

EFEITO DA RUGOSIDADE NO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO A FRIO

Thales Sardinha Garcia Souza^{1,2}, Márcio Henrique Pereira^{1,2}, Roberto Martins de Souza²

¹Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.

²Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

E-mails: thales.souza@amtektekfor.com, marcio.pereira@amtektekfor.com,
robertosouza@usp.br

RESUMO

O custo de qualquer produto forjado para indústria automobilística é altamente influenciado pelos custos envolvidos durante o projeto e construção das ferramentas de conformação. Idealmente, essas ferramentas devem durar um número significativo de ciclos de conformação, de forma a diluir seu custo no maior número de peças possível. Diversos parâmetros afetam o comportamento do desgaste, sendo que as indústrias de forjados abordam as questões tribológicas de formas distintas. Além disso, um mal entendimento desses parâmetros pode levar à um desgaste de ferramenta prematuro.

Esse trabalho analisa o efeito da rugosidade no desgaste de punções de conformação a frio. O tribossistema adotado é a segunda operação de uma prensa mecânica horizontal e consiste em um punção de aço M2 endurecido em movimento relativo contra uma peça de aço SAE 10B22 normalizado. Foram fabricados quinze punções com três níveis de rugosidade e seus desgastes foram medidos após 52.000 e 102.000 ciclos de conformação. Um perfilômetro ótico 3D e um microscópio eletrônico de varredura foram utilizados para acessar as características superficiais dos punções, antes e após dos lotes de produção.

Os resultados mostraram que os punções de maior rugosidade falharam prematuramente enquanto os punções mais lisos e os de rugosidade intermediária apresentaram desgaste equivalentes.

INTRODUÇÃO

Os processos de conformação podem ser classificados em função da temperatura em que são realizados, e são comumente divididos em conformação a frio, a morno e a quente [1]. Os produtos obtidos pelo processo de conformação variam desde geometrias simples como rebites, porcas e parafusos, até formas mais complexas como cubos de embreagem, juntas homocinéticas, engrenagens, fixadores especiais, eixos estriados, entre outras [2]. A fabricação desses produtos prescinde necessariamente de um projeto e da construção das ferramentas de conformação, como punções, matrizes, buchas, extratores e garras. Parte da movimentação econômica gerada pelas forjarias depende do desenvolvimento das ferramentas de conformação [3]. Além disso, o preço dos produtos forjados depende fortemente do custo e

da durabilidade do ferramental, ou seja, as ferramentas das prensas devem durar o máximo possível para que seus custos sejam diluídos em uma grande quantidade de produtos confeccionados. Nas últimas décadas, foram desenvolvidas diversas ligas de aços ferramenta que permitiram aumentar a dureza, a tenacidade e a resistência ao desgaste das ferramentas de conformação, contribuindo assim, para aumentar sua durabilidade [4]. Outros desenvolvimentos com o mesmo propósito foram conduzidos focando em melhorias no processo de fabricação das ferramentas, seja por meio do uso de filmes finos ou por especificações de rugosidade superficial. Nas forjarias, é comum ouvir que quanto mais lisa a superfície da ferramenta, melhor. Porém, quanto mais lisa, maior o tempo e o custo envolvido na sua produção. Portanto, um estudo que analise o efeito da rugosidade superficial no desgaste das ferramentas de conformação é de alta relevância econômica.

Relacionar o efeito da rugosidade com o desgaste de dois corpos em contato por deslizamento representa uma grande dificuldade devido ao fato que o acabamento superficial inicial é alterado durante o período de *running-in*, e as particularidades de cada tribossistema podem resultar em desgastes distintos para corpos com a mesma topografia inicial [5]. As formas mais comuns de desgaste em ferramentas de conformação a frio são abrasão, adesão e a fadiga de superfície. A abrasão ocorre quando o material é removido ou deslocado da superfície do corpo por partículas duras, ou então quando protuberâncias presentes no contracorpo são forçadas e deslizadas ao longo da superfície do corpo [6]. As partículas duras podem remover material da superfície pelos mecanismos de microcorte, microsulcamento, microfratura, despaclamento ou fadiga por repetidas deformações plásticas [7]. Adesão é definida como o fenômeno resultante de forças atrativas entre duas superfícies em contato. Esse fenômeno é governado por ligações iônicas, covalentes, metálicas ou ligações de van der Waals, sendo que a intensidade dessas ligações depende da afinidade química entre os corpos em contato [5]. Quando duas superfícies se tocam, o contato se dá inicialmente entre as asperezas. Com o aumento da carga normal e subsequente movimento relativo, as áreas reais de contato entre as superfícies podem formar junções adesivas. O tamanho dessas junções aumenta por deformação plástica conforme ocorre o movimento. Eventualmente, ocorre o cisalhamento das junções no material mais fraco, o que leva à uma transferência de material de uma superfície para a outra. O desgaste devido a fadiga de superfície é caracterizado por formação de trincas e deslocamento de material causado por repetidos carregamentos cíclicos em superfícies sólidas [5]. Todos os tipos de desgaste citados acima são, de alguma forma, influenciados pela rugosidade das superfícies em contato.

Zum Gahr [5] apresenta uma relação entre rugosidade e intensidade de desgaste para corpos metálicos submetidos ao deslizamento. No contato não lubrificado, o desgaste devido à abrasão é reduzido à medida que a rugosidade diminui. A intensidade do desgaste dos pares em contato aumenta devido à adesão quando a rugosidade fica abaixo de um valor crítico. Para contatos lubrificados, a intensidade do desgaste só diminui se a espessura do filme lubrificante for suficiente para evitar o contato entre asperezas. Sedlacek, Podgornik e Vizintin [8] conduziram estudos sobre a influência do acabamento superficial na rugosidade, no atrito e no desgaste. Por meio de ensaios pino-disco com corpos de aço 100Cr6 com diferentes topografias em movimento relativo à uma esfera de Al_2O_3 , os autores concluíram que superfícies fabricadas com processos de fabricação distintos apresentam comportamentos tribológicos totalmente diferentes, ainda que as superfícies apresentem valores de rugosidade similares. Schey [9] correlacionou o efeito da rugosidade de matrizes no coeficiente de atrito por meio de ensaios de compressão de anel, utilizando lubrificantes de baixa e de alta viscosidade, sendo que a força de atrito, a qual é proporcional ao coeficiente de atrito, é

prejudicial à durabilidade das ferramentas. Schey concluiu que a rugosidade das matrizes é geralmente indesejada e cuidados devem ser tomados no acabamento superficial das ferramentas para que as marcas de polimento estejam na direção de deslizamento de material.

Em contraste aos trabalhos apresentados por Zum Gahr [5], Sedlacek [8] e Schey [9], Magri [10] mostrou que para um caso de forjamento vertical a quente em matriz aberta, as matrizes mais rugosas apresentaram o menor desgaste. Para isso, ele construiu matrizes com quatro tipos de topografia e analisou as superfícies após 50 e 125 ciclos de conformação. Por meio de comparações visuais feitas com o auxílio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), Magri concluiu que nem sempre “a ferramenta mais lisa é a melhor”. O autor explica que a matriz mais rugosa apresentou menor desgaste devido a esta apresentar maior potencial para reter o lubrificante, o que evita o contato direto entre asperezas, mantendo o regime de lubrificação hidrodinâmico e conseqüentemente reduzindo o coeficiente de atrito entre as ferramentas. Ou seja, para esse tribossistema particular foi possível combinar uma manufatura de ferramenta mais simples e com menor custo de fabricação que resultou na redução do desgaste.

Esse trabalho analisa do efeito da rugosidade no desgaste de ferramentas de conformação a frio utilizando punções de aço M2 em movimento relativo contra uma peça de aço SAE 10B22. Partindo deste objetivo principal, busca-se também contribuir para redução de custos associados à fabricação das ferramentas por meio da otimização de alguma fase do processo de fabricação dos punções, ou, idealmente, eliminando uma das fases.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente trabalho, foi utilizada uma prensa mecânica excêntrica multi-estágios de forjamento horizontal onde são fabricados diversos produtos conformados a frio. O objeto de estudo desse trabalho é um punção de segunda operação em movimento relativo contra um determinado produto forjado. A Figura 1 apresenta o tribossistema analisado, onde o punção é o corpo, a matéria-prima ou peça é o contra-corpo, o meio interfacial é óleo e o meio circunvizinho é ar. O efeito da rugosidade no desgaste das ferramentas foi analisado com base em informações adquiridas por meio de diversos lotes de produção em série do mesmo produto forjado.

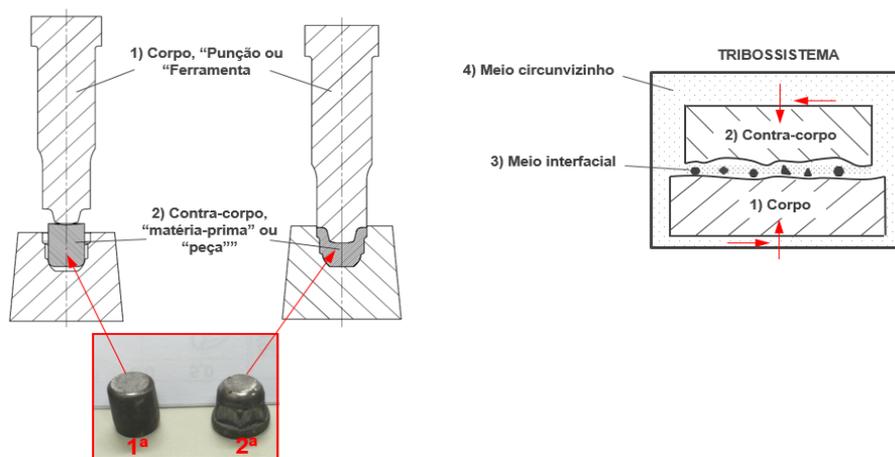


Figura 1 - Tribossistema analisado: 2ª operação

A Figura 2 apresenta os quinze punções confeccionados com três níveis de rugosidade variando em até uma ordem de grandeza, sendo cinco punções sem usinagem de acabamento gerando um R_a entre 1,5 e 2,5 μm , cinco punções com usinagem de acabamento e R_a entre 0,5 e 0,8 μm e cinco punções polidos com R_a entre 0,1 e 0,3 μm . Todos os punções foram usinados em tornos CNC a partir da mesma barra de aço e foram submetidos simultaneamente ao mesmo tratamento. A ordem de entrada em máquina dos punções foi: 1,6,11,2,7,12,3,8,13 e assim sucessivamente. Essa ordem foi propositalmente escolhida para eliminar a influência de uma eventual variável não identificada na conclusão da relação entre topografia e desgaste de ferramenta.

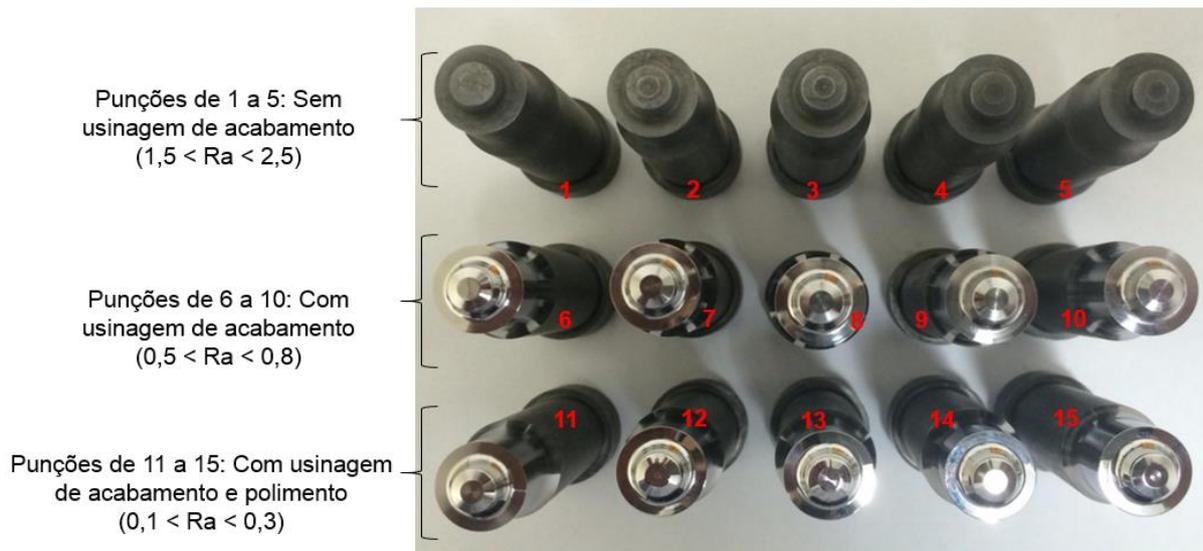


Figura 2 - Punções de 2ª operação com topografias distintas utilizados no estudo

A matéria-prima utilizada na fabricação dos punções é um aço similar ao AISI M2, o qual é um aço ferramenta recomendado para fabricação de ferramentas para operações de corte e conformação a frio. Sua composição química, com a presença de tungstênio, molibdênio e vanádio garante a este material um nível de dureza elevado após o revenimentos, garantindo retenção da capacidade de corte e das propriedades mecânicas durante o serviço. As ferramentas foram submetidas simultaneamente aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento de forma a conferir alta resistência mecânica e resistência ao desgaste. Para avaliar as propriedades mecânicas, foi realizado ensaios de tração e de dureza Vickers nas seções transversal e longitudinal do punção. Para a dureza, o equipamento utilizado foi um microdurômetro UHL VMHT, com uma carga de 500 gf, velocidade de ensaio de 50 $\mu\text{m/s}$ e um espaçamento entre as medições de quatro vezes a diagonal da impressão conforme norma ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008. Em seguida, foi realizada a análise metalográfica de uma amostra do punção para avaliar a microestrutura.

Antes de utilizar as ferramentas para produzir um lote do item escolhido, todos os punções foram pesados e passaram por análise dimensional em perfilômetro de bancada. Em seguida, as rugosidades do topo e da lateral da ferramenta foram verificadas em um rugosímetro de agulha e em um perfilômetro ótico 3D. A Figura 3 mostra as regiões onde as rugosidades foram analisadas, sendo três medições no topo da ferramenta e três medições na lateral. Essas regiões foram escolhidas pois a dinâmica do contato tende a ser diferente

durante o processo de conformação, sendo que o topo está mais suscetível à altas pressões de contato enquanto na lateral é esperada maior força tangencial. Em função da diferença do tipo de carregamento causada pela geometria da ferramenta, o desgaste torna-se diferente nessas regiões.

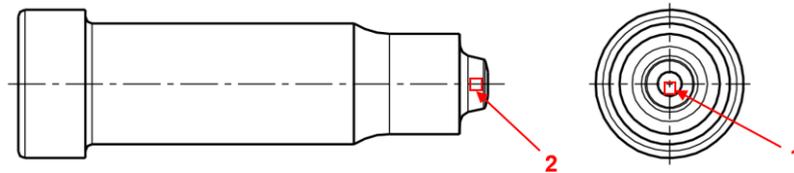


Figura 3 - Regiões de avaliação da rugosidade

A Figura 4 resume os equipamentos utilizados na análise das ferramentas novas e usadas. Inicialmente todos os punções passaram por um processo de limpeza, iniciado com papel embebido com acetona, seguido de ultrassom e finalizado com jato de ar. Após o procedimento de limpeza, as ferramentas foram pesadas em balança de precisão (a), seguido de análise dimensional em perfilômetro (b), análise da topografia em rugosímetro (c), análise da topografia em perfilômetro ótico (d) e análise da superfície em microscópio eletrônico de varredura (e). O ciclo de (a) até (e) foi repetido para todas as ferramentas após 52.000 e 102.000 ciclos de produção.

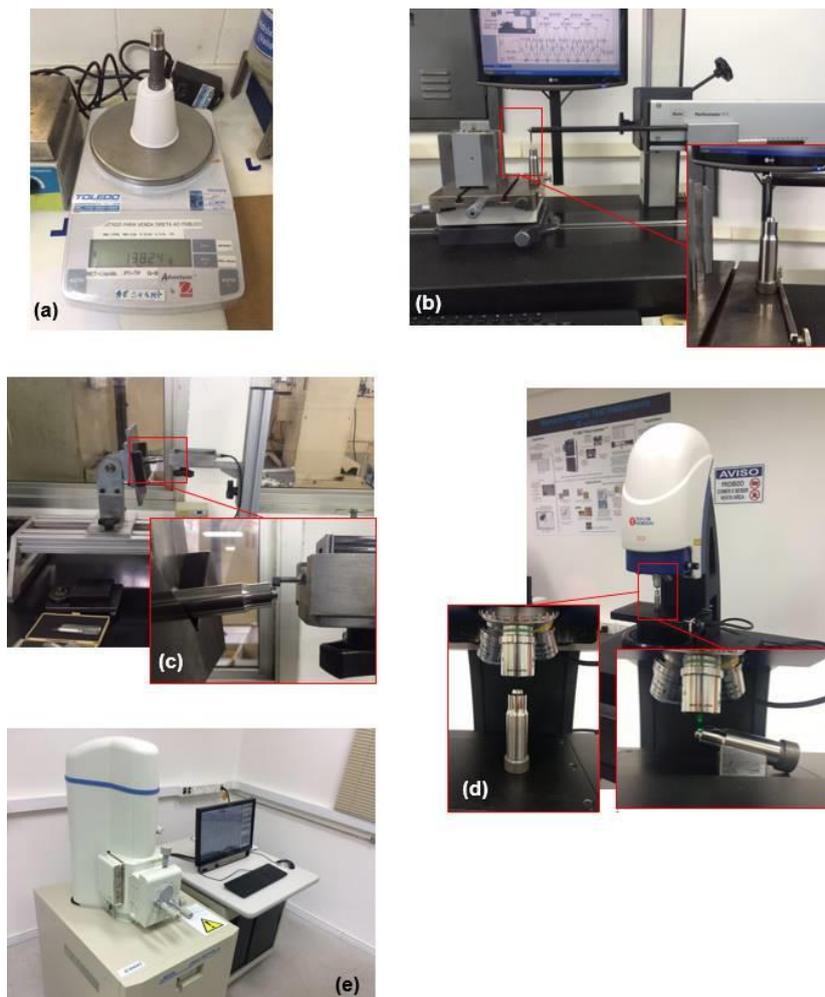


Figura 4 - Equipamentos utilizados a) Balança de precisão, b) Perfilômetro, c) Rugosímetro, d) Perfilômetro ótico 3D, e) Microscópio eletrônico de varredura

Todas as dimensões do punção que poderiam sofrer alterações geométricas devido ao contato cíclico com o contra-corpo foram monitoradas. A Figura 5 apresenta a geometria do punção e as características de 1 a 8 monitoradas ao decorrer do trabalho.

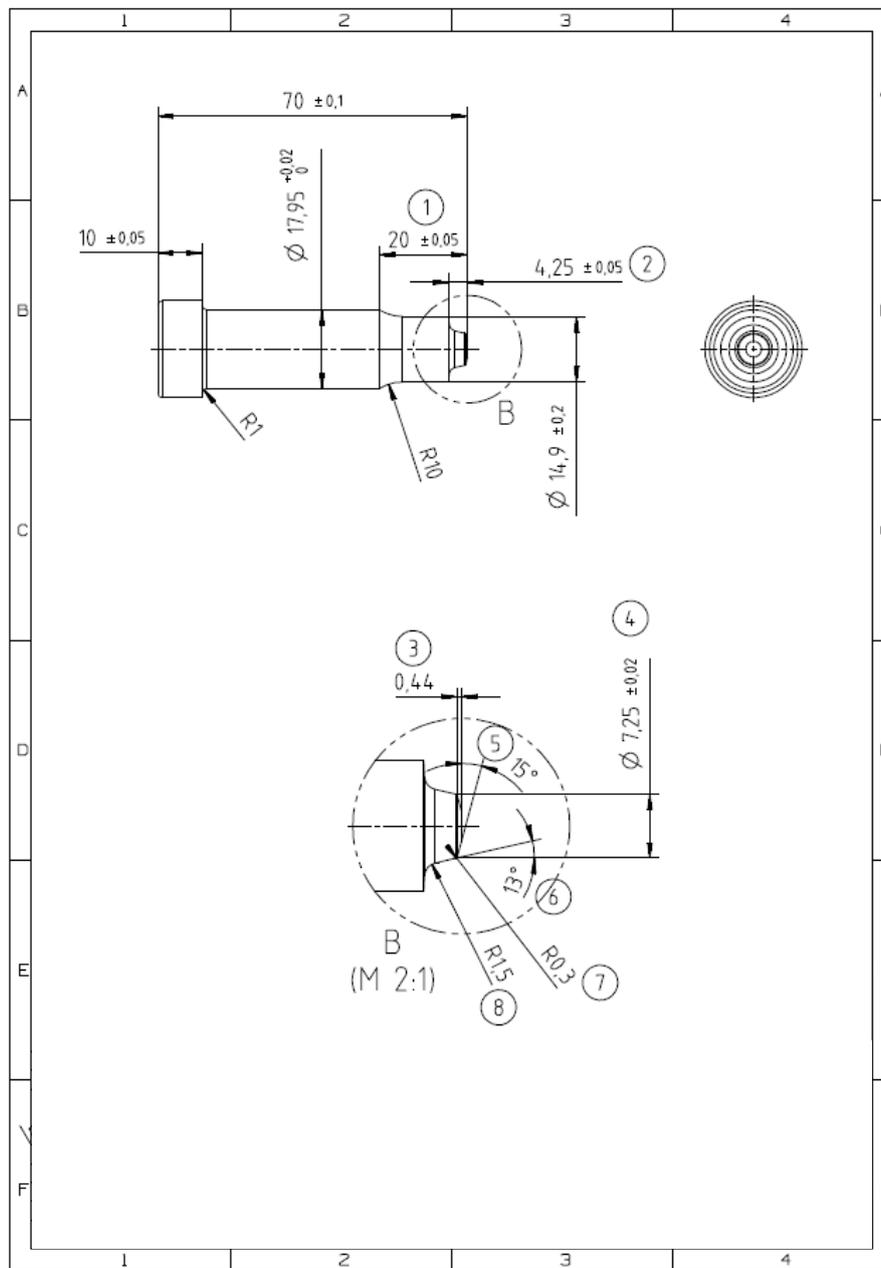


Figura 5 - Geometria do punção de segunda operação. As características de 1 a 8 sofrem desgaste ao longo da produção seriada e foram monitoradas ao decorrer do trabalho

A matéria-prima utilizada na fabricação da peça é o aço SAE 10B22. Esse material é um aço baixo carbono com adição de boro, o qual é muito utilizado na fabricação de fixadores e peças conformadas a frio que sofrem algum tipo de tratamento térmico durante seu processo de fabricação. O boro é adicionado ao aço em baixas quantidades, com a função de aumentar a temperabilidade do aço sem alterar outras propriedades mecânicas. Desta forma, em peças conformadas a frio e temperadas, evita-se a utilização de aços ligados, que possuem alta resistência mecânica e difícil conformação.

Durante a conformação a frio, o material é submetido a um alto grau e taxa de deformação. Para viabilizar o processo, é necessário um pré-tratamento da matéria-prima, de forma a garantir a conformabilidade adequada do material e minimizar os riscos de trincas e quebras de ferramentas. Soma-se a isso a necessidade de bitolas específicas que variam conforme a peça a ser produzida, sendo, portanto, comum a utilização do processo de beneficiamento apresentado na Figura 6.

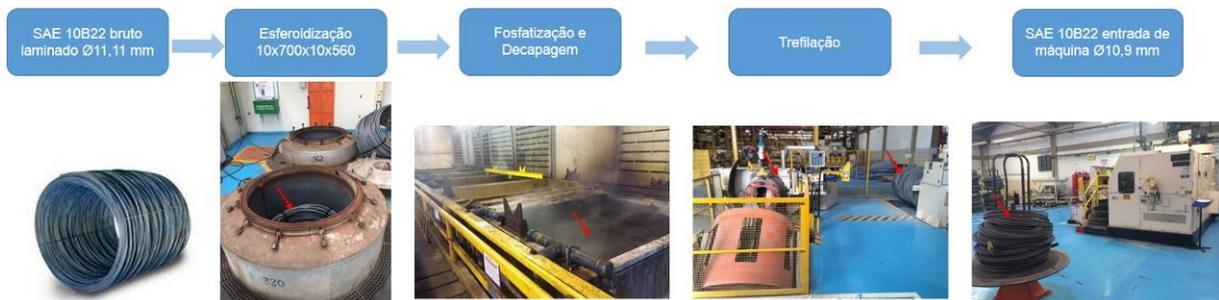


Figura 6 - Processo de beneficiamento da matéria-prima

O processo de beneficiamento da matéria-prima inicia-se com o tratamento térmico de esferoidização, o qual consiste na manutenção do material a temperaturas próximas da crítica ($T=723\text{ }^{\circ}\text{C}$) por tempos longos, de forma que ocorra difusão do carbono presente no aço por um processo de coalescimento.

Para analisar a influência do processo de beneficiamento nas propriedades da matéria-prima, foram conduzidos ensaios de tração, de dureza, de metalografia e composição química no material na condição de entrada de máquina. Em função dos resultados desses ensaios, a matéria-prima pode ser utilizada na fabricação do item ou então deve ser destinada à fabricação de outro produto caso não atenda os critérios de qualidade especificados pela empresa. Com exceção da composição química, todas as outras propriedades dependem da eficiência do processo de beneficiamento apresentado na Figura 6. Além da análise da matéria-prima em condição de entrada de máquina, analisou-se também a variação de dureza do contra-corpo para verificar o aumento de dureza próximo à superfície devido ao encruamento gerado pelo processo de conformação. A Figura 7 apresenta as seções transversais da contra-peça medidas antes e após a segunda operação de conformação. Os losangos pretos ilustram as regiões aproximadas onde as impressões foram realizadas.

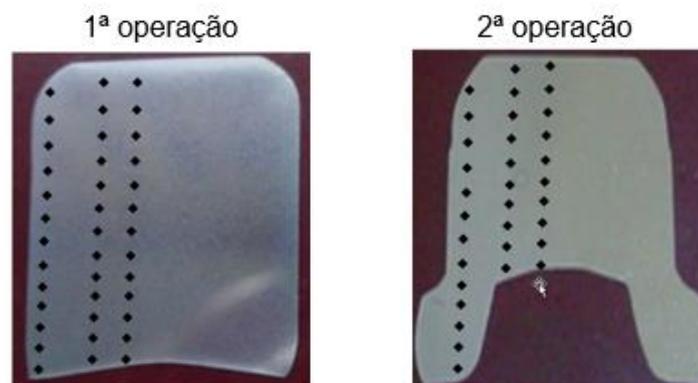


Figura 7 - Seção transversal da contra-peça e regiões de dureza medição de dureza

RESULTADOS

Todos os punções com Ra entre 1,5 e 2,5 μm falharam prematuramente com menos de 100.000 ciclos, sendo que o modo de falha aparenta ser o mesmo. Essa falha prematura, observada apenas nos punções mais rugosos, pode estar relacionada com a rugosidade inicial das ferramentas. Uma vez que os punções mais rugosos não atingiram um número mínimo de ciclos que possibilitasse comparar seu desempenho tribológicos com os demais punções, as análises subsequentes de perda de massa e alteração de geometria serão apresentadas apenas para as ferramentas que passaram por usinagem de acabamento (punções 6 a 10), e para as ferramentas que passaram por polimento (punções de 11 a 15). Até o presente momento, os punções 6, 7, 11 e 12 já foram submetidos à 100.000 ciclos, enquanto os punções 8, 9, 13 e 15 foram submetidos à 50.000 ciclos. Estes últimos atingirão 100.000 ciclos nos próximos meses conforme necessidade do cliente em consumir as peças produzidas. Os punções 5, 10 e 14 foram propositalmente preservados para analisar o dano superficial após um número baixo de ciclos a ser determinado, possivelmente entre 0,1% e 1% da vida nominal do punção, a fim de verificar se após essa quantidade de ciclos o possível benefício gerado por uma superfície inicialmente mais lisa permanece válido.

A Figura 8 apresenta a variação das massas dos punções nas condições novos, após 52.000 ciclos e 102.000 ciclos. As linhas contínuas representam os punções com rugosidade Ra entre 0,5 e 0,8 μm , enquanto as linhas tracejadas representam os punções com rugosidade Ra 0,1 a 0,3 μm . Os punções 6 e 7 que passaram apenas por usinagem de acabamento perderam respectivamente 0,05 g e 0,06 g após 102.000 ciclos, enquanto os punções 8 e 9 perderam respectivamente 0,03 g e 0,02 g após 52.000 ciclos. Os punções 11 e 12 que passaram por polimento após usinagem perderam respectivamente 0,05 g e 0,06 g após 102.000 ciclos, e os punções 13 e 15 perderam respectivamente 0,02 g e 0,02 g após 52.000 ciclos. Até o momento não foi observada diferença significativa entre as ferramentas usinadas e as polidas no que tange à perda de massa.

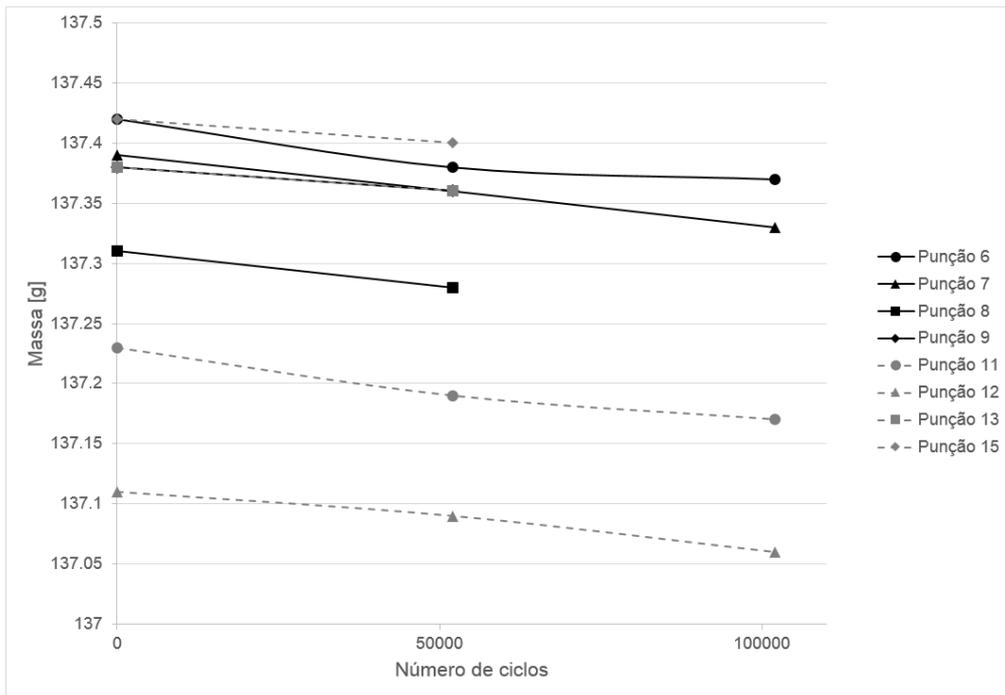


Figura 8 - Variação de massa dos punções

Entre todas as dimensões de projeto da ferramenta apresentadas na Figura 5, a característica 4, referente ao diâmetro de 7,25 mm, é a mais crítica devido à sua importância para as operações subsequentes. Um diâmetro muito menor do que o especificado na segunda operação pode levar à flambagem do punção de terceira operação e, portanto, é uma característica que exige monitoramento ao decorrer da produção em série. A Figura 9 mostra a variação dimensional do diâmetro de 7,25 mm gerado pelo desgaste após 52.000 e 100.000 ciclos.

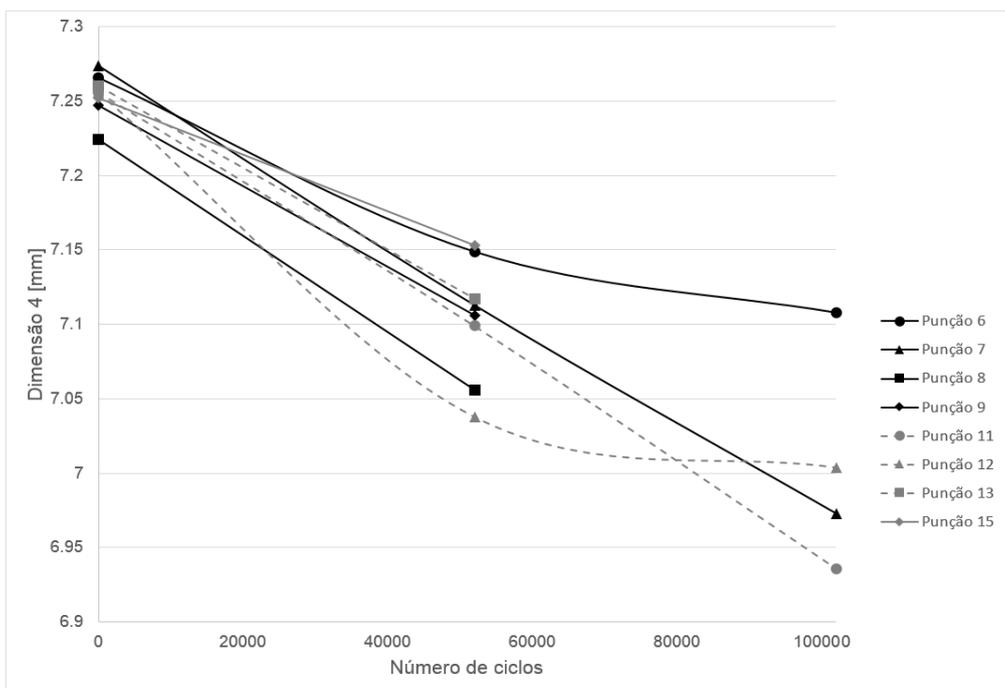


Figura 9 - Variação dimensional do diâmetro crítico

Observa-se que todos os punções reduziram-se nessa dimensão. O motivo pelo qual a perda de geometria não ocorre da mesma forma deve-se à diferença entre as possíveis seções a serem medidas nas ferramentas desgastadas, uma vez que o desgaste não ocorre de maneira perfeitamente simétrica. Uma possível explicação para esse desgaste heterogêneo é a forma de lubrificação do sistema que é feita por gravidade. Medições em outras seções dos mesmos punções levaram à valores absolutos diferentes dos apresentados na Figura 9, porém os valores registrados foram sempre menores do que o valor inicial, sendo que não observou-se um padrão que permitisse diferenciar as ferramentas usinadas (punções 6, 7, 8 e 9) das polidas (punções 11, 12, 13 e 15).

A Tabela 1 apresenta os valores de rugosidades obtidos em rugosímetro de agulha para as ferramentas novas e foram validados em perfilômetro ótico 3D. Comparando os punções de 1 a 5, os quais passaram apenas por usinagem de desbaste, com os punções de 11 a 15, os quais foram polidos após usinagem de acabamento, percebe-se uma variação na rugosidade Ra de até uma ordem de grandeza.

Tabela 1 - Rugosidades dos punções medidos em rugosímetro de agulha (μm)

Usinagem de desbaste (Punções de 1 a 5)	Ra topo = 1,30 Ra lateral = 1,35 1	Ra topo = 1,22 Ra lateral = 1,42 2	Ra topo = 2,49 Ra lateral = 1,69 3	Ra topo = 2,72 Ra lateral = 1,80 4	Ra topo = 1,43 Ra lateral = 1,72 5
Usinagem de acabamento (Punções de 6 a 10)	Ra topo = 0,49 Ra lateral = 0,62 6	Ra topo = 0,53 Ra lateral = 0,43 7	Ra topo = 0,32 Ra lateral = 0,45 8	Ra topo = 0,41 Ra lateral = 0,51 9	Ra topo = 0,48 Ra lateral = 0,57 10
Polimento (Punções de 11 a 15)	Ra topo = 0,26 Ra lateral = 0,14 11	Ra topo = 0,24 Ra lateral = 0,13 12	Ra topo = 0,27 Ra lateral = 0,15 13	Ra topo = 0,28 Ra lateral = 0,17 14	Ra topo = 0,29 Ra lateral = 0,12 15

As Figuras de 10 a 13 apresentam as topografias e as rugosidades das ferramentas usinadas e polidas, nas condições novas e usadas, adquiridas em perfilômetro ótico 3D. As medições realizadas nos punções de 1 a 5 não representam a superfície real da ferramenta de forma fidedigna, pois as franjas oriundas do processo de usinagem não foram identificadas devido à superfície opaca das ferramentas, independente do filtro utilizado no perfilômetro. Portanto, os valores de rugosidades dessas ferramentas não foram considerados como referência de comparação.

A Figura 10 apresenta o topo do punção 7 antes de entrar em máquina pela primeira vez. Observam-se franjas de usinagem bem caracterizadas em função do processo de torneamento em ambas as regiões da ferramenta. As alturas dos picos variam de 0,5 μm a 1,0 μm e as profundidades dos vales variam entre 0,5 μm e 1 μm . Uma vez que a superfície nova apresenta um padrão de picos e vales bem definidos, os valores de Ra e Sa são muito próximos.

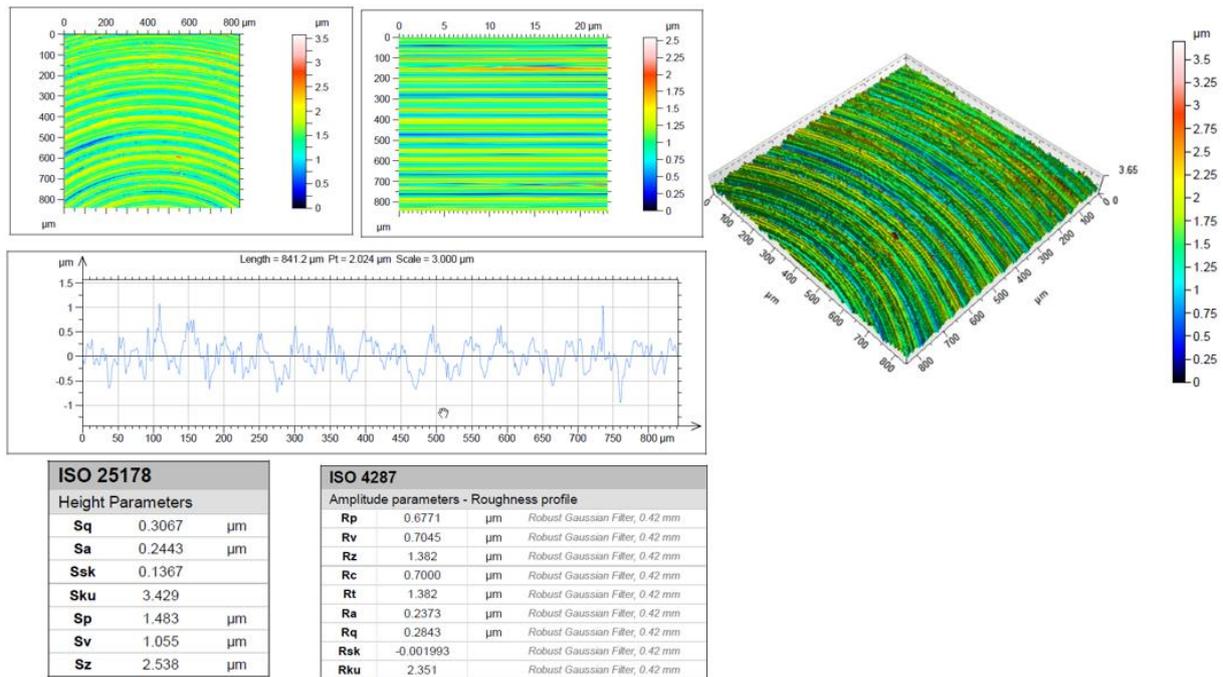


Figura 10 - Topografia e rugosidade do topo do punção 7 novo

A Figura 11 apresenta o topo do punção 7 após 52.000 ciclos de conformação. Ainda é possível observar franjas de usinagem, o que caracteriza a continuidade da superfície com textura periódica. Dessa forma, os valores de Ra e Sa continuam muito próximos entre si, e também em comparação com a ferramenta nova. Por outro lado, medições similares realizadas na lateral da ferramenta mostraram que a superfície foi completamente alterada pelo desgaste, gerando uma topografia com textura aleatória de difícil caracterização. Neste caso, os valores de Ra e Sa diferem significativamente e não serão apresentados aqui.

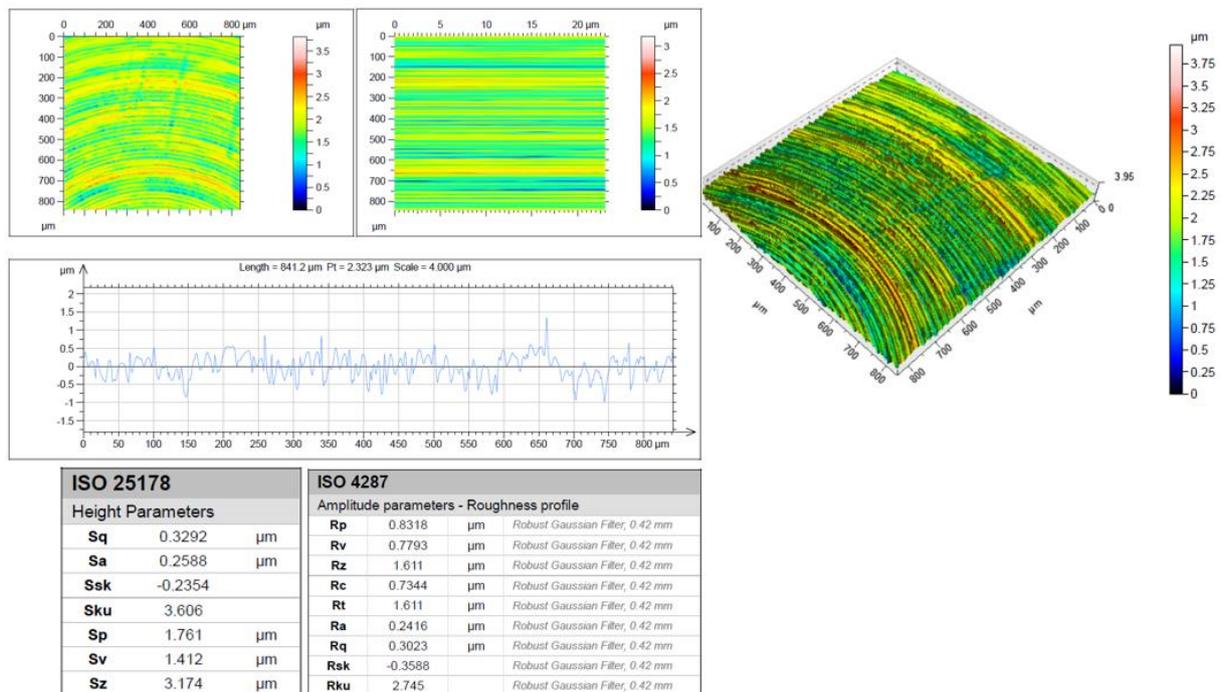


Figura 11 - Topografia e rugosidade do topo do punção 7 após 50.000 ciclos

A Figura 12 mostra a região do topo do punção 12 antes de entrar em máquina pela primeira vez. Assim como no caso do punção 7, apresentado na Figura 10, observam-se franjas de usinagem bem caracterizadas em função do processo de torneamento, porém, graças ao processo de polimento subsequente à usinagem, as alturas máximas dos picos foram reduzidas à no máximo $0,3 \mu\text{m}$, e as profundidades máximas dos vales à $0,45 \mu\text{m}$.

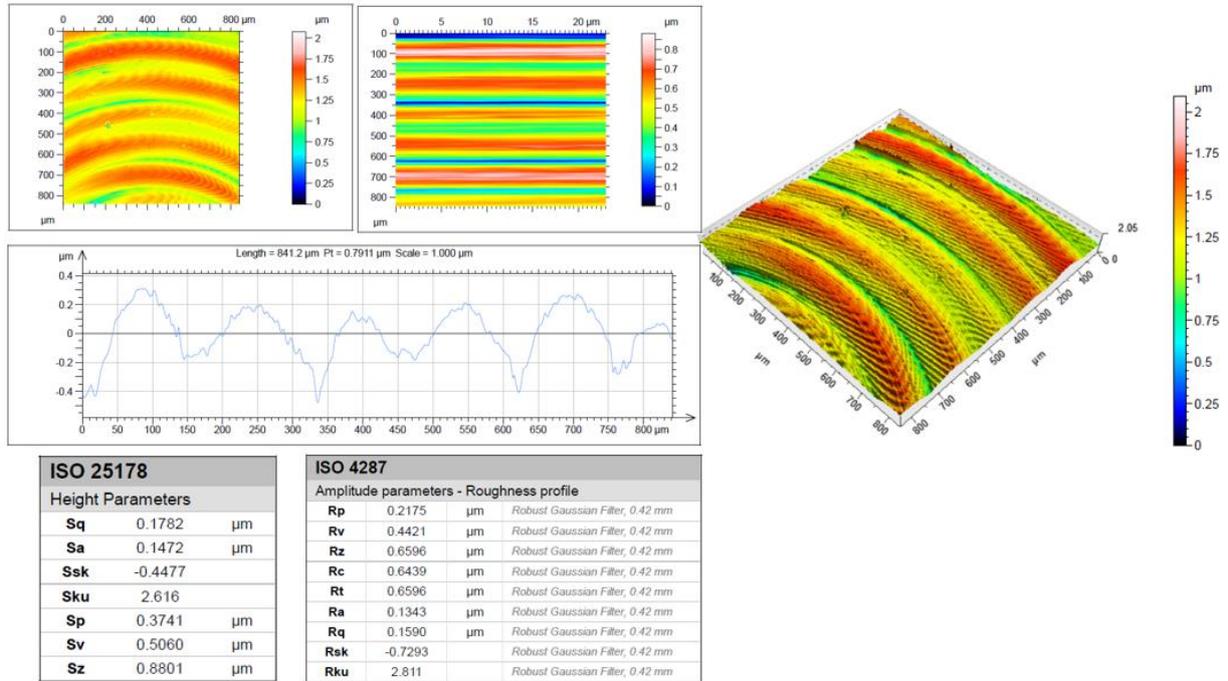


Figura 12 - Topografia e rugosidade do topo do punção 12 novo

A Figura 13 apresenta a topografia do topo do punção 12 após 52.000 ciclos de conformação.

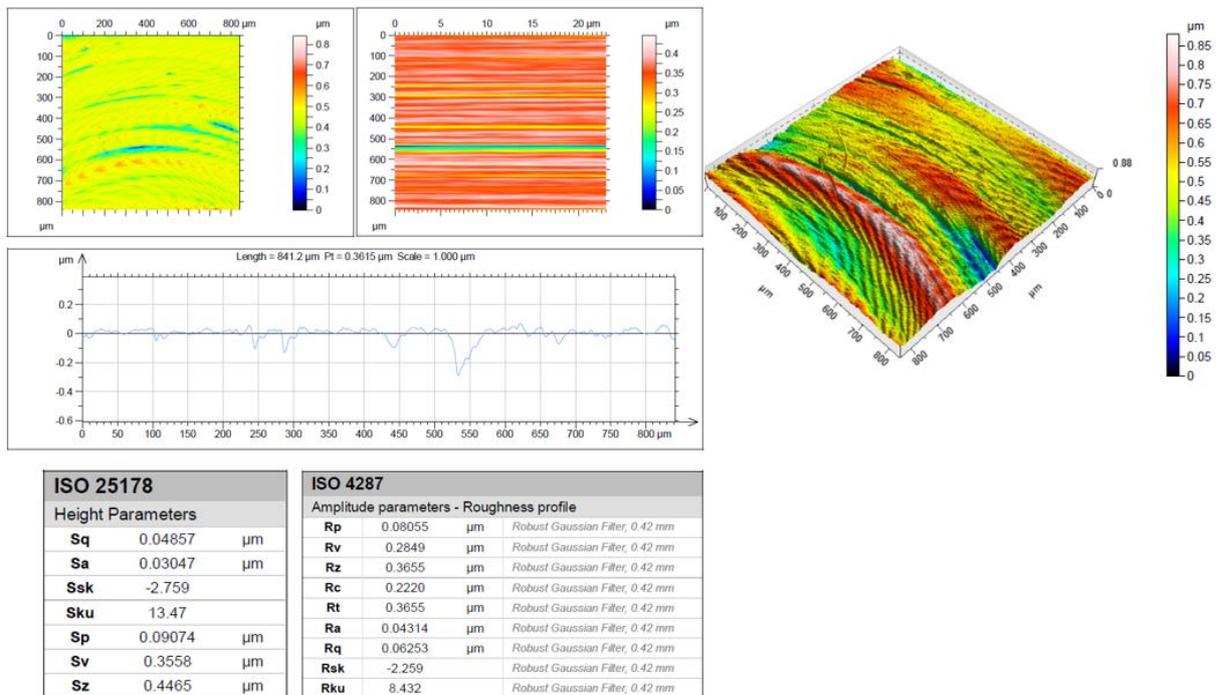


Figura 13 - Topografia e rugosidade do topo do punção 12 após 50.000 ciclos

Ainda que seja possível identificar leves marcas de usinagem na superfície, observa-se que, devido ao processo de desgaste, os picos foram quase totalmente eliminados, resultando em uma altura máxima de 0,1 μm . Essa análise indica que os picos do punção 12 foram “lixados” ou “amassados” durante o processo de conformação a frio, o que será comprovado por meio da análise superficial em microscópio eletrônico de varredura (MEV) apresentada a seguir. Esse mesmo evento também foi observado nos punções 2 e 7, os quais apresentam picos mais altos do que o punção 12.

As Figuras de 14 a 19 apresentam uma análise comparativa do comportamento das superfícies das ferramentas novas e usadas, realizada em MEV, a fim de identificar os tipos de danos superficiais e os mecanismos de desgaste atuantes. A Figura 14 apresenta a topografia do punção 2 novo, com aumentos progressivos de 20 a 200 vezes. Percebe-se nas imagens 14(a) e 14(b) a presença de franjas de usinagem bem definidas, provenientes do processo de torneamento, resultando em uma superfície com textura periódica tanto no topo quanto na lateral da ferramenta. As imagens 14(c) e 14(d) com aumentos de 100 e 200 vezes apresentaram superfícies irregulares com descontinuidades, como se houvessem falhas e poros na superfície, o que foi gerado pelo acabamento superficial ruim da ferramenta. Análises de EDS descartaram a possibilidade de presença de óxido na superfície.

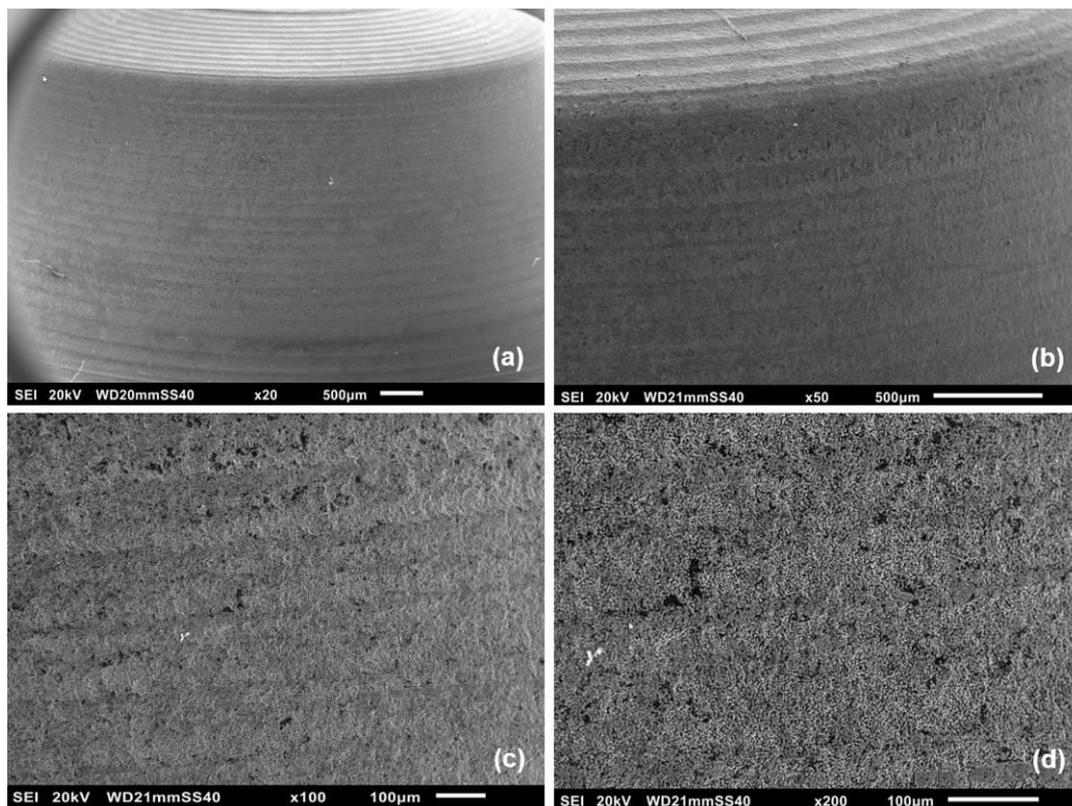


Figura 14 - Punção 2 novo; (a) imagem de elétron secundário com aumento de 20 vezes; (b) 50 vezes; (c) 100 vezes; (d) 200 vezes

A Figura 15 apresenta a topografia do punção 2 após 52.000 ciclos de conformação. Percebe-se nas imagens 15(a) e 15(b) que o topo da ferramenta ainda contém as franjas de usinagem, porém, nota-se que os picos foram arredondados e eles aparentam estar mais baixos do que na ferramenta nova. Tanto o topo quanto a lateral da ferramenta apresentam riscos e sulcos perpendiculares às franjas de usinagem e no sentido de escoamento do contra-corpo, caracterizando o desgaste abrasivo. Na imagem 15(b), nota-se que o desgaste ocorreu com

intensidade diferente no topo e na lateral da ferramenta, sendo que o topo ainda manteve alguma característica da topografia inicial, enquanto a lateral foi totalmente descaracterizada pelo desgaste abrasivo.

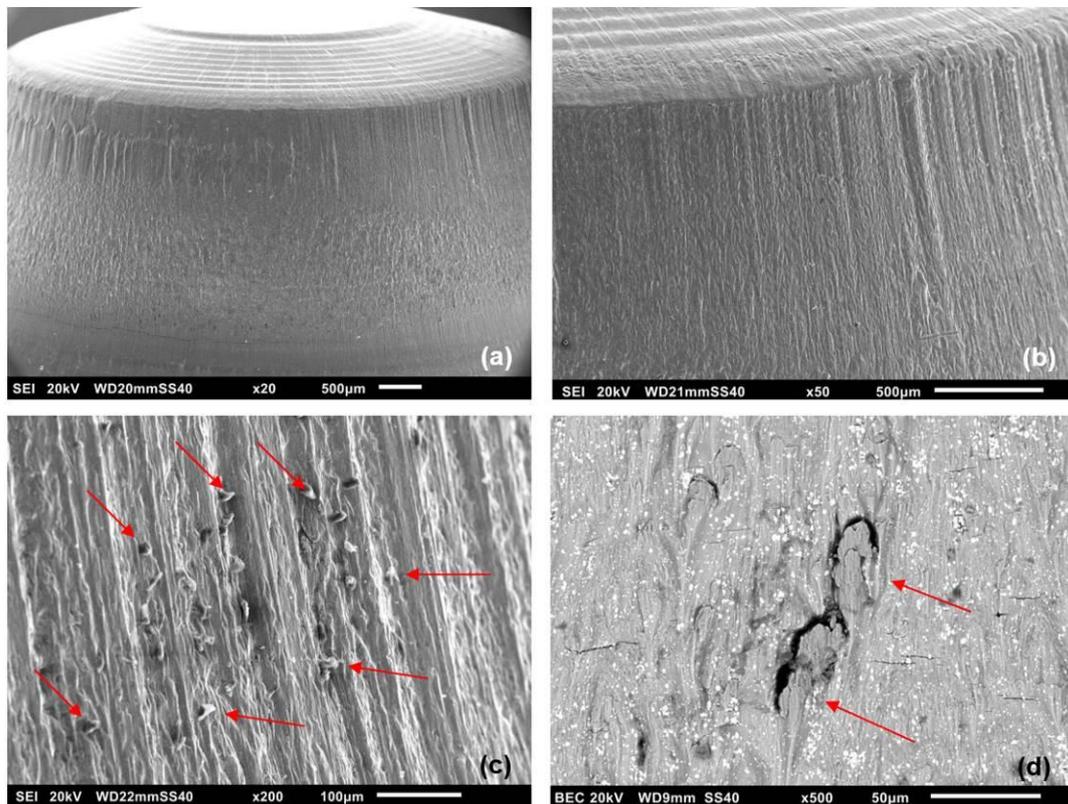


Figura 15 - Punção 2 após 52.000 ciclos; (a) imagem de elétron secundário com aumento de 20 vezes, (b) 50 vezes, (c) 200 vezes, (d) 500 vezes

Na imagem 15(c) percebe-se partículas aderidas à superfície da ferramenta com um tamanho próximo à largura dos riscos, o que pode indicar que partículas similares a estas tenham atuado como debris entre a ferramenta e a peça durante o processo de conformação a frio. Uma outra possível origem para os debris é o deslocamento da matriz da ferramenta conforme ilustrado na imagem 15(d). Ainda nesta imagem, percebem-se micro trincas radiais causadas pelo contato cíclico entre a ferramenta e a peça.

A Figura 16 apresenta a topografia do punção 7 novo, com aumentos progressivos entre 20 e 500 vezes. Observa-se a textura periódica, proveniente do processo de usinagem, em todas as imagens. A imagem de elétron retroespalhados 16(d) evidencia a presença de carbonetos dispersos na matriz com tamanhos entre 1 µm e 10 µm.

A Figura 17 apresenta a topografia do punção 7 após 52.000 ciclos de conformação. Observa-se nas imagens 17(a) e 17(b) que o topo da ferramenta ainda apresenta características da topografia inicial usinada, porém com riscos perpendiculares às franjas de usinagem. As imagens 17(c) e 17(d) mostram que as marcas de usinagem na lateral da ferramenta deram lugar a riscos e sulcos no sentido de escoamento da peça. Além disso, observa-se uma alta concentração de micro trincas nessa região causadas pelo contato cíclico entre a ferramenta e a peça. Ainda na imagem 17(d) destaca-se um carboneto que aparenta estar na eminência de se desprender do substrato. Uma vez liberado, o carboneto pode atuar como partícula abrasiva para o tribossistema.

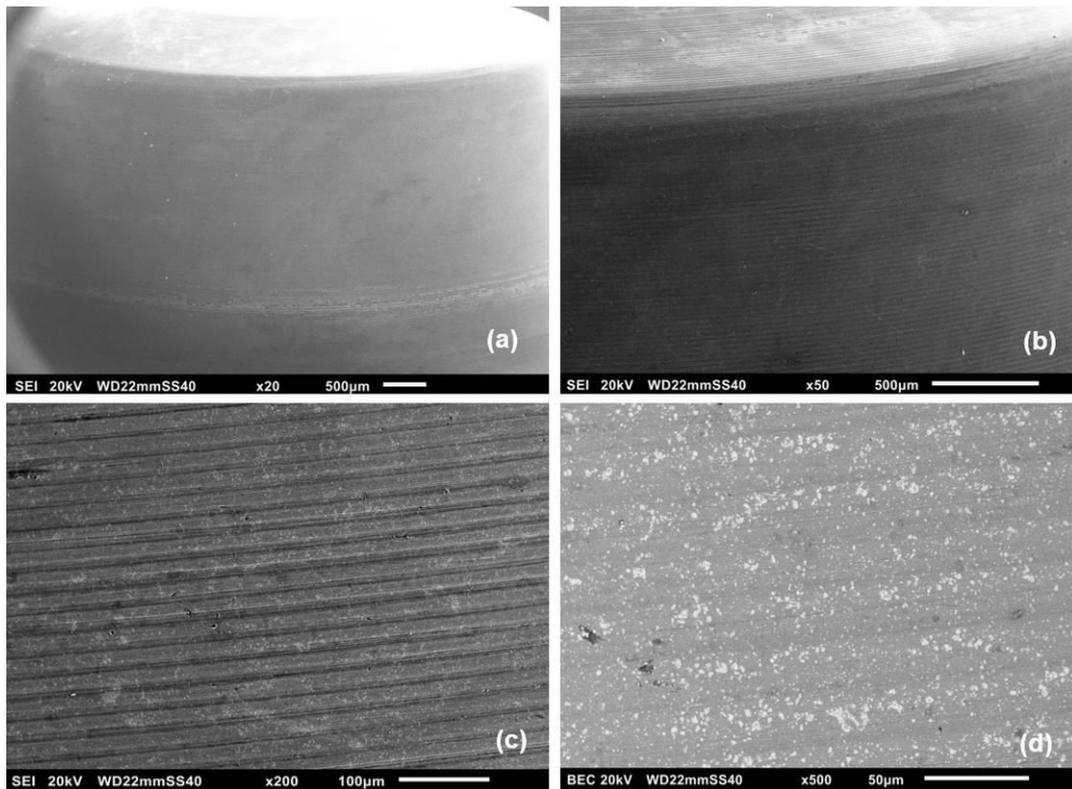


Figura 16 - Punção 7 novo; (a) imagem de elétron secundário com aumento de 20 vezes, (b) 50 vezes, (c) 200 vezes, (d) imagem de elétron retroespalhado com aumento de 500 vezes

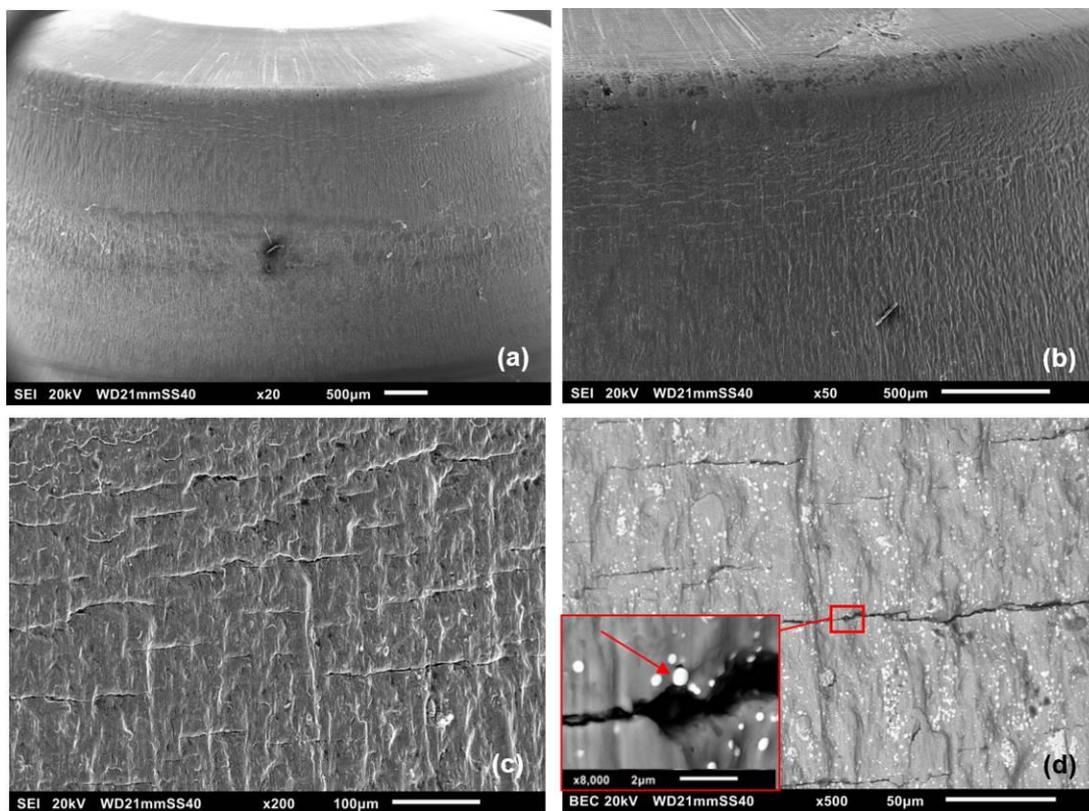


Figura 17 - Punção 7 após 52.000 ciclos; (a) imagem de elétron secundário com aumento de 20 vezes, (b) 50 vezes, (c) 200 vezes, (d) imagem de elétron retroespalhado com aumento de 500 vezes e detalhe à esquerda com aumento de 8.000 vezes

A Figura 18 apresenta a topografia do punção 12 novo. Devido ao processo de polimento, a ferramenta apresenta a superfície lisa ao longo de toda sua extensão, não sendo possível identificar as marcas do torneamento. A exceção é uma única marca de usinagem, mostrada na imagem 18(a), que não foi removida durante o processo de polimento.

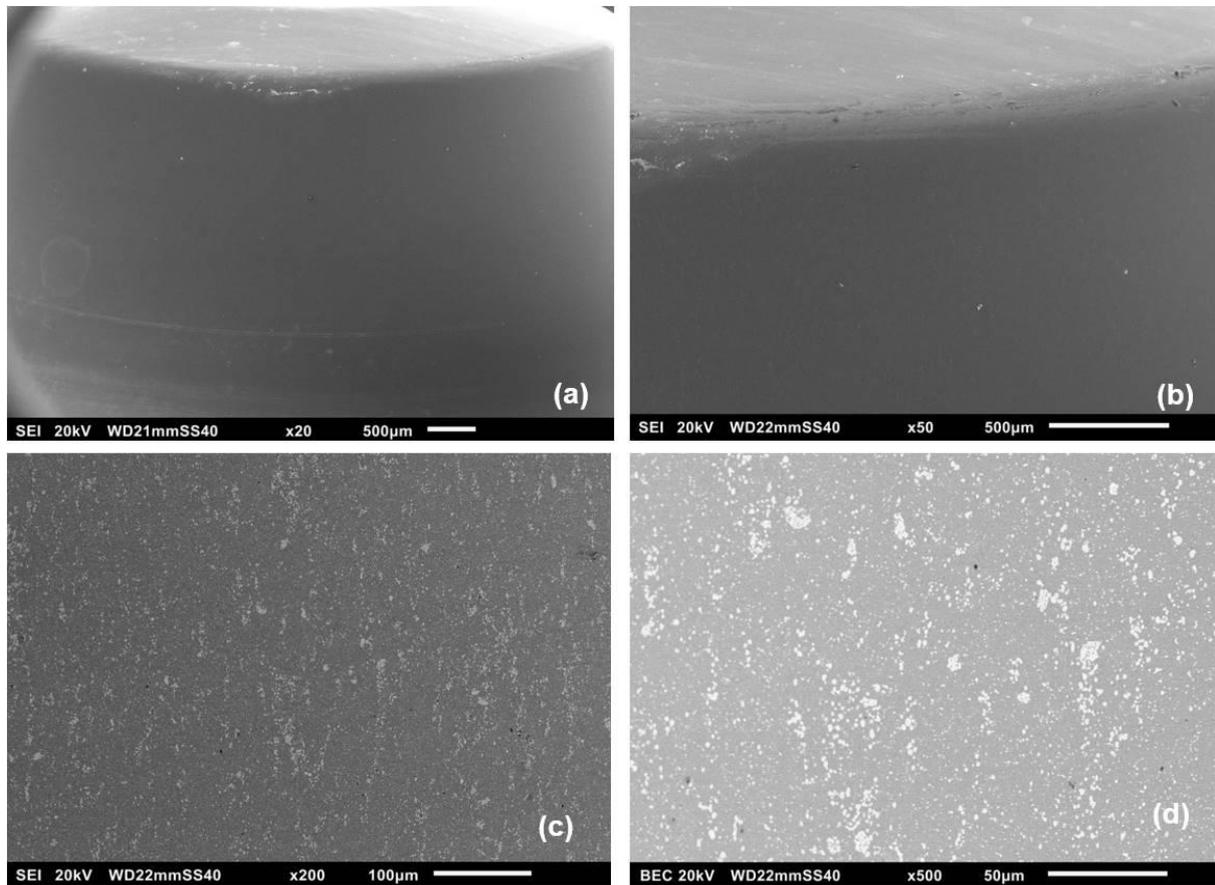


Figura 18 - Punção 12 novo; (a) imagem de elétron secundário com aumento de 20 vezes, (b) 50 vezes, (c) 200 vezes, (d) imagem de elétron retroespalhado com aumento de 500 vezes

A Figura 19 apresenta a topografia do punção 12 após 52.000 ciclos de conformação. As imagens 19(a) e 19(b) mostram riscos no topo da ferramenta e severa deformação plástica na lateral. A imagem 19(c) apresenta uma parte do topo da ferramenta que destaca a presença de riscos na superfície. A forma dos canais indica, aparentemente, que os riscos foram causados por corpos de forma arredondada.

Todas as ferramentas apresentaram micro trincas na superfície lateral após 52.000 ciclos de conformação. A presença de trincas perpendiculares ao sentido de deslizamento do material, pode ser explicada tanto por tensões trativas geradas por atrito durante o sulcamento, como também por fadiga de superfície [8, 12]. A natureza das trincas pode ser investigada analisando a seção transversal dos punções. Eventualmente, os punções com rugosidade inicial entre 1,5 e 2,5 Ra, os quais falharam prematuramente, podem apresentar uma região próxima à superfície com maior nível de deformação plástica quando comparados com os demais punções, o que levaria a concluir que rugosidades maiores geraram uma força de atrito maior e, conseqüentemente, tensões trativas maiores que aceleraram a velocidade de nucleação e propagação das trincas.

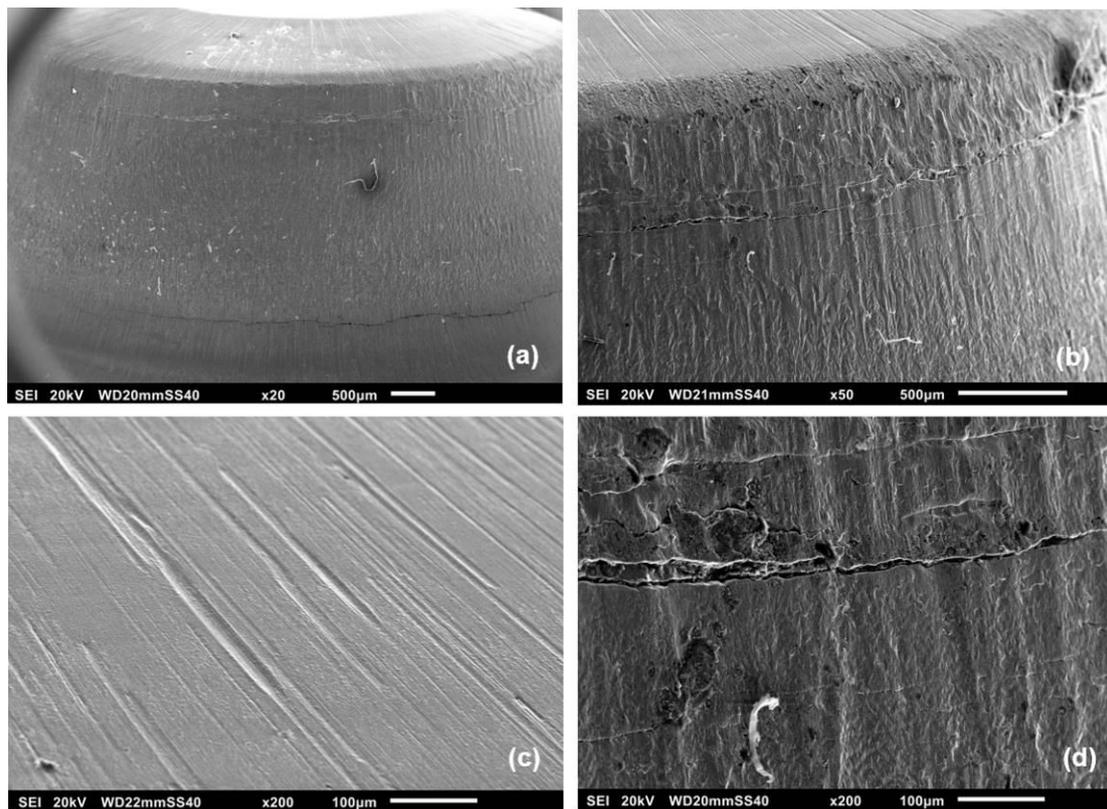


Figura 19 - Punção 12 após 52.000 ciclos; (a) imagem de elétron secundário com aumento de 20 vezes, (b) 50 vezes, (c) 200 vezes, (d) 200 vezes

Em síntese, as análises de dano superficial das ferramentas após 52.000 ciclos de conformação indicam que:

- a) O punção 2 (Figura 15c) aparenta ter os riscos mais profundos na lateral em comparação aos punções 7 (Figura 17c) e 12 (Figura 19d).
- b) Entre as regiões analisadas, foram encontradas partículas aderidas somente na lateral do punção 2 (Figura 15c).
- c) O sentido das micro trincas encontradas nas laterais de todos os punções é perpendicular ao sentido de escoamento do material e coincide com o sentido das franjas de usinagem
- d) O desgaste no topo das ferramentas aparenta ser similar para os punções 7 e 12 e mais severo para o punção 2 (Figuras 17b, 19b e 15b respectivamente).

A forma com que os punções 2, 7 e 12 se desgastaram (Figuras 15b, 17a e 19a) se assemelha muito com o desgaste de punções apresentados por outros autores [11, 12], de forma que os cortes nas laterais dos punções indicam claramente desgaste abrasivo independentemente do nível de acabamento superficial inicialmente utilizado nas ferramentas.

O mapeamento de dureza do contra-corpo, apresentado na Figura 20, revelou que o encruamento provocado pelo segundo estágio da conformação gera um aumento de dureza de até 140 HV, sendo que a dureza próxima à superfície é de 240 HV enquanto o núcleo apresenta cerca de 100 HV. Ou seja, 240 HV é a maior dureza do contra-corpo e que será utilizada na comparação com a dureza do punção (corpo). A análise metalográfica da contra-corpo revelou a presença de cementita 90% esferoidizada dispersas na matriz ferrítica e

tamanho de grão de 6 a 8 comparando com os quadros padrões contidos na norma ASTM E112 [13].

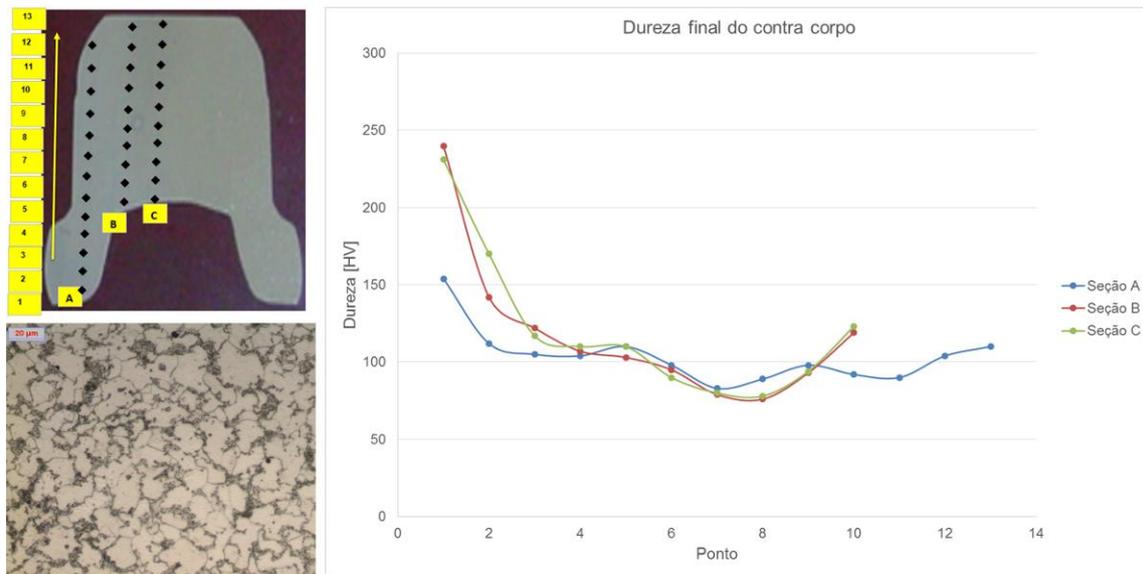


Figura 20 - Dureza e microestrutura da peça após a 2ª operação

A Figura 21 apresenta a variação de dureza do punção em função da distância da superfície. Graças ao processo de tratamento térmico efetuado nas ferramentas, a dureza oscilou entre 680 HV e 730 HV, uma faixa típica de ferramentas de aço M2 temperadas e revenidas. A microestrutura do punção é constituída de martensita revenida, com alinhamento de carbonetos na matriz.

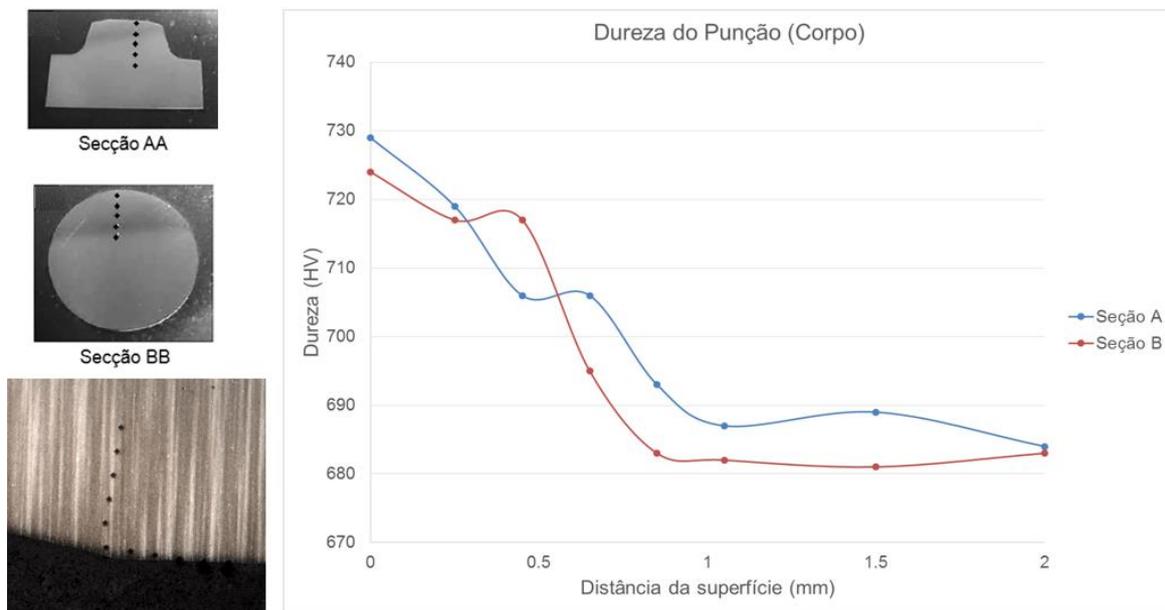


Figura 21 - Dureza e microestrutura do punção

Comparando as Figuras 20 e 21, observa-se que a diferença de dureza na superfície é de aproximadamente 483 HV, ou seja, a dureza do punção é quase três vezes maior do que a dureza da peça e ainda assim ocorre desgaste abrasivo no punção. Logo, é possível que existam debris no meio interfacial entre a ferramenta e a peça que, quando submetidos à altas

cargas normais típicas da conformação, geram o desgaste abrasivo da ferramenta por meio de micro corte e micro sulcamento. Tais debris podem estar presentes no óleo refrigerante ou então podem ser partículas duras que se soltam da ferramenta após sucessíveis contatos.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados acima expostos, é possível concluir que:

- a) Ocorre desgaste do punção por abrasão mesmo com a dureza do punção sendo quase três vezes maior do que a dureza da peça, o que leva a possibilidade de existir um terceiro corpo no meio interfacial entre o punção e a peça.
- b) Regiões diferentes da ferramenta apresentam tipos de desgaste diferentes, sendo que as franjas de usinagem são lixadas e arredondadas no topo da ferramenta enquanto a lateral é constantemente cortada de forma a eliminar as franjas de usinagem por completo após 52.000 ciclos.
- c) Todos os punções com Ra entre 1,5 e 2,5 μm quebraram prematuramente, o que indica que a falha pode estar relacionada com a topografia inicial dessas ferramentas.
- d) Os punções usinados com Ra entre 0,5 e 0,8 μm e os punções polidos com Ra entre 0,1 e 0,3 μm apresentaram desgastes equivalentes, tanto no que tange perda de massa como perda dimensional. Se em algum momento houve benefício de desempenho devido à topografia da ferramenta estar inicialmente polida, tal benefício não pode ser observado nas ferramentas após 52.000 ciclos. Se isso se confirmar após os punções 8, 9, 13 e 15 atingirem 100.000 ciclos de produção, será possível eliminar o polimento do processo de fabricação das ferramentas, o que contribuirá para a redução do custo de fabricação das ferramentas, e consequentemente dos produtos forjados.

REFERÊNCIAS

- [1] DIN 8580, **Manufacturing processes – Terms and definitions, division**. Deutsches Institut Fur Normung, 2003.
- [2] SACMA GROUP. Disponível em: <http://www.sacmagroup.com/pt/winning-technologies/projeto-de-ferramental.ow?pageId=12949>. Acesso em: 6 de Maio de 2016.
- [3] SOUZA, M. M.; PEREIRA, M. H.; SOUZA, T. S. G. Fabricação e caracterização de componentes forjados para transmissões. In: 12º Simpósio SAE Brasil de Powertrain, Sorocaba, 2014.
- [4] MENDES, M. A. Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimentos de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade de São Paulo

- [5] ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. New York: Elsevier, 1987.
- [6] HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 1.ed.** London: Edward Arnold, 1992.
- [7] STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Elsevier, 2001.
- [8] SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear. **Wear, n. 266, p. 482 – 487**, 2009.
- [9] SCHEY, J. A. **Tribology in metalworking – friction, lubrication and wear**. American Society for Metals, 2 ed., 1984.
- [10] MAGRI, M. L. Influência da topografia superficial na vida da matriz de forjamento a quente, 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas.
- [11] FALCONNET, E.; CHAMBERT, J.; MAKICH, H.; MONTEIL, G. Prediction of abrasive punch wear in copper alloy thin sheet blanking. **Wear, n. 338 – 339, p. 144 – 154**, 2015.
- [12] ASM HANDBOOK. **ASM Metals Handbook, Vol. 18. Friction, lubrication and wear technology**, 1992.
- [13] ASTM E 112 – 96. **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**. American Society for Testing and Materials, 2004.