



MECANISMOS DE ATRITO E DESGASTE EM CONFORMAÇÃO DE CHAPAS E SUA INFLUÊNCIA NA CADEIA DE PRODUÇÃO DO FERRAMENTAL¹

João Henrique Corrêa de Souza²

Resumo

Processos de conformação, em especial conformação de chapas, são fortemente influenciados por fenômenos tribológicos. As modernas técnicas de ferramentaria exigem amplo entendimento dos aspectos tribológicos do processo visando melhorar o rendimento do processo e reduzir ao máximo as manutenções causadas por diferentes formas de desgaste. Efeitos cumulativos como, por exemplo, desgaste adesivo são responsáveis por elevar o número de paradas de prensa para manutenção da ferramenta. Problemas de qualidade como fraturas da chapa e enrugamentos estão frequentemente relacionados a condições de atrito desfavoráveis em diferentes regiões da ferramenta. Neste trabalho é apresentado um resumo do estado da arte na área de tribologia da conformação de chapas além das técnicas disponíveis atualmente e estratégias para melhorar a qualidade das superfícies ativas da ferramenta durante o processo de conformação.

Palavras-chave: Conformação de chapas; Tribologia; Ferramentaria; Cadeia de produção.

MECHANICS OF FRICTION AND WEAR IN SHEET METAL FORMING AND ITS IMPACT ON THE PRODUCTION CHAIN OF FORMING DIES

Abstract

Forming processes, and particularly sheet metal forming, are strongly governed by tribological phenomena. Modern tooling techniques require a comprehensive control of tribological factors aiming to improve process efficiency and to reduce maintenance stops due to different wear types. Cumulative effects such as adhesive wear are a frequent cause of press stops for die maintenance. Quality problems such as part wrinkling and fracture are often related to unfavorable friction conditions in different regions of the die. In this work, an overview of the state of the art in sheet metal forming tribology is presented, as well as today available techniques to improve the quality of tool active surfaces during the forming process.

Key words: Sheet metal forming; Tribology; Tooling; Process chain.

¹ Contribuição técnica ao 9º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 10 e 11 de agosto de 2011, São Paulo, SP.

² Dr.-Ing., Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento, Bruning Tecnometal SA.



1 INTRODUÇÃO

Componentes produzidos a partir de chapas metálicas estão presentes em uma parcela bastante significativa dos bens de consumo atuais. Entre as várias aplicações possíveis para tais componentes, os ramos automobilístico, rodoviário e de máquinas agrícolas destacam-se por sua importância econômica. As características responsáveis por essa grande presença são, por um lado, uma excelente relação peso/ resistência mecânica da peça associada à possibilidade de se obter peças com geometrias complexas. Por outro lado, a facilidade em se obter altas taxas de produção faz com que o custo por peça se torne relativamente baixo. Recentemente, constantes desenvolvimentos nas áreas de materiais, metalurgia e técnicas de fabricação levaram ao desenvolvimento de chapas de alta resistência e boa conformabilidade, possibilitando reduções de peso dos sistemas aliado a aumento de resistência mecânica, quando comparado aos materiais de chapas convencionais. Redução de peso deve continuar sendo a mola mestra dos esforços de pesquisa e desenvolvimento, salientando a forte tendência sinalizada pelas tecnologias de mobilidade baseadas em eletricidade.

Dentre os insumos necessários à produção de peças estampadas o ferramental de conformação ocupa uma posição de destaque, pois dele vai depender a qualidade final da peça e a taxa de produção que poderá ser alcançada. As etapas de conformação determinam o número de ferramentas necessárias à produção. Ferramentas de simulação por elementos finitos são hoje em dia indispensáveis na determinação das etapas do processo e, portanto, no projeto do ferramental. A taxa de produção almejada para o componente vai também influenciar no projeto devendo o conceito da ferramenta ser adaptado ao tipo de alimentação da matéria-prima (por exemplo, alimentação manual, ferramenta progressiva, utilização de *transfers*, utilização de robôs). Essas considerações acompanham o desenvolvimento do ferramental do início, com a definição dos objetivos, até o término da etapa de projeto e início da produção do ferramental, conforme pode ser visto na Figura 1.

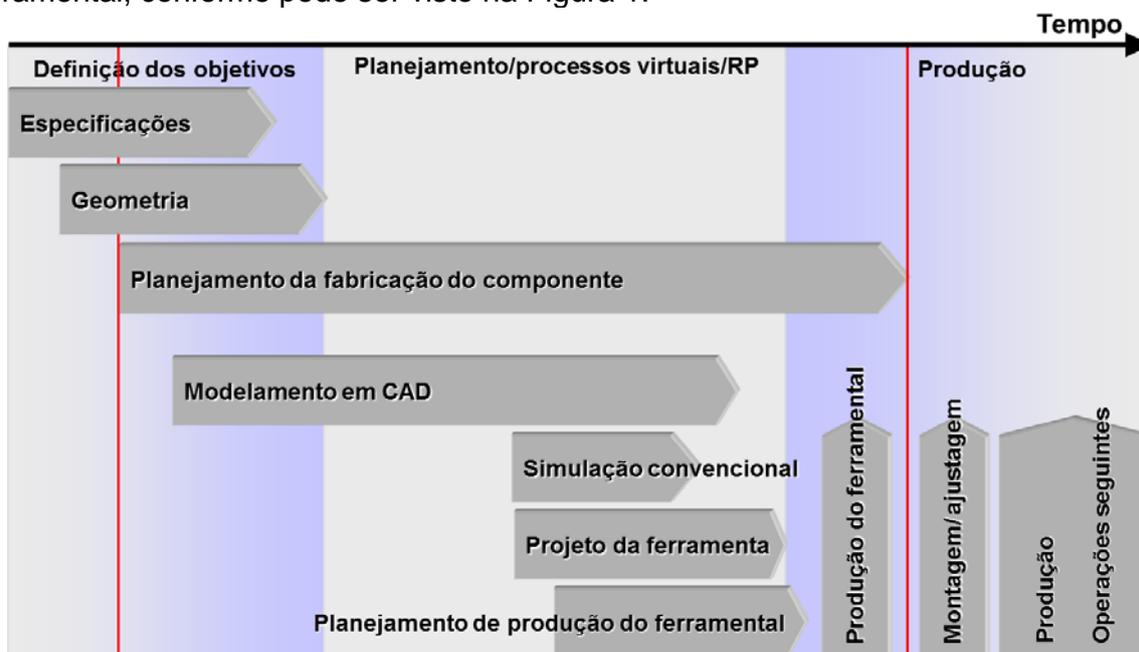


Figura 1. Sequência de atividades presentes no desenvolvimento de ferramental.⁽¹⁾



Após a produção do ferramental chega-se à etapa de montagem e ajustagem que antecede os primeiros testes. Este é um ponto crítico importante do desenvolvimento de uma ferramenta, pois dependendo do resultado dos testes a ferramenta poderá necessitar de re-usinagens e retrabalho. Além disso, é muito comum receber do futuro cliente modificações e atualizações na geometria das peças ainda durante o projeto ou construção do ferramental. Finalmente, chega-se ao ponto de iniciar a produção do componente. Para obter sucesso aqui é preciso “congelar” a condição da ferramenta após a aprovação nos testes, garantindo que essa condição se mantenha intacta por mais tempo possível. A tarefa de se obter na prática (e manter) essa condição é um dos desafios mais importantes da equipe da ferramentaria. Da competência das áreas de planejamento, simulação, projeto, construção, ajustagem etc. depende a rapidez e a qualidade do trabalho e isso ter consequências também no futuro, na forma de quantidade de horas paradas para manutenção. A visão do conjunto é importante a todos os participantes no desenvolvimento.

Processos de conformação de chapas podem ser analisados conforme parâmetros de influência mostrados na Figura 2.

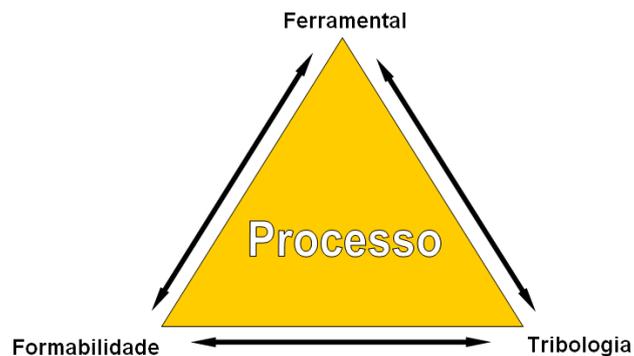


Figura 2. Principais fatores de influência nos processos de conformação de chapas.⁽²⁾

Instabilidades ou variações em um ou mais desses parâmetros poderão afetar o processo de forma negativa. O item ferramental engloba aspectos como geometria dos componentes e estrutura da ferramenta, materiais utilizados para a fabricação e seu beneficiamento, etapas e seqüência de fabricação da mesma. O item formabilidade refere-se à correta definição da seqüência de fabricação do componente, ou seja, o número de etapas necessárias. Aqui também está incluída a correta definição da matéria-prima (propriedades mecânicas da chapa). O terceiro item, tribologia, compreende os fenômenos de atrito e desgaste que ocorrem entre a superfície da chapa e as superfícies ativas da ferramenta. Na estampagem, o fluxo de material da chapa para dentro da ferramenta é controlado por diferentes sistemas tribológicos em diferentes regiões de contato. Uma característica dos processos de estampagem é que a condução da força da prensa até a região de conformação ocorre de forma indireta. Ou seja, a força aplicada pelo punção deve ser transmitida até a matriz através da própria chapa, sem que a mesma rompa (falando de forma figurada, a chapa precisa ser capaz de “puxar-se” durante o processo). É possível afirmar que a grande maioria dos problemas de ferramental se traduz em problemas tribológicos, ou seja, atrito (excessivo ou insuficiente) ou desgaste. O objetivo deste trabalho é permitir uma

discussão sobre os fenômenos tribológicos que ocorrem na estampagem e sua íntima relação com as técnicas de fabricação do ferramental.

2 O PAPEL DO ATRITO EM PROCESSOS DE ESTAMPAGEM

Em uma ferramenta de conformação de chapas podem ser reconhecidas algumas regiões de atrito distintas entre a chapa e ferramenta, dependendo do tipo de processo de estampagem que está sendo realizado.

2.1 Embutimento

A Figura 3 mostra diferentes sistemas tribológicos presentes em uma ferramenta de embutimento profundo (na zona de conformação: tração-compressão).

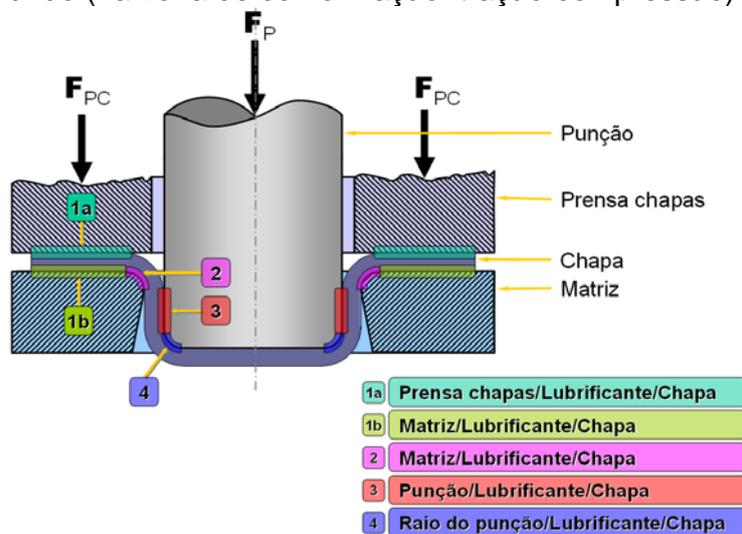


Figura 3. Regiões de contato da chapa com a ferramenta em uma ferramenta de embutimento puro.⁽²⁾

Nas regiões 3 e 4 da Figura 3 (contato punção/ chapa) um alto coeficiente de atrito é favorável. Aqui domina o atrito estático, ou seja, praticamente não há movimento relativo entre a chapa e o punção. Um maior coeficiente de atrito, principalmente entre a chapa e a parede do punção, favorece o processo distribuindo melhor a força aplicada pelo punção sobre a chapa. Na região 2 (contato raio da matriz/ chapa) é importante minimizar o atrito, pois esta é a região onde a chapa exerce maior pressão sobre a ferramenta e onde se produz o desgaste. Nas regiões 1a e 1b (contato prensa-chapas/ chapa) a força de atrito a ser aplicada irá depender da necessidade de facilitar ou restringir o fluxo de material para dentro da ferramenta. Isso é possível através de variação da força do prensa-chapas, do uso de lubrificantes ou ainda alterando-se o tamanho do blank original.

2.2 Estiramento

No caso de uma ferramenta onde ocorre estiramento puro, ilustrada na Figura 4, (na zona de deformação: tração/ tração) é preciso minimizar o atrito punção/ chapa.

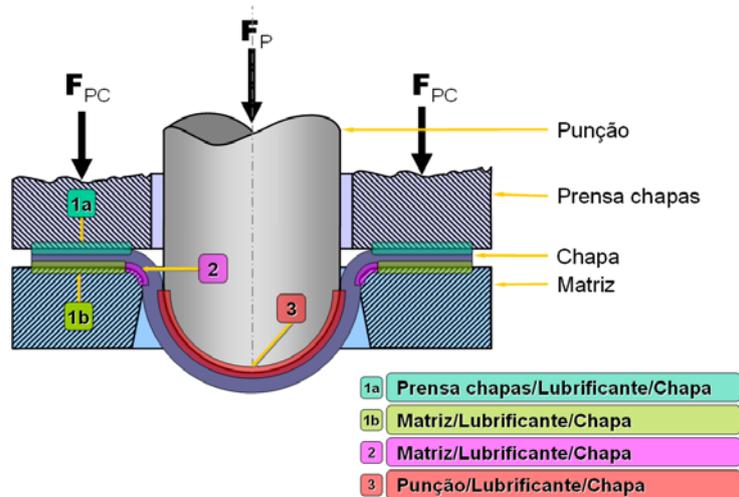


Figura 4. Regiões de contato em uma ferramenta de estiramento.⁽²⁾

Nesse caso é comum haver pouco ou nenhum movimento relativo chapa/ ferramenta nas regiões 1a e 1b, sendo que a deformação se dá totalmente à custa da espessura da chapa. Minimizar o atrito favorece o processo atrasando o rompimento da chapa.

2.3 Dobramento

Dobra em “U”: Como mostra a Figura , os sistemas tribológicos reduzem-se a apenas três. Este processo é comumente utilizado na conformação de chapas grossas, estando a matriz submetida a altas pressões localizadas nos raios das matrizes.

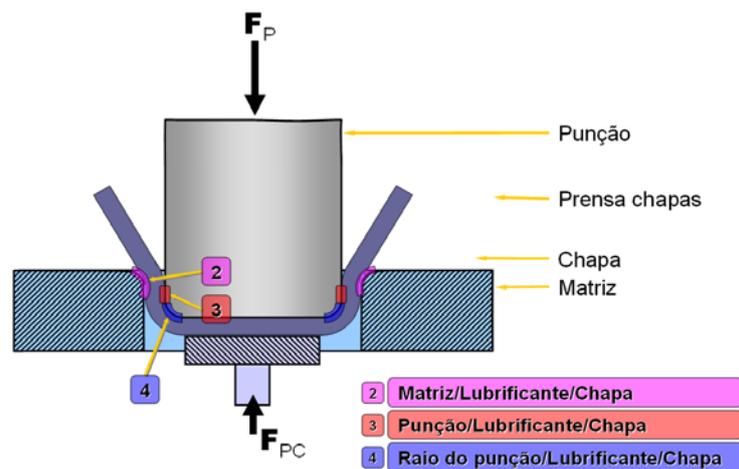


Figura 5. Regiões de contato em uma ferramenta de dobra em “U”.⁽²⁾

Aqui, normalmente, o rompimento da chapa não é um problema, mas o desgaste sim. Redução do atrito favorece o processo.

3 DESGASTE EM PROCESSOS DE ESTAMPAGEM

Antes de falar sobre desgaste é preciso entender como funciona o atrito na conformação. Os fenômenos de atrito e desgaste dependem da maneira com que as superfícies em contato interagem, podendo se resumir a três parâmetros mais importantes dessa interação:

- a velocidade relativa entre os corpos em contato,
- a presença de lubrificação; e
- a pressão de contato entre os corpos.

A maneira como esses fatores influenciam o coeficiente de atrito pode ser ilustrada pela curva de Stribeck, conforme mostra a Figura 6.

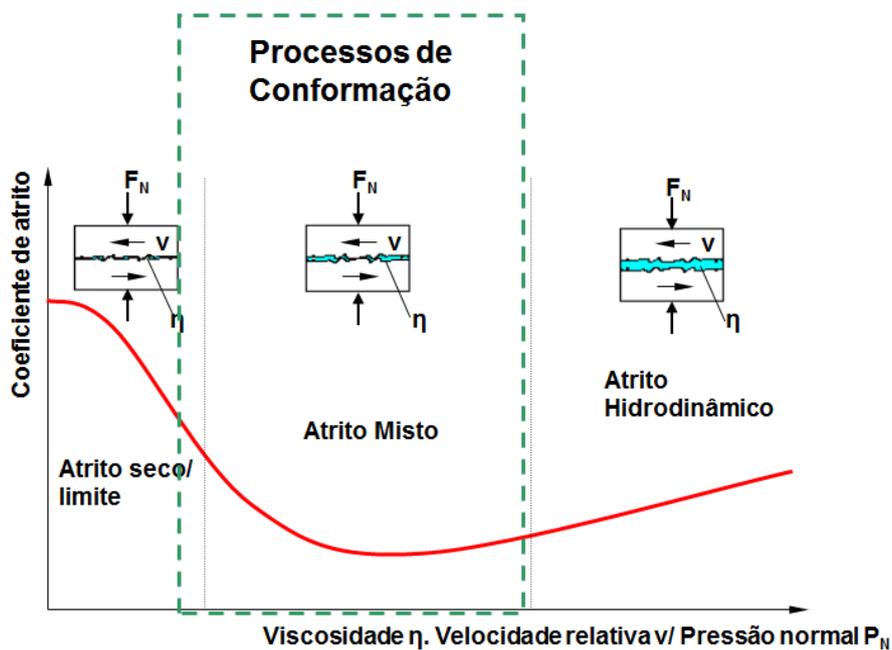


Figura 6. Curva de Stribeck.⁽³⁾

Na situação de atrito seco/ limite há um contato permanente entre os picos das asperezas durante o movimento relativo. No atrito misto há uma situação de contato esporádico entre as duas superfícies. Já na lubrificação hidrodinâmica as duas superfícies estão completamente separadas por um filme de lubrificante. Na conformação de chapas reina o regime de lubrificação mista, portanto existe contato físico entre superfície da chapa e da ferramenta. Portanto as partes ativas da ferramenta sempre estarão sujeitas a algum tipo de desgaste.

As formas mais presentes de desgaste na conformação de chapas são desgaste abrasivo e desgaste adesivo. O desgaste abrasivo não representa um grande problema para os aços utilizados atualmente. O problema mais crítico é o surgimento de desgaste adesivo, que em combinação com fenômenos de abrasão, pode danificar não só a superfície da ferramenta, mas também a da chapa que está sendo conformada.⁽⁴⁾

Os fatores que causam o surgimento da adesão (Figura 7) são:

- superfícies em contato metalurgicamente semelhantes;
- movimento relativo entre as superfícies;
- altas pressões na região do contato; e
- quebra do filme de lubrificante.

Principalmente em chapas grossas, (espessura > 1,5 mm) as pressões de contato entre a superfície da chapa e as superfícies ativas da ferramenta pode atingir valores muito altos. A similaridade existente entre o material da chapa e o da ferramenta (contato metal x metal), somado às altas pressões e ao movimento repetitivo ocasionam transferência de material da chapa para a ferramenta, no início a nível microscópico. Esse material que se desprende da chapa permanece soldado ou caldeado à superfície da ferramenta e dá origem a um efeito cumulativo que se intensifica a cada nova peça produzida. Na conformação de aços inoxidáveis, por exemplo, desenvolvem-se altas pressões sobre a ferramenta durante a conformação e conseqüentemente grande tendência à adesão.⁽⁵⁾ Situação semelhante ocorre na conformação de chapas grossas de aço carbono.⁽⁶⁾

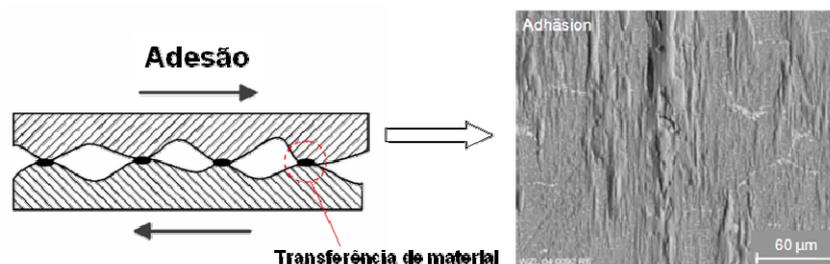


Figura 7. Esquema do fenômeno da adesão (esquerda) e micrografia de material aderido a uma superfície.

É possível controlar o aparecimento de adesão por meio de tratamentos superficiais nas ferramentas. O objetivo desses tratamentos é diminuir a similaridade dos materiais em contato,⁽⁷⁾ seja simplesmente aumentando a dureza (por exemplo nitretação), seja por meio de recobrimento com outro material, como nos revestimentos cerâmicos PVD (*Physical Vapour Deposition*).⁽⁸⁻¹¹⁾ Tratamentos superficiais para ferramentas costumam ser usados como solução para os problemas de desgaste. Estes, porém, só são eficazes se acompanhados de uma análise detalhada dos aspectos que afetam a tribologia do contato.

4 CONFEÇÃO DA FERRAMENTA X RESISTÊNCIA AO DESGASTE

Após a etapa de simulação de processo ser concluída e o projeto do ferramental estar pronto inicia-se a confecção da ferramenta. As etapas normalmente presentes são: pré-usinagem, tratamento térmico, usinagem final, polimento e tratamento superficial. A Figura 8 resume as soluções comumente utilizadas em ferramentas de estampagem para cada etapa da fabricação.

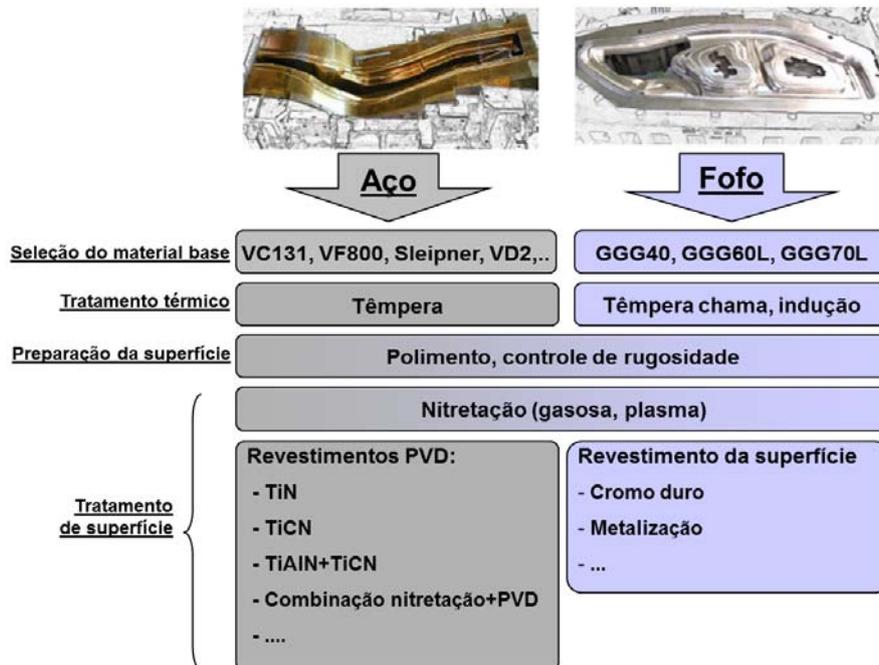


Figura 8. Opções existentes no mercado para ferramentas de estampagem.⁽²⁾

A escolha vai depender da resistência ao desgaste que se deseja dar à ferramenta, o que é definido pela criticidade do processo, quantidade de produção mensal do componente e outros fatores conforme a Figura 9.

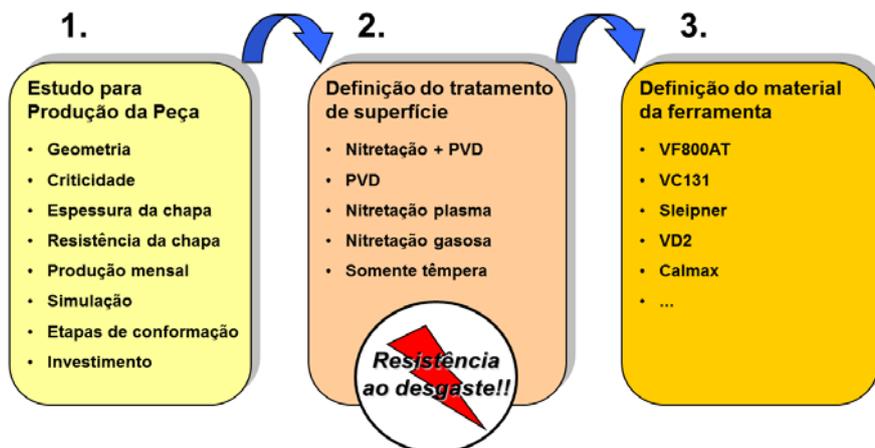


Figura 9. Sequência ideal para a escolha do beneficiamento a ser feito na ferramenta.

A capacidade de resistir ao desgaste depende primeiramente da escolha correta do material base. Outro fator de grande importância é a qualidade e do polimento,⁽¹²⁾ pois os revestimentos PVD só são eficazes quando a superfície onde eles são aplicados está com a rugosidade correta para a aplicação.

5 CONFEÇÃO DA FERRAMENTA X ATRITO

Neste caso o desafio se encontra no fato de que a geometria final da peça só é conhecida após a realização de testes com a ferramenta. O comportamento da chapa dentro da ferramenta depende fortemente das condições de atrito, que por sua vez dependem da qualidade superficial dos aços. Muitas vezes, devido às limitações de prazos ou para reduzir custos, a equipe se vê tentada a realizar testes com a ferramenta sem o devido polimento ou mesmo antes de realizar o tratamento térmico, o que pode trazer problemas posteriores. Os testes em prensa deveriam ser efetuados em uma condição o mais próximo possível das condições futuras de produção, portanto os aços devem estar já temperados e polidos. As re-usinagens, que na maioria das peças de maior complexidade são inevitáveis, devem ser executadas nos aços temperados. A sequência de fabricação recomendada é mostrada na Figura 10.

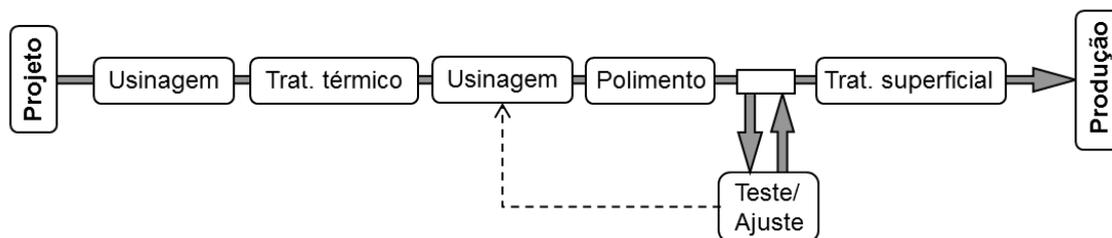


Figura 10. Sequência recomendada para a fabricação do ferramental.

6 CONCLUSÕES

A técnica de produção de componentes estampados exige conhecimentos sobre a tribologia dos diferentes processos. Uma boa técnica de ferramentaria tem como base por um lado o conhecimento dos fenômenos de atrito e desgaste que ocorrem durante o processo, por outro lado o domínio das técnicas disponíveis atualmente para a fabricação e beneficiamento dos componentes ativos da ferramenta.

As técnicas existentes para endurecimento e revestimento de superfícies só são eficazes se o componente a ser tratado for especificado de forma correta desde a escolha do material, tratamento térmico e preparação da superfície. A redução do tempo de desenvolvimento requer a correta definição das etapas necessárias para a confecção da ferramenta levando-se em conta a necessidade de testes na prensa em condições próximas às de produção. Assim garante-se um desenvolvimento sem interrupções para retrabalhos e uma produção robusta com mínima necessidade de manutenções.

REFERÊNCIAS

- 1 Souza, J.H.C.; Liewald, M.; Eckert, A.: Estratégias de Simulação e Prototipagem Rápida no Desenvolvimento de Peças de Chapas. 28º Senafor – 11º Conferência Internacional de Chapas, Porto Alegre, RS, Brasil, 8 a 10 de outubro de 2009
- 2 Souza, J.H.C.: Otimização de Superfícies Tribológicas em Ferramentas para Conformação de Chapas. 29º Senafor – 13º Conferência Internacional de Chapas, Porto Alegre, RS, Brasil, 14 a 16 de outubro de 2009



- 3 Stribeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. VDI-Zeitschrift 46, S. 1341, 1432 and 1463, 1902
- 4 Schedin, E.: Galling mechanisms in sheet forming operations. Wear 179 (1), pp.123-128, 1994
- 5 Hanson, M.; Stavlid, N.; Coronel, E.; Hogmark, S.: On adhesion and metal transfer in sliding contact between TiN and austenitic steel. Wear 264, pp. 781-787, 2008
- 6 Gåård, A.; Krakhmalev, P.V.; Bergström, J.; Hallbäck, N.: Galling resistance and wear mechanisms – cold work tool materials sliding against carbon steel sheets. Tribology Letters 26-1, pp. 67-72, 2006
- 7 Hopkins, D.N. / Harrington, C.D. / Black, B.R. Reduce maintenance costs by using engineered surfaces to control friction and galling. Wear 225, pp. 27-37, 1999
- 8 Bender, D.: Innovative coatings for sheet-metal processing tools. In: New Developments in Sheet Metal Forming. IFU-Konferenz 2002, Universität Stuttgart
- 9 Podgornik, B.; Hogmark, S.: Surface modification to improve friction and galling properties of forming tools. Journal of Materials Processing Technology 174, pp. 334-341, 2006
- 10 Podgornik, B.; Hogmark, S.; Sandberg, O.: Proper coating selection for improved galling performance of forming tool steel. Wear 261, pp. 15-21, 2006
- 11 Clarysse, F.; Lauwerens, W.; Vermeulen, M.: Tribological properties of PVD tool coatings in forming operations of steel sheet. Wear 264, pp. 400-404, 2008
- 12 Shey, S.; Louis, G.H.; Richmond, O.: Tool Surface Topographies for Controlling Friction and Wear in Metal-Forming Processes. Journal of Tribology 120, pp. 517-527, 1998.