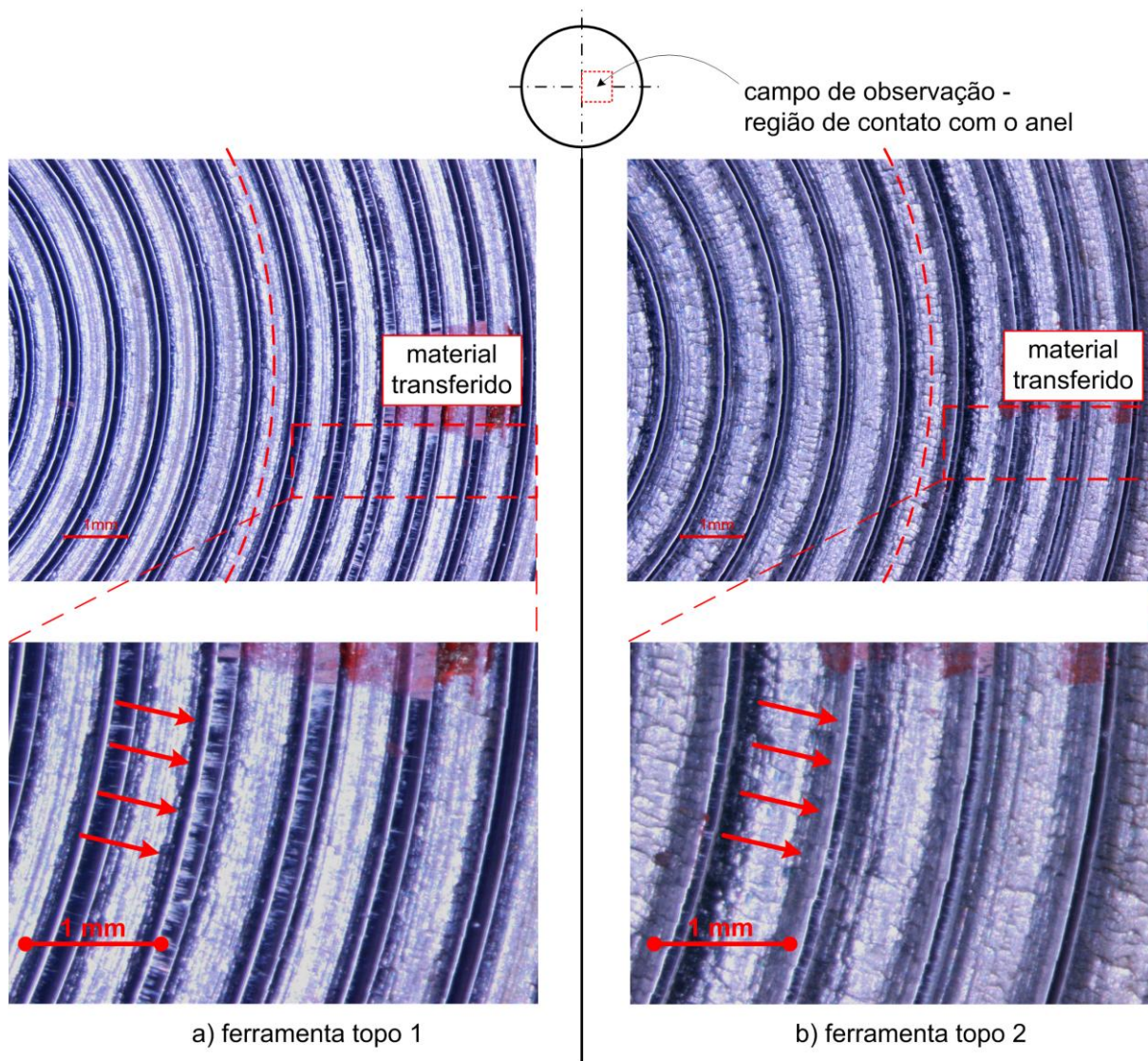


Figura 49 – Alterações superficiais na ferramenta topo 1 (a) e topo 2 (b) após ensaio com 50% de redução em altura do anel e velocidade de descida da ferramenta superior de 3 mm/s.

As marcas radiais são evidentes (indicadas pelas setas), porém com comprimento limitado pela largura dos platôs. As marcas na ferramenta com comprimento de platô menor apresentam menor intensidade e em ambas, aparentemente, estas marcas apresentam menor intensidade quando comparadas àquelas da ferramenta com superfície polida.

Considerando que as marcas radiais são o resultado da transferência de material do anel para a ferramenta, com base nos resultados obtidos com a ferramenta polida, é esperado que a menor intensidade destas marcas seja refletida na menor perda de

massa nos anéis. A Tabela 8 apresenta a variação de massa dos anéis após ensaios com as ferramentas de topografia anisotrópica nos dois diferentes níveis de redução. Observa-se que em nenhuma repetição de nenhuma das condições testadas a diferença de massa foi superior a 0,1 mg. Nota-se que em alguns casos a diferença é negativa e este suposto ganho de massa dos anéis está relacionado a contaminação da ferramenta. As ranhuras das topografias estruturadas dificultam a remoção de eventuais partículas estranhas ao ensaio.

Tabela 8 – Variação de massa dos anéis após ensaio com diferentes níveis de redução em altura (20% e 50%) e diferentes topografias estruturadas (topo1 e topo2).

Redução Topografia	Anel	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Diferença de massa (g)	
20%	topo 1	1	9,00525	9,00527	-0,00002
		2	9,00577	9,00574	0,00003
		3	9,00036	9,00034	0,00002
	topo 2	1	8,97256	8,97252	0,00004
		2	8,98199	8,98203	-0,00004
		3	8,98827	8,98829	-0,00002
50%	topo 1	1	9,00525	9,00527	-0,00002
		2	9,00577	9,00574	0,00003
		3	9,00036	9,00034	0,00002
	topo 2	1	8,97256	8,97252	0,00004
		2	8,98199	8,98203	-0,00004
		3	8,98827	8,98829	-0,00002

Nos resultados obtidos com a ferramenta de topografia polida foi possível encontrar uma relação entre a perda de massa dos anéis com a intensidade das marcas radiais e que estas possuem maior intensidade quanto maior o deslizamento do anel sobre a ferramenta. Dessa forma, espera-se menor deslizamento para as duas condições com topografia anisotrópica, uma vez que com estas topografias não

houve perda de massa dos anéis. A Figura 50 apresenta o comportamento das marcas realizadas sobre a superfície plana do anel após ensaio com 50% de redução e ferramenta topo1. Observa-se que não há deslocamento das marcas mesmo no ponto iv', onde na condição com a ferramenta polida foi obtido o maior deslizamento.

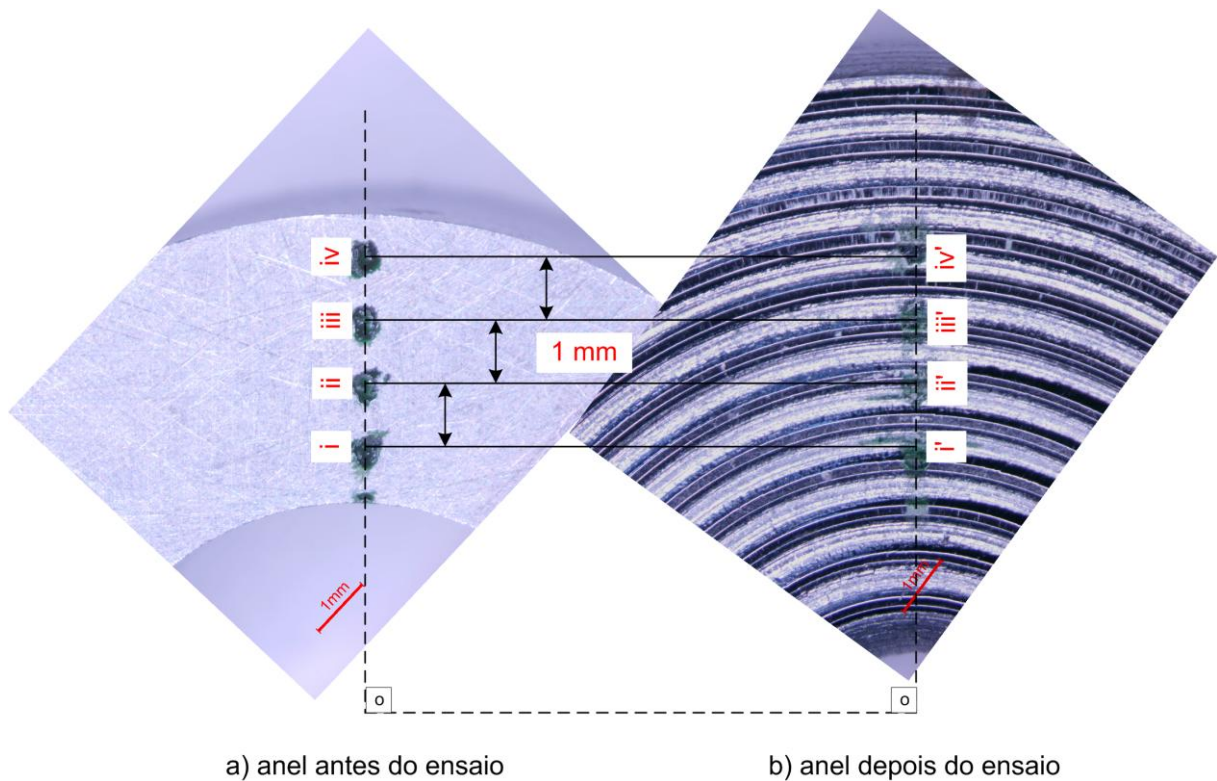


Figura 50 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com 50% de redução em altura e ferramenta topo1.

O mesmo resultado foi obtido com a ferramenta topo2, ou seja, não foram observados deslocamentos das marcas sobre a superfície plana do anel, ver Figura 51.

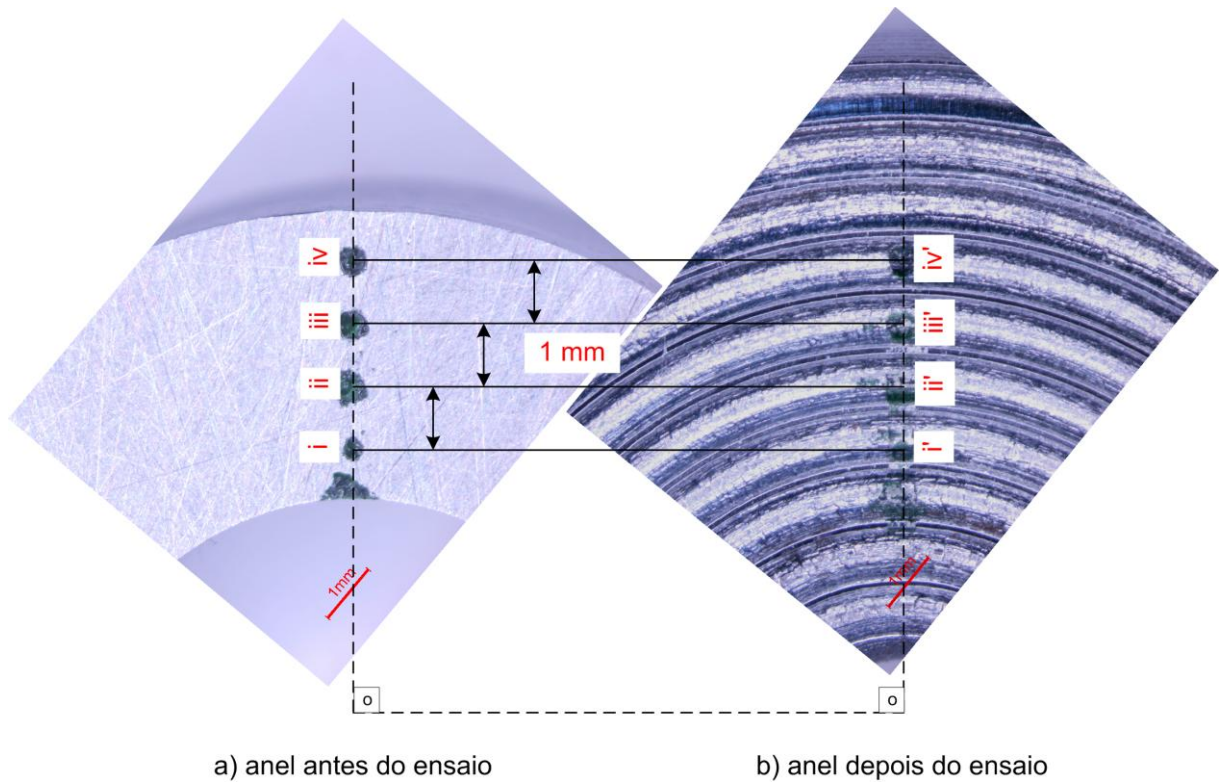


Figura 51 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com 50% de redução em altura e ferramenta topo2.

Cabe destacar que nesta análise de deslizamento das marcas sobre a superfície plana do anel é desconsiderado o deslizamento vertical das marcas resultante da penetração do anel nas ranhuras das ferramentas. A Figura 52 mostra que as marcas (verdes) do anel podem ser encontradas no fundo das ranhuras.

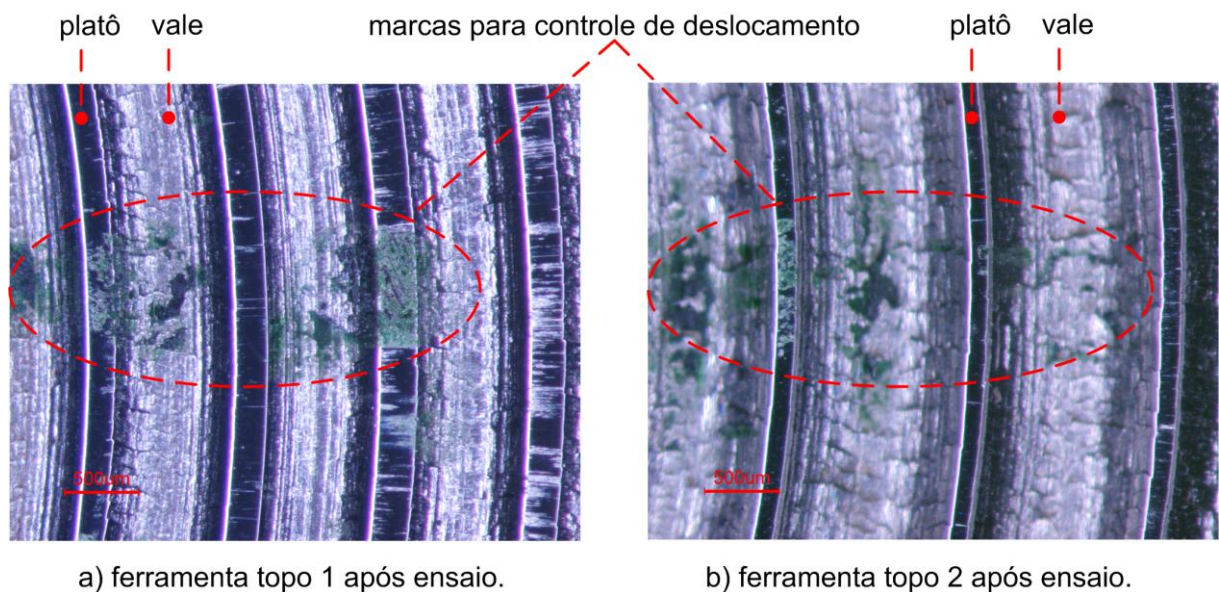


Figura 52 – Impressão das marcas do anel no fundo das ranhuras das ferramentas topo1 (a) e topo2 (b) após ensaio com 50% de redução em altura.

Os ensaios conduzidos com 20% de redução em altura também não apresentaram deslizamento da face plana do anel sobre a ferramenta, contudo, seja com 20% ou 50% de redução, houve aumento da área resultante da projeção da face externa e interna sobre a superfície das ferramentas, conforme apresentado na Figura 53.

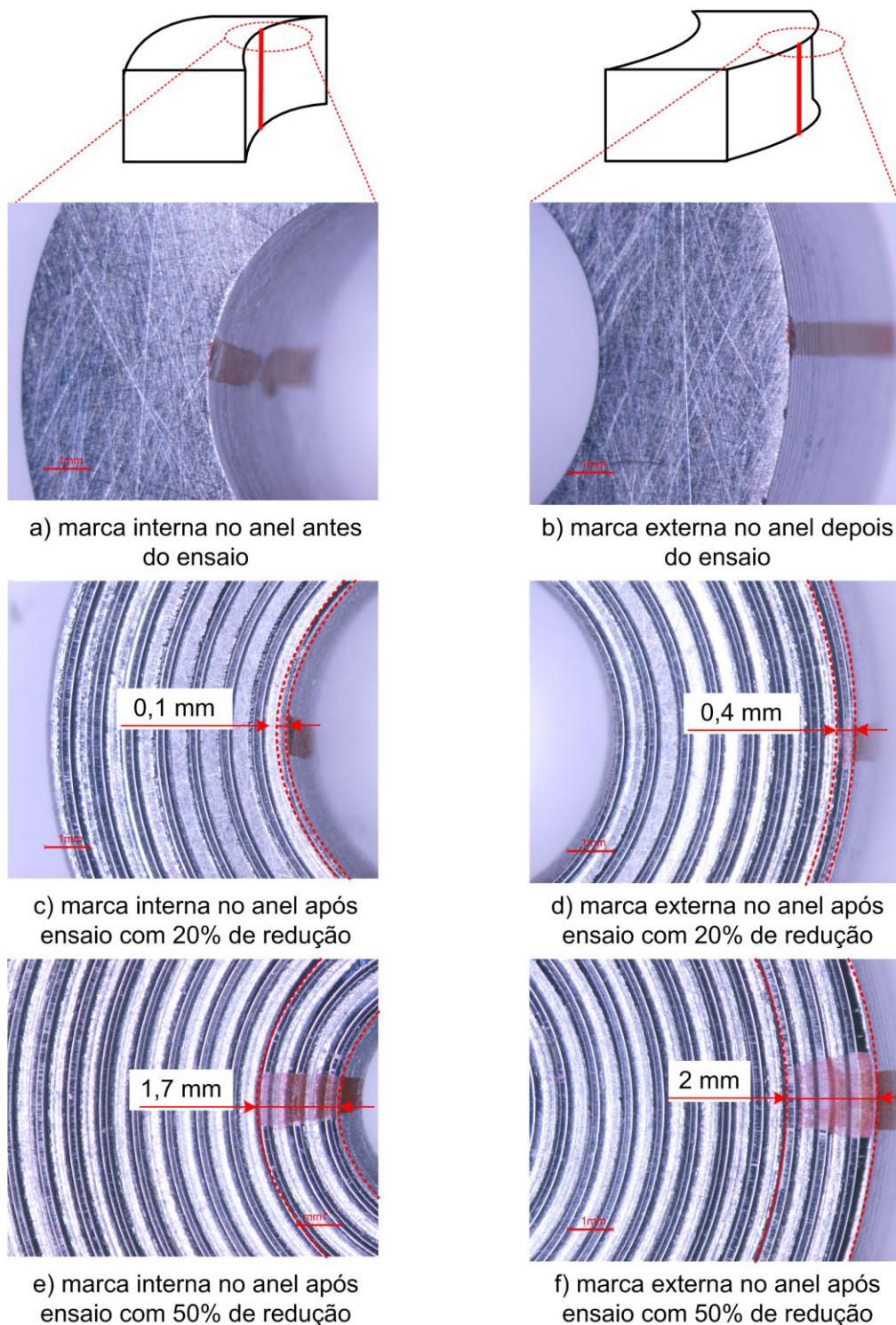


Figura 53 – Deslocamento da marca lateral interna do anel (a) após ensaio com 20% (c) e 50% (e). Deslocamento da marca lateral externa (b) após ensaio com 20% (d) e 50% (f) de redução em altura. Ferramenta topo1.

O efeito topográfico da ferramenta topo2 foi semelhante àquele obtido com a ferramenta topo1 (Figura 54), isto é, o deslizamento da face plana do anel é insignificante frente ao movimento curvilíneo que resulta na projeção da face lateral externa e interna para a superfície da ferramenta. O movimento curvilíneo deve ser decomposto num movimento vertical e outro horizontal. A componente horizontal é responsável pelas marcas radiais observadas na superfície da ferramenta.

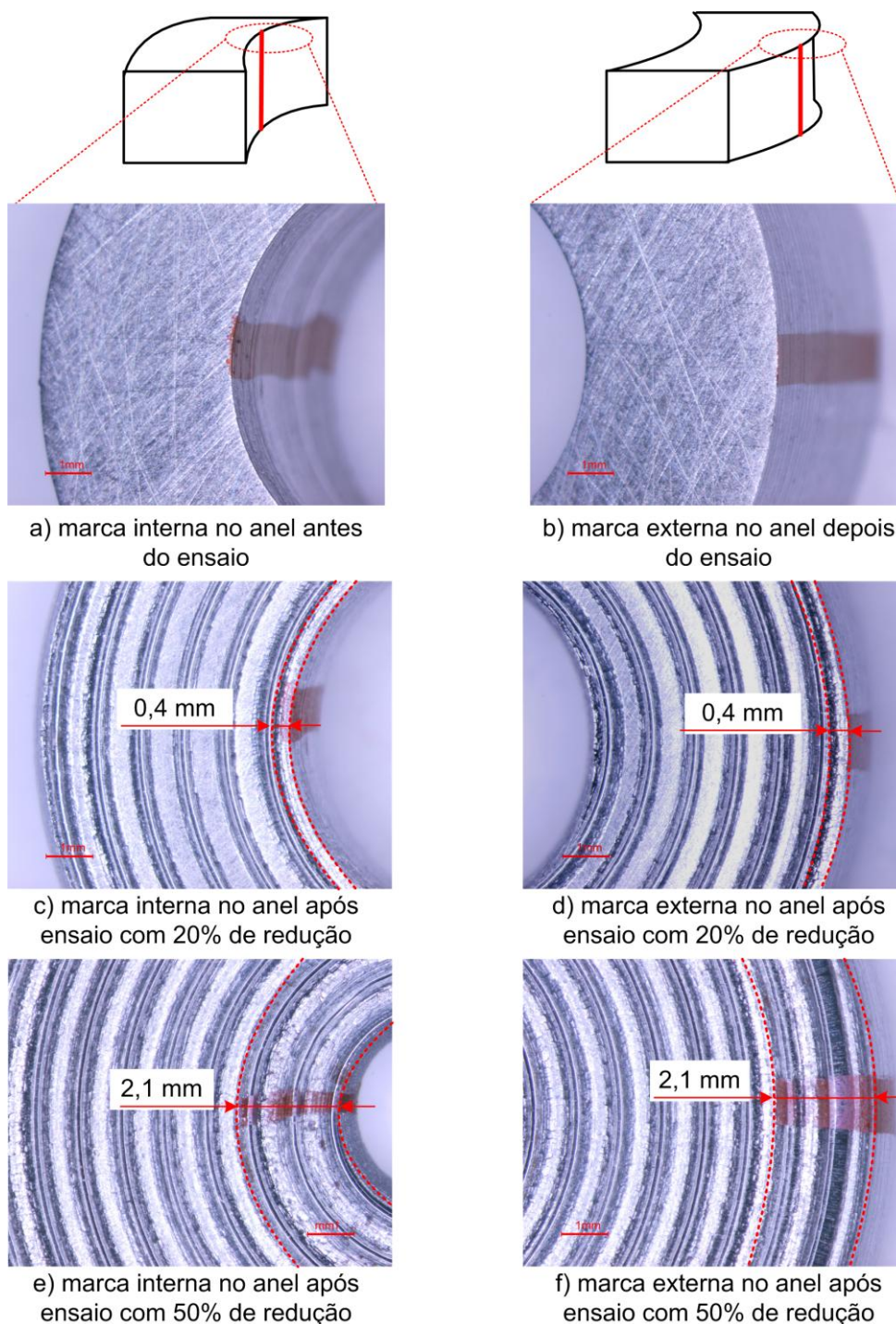


Figura 54 – Deslocamento da marca lateral interna do anel (a) após ensaio com 20% (c) e 50% (e). Deslocamento da marca lateral externa (b) após ensaio com 20% (d) e 50%(f) de redução em altura. Ferramenta topo2.

Uma vez que não foi observado um deslizamento expressivo da face plana do anel sobre a superfície da ferramenta, como no caso encontrado com a ferramenta polida, conclui-se que a alteração de forma do anel ocorre, preferencialmente, pela projeção das faces interna e externa sobre a superfície plana das ferramentas. As ranhuras atuam como obstáculos para o deslizamento do anel sobre a superfície da ferramenta, concentrando as deformações plásticas numa região interna do anel. A Figura 55 apresenta o esquema de deformação do anel quando em condições de redução de altura de 20% e 50% e com ferramentas de topografia engenheirada.

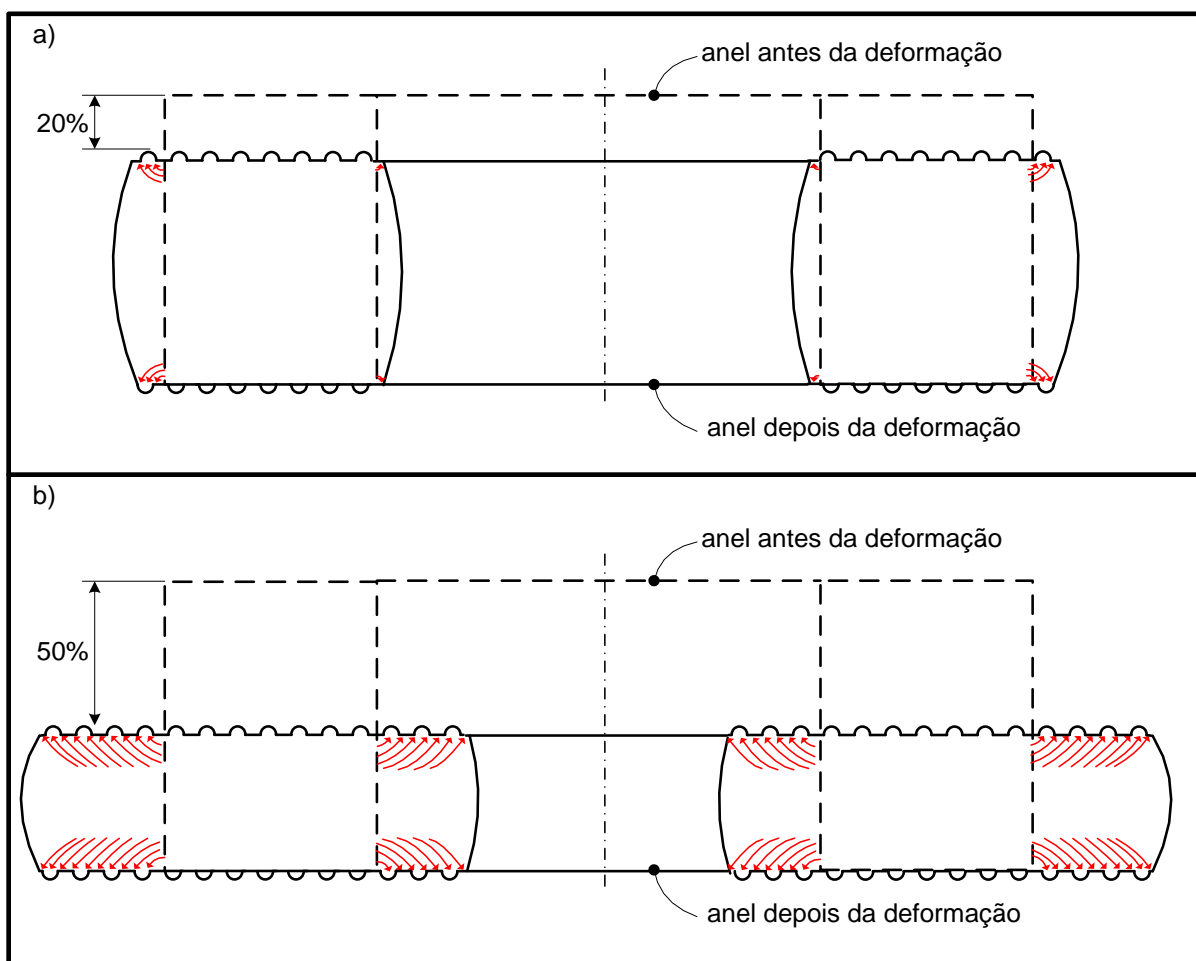
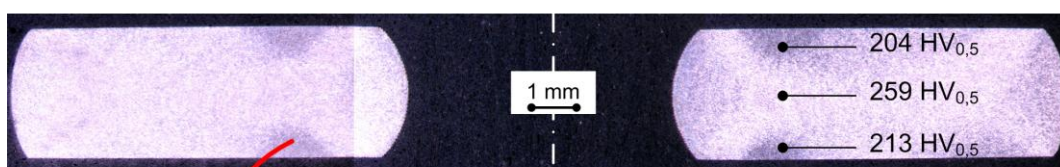


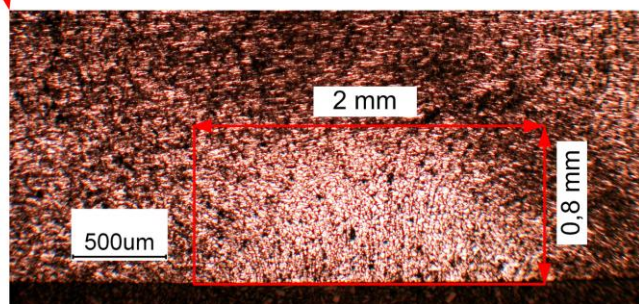
Figura 55 – Representação esquemática do deslizamento do anel durante conformação em 20% (a) e 50% (b) com ferramenta de topografia anisotrópica.

O efeito das duas diferentes topografias anisotrópicas foi, principalmente, alterar o padrão de deformação do anel. As ranhuras produzidas de forma perpendicular ao deslizamento atuam como obstáculos e deslocam as deformações plásticas para regiões internas do anel, uma vez que não foram identificados deslizamentos entre a superfície do anel e a ferramenta. O efeito de bloqueio do deslizamento foi também observado por meio de comparações entre as microestruturas do anel numa seção

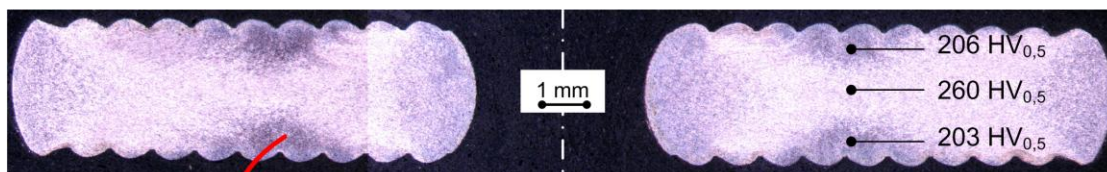
transversal ao plano de contato com a ferramenta. Observa-se na Figura 56 que a região onde não há grandes deformações plásticas dos grãos é menor na condição com topografia isotrópica, resultado do maior deslizamento entre as superfícies do anel e da ferramenta. Medidas de dureza na região com pequena deformação plástica dos grãos resultaram em valores entre 203 HV_{0,5} e 213 HV_{0,5} e nas regiões com grande deformação plástica dos grãos valores de até 260 HV_{0,5}, independentemente da topografia da ferramenta. Tomando como base a dureza do anel antes do ensaio que é igual a 194 HV_{0,5}, houve um aumento de dureza na região com maior deformação plástica dos grãos de aproximadamente 35%.



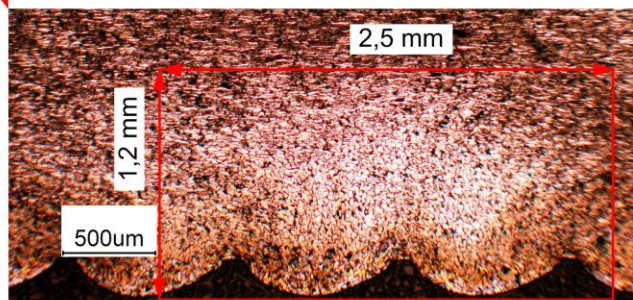
a) seção transversal do anel conformado com 50% de redução contra a ferramenta polida



b) ampliação da região indicada pela seta



c) seção transversal do anel conformado com 50% de redução contra a ferramenta topo 2



d) ampliação da região indicada pela seta em (c)

Figura 56 – Modificação do padrão de deformação com 50% de redução do anel e velocidade de 3 mm/s em função da topografia da ferramenta.

Outra evidência da modificação do padrão de deformação do anel em função da topografia pode ser observada quando se compara as regiões da seção transversal próxima a superfície. As microestruturas dos anéis deformados com as ferramentas de topografia anisotrópica apresentam uma orientação particular, que possui uma determinada inclinação em relação à superfície de contato, enquanto que no anel conformado com a ferramenta polida não se observa esta orientação. Outra característica a ser destacada nos anéis conformados com ferramenta anisotrópica é a pequena deformação dos grãos da porção de material que ficou no fundo de um vale, observado com maior detalhe na condição com a ferramenta topo2, que possui maior profundidade de vale.

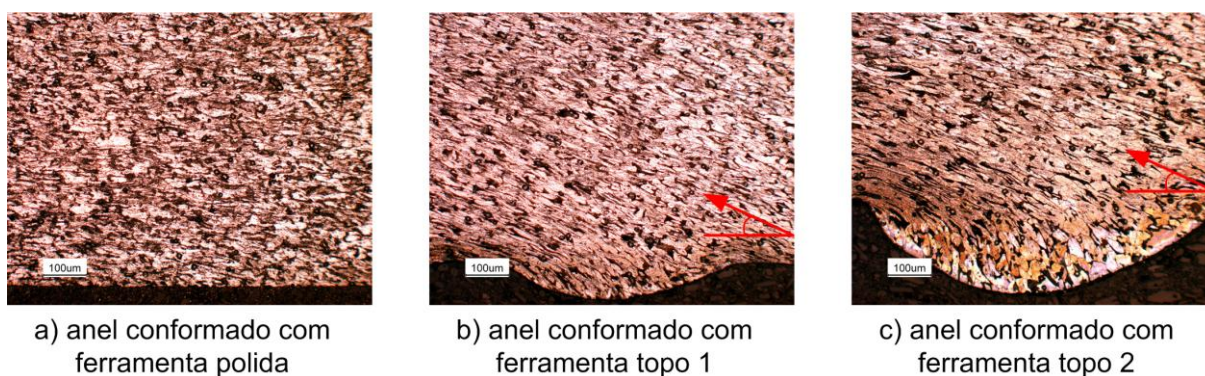


Figura 57 – Diferença nas características de deformação dos anéis conformados com 50% de redução e velocidade de 3 mm/s.

O menor deslizamento promovido pelos vales das topografias anisotrópicas resultou na menor intensidade das alterações superficiais e conseqüentemente menor perda de massa dos anéis, quando comparados a ferramenta polida, ver resumo apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo dos resultados encontrados em função das variáveis de redução em altura dos anéis (20% e 50%) e características topográficas das ferramentas (polida, topo1 e topo2).

Resultados encontrados	Combinação das variáveis testadas (redução em altura e topografia)					
	50% e polida	50% e topo 1	50% e topo 2	20% e polida	20% e topo 1	20% e topo 2
intensidade das alterações topográficas	forte	fraca	fraca	fraca	fraca	fraca
perda de massa	sim	não	não	não	não	não
deslizamento	grande	pequeno	pequeno	pequeno	pequeno	pequeno

As análises apresentadas mostraram que as topografias estruturadas apresentam vantagem no que se refere à transferência de material quando comparada a uma topografia isotrópica, porém, os ensaios foram conduzidos com apenas um único ciclo de deslizamento. A seguir, será verificado o efeito destas topografias quando submetidas a ciclos de deslizamento repetitivos, como no caso do ensaio tribológico realizado na configuração pino-sobre-disco.

4.2.3 Estudo do efeito das topografias anisotrópicas em função dos ciclos de deslizamento

Como descrito anteriormente, os ensaios visaram avaliar as alterações superficiais e perda de massa do anel após conformação com uma superfície constante, ou seja, as alterações superficiais resultantes de cada ensaio são removidas a cada nova repetição. A fim de verificar o efeito do acúmulo de danos foi realizado um ensaio onde dez anéis foram conformados sucessivamente, para cada uma das três topografias das ferramentas (polido, topo1 e topo2).

Para manter constante a força, uma vez que ela é diferente para cada uma das topografias numa única condição de redução, foi estabelecido que a deformação do anel fosse aquela resultante de uma força de compressão máxima de 490,3 kN. A velocidade de descida da ferramenta superior foi igual a 0,3 mm/s. A Figura 58 apresenta a superfície das ferramentas após a conformação de dez anéis sucessivamente. Observa-se de forma mais nítida, principalmente na ferramenta polido, as regiões caracterizadas como aquelas onde há transferência de material do anel para a ferramenta. Numa posição equivalente, nas ferramentas topo1 e topo2, observa-se que os platôs indicados pelos números 11 e 12 para a ferramenta topo1 e números 9 e 10 para a ferramenta topo2 estão mais claros que os demais.

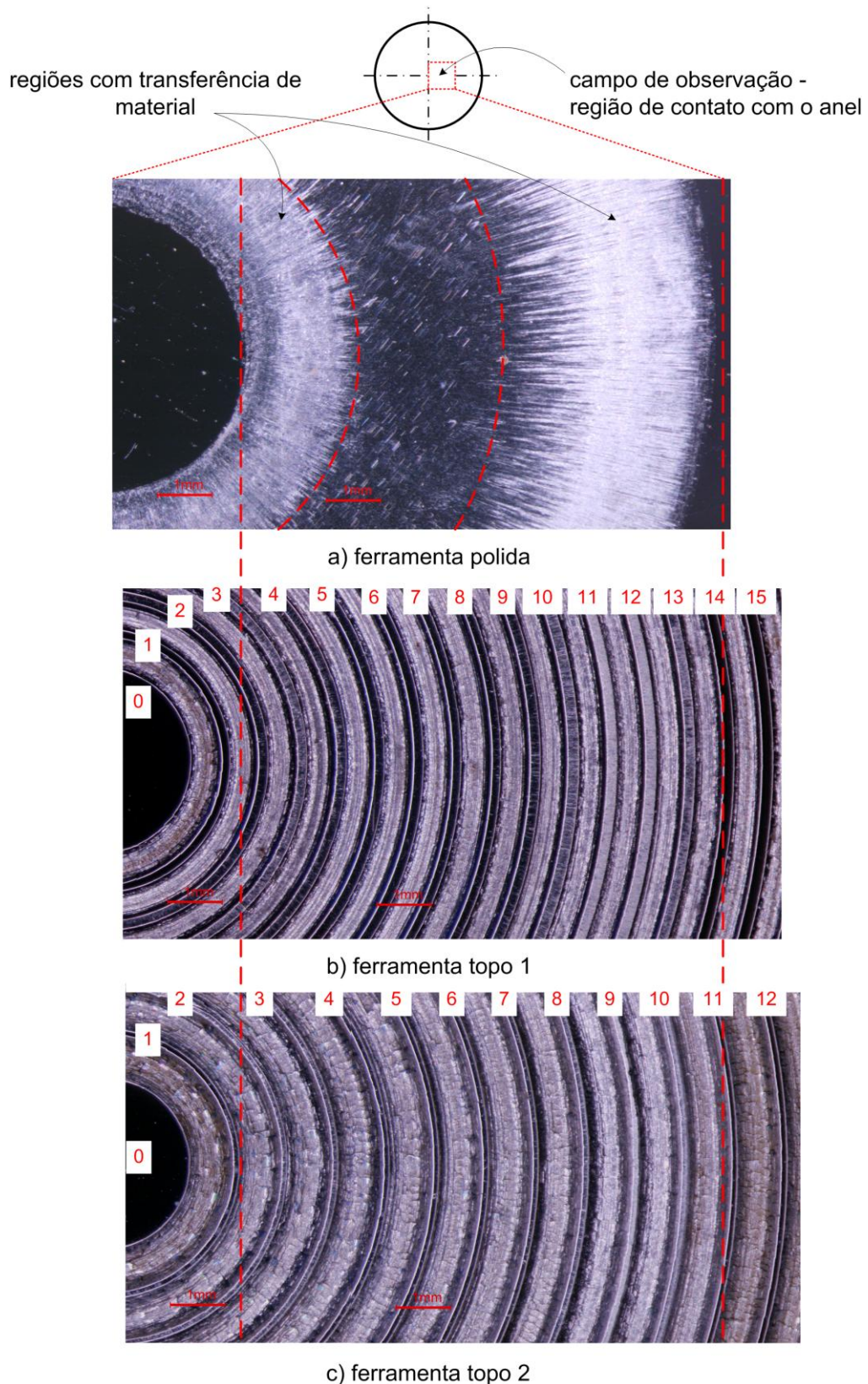


Figura 58 – Superfície da ferramenta polida (a), ferramenta topo1 (b) e ferramenta topo2 (c) após a conformação de 10 anéis sucessivos com força máxima de compressão de 490,3 kN.

A Figura 59 apresenta os perfis topográficos das ferramentas após a conformação dos dez anéis. O comprimento de medida (28 mm) é maior que o diâmetro da área

circular afetada pelo processo de desgaste. Observa-se que a superfície da ferramenta polida é aquela que sofre a maior alteração topográfica, quando comparada aos platôs 11 e 12 da ferramenta topo1. Os platôs de número 9 e 10 da ferramenta topo2 não apresentaram alteração no perfil topográfico.

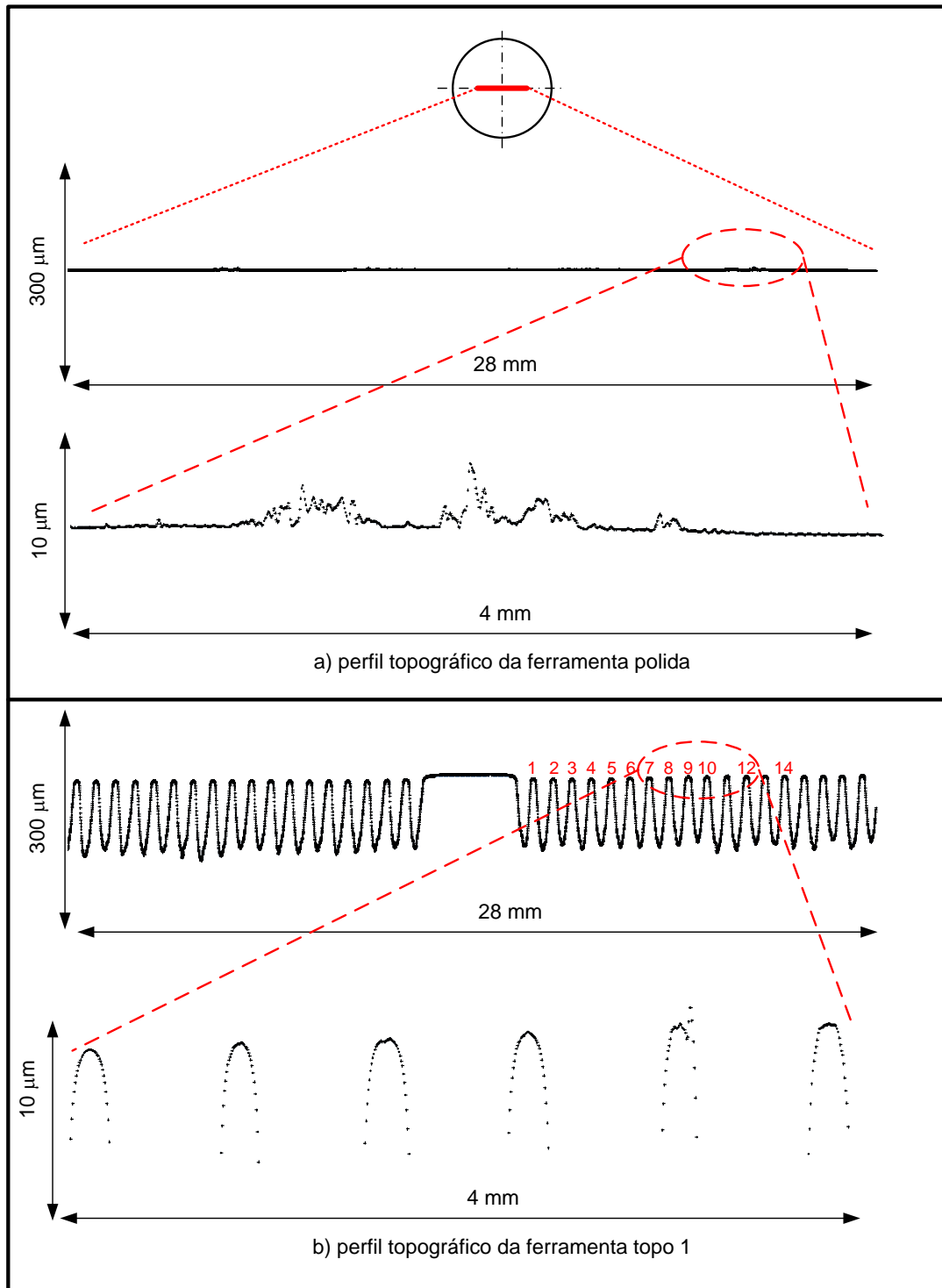


Figura 59 – Perfil topográfico da ferramenta polida (a) e ferramenta topo 1 (b) após a conformação de 10 anéis sucessivos com força máxima de compressão de 490,3 kN.

Observações por microscopia óptica das regiões com marcas radiais (Figura 60) permitiram identificar que a maior alteração superficial ocorre, principalmente, no primeiro ciclo de deslizamento. Esta observação foi também identificada quando se observou, na ferramenta polida, a evolução dos danos superficiais por medidas do perfil topográfico (ver Figura 61).

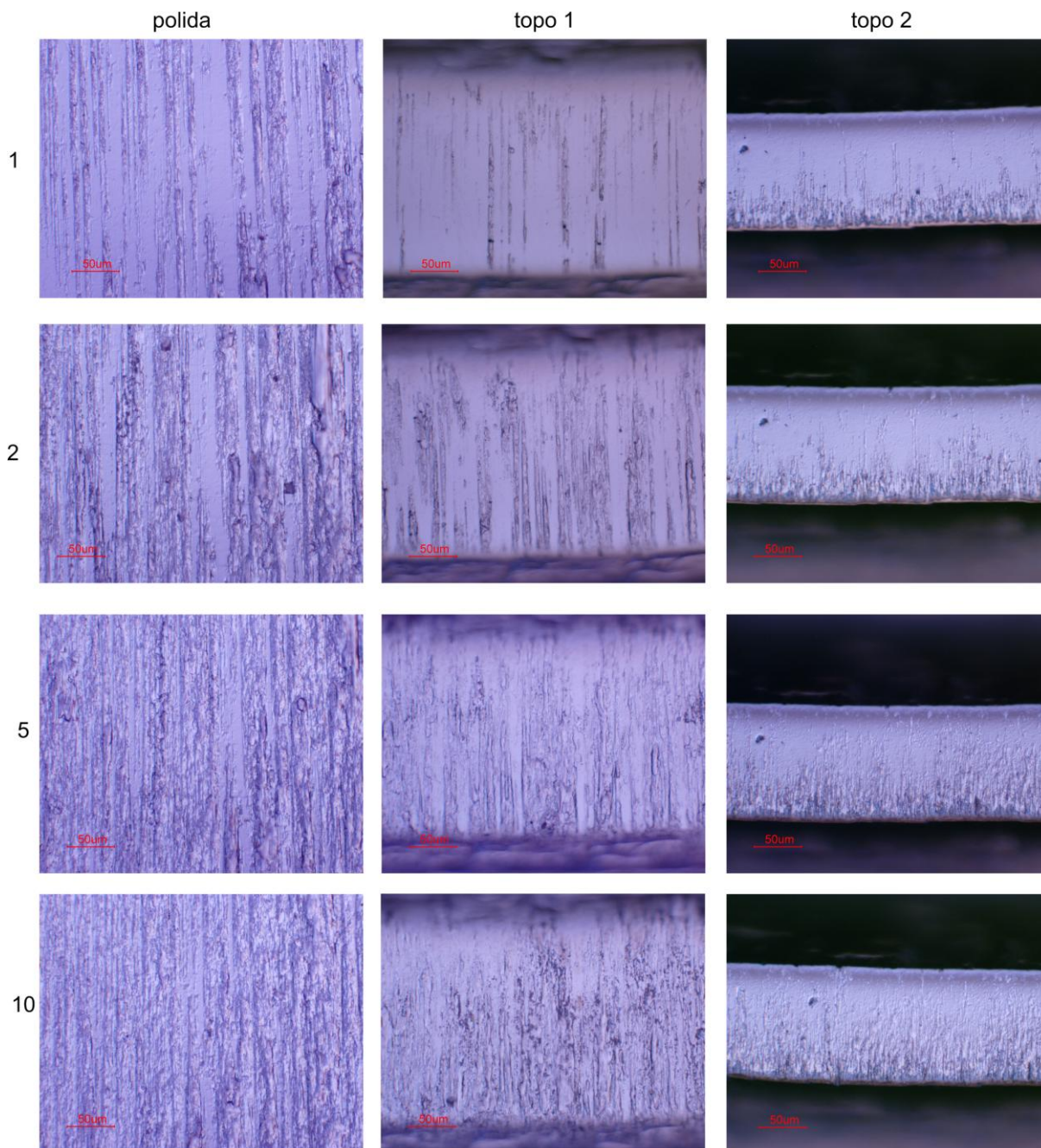


Figura 60 – Microscopia óptica da região com maior intensidade de alterações superficiais da ferramenta polida, ferramenta topo1 (platô 11) e ferramenta topo2 (platô 9) em função do número de anéis conformados com 490,3 kN.

A Figura 61 apresenta a variação das amplitudes topográficas em função dos ciclos de deslizamento para a ferramenta polida. Observa-se que a maior alteração é dada

após a conformação do primeiro anel, a partir do segundo as alterações estão na mesma ordem de grandeza.

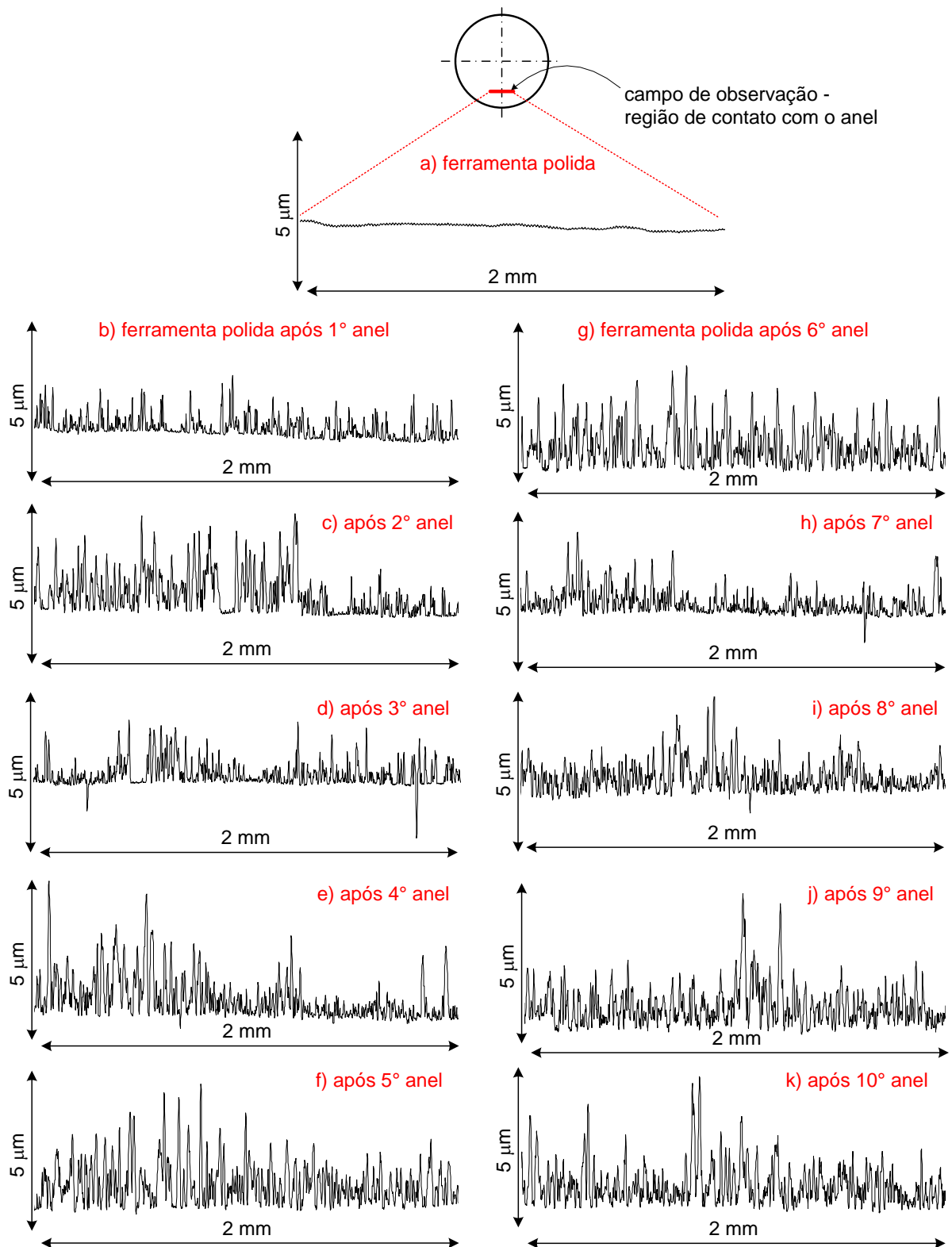


Figura 61 – Perfil topográfico da ferramenta polida (a), da ferramenta polida após a conformação do 1° anel (b), 2° (c), 3° (d), 4° (e), 5° (f), 6° (g), 7° (h), 8° (i), 9° (j) e 10° (k).

Os danos superficiais observados após o primeiro ciclo de deslizamento são os mais significativos no processo de desgaste das condições estudadas uma vez que no primeiro e segundo ciclo foram também observadas as maiores quantidades de material transferido, medida pela massa do anel e apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Variação de massa dos anéis conformados sucessivamente na ferramenta polida com força máxima de 490,3 kN.

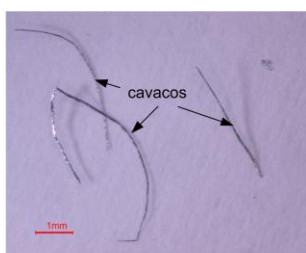
Anel	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Diferença de massa (g)
1	8,99078	8,99054	0,00024
2	8,9702	8,96994	0,00026
3	8,9503	8,95015	0,00015
4	8,96687	8,96677	0,00010
5	8,98368	8,98361	0,00007
6	8,98419	8,98408	0,00011
7	8,96933	8,96934	-0,00001
8	8,97154	8,97152	0,00002
9	8,98946	8,98946	0,00000
10	9,00909	9,00901	0,00008

As medidas de massa dos anéis conformados nas ferramentas anisotrópicas não apresentaram variações significativas, isto é, valores maiores que 0,1 mg. Apenas um anel conformado com a ferramenta topo1 (o quarto na sequência de ensaio) apresentou variação de massa superior a 0,1 mg. A Tabela 11 apresenta a variação de massa dos anéis conformados com a ferramenta topo2. Observa-se que o segundo, o quarto e o sexto apresentam variação de massa superior a 0,1 mg. Assim como o quarto anel conformado com a ferramenta topo1, foram encontrados cavacos nos três anéis conformados com a ferramenta topo2, conforme apresentado na Figura 62.

Tabela 11 – Variação de massa dos anéis conformados sucessivamente na ferramenta topo2 com força máxima de 490,3 kN.

Anel	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Diferença de massa (g)
1	9,02222	9,02232	-0,00010
2	8,99636	8,99612	0,00024
3	8,966	8,96591	0,00009
4	8,98081	8,98056	0,00025
5	8,97949	8,97957	-0,00008
6	8,99133	8,9912	0,00013
7	8,94853	8,94854	-0,00001
8	8,98221	8,98216	0,00005
9	8,97583	8,97576	0,00007
10	8,99083	8,99085	-0,00002

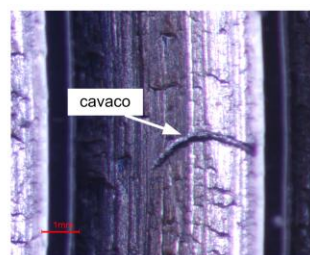
Os cavacos foram coletados após a conformação do respectivo anel. A Figura 62 mostra, também, que o cavaco pode permanecer grudado no anel ou alojado em um dos vales da ferramenta.



a) cavacos encontrados durante ensaio com ferramenta topo 2



b) cavaco grudado no quinto anel



c) cavaco no vale da ferramenta topo2

Figura 62 – Presença de cavacos durante os ensaios conduzidos com a ferramenta topo2.

Os resultados do processo de desgaste em condições de deformação plástica volumétrica do contra-corpo apresentaram semelhança com os resultados obtidos nos ensaios com deformação plástica microscópica. A principal semelhança foi o mecanismo que promove os danos, adesão com pontos de junção, deformação plástica e ruptura dos pontos junção com transferência de material do corpo de menor dureza para o corpo de maior dureza.

A utilização de topografias anisotrópicas promoveu uma redução nos danos superficiais, mas esta redução não pôde ser relacionada ao efeito da distribuição dos pontos de contato, conforme a hipótese deste trabalho. O efeito das topografias anisotrópicas foi diminuir o deslizamento entre o anel e a ferramenta e os danos por transferência de material foram sensivelmente minimizados por este efeito.

Assim como no ensaio com deformação plástica microscópica, discute-se a seguir o efeito das topografias anisotrópicas na resistência ao movimento em condições de deformação plástica macroscópica.

4.2.4 Discussões sobre o atrito (resistência ao movimento) no ensaio de compressão do anel

Foram realizados ensaios com dois níveis de redução em altura do anel, $20\% \pm 0,8\%$ e $50\% \pm 0,8\%$, três diferentes condições topográficas da ferramenta, topo1 e topo2, velocidade de descida da ferramenta superior igual a 3 mm/s, temperatura ambiente e sem lubrificação. Foram realizadas três repetições para cada combinação entre as variáveis. A Tabela 12 apresenta os resultados da variação percentual do diâmetro interno do anel, $\Delta\phi_i = (\phi_{inicial} - \phi_{final}) / \phi_{inicial}$, em função das combinações entre as variáveis: topografia da ferramenta e redução em altura do anel.

Tabela 12 – Diâmetro interno dos anéis após ensaio de compressão com diferentes condições topográficas e de redução em altura.

Repetição	Condição topográfica						
	Polido		Isotrópica danificada	Topo1		Topo2	
	20%	50%	50%	20%	50%	20%	50%
	Redução no diâmetro interno - $\Delta\phi$ (%)						
1	9,8	43,9	52,2	13,4	55,4	13,3	60
2	9,3	46,1	51,9	14	56,2	13,5	60,1
3	9,2	47,5	54	13,6	56,2	14,2	61
média	9,4	45,8	52,7	13,7	55,9	13,7	60,4

Os valores obtidos de redução no diâmetro interno do anel foram utilizados para determinar o coeficiente de atrito, valor que representa a resistência ao movimento obtido pelo método proposto por Male e Cockcroft (1964-65). Os valores do coeficiente de atrito estão apresentados na Figura 63.

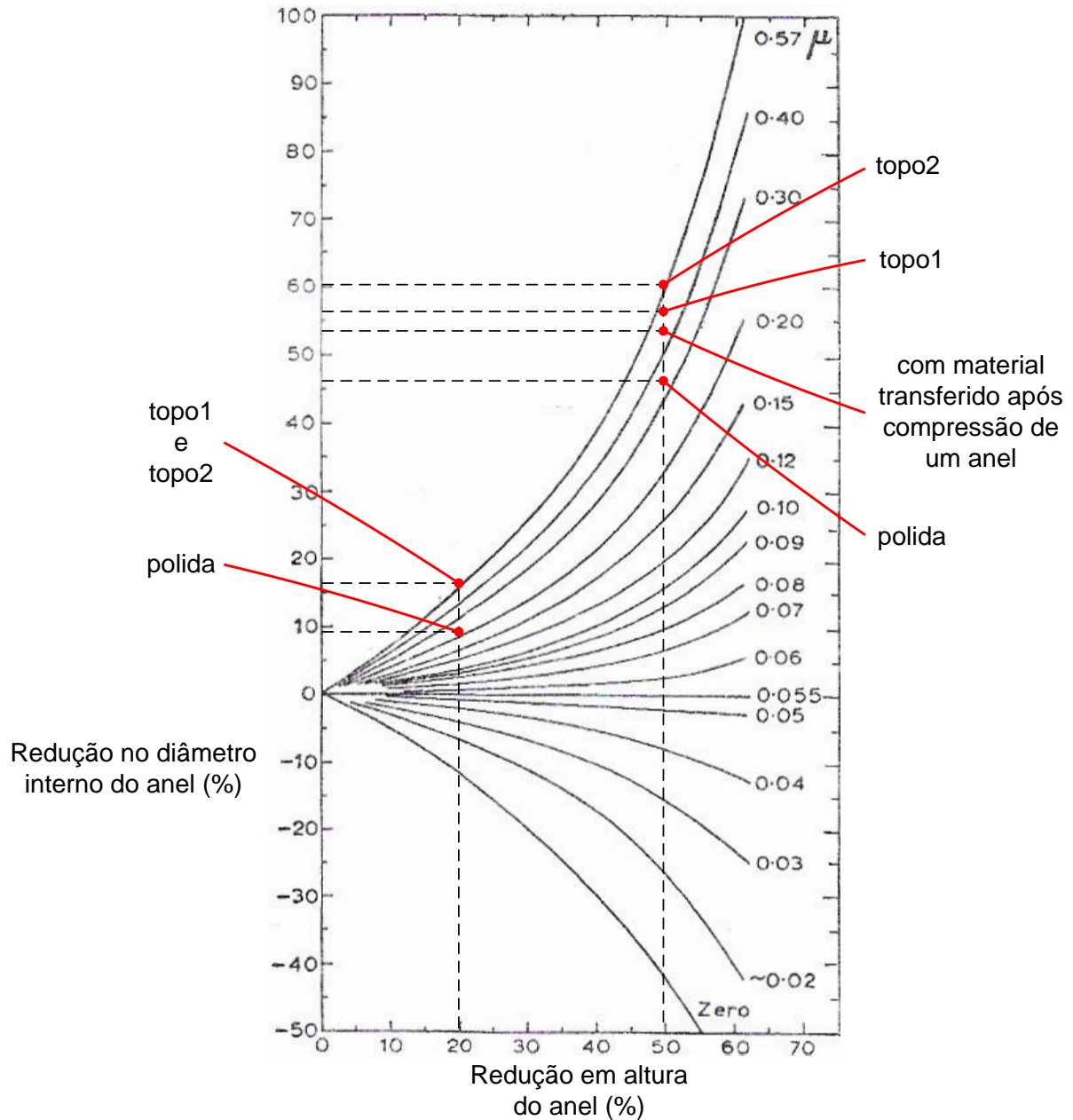


Figura 63 – Curvas de calibração de Male e Cockcroft (1964-65) para anel com geometria 6:3:2 e valores de redução do diâmetro interno do anel das condições estudadas.

Os valores medidos do coeficiente de atrito serão discutidos partindo dos resultados relacionados aos danos superficiais da ferramenta e do anel e conceitos da literatura sobre atrito em condições de deformações plásticas macroscópicas.

4.2.4.1 Definições de raio neutro e regiões circunvizinhas

Segundo a literatura o raio neutro (R_n) corresponde ao ponto no qual a partir de um determinado instante da deformação axial, em condições com resistência ao movimento, há divisão no fluxo de massa, isto ocorre pois é energeticamente favorável para uma parte do material escoar no sentido radial e em direção ao raio interno enquanto a outra parte escoar na direção oposta (MALE E DePIERRE, 1970). Conforme Bay e Gerved (1987), uma vez que R_n é maior que R_i , no ponto em contato com a ferramenta que coincide com R_n o deslizamento é igual a zero, assim como a resistência ao movimento. Ainda segundo esses autores, haverá uma região na superfície de contato do anel, circunvizinha a R_n , que irá deslizar em relação a ferramenta com deslocamentos cada vez maiores a medida que se afasta de R_n acompanhado de elevação do coeficiente de atrito que atingirá eventualmente um valor máximo equivalente a máxima tensão interfacial (τ_i).

4.2.4.2 Identificação do raio neutro e regiões circunvizinhas

O raio neutro para os ensaios conduzidos com ferramenta polida foi determinado pelo ponto onde se encontram as regiões com maior deformação plástica na seção transversal do anel conformado com 20% de redução. Para o anel conformado com 50% de redução o raio neutro foi identificado no ponto central da região que sofreu menor deformação plástica, observada também na seção transversal. De acordo com as considerações de Bay e Wanhein (1976) e Bay e Gerved (1987) a região circunvizinha ao raio neutro pode ser determinada pelas regiões com pequenos deslocamentos.

Uma vez que as medidas dos deslocamentos dos pontos marcados na superfície do anel apresentaram valores menores para a condição com 20% de redução é esperado que a área circunvizinha ao raio neutro seja maior nessa condição que a do anel conformado com 50% de redução em altura. Esta região foi encontrada conforme apresentado na Figura 64.

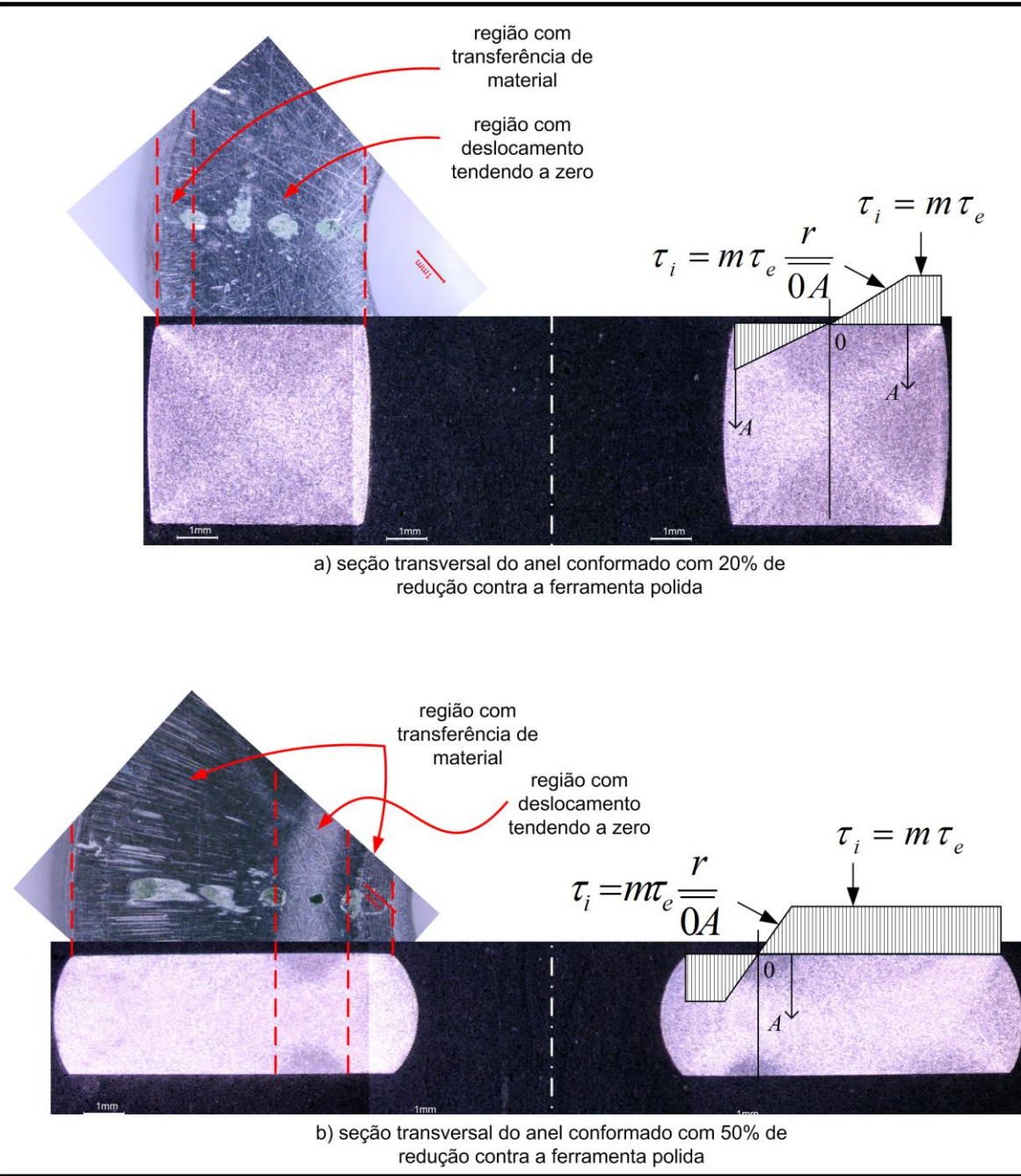


Figura 64 – Correlação entre as marcas superficiais e deformações plásticas na seção transversal com o modelo de distribuição da tensão de cisalhamento interfacial proposta por Bay e Wanheim (1976).

O modelo de distribuição da tensão interfacial de Bay e Wanheim (1976), elaborado para um disco e que não foi apresentado na revisão dos modelos listados na Tabela 2, considerando que a relação entre a área real e aparente de contato se aproxima de uma unidade, é o modelo mais adequado para os resultados encontrados, pois considera que a resistência ao movimento na região circunvizinha a R_n aumenta com o aumento do deslizamento até um valor máximo e permanecendo constante com o

aumento da pressão. A região com tensão interfacial constante pode ser associada a região com transferência de material.

Dessa forma pode ser compreendida a diferença no coeficiente de atrito obtido com 20% e 50% de redução. Na condição com 20% de redução em altura, o coeficiente de atrito médio deve ser menor que aquele obtido da condição com 50% de redução, pois a área com menor deslizamento é maior nesta condição.

Os mecanismos de resistência ao movimento na região com menor deslizamento e menor coeficiente de atrito podem ser: i/ intertravamento de asperezas, ii/ forças eletrostáticas ou iii/ adsorção química. Entre esses, o mecanismo correlacionado a afinidade química entre o material da ferramenta e do anel deve prevalecer sobre o intertravamento das asperezas, isto porque nos ensaios preliminares com lubrificante sólido, apresentados no apêndice A, (politetrafluoretileno – teflon) em condições topográficas semelhantes, houve grande alteração na resistência ao movimento. O anel nesse caso deformou-se sem zona neutra, comportando-se como um disco.

Na região com transferência de material o mecanismo é formação de junção, deformação plástica no ponto de junção até sua ruptura. Essa é a condição limite onde o material atinge a tensão interfacial limite e nestes pontos de transferência de material não há deslizamento na interface, mas sim num plano interno ao material do anel. Nesta região, não foi verificado o efeito da afinidade química, porém verificou-se o efeito de alterações topográficas. O ensaio crítico foi conformar um anel com 50% de redução em altura, porém com uma ferramenta que apresentava as marcas radiais resultantes da conformação de um único anel também conformado com 50% de redução. Foi constatado que, baseado nas curvas de coeficiente de atrito de Male e Cockcroft (1964-65), há um aumento no valor do coeficiente de atrito, o que pode ser relacionado a alteração na topografia da ferramenta. Este experimento reflete a importância da presença dos danos nas ferramentas de conformação para a qualidade do produto conformado e também para as perdas energéticas atribuídas a maior resistência ao movimento. Segundo a literatura (ALTAN; OH; GEGEL, 1999; ASM HANDBOOK, VOL. 18, 1992; DIETER, 1988; SCHAEFFER, 1999 e SCHEY, 1984) quanto maior a resistência ao movimento maior a força necessária para compressão. A Figura 65 apresenta os valores da força de compressão obtidos com os ensaios conformado com a ferramenta polida e com a ferramenta com danos de desgaste.

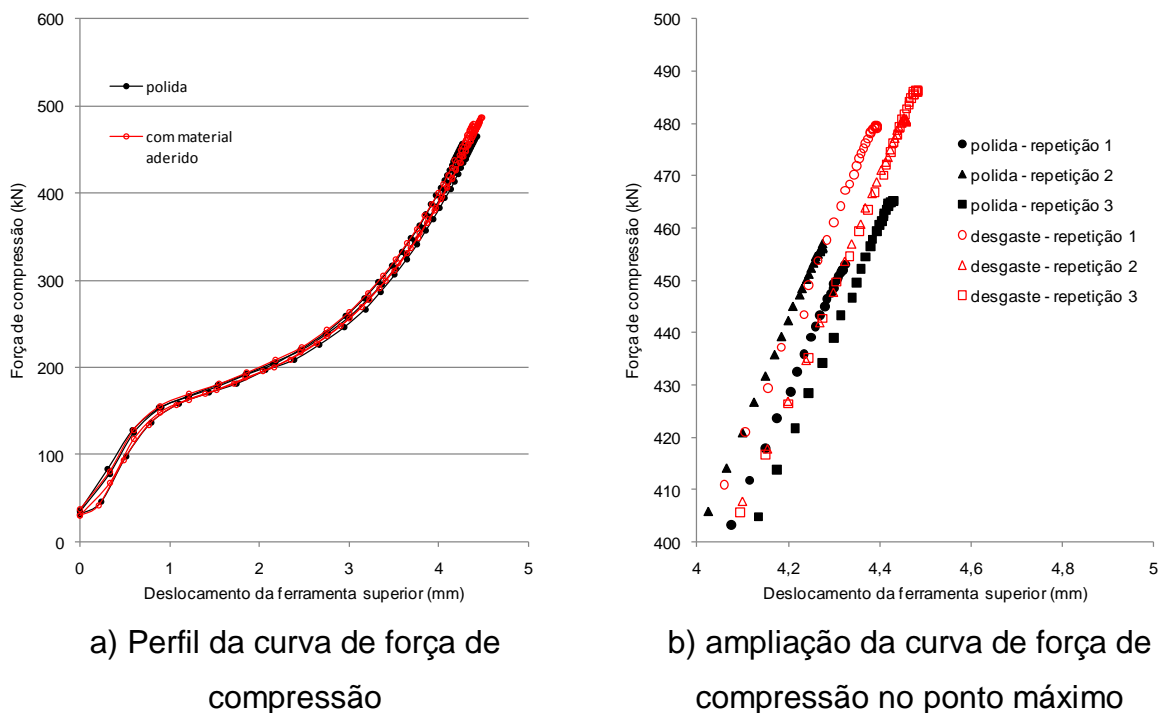
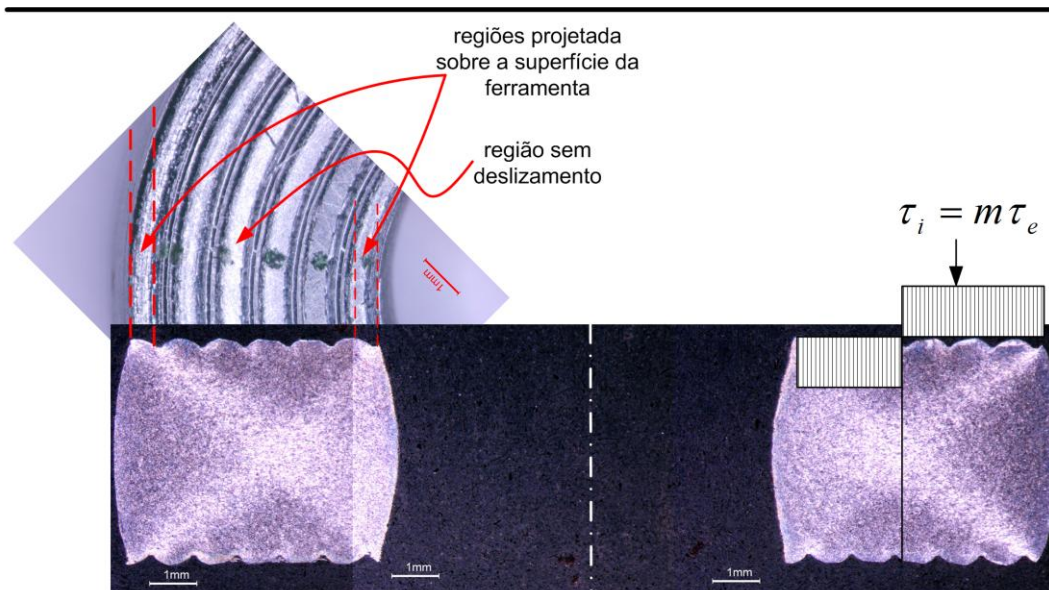


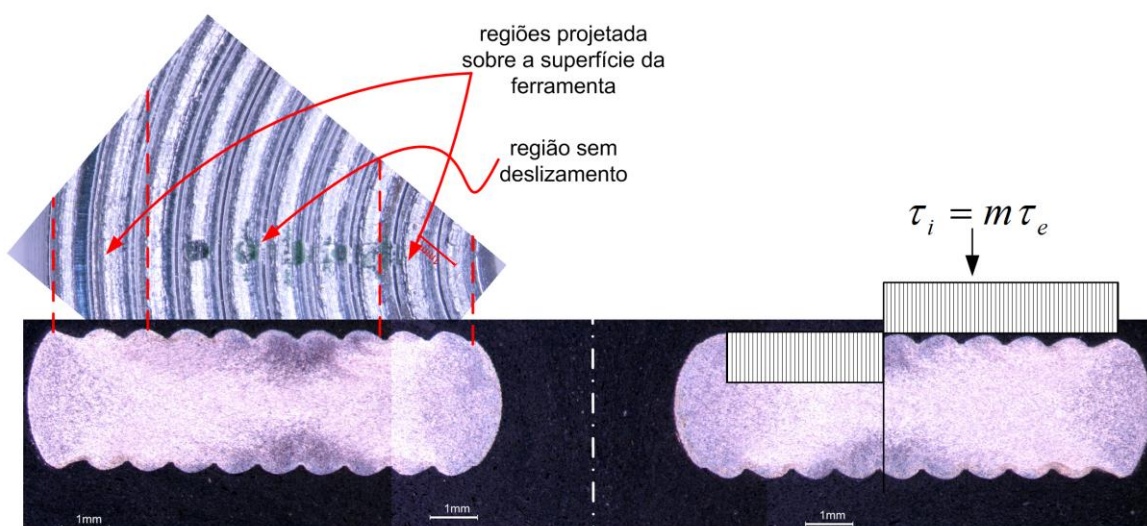
Figura 65 – Força de compressão em função do deslocamento da ferramenta superior. Perfil da curva (a) e detalhe do ponto da força máxima de compressão (b) para a condição com ferramenta polida e ferramenta polida mais material aderido. 50% de redução do anel e velocidade de 3 mm/s.

4.2.4.3 Resistência ao movimento com as ferramentas de topografia anisotrópica

Com base nas características de deformação dos anéis foi constatado que o mecanismo de resistência ao movimento deve ser diferente daqueles observados nos anéis conformados com ferramentas isotrópicas. Conforme apresentado na Figura 66 não há deslizamento mensurável entre a superfície plana do anel com a superfície da ferramenta. Além disso, a região circunvizinha ao raio neutro é aproximadamente igual a área inicial de contato. Se considerado modelo de Bay e Wanheim (1976) a resistência ao movimento deve ser igual a zero, uma vez que o deslocamento é zero. Por outro lado, pode ser considerado também que toda a região de contato está na condição onde há colamento total entre as superfícies em contato e a resistência ao movimento é interpretada pela resistência do material ao cisalhamento e assim predomina sobre toda a área de contato o atrito interfacial constante e independente da pressão de conformação.



a) seção transversal do anel conformado com 20% de redução contra a ferramenta topo2



b) seção transversal do anel conformado com 50% de redução contra a ferramenta topo2

Figura 66 – Correlação entre as marcas superficiais e deformações plásticas na seção transversal com o modelo de distribuição da tensão de cisalhamento interfacial constante em função da pressão de conformação.

O menor valor do coeficiente de atrito medido com a ferramenta topo1 em relação à ferramenta topo2 pode ser atribuído a menor profundidade dos vales. Apesar de não ter sido possível medir deslizamentos nos anéis conformados nestas topografias, as deformações na seção transversal, próxima a interface, sugerem que a maior profundidade dos vales da ferramenta topo2 é mais efetiva no bloqueio do deslizamento (ver Figura 57).

O mecanismo de resistência ao movimento nas condições com topografia anisotrópica é o bloqueio imposto pelos sulcos. Este mecanismo sobrepõe, por exemplo, qualquer efeito de afinidade química entre o anel e a ferramenta, pois ensaios conduzidos em caráter preliminar mostraram que sob estas condições topográficas a presença de um meio interfacial, como o politetrafluoretileno ou mesmo uma graxa comum a base de lítio não alteram o comportamento de bloqueio do deslizamento imposto pelos vales.

A comparação dos valores do coeficiente de atrito obtidos com as ferramentas anisotrópicas no ensaio com deformação plástica macroscópica, que oscilaram entre 0,45 e 0,57, com as medidas do coeficiente de atrito obtidas no ensaio pino-sobre-disco (0,05 a 0,6) permite verificar que há sobreposição dos valores. Embora exista semelhança entre os valores obtidos nos diferentes ensaios, deve-se destacar que para grande parte dos sistemas tribológicos no qual são envolvidos pares metálicos, o coeficiente de atrito oscila entre 0,2 e 0,6 (BUDINSKI, 1991). Além disso, as discussões sobre a diferença nos valores do coeficiente de atrito entre um ensaio e outro poderiam ser conduzidas, pelo menos, por duas diferentes abordagens: i/ discutindo o método de medição do coeficiente de atrito de qualquer um dos ensaios ou ii/ discutindo os mecanismos de resistência ao movimento, como descrito a seguir.

A resistência ao movimento está fortemente associada, neste estudo, aos danos superficiais. Isto é, grande parte da resistência ao movimento pode ser atribuída a força necessária para deformar plasticamente as junções até a ruptura do material de menor resistência; quanto maior as regiões com transferência de material maior a resistência ao movimento. Porém este não é o único mecanismo de resistência ao movimento. Em todas as condições testadas, foi observada uma região onde houve apenas deformação plástica das asperezas e o deslizamento tende a zero no centro desta região. Essa região está associada raio neutro e a resistência ao movimento aumenta a partir desse ponto com o aumento do deslizamento até atingir a condição onde a tensão interfacial se igual à tensão de escoamento em cisalhamento do anel. A hipótese para os mecanismos predominantes de resistência ao movimento nessa região são aqueles relacionados à afinidade química entre os pares. Este resultado sugere que a discussão sobre se o valor do coeficiente de atrito no raio neutro é zero precisa ser aprofundada.

Como síntese, os valores obtidos em termos do fenômeno de atrito possuem a seguinte relação com as topografias estudadas:

i/ topografia isotrópica (polida), promove o surgimento de duas regiões distintas, uma relacionada a região circunvizinha ao raio neutro, identificada pelos pequenos deslizamentos que tendem a zero no raio neutro (coeficiente de atrito entre 0 e 0,57) e outra região relacionada aos danos superficiais caracterizados como transferência de material resultado do intenso deslizamento entre anel e ferramenta, onde o coeficiente de atrito possui valor máximo, 0,57.

ii/ topografia anisotrópica, promovem o intertravamento macroscópico entre o anel e a ferramenta impedindo o deslizamento e resultando no valor máximo de resistência ao movimento (coeficiente de atrito igual a 0,57) em toda a superfície de contato e constante com a pressão de conformação.

5 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios realizados com deformações plásticas microscópicas permitiram concluir que:

- ⇒ Há uma relação entre as características topográficas com as características dos danos do processo de desgaste por deslizamento. Constatou-se que o aumento do número de pontos de contato resultou no aumento dos pontos onde houve transferência de material, caracterizando o esfolamento.
- ⇒ A topografia com maior número de pontos de contato apresentou maior área com danos decorrentes do processo de desgaste. Porém não foi possível verificar se o volume de material transferido foi alterado.
- ⇒ Os vales (15 μm de profundidade) da topografia em linha atuaram de forma efetiva evitando o contato do contra-corpo em deslizamento com as partículas transferidas. A topografia em rede, com menor profundidade das cavidades (5 μm), apresentou um instante durante o deslizamento no qual um aglomerado de material foi arrastado pelo contra-corpo, causando o sulcamento. Este resultado indica um valor limite de profundidade para alojamento das partículas nestas condições de ensaio.
- ⇒ A topografia anisotrópica com maior quantidade de pontos de contato apresentou uma distribuição dos valores de coeficiente de atrito diferente da distribuição obtida com a topografia com menor quantidade de pontos de contato. Este fato sugere uma relação entre a maior quantidade dos pontos de contato com o aumento dos valores obtidos de coeficiente de atrito.

Conclusões sobre os ensaios com deformação plástica macroscópicas:

- ⇒ Os danos superficiais do corpo e contra-corpo podem ser divididos em: i/ deformações plásticas das asperezas e ii/ transferência de material da superfície do anel para a ferramenta.
- ⇒ A utilização de topografias anisotrópicas promoveu a redução nos danos superficiais, mas esta redução não pôde ser relacionada ao efeito da distribuição dos pontos de contato, conforme uma das hipóteses desse trabalho. O efeito das topografias anisotrópicas foi diminuir o deslizamento entre o anel e a ferramenta e os danos por transferência de material foram sensivelmente minimizados por este efeito.
- ⇒ As topografias anisotrópicas promoveram o intertravamento macroscópico entre o anel e a ferramenta impedindo o deslizamento e resultando no valor máximo de resistência ao movimento (coeficiente de atrito igual a 0,57) em toda a superfície de contato e constante com a pressão de conformação.
- ⇒ O bloqueio do deslizamento apresenta relação com a profundidade dos vales, quanto maior a profundidade do vale mais efetivo o efeito do bloqueio do deslizamento.

Os resultados do processo de desgaste em condições de deformações plásticas volumétricas do contra-corpo apresentaram semelhança com os resultados obtidos nos ensaios com deformação plástica microscópica. A principal semelhança foi o mecanismo que promove os danos, adesão com pontos de junção, deformação plástica e ruptura dos pontos junção com transferência de material do corpo de menor dureza para o corpo de maior dureza.

Como respostas aos objetivos traçados, apresentam-se os seguintes comentários.

Objetivo: Verificar o efeito sorvedouro de partículas de desgaste. Este efeito foi identificado apenas na condição com deformações plásticas microscópicas e apresentou relação com a profundidade das cavidades.

Objetivo: Verificar o efeito de distribuição dos pontos de contato sobre os danos superficiais; A topografia com maior quantidade de pontos de contato apresentou

maior área com danos do processo de desgaste, porém deve ser conduzida uma quantificação mais adequada desses danos.

Objetivo: Descrever o comportamento de resistência ao movimento quando utilizadas topografias com características topográficas engenheiradas. Os valores do coeficiente de atrito obtidos com deformações plásticas macroscópicas apresentaram valores equivalentes aqueles obtidos em condições de deformação plástica microscópica, contudo cabe destacar as limitações das técnicas utilizadas para determinar ambos.

6 TRABALHOS FUTUROS

A proposta de continuidade do presente estudo está dividida em ensaios com deformação plástica microscópica e macroscópica, conforme apresentado a seguir:

Ensaio com deformação plástica microscópica.

- ⇒ Repetir os ensaios porém com sistema de aquisição da força tangencial com maior taxa de aquisição dos sinais, isto para verificar se a distribuição dos valores de coeficiente de atrito são conforme aquelas apresentadas no presente estudo.
- ⇒ Repetir os ensaios porém utilizando técnicas de caracterização que possibilite quantificar o material transferido incluindo uma topografia isotrópica polida.

Ensaio com deformação plástica macroscópica.

- ⇒ Verificar o efeito da profundidade dos vales no bloqueio ao deslizamento. Realizar ensaio com vales com profundidade entre em 0,05 mm e 0,3 mm.
- ⇒ Ampliar a revisão desse trabalho sobre os modelos de resistência ao movimento em condições de conformação mecânica.
- ⇒ Desenvolver um novo modelo analítico explorando as limitações dos modelos atuais no que se refere à região circunvizinha ao raio neutro.

REFERÊNCIAS

ABDUL, N. A. Friction determination during bulk plastic deformation of metals. *Annals of the CIRP*, Vol. 30, 1981, pp. 143-146.

ALTAN, T., OH, S-I, GEGEL, H. L., *Conformação de Metais – Fundamentos e aplicações*. Traduzido por COELHO, R. T., EESC-USP, 1999, 366 p.

ALVES, L. H. D. Mecanismos de desgaste de rodas ferroviárias. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Friction, lubrication and wear technology. In: *Metals Handbook*, Vol. 18. 1992. p. 942. 2a. Edição.

ANDREASEN, J. L.; BAY, N.; CHIFFRE, L. Quantification of galling in sheet metal forming by surface topography characterization, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 38, 1998, pp. 503-510

ARCHARD, J.F., Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *J. Appl. Phys.* 241, 1953, p. 891-988.

ARCHARD, J. F. Elastic deformation and the laws of friction. *Proc. R. Soc. London*. A243, 1957, pp. 190-205.

ASPINWALL, D.K.; WISE, M. L. H.; STOUT, K. J.; GOH, T. H. A.; ZHAO, F. L.; ELMENSHAWYET, M. F. Electrical Discharge Texturing. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 32, No. 1/2, 1992, p. 183-193.

AVITZUR, B., *Metal Forming: Processes and Analysis*, McGraw-Hill, 1968, 500 p.

AVITZUR, B.; SAUERWINE, F. Limit Analysis of Hollow disk forging. Part 1: Upper bound. *Transactions of the ASME*, Vol. 100, 1978, p. 340-346.

BAY, N.; WANHEIM, T. Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact. *Wear*, Vol. 38, 1976, pp. 201-209.

BAY, N.; GERVED, G. Tool/workpiece interface stresses in simple upsetting. *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 14, 1987, pp. 263-282.

BERNARDES, F. G. Desgaste abrasivo de um ferro fundido branco multicomponente. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BHUSHAN, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact. *Tribology Letters*, Vol. 4, 1998, pp. 1 – 35.

BHUSHAN, B. *Introduction to tribology*. John Wiley and Sons, 2002, 732 p.

BHUSHAN, B., *Nanotribology and nanomechanics of MEMS/NEMS and BioMEMS/BioNEMS materials and devices*. *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, 2007, p. 387-412.

BORDER, C. Análise do coeficiente de atrito no ensaio do anel para o forjamento a quente. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. The area of contact between stationary and between moving surfaces. *Proc. R. Soc. London*. A169, 1939, pp. 391-413.

BOWDEN, F. P; TABOR, D. *The friction and lubrication of solids*. Oxford University Press, 2001. 374 p.

BRITO, A. M. G.; SCHAEFFER, L. Utilização de diferentes modelos de atrito na simulação numérica do forjamento a frio de ligas de alumínio. 28° SENAFOR, 2008, p. 141-157.

BUDINSKI, K. G. Friction of plastic webs. *Tribology International*, Vol. 34, 2001, pp. 625-633.

CAMPANHA M. V. Estudo sobre a vida útil de rolamentos fixos de uma carreira de esferas. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CAPUS, J. M.; COCKCROFT, M. G. Relative slip and deformation during cold rolling. *Journal of the institute of metals*, Vol. 90, 1961-62, pp. 289-297.

CARTER, W. T. J. A model for friction in metal forming. *Journal of Engineering Materials and Technology*. Vol. 116, 1994, pp. 8-13.

COSTA, H.L., HUTCHINGS, I.M. Reciprocating lubricated sliding on texture steel surface. In: Congresso Ibérico de tribologia, 3, Portugal, 2005. IBERTRIB 2005 p1-14. 1 CD-ROM.

COZZA, R. C. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo. 2006. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

CUPPARI, M. G. V. Relação entre microestrutura e resistência à cavitação de ligas fundidas baseadas no sistema quaternário Fe-Cr-Ni-C. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

CUPPARI, M. G. V. Relação entre microestrutura e resistência à cavitação de aços inoxidáveis fundidos. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

DUBRUJEAUD, B.; VARDAVOULIAS, M.; JEANDIN, M. The role of porosity in the dry sliding wear of a sintered ferrous alloy. *Wear*, Vol. 174, 1994, pp. 155-161.

DEMARCHI, W. Estudo de Materiais, Geometria e Compatibilidade dos Tribossistemas Em Anéis de Pistão Para Motores de Combustão Interna. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

DIETER, G. E., *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill Book Company, 4 ed., 1988, 751 p.

DOWSON, D. *History of tribology*. Longman, 1979. 677 p.

DUBAR, M.; DUBOIS, A.; DUBAR, L. Wear analysis of tools in cold forging: PVD versus CVD TiN coatings. *Wear*, Vol. 259, 2005, pp. 1109-1116.

FARIAS, M. C. M. Desgaste por deslizamento de aços inoxidáveis austeníticos. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

FARIAS, M. C. M. Influência da Velocidade de Deslizamento, da Carga Normal e da Transformação Martensítica induzida por deformação na Resistência ao Desgaste de Aços Inoxidáveis Austeníticos. 2004. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

FERRARESE, A. Efeito do desgaste do primeiro anel de pistão no seu desempenho de vedação e raspagem. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FERREIRA, V. Ultra-baixo coeficiente de atrito entre o par cerâmico Si₃N₄-AL₂O₃, em água. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GIMENEZ, R. L. Área de hemiesferas de borracha contra uma superfície de vidro. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Usp,

GONÇALVES, V. Obras em Congonhas. Jornal O Estado de São Paulo, 25 de julho de 2007.

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, B. P. Contact of nominally flat surfaces. Proc. R. Soc. London. Vol. 295, 1966, pp. 300-319.

GUIMARÃES, M. S. Proposta de método para caracterização de propriedades termomecânicas de filmes finos usando dispositivos MEMS. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

HALLING, J. Principles of tribology. Paperback, 1978, 401 p.

HAWKYARD, J. B.; JOHNSON, W. An analysis of the changes in geometry of short hollow cylinder during axial compression. Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, 1967. p. 163-182.

HIOKI, D. Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido. 2006. 232 f. Tese (Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

HOLM, R. Electric contacts. Almqvist and Wiksells Akademiska, 1946.

HUTCHINGS, I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 1.ed. London: Edward Arnold, 1992.

JOST, H.P. Tribology – origin and future. *Wear*, 136, 1990. p. 1-17.

KERRIDGE, M.; LANCASTER, J. K. The stages in a process of severe metallic wear. *Proceedings of the Royal Society of London*, A236, 1956, pp. 250-264

KUDO H., Some analytical and experiental studies of axi-symmetric cold forging and extrusion – I. *International Journal Mechanical Science*, Vol. 2, 1960, pp. 102-127.

LANGE, K.; CSER, L.; GEIGER, M.; KALS, J. A. G. Tool life and tool quality in bulk metal forming. *Annals of the CIRP*, Vol. 41, 1992, pp. 667-675.

LAZZAROTTO, L.; DUBAR, L.; DUBOIS, A.; RAVASSARD, P.; OUDIN, J. Identification of Coulomb's friction coefficient in real contact conditions applied to a wire drawing process. *Wear*, Vol. 211, 1997, pp. 54-63.

LEE, C. H.; ALTAN, T. Influence of flow stress and friction upon metal flow in upset forging of rings and cylinders. *Journal of Engineering for Industry*, 1972, pp. 775-781.

LEITE, M. V.; GOMES, J. M. R.; SINATORA, A. Ensaio de pino-sobre-disco do aço ABNT H13 com topografia estruturada em condições de deslizamento a seco. In: 45º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2008, Porto de Galinhas, 2008. p. 517-529.

LIMA, M. S. F.; RIVA, R.; NEVES, D.; DINIZ, A. E. Modificação da superfície de ferramentas com lasers. *Congresso Usinagem 2006*. São Paulo.

LIMA, M. S. F.; NEVES, D.; RIVA, R.; LADARIO, F. P.; ARROYO, J. M. DINIZ, A. E; VIANA, R.; MACHADO, A. R.; MARQUES, D. M. M.; GUERREIRO, S. S. Development of laser texturing for enhanced lifetime of cutting and forging tools. *Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2009 Munich*, 2009.

LIU, J. Y. An analysis of deformation characteristics and interfacial frictions conditions in simple upsetting of rings. *Journal of Engineering for Industry*, 1972, pp. 1149-1155.

MALE, A. T., COCKCROFT, M.G. A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation. *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 93, 1964-65, p. 38-46.

MALE, A. T.; DePIERRE, V., The validity o mathematical solutions for determining friction from the ring compression test. *Journal of Lubrication and Technology*, 1970, p 389 – 397.

MARANHO, O. Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MARU, M. M. Estudo Tribológico do Aço Inoxidável Nitretado Contra Ferro Fundido Cinzento Em Máquina de Ensaio de Desgaste Com Movimento Alternado. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

MARU, M. M. Estudo do Desgaste e Atrito de um Par Metálico sob Deslizamento Lubrificado. 2003. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

MAGALHÃES, A. Moenda com dois cilindros horizontais, de tração manual, conhecida como “quebra-peito”. Foto. Museu do Homem do Nordeste. Recife-PE, sem data.

MEDEIROS, J. T. N. Fadiga de Contato de Discos Metálicos não-conformes Submetidos a Ensaio a Seco de Rolamento. 2002. 501 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

MENDES, M. A. R. S. Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimentos de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. Uma avaliação das propriedades de desgaste e tenacidade em aços para trabalho a frio. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, Vol. 2, 2005, pp. 12-18.

MORDENTE, P. J. R. Estudo tribológico de um par metálico com movimento deslizante lubrificado. 2004. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MUNIZ, J. M. Fenômenos tribológicos intrínsecos ao travamento de juntas de engenharia aparafusadas. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MURAI; KUDO; DANGO; KRUSCH; MENDE; ORTHEY; KIKUCHI. Modernization of the strongest press in Japan. International Forgemasters Meeting, Santander, Spain, 2008.

NEVES, J., C., K., Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato esfera sobre plano e sua aplicação na caracterização de ferros fundidos com matrizes de elevada dureza. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PANTALEÓN, E. Um Modelo de Desgaste Oxidativo Baseado em Parâmetros Termodinâmicos. 2004. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo.

PAWELSKI, O.; RASP, W.; ZWLCK, W.; NETTELBECK, H. J.; STEINHOFF, K. The influence of different work-roll texturing systems on the development of surface structure in the temper rolling process of steel sheet used in the automotive industry. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 45, 1994. p. 215-222.

PETERSON, M. B.; BHANSALI, K. J.; WHINTENTON, E. P.; IVES, L. K. Galling wear of metals. Wear. Vol. 5, 1985, pp. 293-301.

PETTERSSON, U., JACOBSON, S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. Tribology international , v.36, p.857-864, 2003.

PINTAUDE, G. Estudo do regime transiente em desgaste abrasivo - ensaios em britador de mandíbulas. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

PINTAUDE, G. Análise dos Regimes Moderado e Severo de Desgaste Abrasivo Utilizando Ensaio Instrumentados de Dureza. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

PODGORNIK, B.; HOGMARK, S. Surface modification to improve friction and galling properties of forming tools. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 174, 2006, pp. 334-341.

PODGORNIK, B.; HOGMARK, S.; SANDBERG, O.; Proper coating selection for improved galling performance of forming tool steel. *Wear*, Vol. 261, 2006, pp. 15-21.

RABINOWICZ, E. *Friction and wear of materials*. John Wiley and Sons, 1965, 244 p.

RABINOWICZ, E.; TABOR, D. Metallic transfer between sliding metals: an autoradiographic study. *Proc. R. Soc. London*. Vol. 208, 1951, pp. 455-475.

RAMOS, L. V. Medidas de atrito no desgaste abrasivo a três corpos. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RANZAN, A. Estudo da Contribuição da Corrosão no Sinergismo Corrosão-Desgaste em Aços Inoxidáveis. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

RAO, K. P.; SIVARAN, K. A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, 1993, p. 295-318.

RIGNEY, D. A.; CHEN, L. H.; NAYLOR, M. G. S.; ROSENFELD, A. R. Wear processes in sliding systems. *Wear*, Vol. 100, 1984, pp. 195-219.

RYK, G.; ETSION, I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. *Wear*, Vol. 261, 2006, pp. 792-796.

ROSARIO, J. F. A. Avaliação da integridade da superfície no torneamento de um ferro fundido nodular com carboneto. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

ROVAI F. F. Desgaste e corrosão de bombas de combustível com misturas de álcool e gasohol. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SALADARRIAGA, P. A. C. Estudo dos campos de tensão gerados por inclusões durante o processo de torneamento em aços ABNT 1045 utilizando o método dos elementos finitos. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

SANTOS, D. F. G. Caracterização microestrutural, mecânica durante o processo de torneamento de aços ABNT 1045 e ABNT 1145 para avaliação do efeito do enxofre. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

SANTOS, M. M. Estudo da influência de lubrificante nos regimes de desgaste abrasivo (moderado e severo) de aços e ferros fundidos. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SCHAEFFER, L. Conformação mecânica, Editora Imprensa Livre, Porto Alegre, 1999, 167 p.

SCHAEFFER, L. Introdução à conformação mecânica dos metais, Editora da Universidade, UFRGS, 1983, 125 p.

SCHEY, J. A. Tribology in metalworking – friction, lubrication and wear. American Society for Metals, 2a. edição, 1984, 736 p.

SCHROEDER, W.; WEBSTER, D. A. Press-forging Thin Sections: Effect of friction, area, and thickness on pressures required, Journal of Applied Mechanics, Vol. 16, 1949, p. 289-294.

SCHUITEK, A. J. Estudo do comportamento de desgaste de materiais metálicos em riscamento circular. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SEIDEL, F.; STOCK, H. R.; MAYR, P. Development of ion-implanted hard coatings for industrial applications in low lubricated cold forging processes. Surface and Coatings Technology, Vol. 84, 1996, pp. 506-511.

SENA, C. H. C. Projeto e Construção de uma Bancada de Testes de Atrito e Desgaste para Anéis Sincronizadores de Transmissões Automotivas. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

SHELLER, I. J. G., LEXICON – TOTIUS LATINITATIS – A dictionary of the latin language. Translated by J.E. Riddle. 1835.

SILVA, C. H. Estudo do efeito da carga normal e da velocidade no coeficiente de atrito do par polietileno de alta densidade e aço carbono galvanizado. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

SILVA, C. H. Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

SINATORA, A. Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. 2005. 33 f. Erudição (Professor Titular) – Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SOUZA, L. Avaliação dos efeitos dos parâmetros de usinagem e dos tratamentos térmicos no torneamento de três aços inoxidáveis austeníticos. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. Engineering tribology. Elsevier, 2001.

STOUT, K.J. Surface roughness – measurement, interpretation and significance of data. Materials in Engineering, Vol. 2, 1981, pp. 287-295.

STOUT, K. J., BLUNT, L. A contribution to the debate on surface classifications-random, systematic, unstructured, structured and engineered. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 41, 2001, p. 2039–2044.

SUBRAMANIAN, C.; STRAFFORD, K. N. Towards optimization in the selection of surface coatings and treatments to control wear in metal-forming dies and tools. Materials and Design, Vol. 14, 1993, pp. 291-298.

TAN, X. Comparisons of friction models in bulk metal forming. Tribology International, Vol. 35, 2002, pp. 385-393.

THOMAS, T. R. Rough Surfaces. 2nd Ed. London: Imperial College Press, 1999.

TRINKS, W. Roll Pass Design. Vol. 1. Third Edition. The Penton Publishing Co. Cleveland, 1941. 189 p.

UEHARA, S. Influência do acabamento superficial no desempenho de bronzinas. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

UETZ, H., WIEDEMEYER, J., Tribologie der Polymere. Hanser, 1984, 378 p.

VÁSQUEZ, D. H. G. Estudo comparativo do comportamento tribológico de três materiais termoplásticos submetidos a desgaste por deslizamento a seco. 2003. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.

WANG, X., KATO, K., ADACHI, K., AIZAWA, K. Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water, Tribology international, v.31, p.189-197, 2003.

WHITEHOUSE, D.J Handbook of surface metrology. Philadelphia:Institute of Physics Publishing, 1994, 988p.

WIKIPEDIA, A enciclopédia livre. Nelumbo Nucifera. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Nelumbo_nucifera>. Acesso em 3 maio. 2010.

ZUM GAHR, K.H. Microstructure and wear of materials. New York: Elsevier, 1987.

APÊNDICE A – Projeto e construção de um tribômetro para ensaios de conformação mecânica em condições controladas

Para realizar estudos de processos de conformação em condições próximas à aplicação necessita-se de um equipamento capaz de produzir deformações plásticas volumétricas. Para isso, pode-se utilizar prensas. Na Universidade de São Paulo – *Campus* Cidade Universitária – há uma prensa disponível, localizada no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Porém, a capacidade de aplicação de força desta prensa, máximo de 300 kN (~ 30 tf), é um fator que limita sua utilização, pois impossibilita estudar deformações superiores a 40 % de redução (em espessura) de anéis de aço ao carbono com diâmetro externo maior que 20 mm. Embora seja possível obter maiores deformações em anéis com diâmetro externo menor do que 20 mm, essa redução de dimensões do anel restringe a área nominal de contato e dificulta o estudo do efeito da topografia no atrito.

Há outros equipamentos neste *Campus*. Entretanto, estes equipamentos são de difícil utilização, devido tanto às dimensões, como a prensa de 15.000 kN do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), quanto à falta de automatização, como a máquina para ensaios de compressão de materiais para a construção civil do Departamento de Engenharia de Construção Civil.

Realizar estes ensaios em ambiente industrial é uma tarefa difícil, devido à falta de disponibilidade dos equipamentos para realização dos experimentos e à falta de funcionários para acompanhamento dos ensaios.

Frente a estes desafios, projetou-se um tribômetro para ensaios em condições de conformação mecânica com as seguintes condições de contorno: baixo custo, sensibilidade para controle da velocidade de deformação, controle de carga e posicionamento e sistema de aquisição de dados. A seguir, descrevem-se as etapas de projeto.

Determinação das características do tribômetro

O financiamento do projeto e construção do tribômetro foi obtido por meio do edital do Projeto Universal do CNPq, com limite de R\$ 150 mil para o valor financiado. Este valor é inferior, por exemplo, ao valor de uma máquina para ensaios de compressão e também de uma prensa comercial com capacidade de carga superior a 980 kN (~ 100 tf). Dessa forma, com base no valor do Edital do Projeto Universal, listaram-se as necessidades de um tribômetro para ensaios de conformação mecânica:

- i/ realizar ensaios de compressão e extrusão;
- ii/ permitir a utilização de materiais metálicos ferrosos e não ferrosos;
- iii/ trabalhar com temperaturas próximas à temperatura de fusão dos materiais e à temperatura ambiente;
- iv/ permitir o estudo de lubrificantes;
- v/ permitir o estudo do efeito da velocidade de deformação;
- vi/ permitir o estudo do efeito da força de conformação;
- vii/ permitir o estudo do efeito do grau de deformação;
- viii/ permitir a obtenção de propriedades dos materiais seguindo os critérios normatizados de ensaios de compressão.

Com base nas características acima mencionadas, definiram-se os seguintes requisitos de projeto:

- i/ tipo de prensa: hidráulica;
- ii/ capacidade de carga: 980 kN e 1.960 kN (100 tf a 200 tf);
- iii/ área útil de trabalho: 400 mm por 400 mm;
- iv/ válvula proporcional de vazão;
- v/ sensor de carga;
- vi/ sensor de deslocamento linear com resolução de 0,01 mm;
- vii/ controlador lógico programável (CLP) integrado a um computador pessoal (PC);
- viii/ velocidade de deslocamento: 0,06 mm/s a 2 mm/s.

Detalhamento do projeto do tribômetro

O projeto do tribômetro foi dividido em três partes: estrutura, hidráulica e eletrônica.

Estrutura

Optou-se por uma estrutura comercial do tipo bastidor, com capacidade de carga de 1.471 kN (~ 150 tf) com cilindro de duplo efeito. Nesta estrutura comercial foram adaptadas mesa e guias cilíndricas, conforme apresentado na Figura 67.

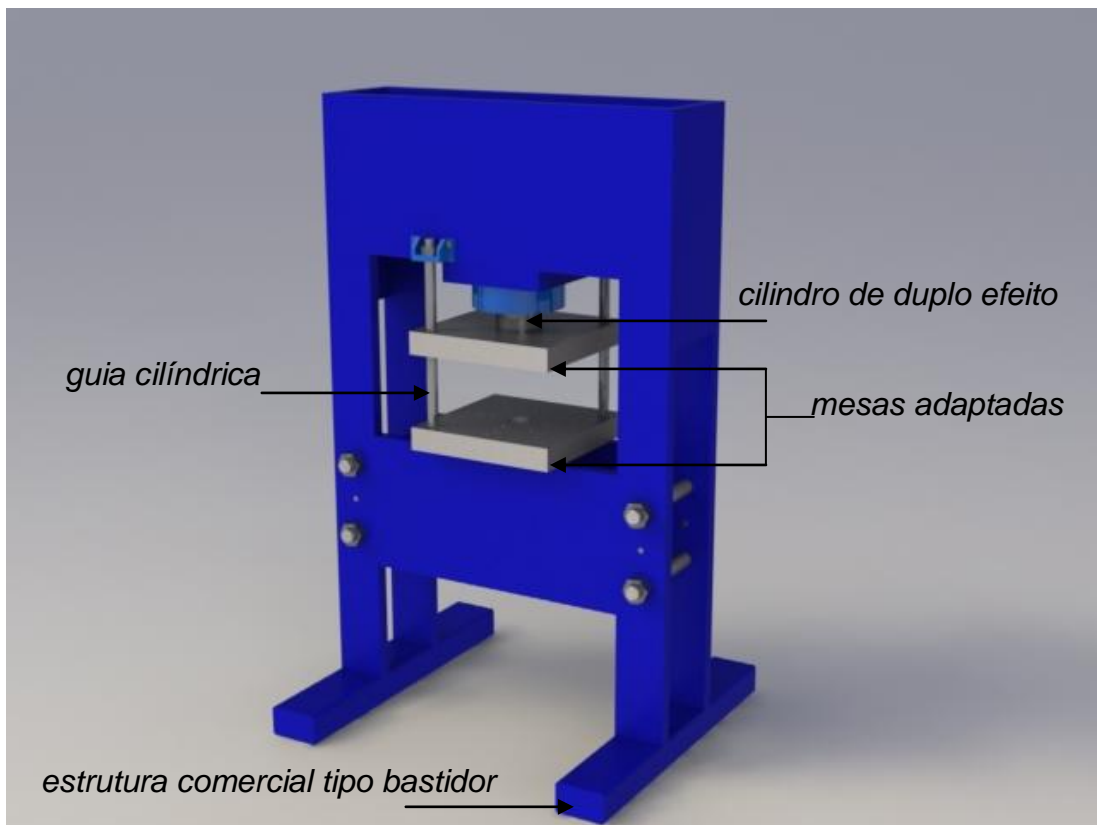


Figura 67 – Desenho ilustrativo da estrutura e peças adaptadas.

As mesas têm 74 mm de uma espessura e foram projetadas visando garantir a rigidez do equipamento. Optou-se pela fixação do porta-ferramentas (bolster) por furos roscados (típicos em máquinas de forja) para evitar os rasgos tipo “T” que poderiam diminuir a rigidez da mesa.

O porta-ferramenta, apresentado na Figura 68, foi projetado para ferramentas cilíndricas com diâmetro de 120 mm. No porta-ferramenta pode ser montado um sistema de aquecimento por condução que permitirá, inicialmente, realizar ensaios com as ferramentas aquecidas até 300 °C. O porta-ferramenta possui guias cilíndricas que visam garantir a concentricidade entre as ferramentas.

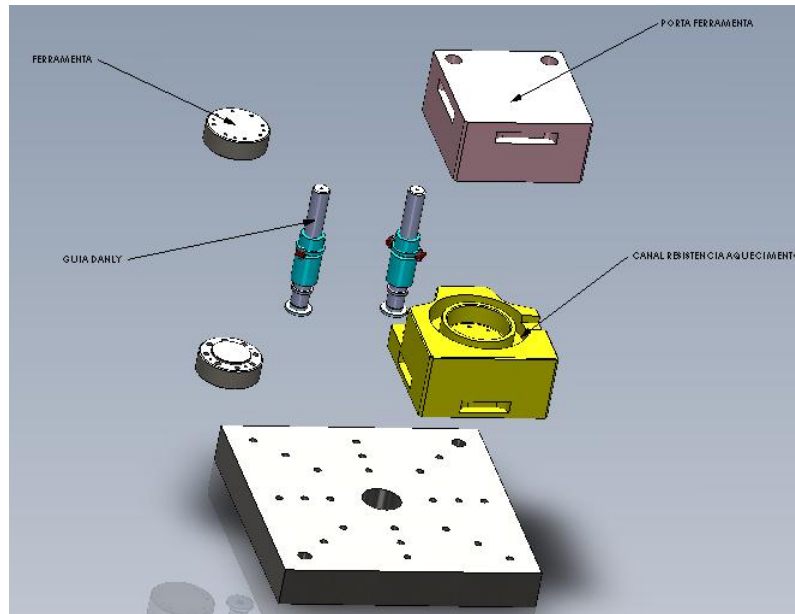


Figura 68 – Vista explodida do conjunto porta ferramenta.

Sistema hidráulico

Foi desenvolvido um sistema hidráulico em parceria com a Oleodinâmica (representante autorizado Rexroth) capaz de atender os requisitos de projeto.

Embora a válvula de preenchimento seja um componente usual em prensas hidráulicas, neste projeto ela foi abolida, para garantir que a mesa superior não desça em queda livre, o que poderia interferir nos resultados do estudo (ao atingir a peça, a mesa poderia transferir energia cinética ao processo).

Dessa forma, o sistema de alimentação do cilindro e a válvula proporcional foram projetados de acordo com o diagrama apresentado na Figura 69.

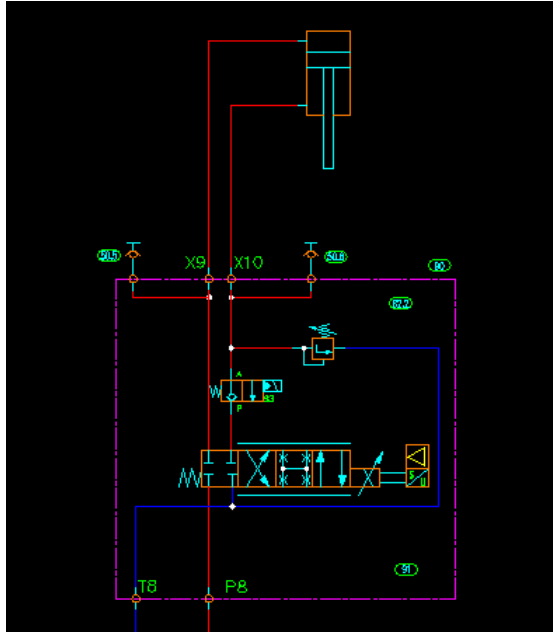


Figura 69 – Diagrama do sistema hidráulico.

A opção por uma válvula hidráulica proporcional que atendesse os requisitos de precisão e a gama de velocidades descartou soluções triviais como bombas de vazão variável e válvulas proporcionais comuns. A especificação recaiu sobre a válvula tipo 4WRPEH6, uma válvula servossolenóide com eletrônica integrada e vazão nominal de 24 l/min (ver Figura 70).

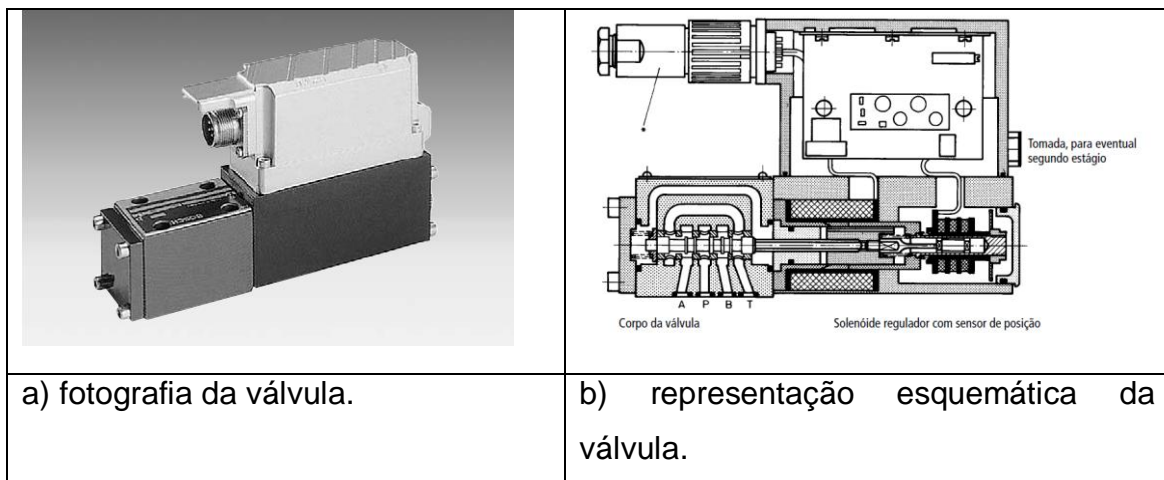


Figura 70 – Válvula 4WRPEH6 (Rexroth – catálogo de produtos).

Sistema eletrônico

Especificou-se um comando via CLP integrado a um PC. O controle permite definir as condições de ensaio e arquiva os resultados dos ensaios para posterior análise.

A integração dos sistemas é feita por meio de um CLP Rexroth, a medição de força é realizada por meio de uma célula de carga com capacidade máxima de 150 tf (Transtech – manual de instruções) e as medição de posição por um sensor linear com precisão de 0,005 mm (MTS – modelo RP).

A forma na qual o CLP foi programado possibilita incluir novas sub-rotinas para diversos tipos de ensaios.

Montagem do tribômetro

A etapa de montagem pode ser dividida, em duas partes: i/ montagem dos sensores e peças adaptadas à estrutura e ii/ montagem da unidade hidráulica à estrutura. A Figura 71 apresenta uma fotografia dos sensores e peças adaptadas montadas à estrutura.

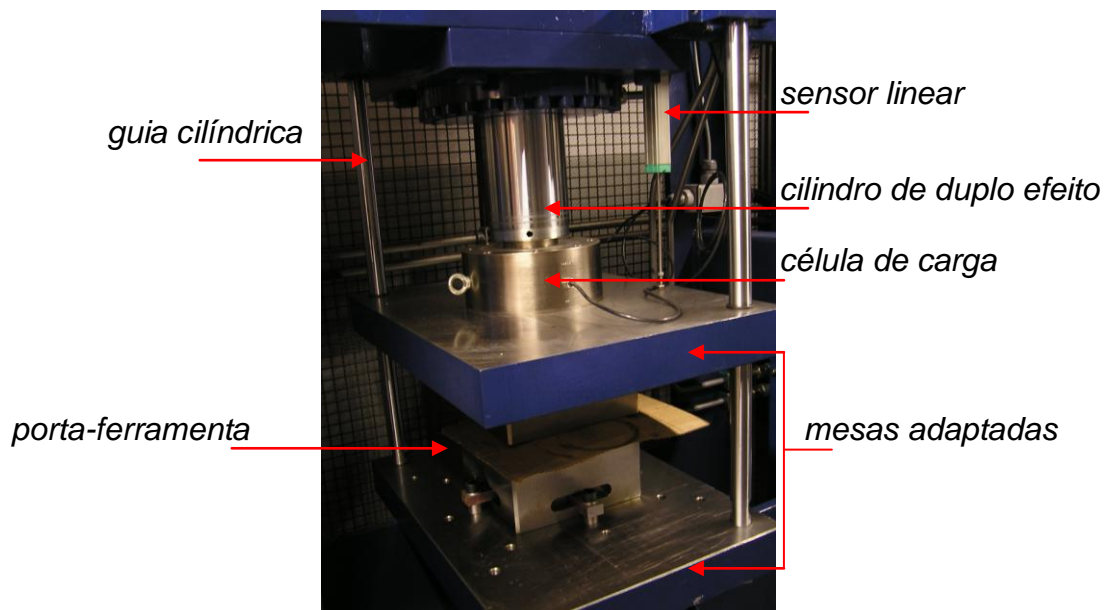


Figura 71 – Componentes do sistema estrutural e de aquisição de dados.

As mangueiras de conexão da unidade hidráulica a estrutura são flexíveis e a válvula servossolenóide esta posicionada no mesmo nível da camisa do cilindro. A unidade hidráulica foi projetada para manter a temperatura do óleo entre a temperatura ambiente e 40°C, a Figura 72 apresenta uma fotografia do sistema hidráulico.

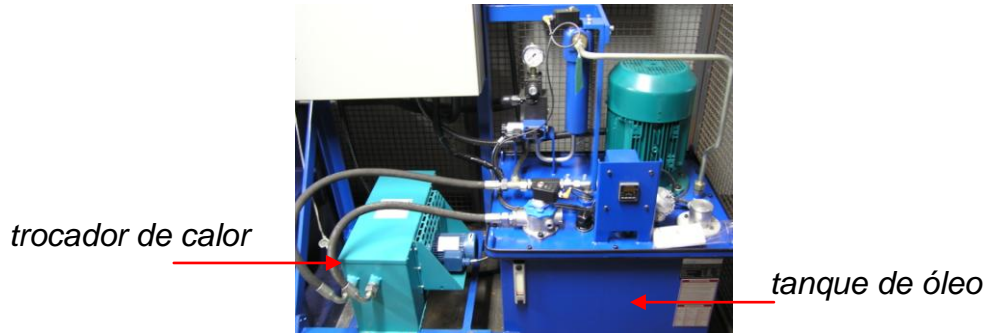


Figura 72 – Unidade hidráulica.

O CLP e os demais componentes eletrônicos foram montados no painel de controle junto a estrutura da unidade hidráulica, conforme apresentado na Figura 73.

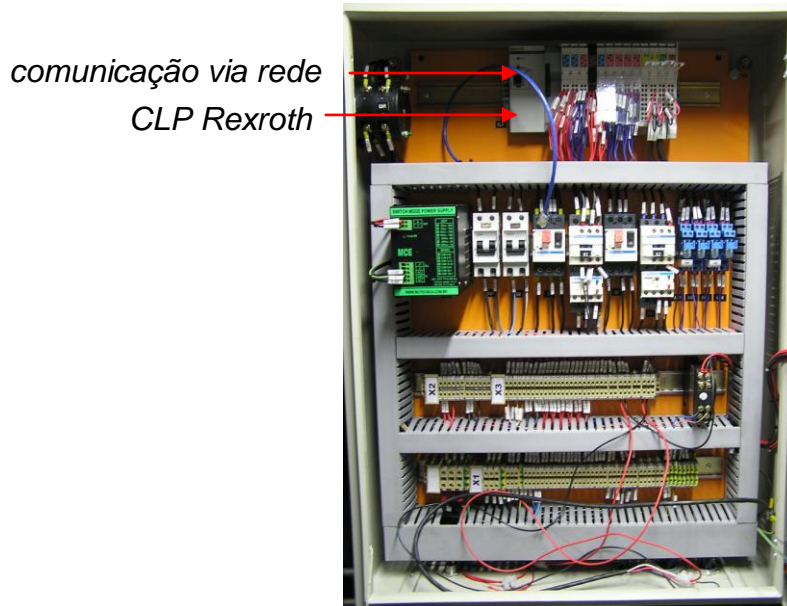


Figura 73 – Fotografia do painel de controle.

A Figura 74 apresenta uma fotografia com uma visão geral do equipamento.

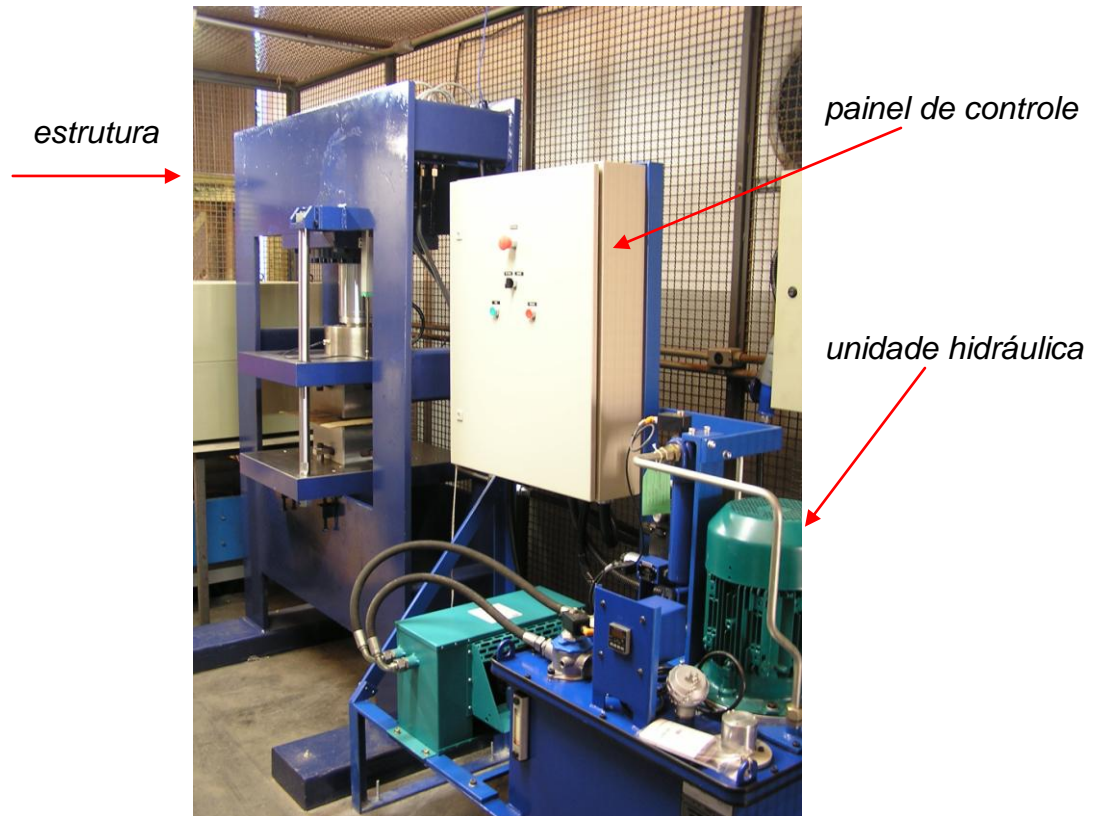


Figura 74 – Fotografia do tribômetro LFS-6.

Testes de funcionamento do tribômetro

O primeiro teste, realizado sem uma peça para ser conformada, objetivou verificar se os sinais emitidos pelos sensores de força e deslocamento correspondem à taxa de aquisição estabelecida pelo CLP, 10 Hz. Além disso, verificou-se, por meio do sensor de posição, se o deslocamento programado e o tempo de permanência na posição desejada eram atendidos. A Figura 75 apresenta o resultado destes testes.

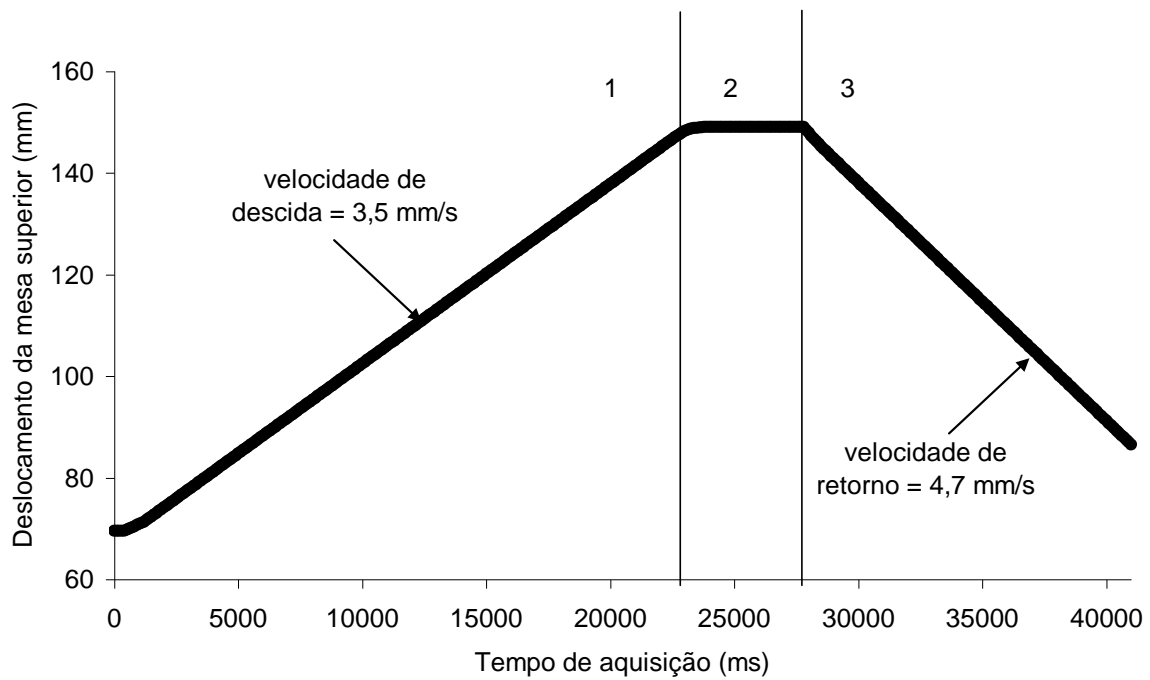


Figura 75 – Curva de posição da mesa superior em função do tempo total de aquisição de dados.

A curva da Figura 75 tem 415 pontos, ou seja, um ponto foi registrado a cada 100 ms. A região representada pelo número 1 representa o movimento de descida da mesa superior; o número 2 corresponde ao tempo de permanência na posição desejada (neste teste de 5 s) e o número 3 representa o movimento de subida da mesa superior.

Este teste foi repetido em outro dia e a Figura 76 apresenta as curvas de deslocamento da mesa (a) e posição da mesa (b) obtidas nos diferentes dias.

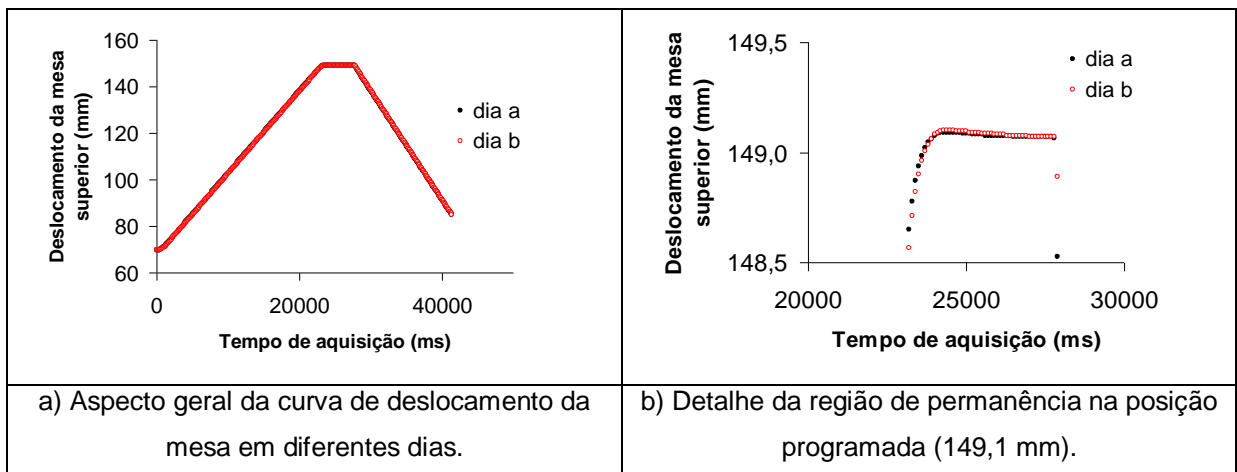


Figura 76 – Curvas de deslocamento da mesa superior em diferentes dias.

Pode-se observar na Figura 76 que o deslocamento foi estável, não apresentou oscilação e variou pouco em operações distintas. Por isto o sistema de controle de deslocamento da mesa foi considerado estável. Entretanto, o mesmo comportamento não foi observado quando se analisou a curva de força (Figura 77).

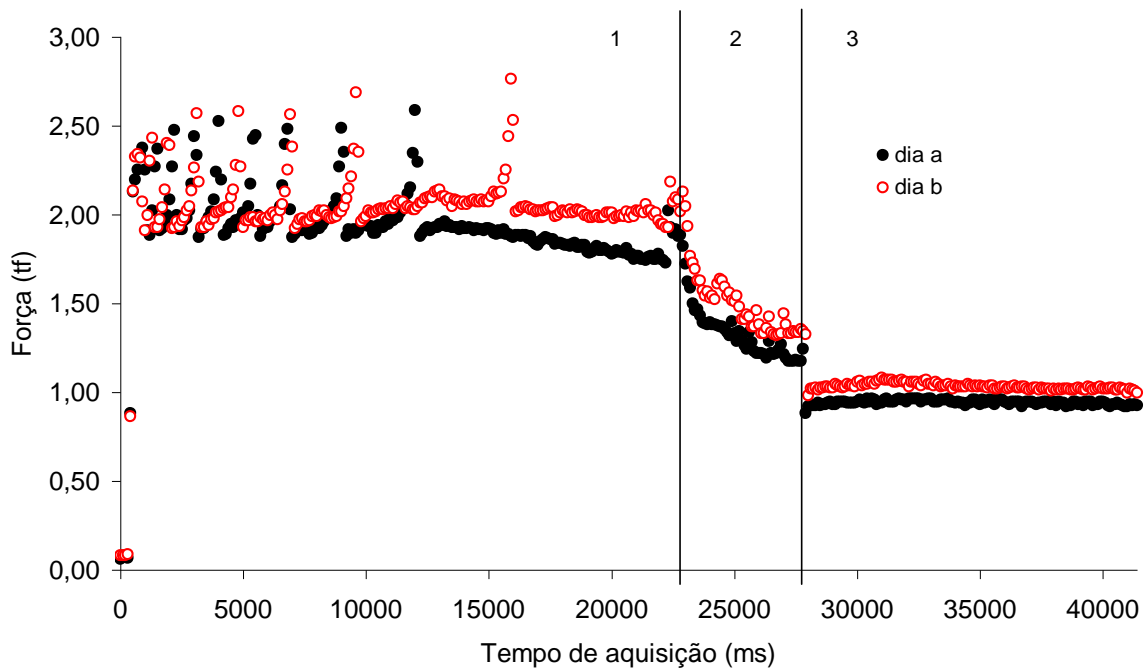


Figura 77 – Curvas de força em diferentes dias durante o movimento da mesa superior sem a presença de uma peça para conformação.

Os valores de força obtidos nos testes em vazio indicam que as massas da mesa superior, porta-ferramenta, êmbolo e ajuste do êmbolo com os anéis raspadores resultam num valor de força maior que zero. Como, os valores obtidos são inferiores ao fundo de escala da célula de carga, 7,5 tf (5% da capacidade máxima) e o sistema de monitoramento de força foi considerado adequado para os objetivos do projeto.

Para verificar a repetibilidade do equipamento, utilizou-se um par de ferramentas de aço ABNT H13, com dureza média de 561 ± 5 HV₃₀, superfície plana e retificada e como peça a ser conformada, um anel com diâmetro externo de 18 mm, diâmetro interno de 9 mm e espessura de 6 mm, em aço ABNT 1020, com dureza média de 138 ± 19 HV₅ e acabamento superficial resultante do processo de torneamento.

Os testes foram conduzidos para diferentes níveis de redução na espessura dos anéis (42 %, 56 % e 59 %), com velocidade constante de 3,5 mm/s, tempo de

permanência na posição de redução máxima do anel de 5 s e com a presença de um meio interfacial, graxa a base de lítio (graxa azul). Foram utilizados 5 anéis para cada nível de redução em espessura.

A Figura 78 mostra a curva de deslocamento da mesa superior durante a conformação dos anéis para cada um dos níveis de conformação. Pode-se observar que os valores absolutos de força aumentam com o aumento do nível de redução. Além disso, observa-se que a dispersão da força máxima de conformação aumentou com o aumento da força de redução e foi sempre inferior à resolução da célula de carga, o que demonstra a repetibilidade do equipamento.

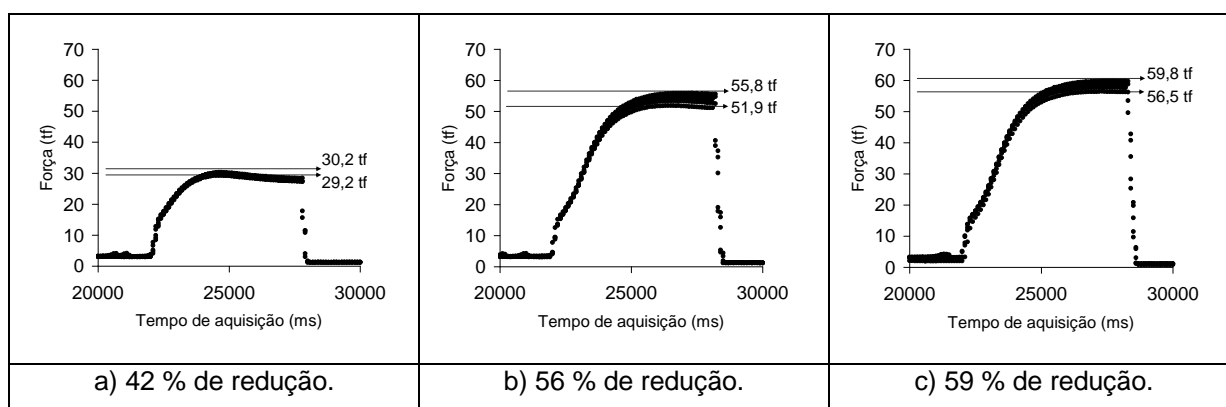


Figura 78 – Variação das curvas de força obtidas durante a conformação de 5 anéis em diferentes níveis de redução em espessura com graxa a base de lítio.

A Figura 79 apresenta as curvas de posição da mesa superior para os três níveis de conformação apresentados anteriormente. A variação da posição da mesa superior, para cada um dos três níveis de redução em espessura, é inferior a 0,05 mm.

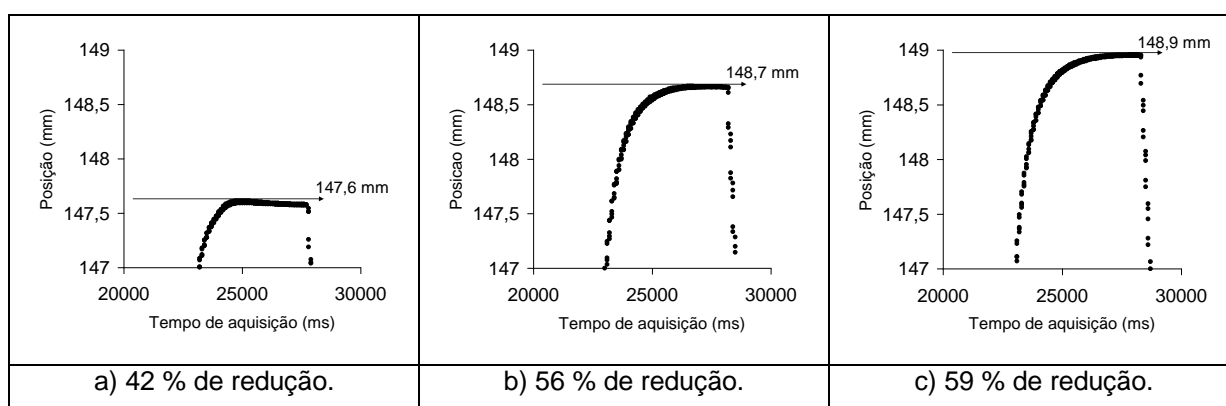


Figura 79 – Variação das curvas de posição obtidas durante a conformação de 5 anéis em diferentes níveis de redução em espessura.

Para verificar a sensibilidade do equipamento em diferentes meios lubrificantes, realizou-se um teste mantendo constante: a posição de conformação (em

148,9 mm), o número de repetições (5), a velocidade de descida, o tempo de conformação e a geometria e os materiais das ferramentas e dos anéis. A única variável foi o meio interfacial: graxa e óleo hidráulico ISO 100. A Figura 80 apresenta as curvas de posição e força obtidas neste ensaio.

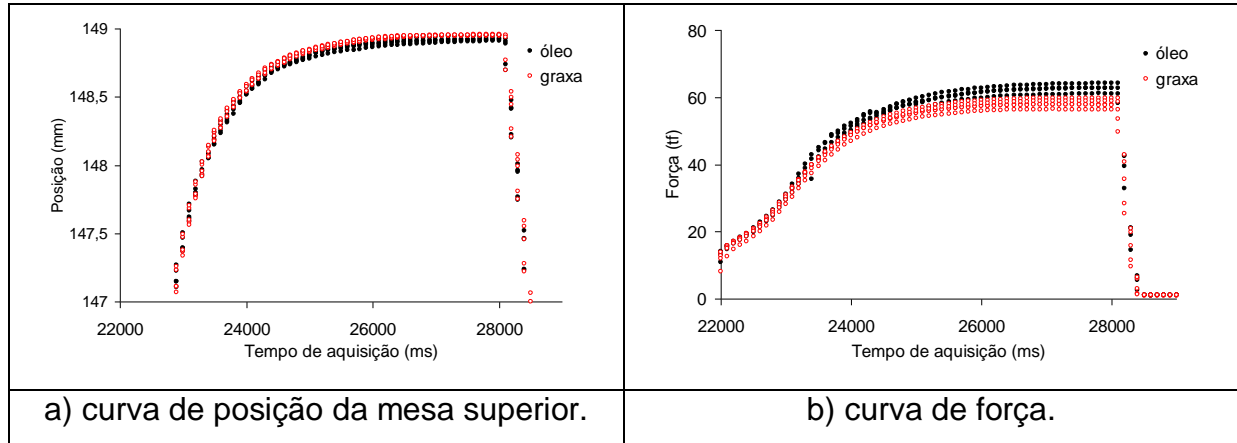


Figura 80 – Curvas de posição e força de anéis conformados com diferentes lubrificantes, graxa e óleo.

A curva de posição indica que, independentemente do meio lubrificante, a posição estabelecida no ensaio (148,9 mm) foi atingida. Porém, a medição das espessuras dos anéis após a conformação indicou diferenças. Os anéis conformados com graxa foram reduzidos em $59,3 \pm 0,5$ % enquanto aqueles conformados com óleo hidráulico foram reduzidos em $57,6 \pm 0,8$ % (média e desvio padrão, respectivamente).

Uma vez que a posição da mesa superior foi igual para as duas condições estudadas e que os anéis possuem a mesma espessura inicial, a diferença entre as espessuras após a conformação pode ser explicada pela diferença no comportamento elástico do conjunto estrutura do tribômetro, ferramentas e material conformado para as diferentes forças de compressão obtidas em virtude da alteração do meio lubrificante.

Observa-se, ainda, que a força máxima para conformar os anéis com graxa foi inferior à força máxima para conformar os anéis com óleo hidráulico (Figura 80b).

Devido ao resultado do retorno elástico no teste com óleo ser maior que no teste com graxa e assim também com a força máxima de conformação, novos testes

foram conduzidos a fim de encontrar uma relação entre a força máxima de conformação e o retorno elástico.

Para isso, foram mantidos constantes os seguintes fatores: velocidade de conformação (3,5 mm/s), tempo de conformação (5 s), geometria da ferramenta (plana), material da ferramenta (aço ABNT H13 – $561 \pm 5 \text{ HV}_{30}$), geometria do material a ser conformado (anel – diâmetro externo de 18 mm, diâmetro interno de 9 mm e espessura de 6 mm) e material a ser conformado (aço ABNT 1020 – $138 \pm 19 \text{ HV}_5$). As variáveis do teste foram: i/ topografia da superfície plana da ferramenta (polida – com abrasivo de diamante de $3 \mu\text{m}$), ii/ acabamento da superfície plana dos anéis (lixada com abrasivos de Al_2O_3 com tamanho médio de $16 \mu\text{m}$), iii/ ausência de meio lubrificante e iv/ 23 ensaios.

Vale destacar que as superfícies de conformação das ferramentas foram polidas entre cada conformação realizada.

A Figura 81 apresenta a diferença entre a espessura do anel após a conformação e a distância entre as ferramentas superior e inferior no ponto de máxima força de conformação.

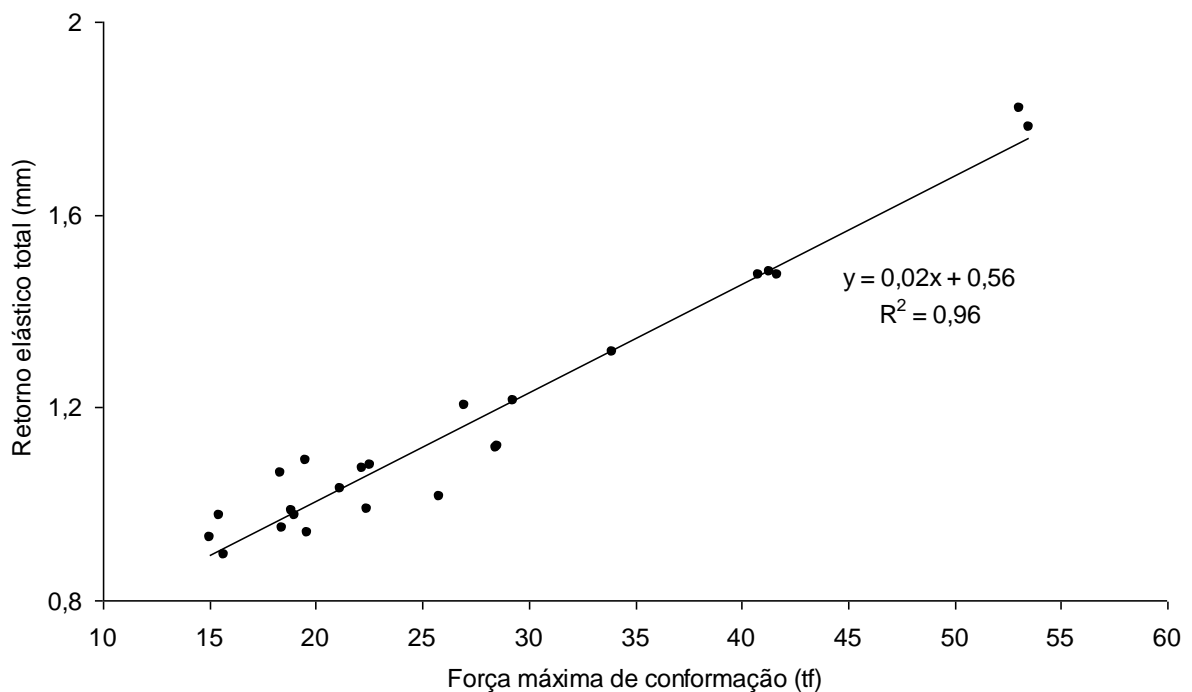


Figura 81 – Retorno elástico do conjunto tribômetro mais anel em função da força máxima de conformação. Ensaio a seco e ferramentas polidas a cada anel conformado.

A variação do comportamento elástico do conjunto tribômetro/ferramenta polida/anel lixado/ sem lubrificação para os 23 anéis conformados, apresentou uma relação linear com a força máxima de conformação (R^2 de 0,96).

Com estes ensaios considerou-se concluída a etapa de verificação do funcionamento do tribômetro para estudos de conformação mecânica.

A fim de verificar os resultados em condições distintas, foram realizados ensaios com lubrificante sólido a base de politetrafluoretileno (teflon em fita) e sem lubrificante para ferramentas polidas. De acordo com os diferentes níveis de redução na espessura e variação do diâmetro interno do anel obteve-se os valores do fator de atrito conforme apresentado na Figura 82.

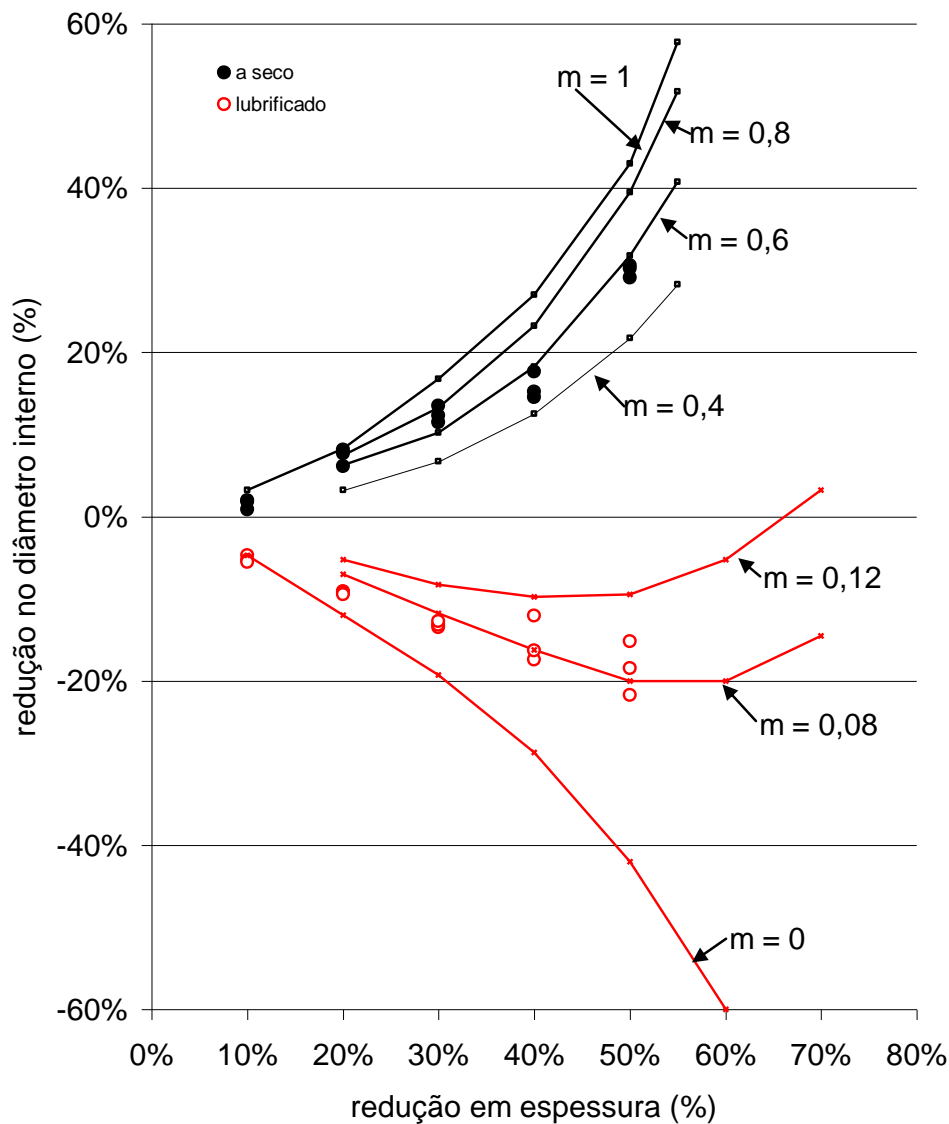


Figura 82 – Curvas do fator de atrito de Male e DePierre e valores experimentais de um ensaio lubrificado e outro a seco.

Pode ser constatado, conforme a literatura, que há uma condição de lubrificação tal que o escoamento do anel é igual a de um disco solido, isto é, todos os pontos internos fluem no sentido radial em direção ao raio externo, o que promove o aumento do diâmetro interno.

APÊNDICE B – Alterações superficiais das ferramentas utilizadas no ensaio de compressão do anel

A Figura 83 apresenta as alterações superficiais da ferramenta polida após conformação de um anel com 20% de redução em altura e velocidade de descida da ferramenta superior de 3 mm/s.

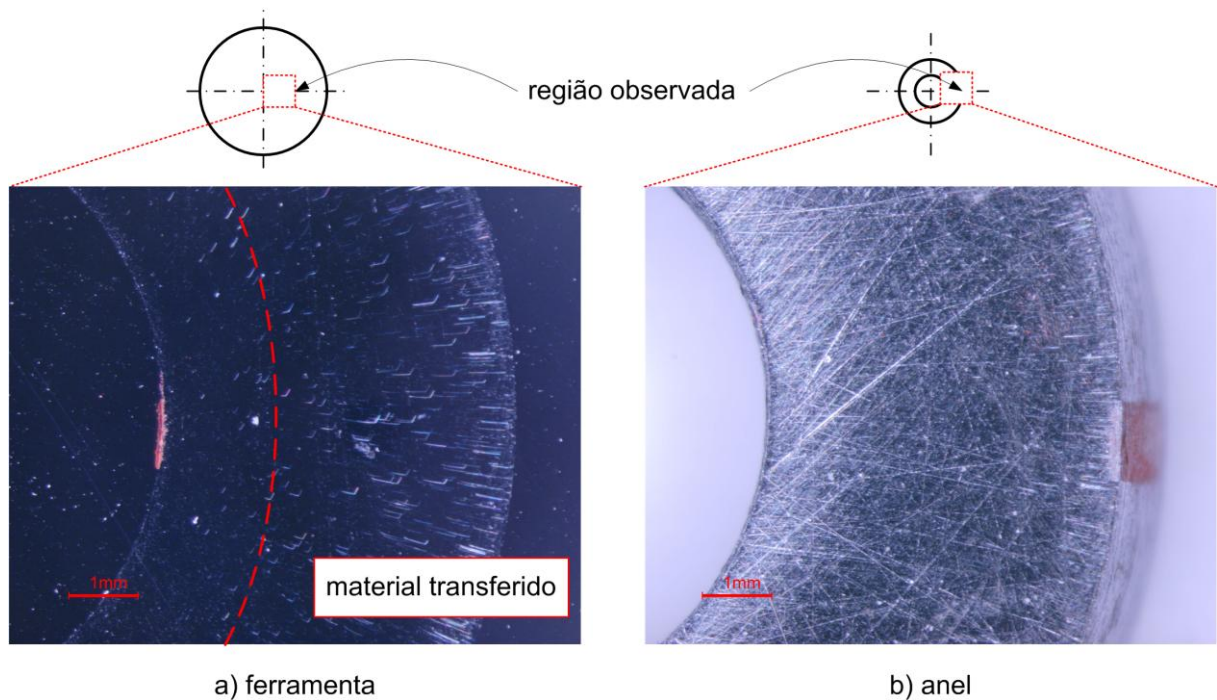


Figura 83 – Superfície da ferramenta inferior inicialmente polida (a) e do anel (b) após ensaio com redução em altura de 20% e velocidade de descida da ferramenta superior de 3 mm/s.

APÊNDICE C – Padrão de deformação dos anéis com lubrificação

A Figura 84 apresenta o padrão de deformação do anel conformado com a ferramenta polida, 50% de redução em altura e velocidade de 3 mm/s.

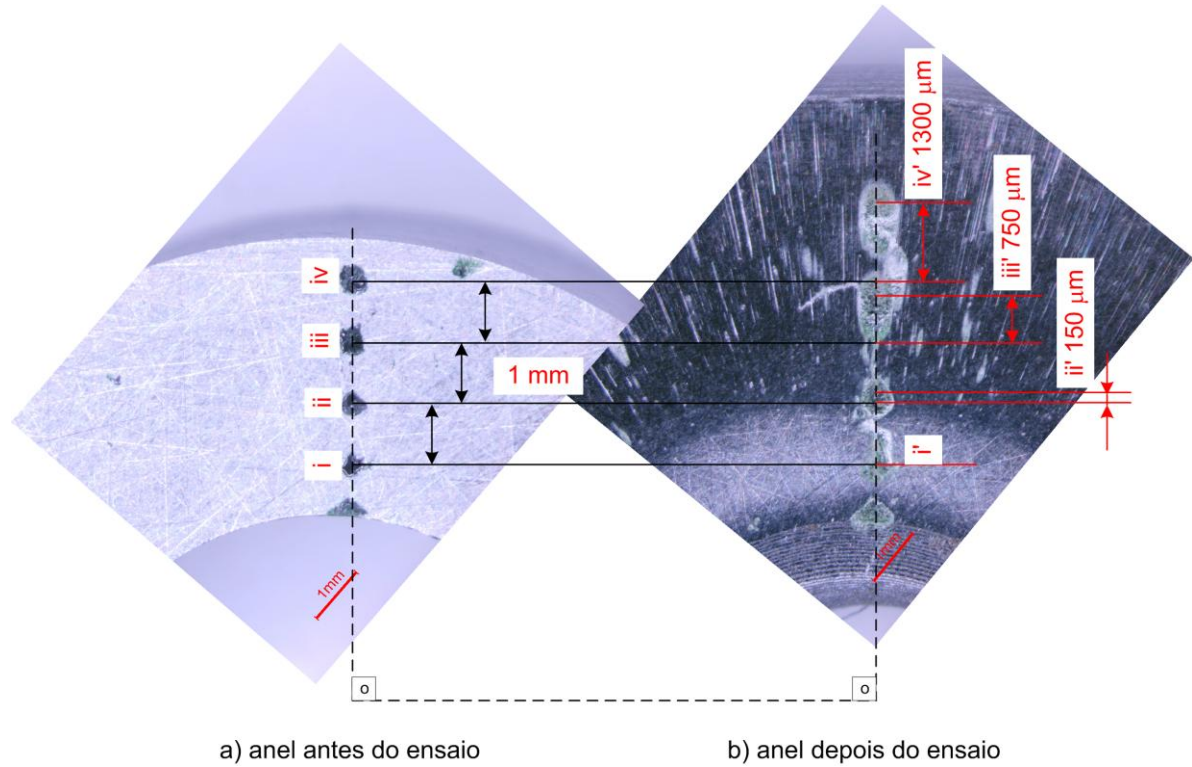


Figura 84 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com a ferramenta polida, 50% de redução em altura e velocidade de 3 mm/s.

A Figura 85 apresenta o padrão de deformação do anel conformado com a ferramenta polida, 50% de redução em altura, velocidade de 3 mm/s e lubrificado com politetrafluoretileno.

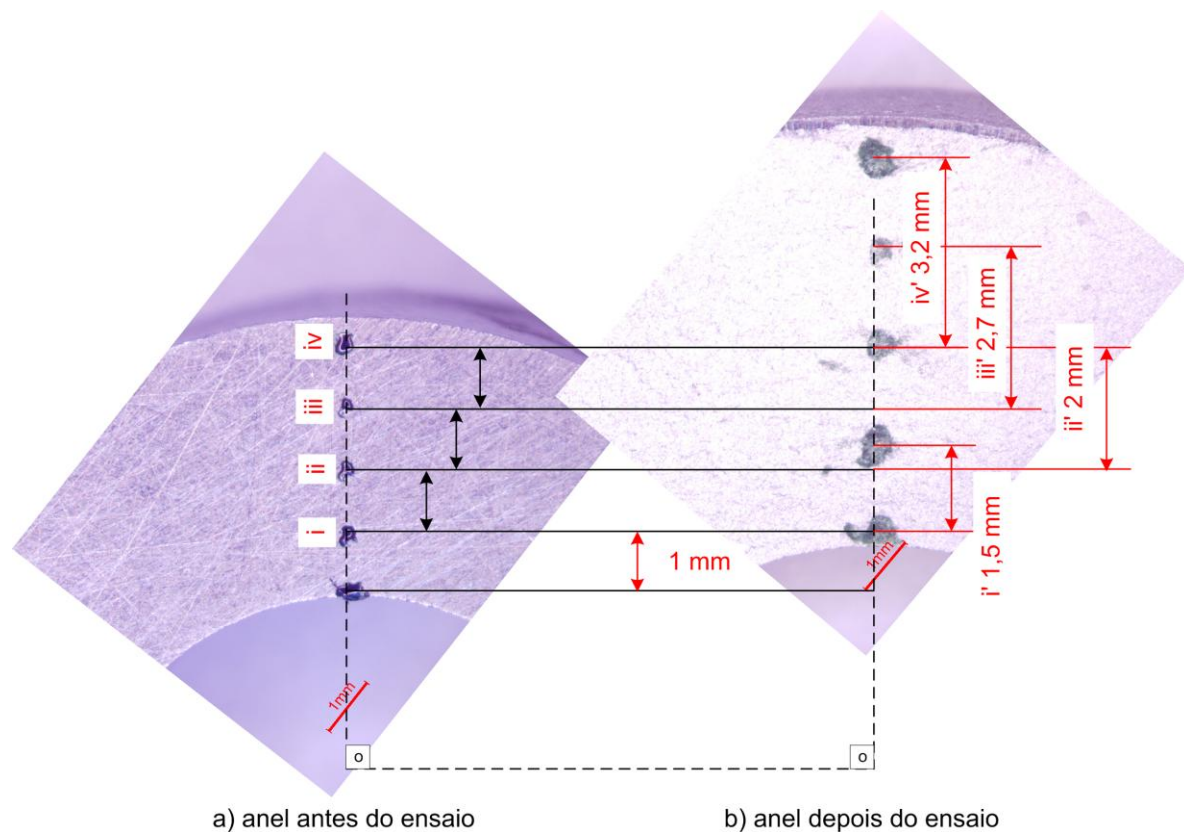


Figura 85 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com a ferramenta polida, 50% de redução em altura, velocidade de 3 mm/s e lubrificado.

A Figura 86 apresenta o padrão de deformação do anel conformado com a ferramenta topo2, 50% de redução em altura, velocidade de 3 mm/s e lubrificado com politetrafluoretileno.

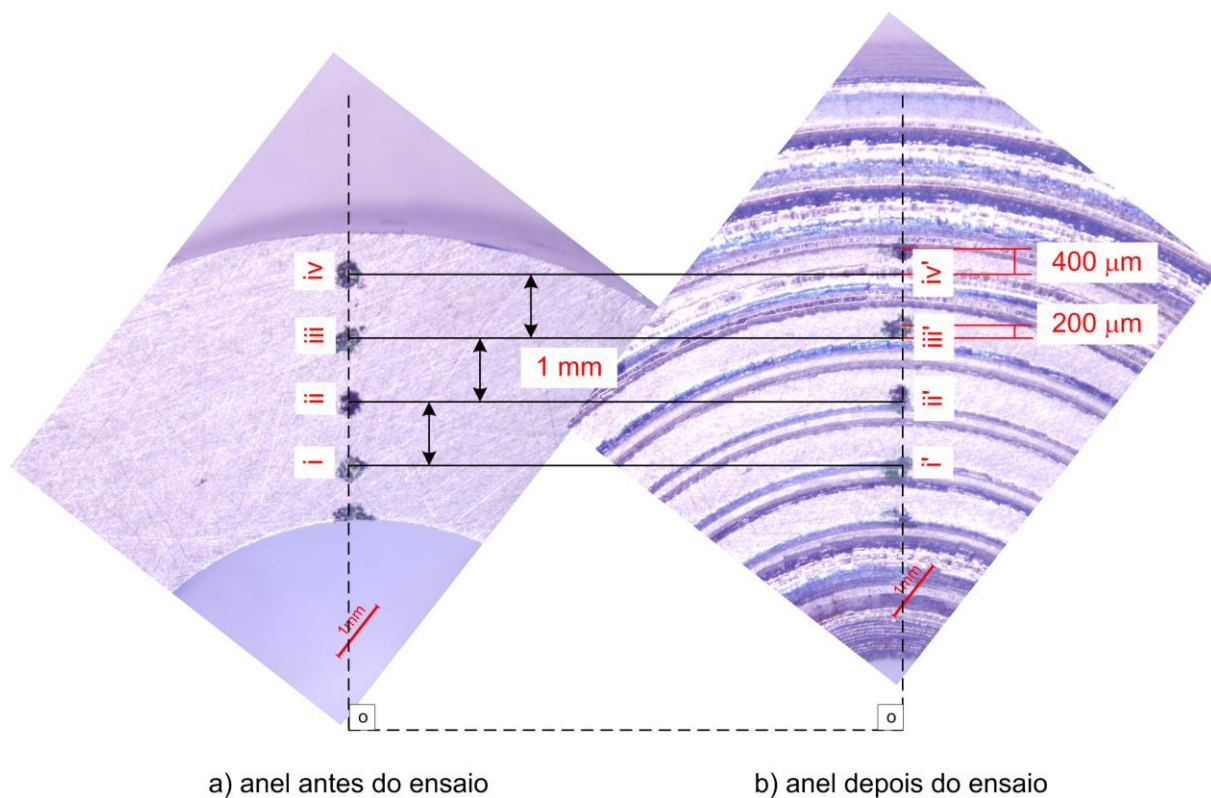


Figura 86 – Deslocamento das marcas no anel após ensaio com a ferramenta topo2, 50% de redução em altura, velocidade de 3 mm/s e lubrificado.

A presença do lubrificante possibilitou identificar o deslizamento entre a superfície do anel e a superfície da ferramenta. A Figura 87 apresenta os valores do coeficiente de atrito medidos nos ensaios preliminares realizados com lubrificante politetrafluoretileno.

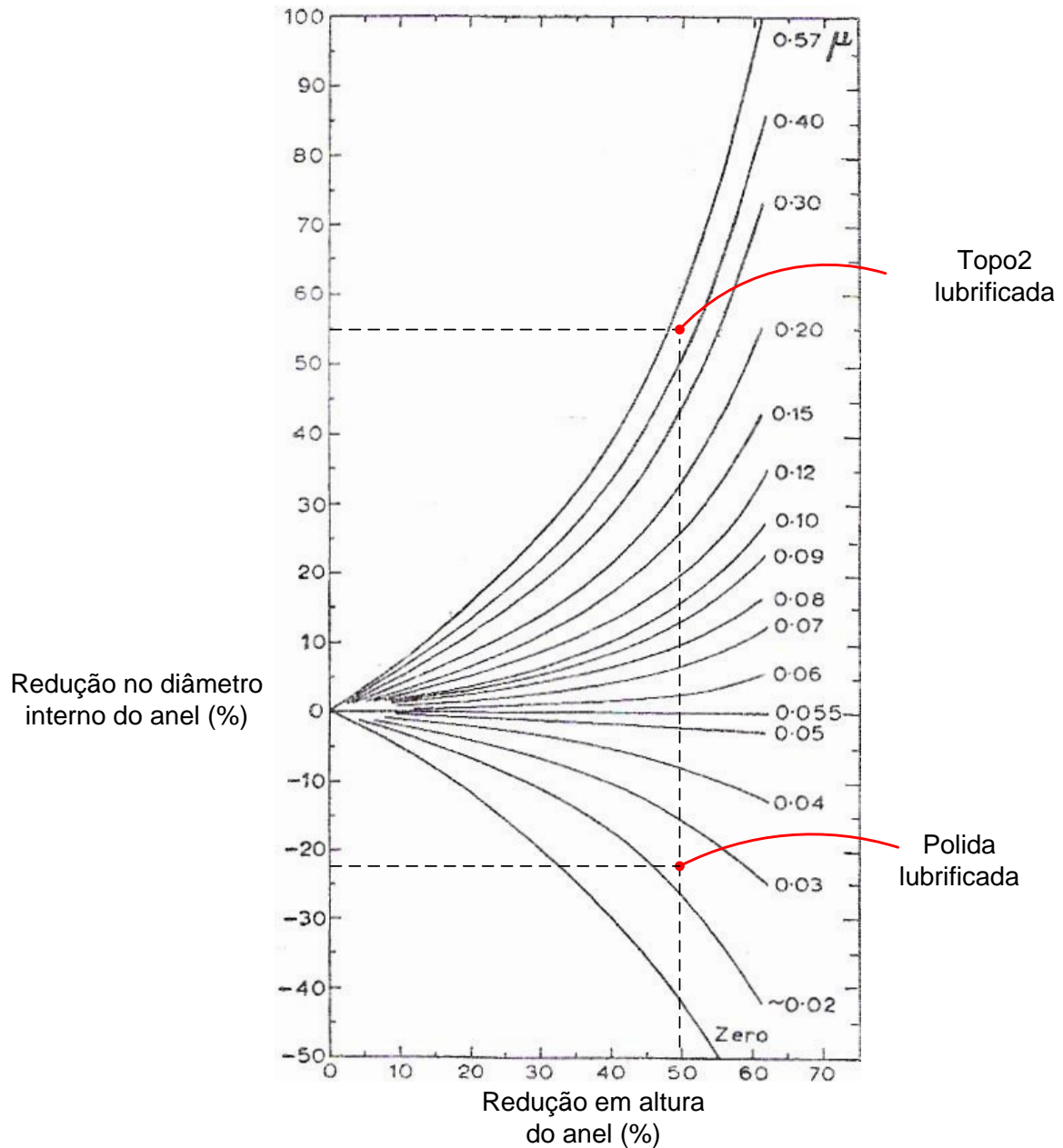


Figura 87 – Curvas de calibração de Male e Cockcroft (1964-65) e valores de redução do diâmetro interno do anel conformado com a ferramenta topo2 e polida, 50% de redução em altura, velocidade de 3 mm/s e lubrificado.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)