

# Conformação Mecânica de Múltiplos Estágios

Cássio Aurélio Suski



Florianópolis – SC  
2015



### **Reitoria:**

Rua 14 de Julho, 150 Bairro: Coqueiros,  
Florianópolis - Santa Catarina  
CEP: 88075-010  
Telefone: (48) 3877-9000 / Fax: (48) 3877-9060  
www.ifsc.edu.br

### **Revisão:**

Graziela Morelli

### **Diagramação e Capa:**

Luiz Henrique Bier Maia

Proibida a reprodução total ou parcial desta obra.

Catálogo na fonte pelo Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC  
Reitoria

S964p

Suski, Cássio Aurélio.

Conformação mecânica de múltiplos estágio / Cássio Aurélio  
Suski. - Florianópolis: Publicações do IFSC, 2014.  
96 p. ; 15 x 21cm.

Publicado também em versão eletrônica.

Disponível em: <http://www.ifsc.edu.br/pesquisa/menu-inst-livros-do-ifsc>  
ISBN:978-85-8464-027-0

1. Conformação mecânica. 2. Extrusão. 3 Matrizes de  
conformação. I. Título.

CDD 621

Ficha catalográfica elaborada por:  
Paula Oliveira Camargo - CRB 14/1375



# SUMÁRIO

<b>1. Conceitos Básicos de Conformação .....</b>	<b>11</b>
1.1 Processos de Conformação .....	11
1.2 Recalque .....	11
1.3 Extrusão .....	12
1.3.1 Extrusão direta .....	13
1.3.2 Extrusão Inversa .....	13
1.4 Corte .....	14
<b>2. Equipamentos e Ferramentas de Conformação Mecânica .....</b>	<b>15</b>
2.1 Prensas horizontais de múltiplos estágios .....	15
2.2 Ferramentas de conformação de múltiplos estágios .....	19
2.3 Materiais para ferramentas de conformação mecânica .....	20
<b>3. Mecanismos de Falha de Ferramentas de Conformação Mecânica .....</b>	<b>22</b>
3.1 Desgaste .....	22
3.2 Tribologia .....	23
3.3 Classificação dos processos de desgaste .....	26
3.4 Tribosistema .....	27
3.5 Mecanismos de desgaste .....	29
3.5.1 Adesão .....	31
3.5.2 Abrasão .....	33
3.5.3 Fadiga .....	37
3.5.4 Reação triboquímica .....	39
<b>4. Projeto de Conformação Mecânica .....</b>	<b>41</b>
4.1 Projeto da sequência de conformação .....	41
4.1.1 Cálculo de volume .....	41
4.1.2 Cálculo do fator de recalque .....	41
4.1.3 Máximo diâmetro de recalque levando em conta o atrito .....	42
4.1.4 Porcentagem de redução .....	43
4.1.5 Ângulo ótimo .....	44
4.1.6 Distribuição de volumes nas pré-formas .....	45
4.1.7 Tensão de Recalque .....	45
4.1.8 Cálculo de flambagem .....	45
4.1.9 Extrusão livre .....	46

4.1.10	Extrusão forçada .....	47
4.1.11	Extrusão inversa .....	48
4.1.11.1	Porcentagem de Redução .....	48
4.1.11.2	Tensão de extrusão inversa .....	49
4.2	Projeto da ferramenta de conformação .....	51
4.2.1	Método da relação entre o diâmetro da carcaça e do inserto das matrizes na conformação a frio com um anél de contração e um inserto .....	54
4.2.2	Relação entre o diâmetro da carcaça e do inserto das matrizes na conformação a frio com um anél de contração e múltiplos insertos .....	55
4.2.3	Método das tensões radiais .....	55
4.2.4	Interferências entre os anéis de contração .....	56
4.2.5	Extração da peça .....	57
4.2.5.1	Extração telescópica .....	57
4.2.5.2	Extração com bucha .....	57
4.2.6	Recorte .....	58
4.2.6.1	Recorte com uma matriz .....	58
4.2.6.2	Recorte com duas matrizes .....	58
4.3	Exemplo de desenvolvimento de projeto de sequência de conformação mecânica .....	58
4.3.1	Análise do desenho do cliente .....	58
4.3.2	Cálculo do volume total da peça .....	59
4.3.3	Determinação do comprimento inicial do tarugo .....	61
4.3.4	Definição da sequência de conformação, desde o corte até a peça final .....	62
4.3.5	Cálculo do percentual de redução .....	63
4.3.6	Cálculo dos comprimentos do primeiro estágio .....	63
4.3.7	Recalque .....	64
4.4	Dimensionamento das ferramentas de conformação .....	65
4.5	Outros exemplos .....	69
<b>5. Simulação em Conformação .....</b>		<b>77</b>
5.1	Exemplo de aplicação de software de simulação .....	78
5.2	Resultados .....	79
5.3	Considerações sobre simulação .....	83
<b>Referências Bibliográficas .....</b>		<b>91</b>

## **AGRADECIMENTOS**

O autor agradece, em especial, à sua esposa, a Designer Graziela Morelli, pela formatação de tabelas e figuras.

Agradece ainda ao Eng. Mário José Soares pela confecção dos desenhos das sequências de conformação e ao Eng Rafael König por ceder imagens de sua autoria.

São entendidos também os agradecimentos ao Instituto Federal de Santa Catarina pela publicação do livro.



## PREFÁCIO

O início dos processos de conformação mecânica datam do período onde o homem passa a extrair os minérios da crosta terrestre a fim de produzir utensílios e artefatos metálicos para uso diário. Há mais de 4000 anos antes de Cristo o homem já trabalhava metais como o ouro, cobre, prata e até mesmo algumas misturas de minérios com presença de ferro. Nesta época os processos de conformação eram bastantes rudimentares e realizados com o auxílio de rochas como ferramentas de conformação.

Atualmente estes processos de conformação se desenvolveram por meio de equipamentos de elevada produtividade e precisão dimensional. São prensas de múltiplos estágios que fabricam desde pequenos parafusos até componentes especiais para as indústrias automotiva, aeronáutica, eletrônica e muitas outras.

Os principais fatores considerados para o desenvolvimento dos processos de conformação são os econômico/financeiros e a garantia de propriedades mecânicas adequadas para cada aplicação a que se destinam os produtos fabricados.

Este livro visa dar uma contribuição aos alunos de cursos técnicos e de graduação dos Institutos Federais e Universidades voltados para à fabricação mecânica. Inicialmente conceitos e tipos de conformação são apresentados. Em seguida são explanados assuntos relacionados aos equipamentos, ao processo, às ferramentas de conformação e seus mecanismos de falhas. São abordados assuntos práticos relacionados ao projeto da sequência de conformação de componentes através de equipamentos de múltiplos estágios. A abordagem se baseia na teoria de cálculos simplificados, porém não menos precisos, a fim de facilitar a compreensão do público interessado na área de conformação mecânica. São mostrados exemplos de cálculos de sequências de conformação e noções sobre a contribuição da simulação computacional por elementos finitos. Espera-se que este livro possa contribuir com a disseminação do restrito conhecimento em projetos de conformação mecânica de múltiplos estágios e que possibilite o maior interesse por esta área que representa o processo de fabricação mais utilizados na produção de componentes no mundo.



# 1. CONCEITOS BÁSICOS DE CONFORMAÇÃO

## 1.1. Processos de Conformação

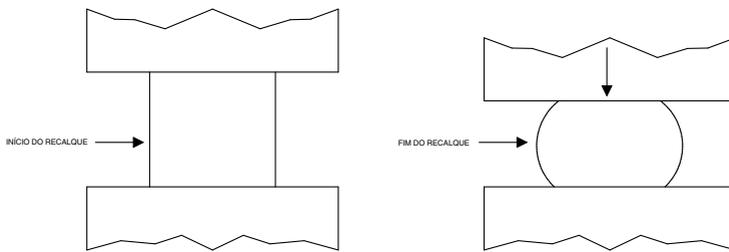
Os processos de conformação alteram a geometria do material (deformação plástica) por meio de ferramentas e equipamentos que aplicam forças ao material. São diversos os fatores que influenciam nas características das peças conformadas. Dentre estes fatores pode-se citar a composição química e a estrutura metalúrgica (natureza, tamanho, forma e distribuição das fases presentes) dos materiais utilizados; o tipo, grau e velocidade de deformação aplicada e a temperatura a qual o material foi submetido antes da conformação.

Existem centenas de processos de conformação mecânica e estes podem ser classificados pelo tipo de esforço de deformação do material, pela variação da espessura da peça conformada, pelo regime de operação e pelo propósito da deformação.

Dentre estes processos os mais comumente encontrados nas operações de múltiplos estágios são o recalque, a extrusão, e o corte/recorte. Além destes pode-se encontrar ainda a laminação e a trefilação em processos de suporte. A laminação é utilizada para formação das roscas, canais e recartilhos e a trefilação é utilizada para calibração do fio máquina a ser utilizado para a fabricação dos componentes.

## 1.2. Recalque

O recalque (figura 1.1) consiste na compressão direta do material entre um par de ferramentas de face, em geral, plana ou côncava a fim de reduzir a altura e aumentar a seção transversal da peça. O recalque é muito empregado também para formação dos estágios intermediários de fabricação de peças conformadas, como por exemplo, as cabeças de parafusos, pregos, válvulas, etc. Em geral a forma final destes componentes é precedida de estágios intermediários. A matéria-prima é cortada a partir de barras ou arames e o processo de recalque pode ocorrer em um ou mais estágios, podendo ser realizado a frio, morno ou quente. Além disto é bastante importante para o estudo teórico dos processos de conformação e para o ensaio de materiais.



**FIGURA 1.1** — Processo de recalque.

### 1.3. Extrusão

O processo de extrusão (figuras 1.2 e 1.3) se baseia no escoamento de material em direção paralela ao do movimento das matrizes e pode ser dividido, principalmente, em extrusão direta e extrusão inversa.

Na extrusão direta o sentido do movimento do material é o mesmo que ao do trabalho realizado e na extrusão inversa o sentido do movimento do material é contrário ao do trabalho realizado.

No processo de extrusão a ferramenta conformadora é uma matriz cônica convergente, através da qual a peça bruta é empurrada. Atualmente o processo de extrusão é utilizado para a fabricação, principalmente de tubos sem costura e perfis de aço e metais leves, porém também é parte fundamental nos estágios intermediários de fabricação de componentes por múltiplos estágios, podendo ser utilizado a frio ou a quente.

### 1.3.1 Extrusão direta:

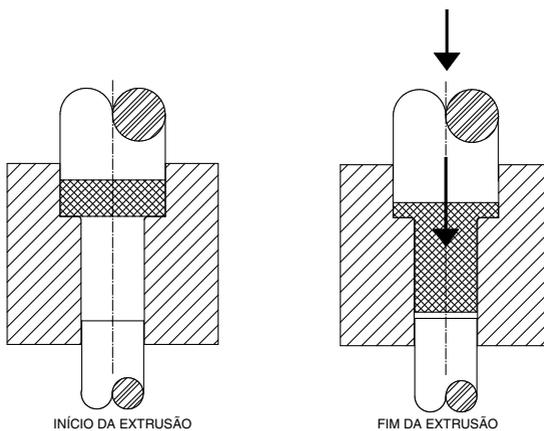


FIGURA 1.2 — Processo de extrusão direta.

### 1.3.2 Extrusão Inversa:

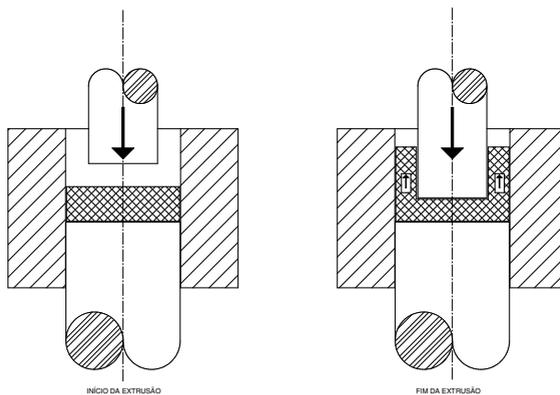


FIGURA 1.3 — Processo de extrusão inversa.

## 1.4. Corte

O processo de corte/recorte (figura 1.4) consiste no cisalhamento de material sob ação de uma matriz de recorte sobre um material, dando a peça o perfil da ferramenta. O recorte é bastante utilizado, por exemplo, nos últimos estágios de conformação de cabeças de parafusos sextavados, quadrados, etc.

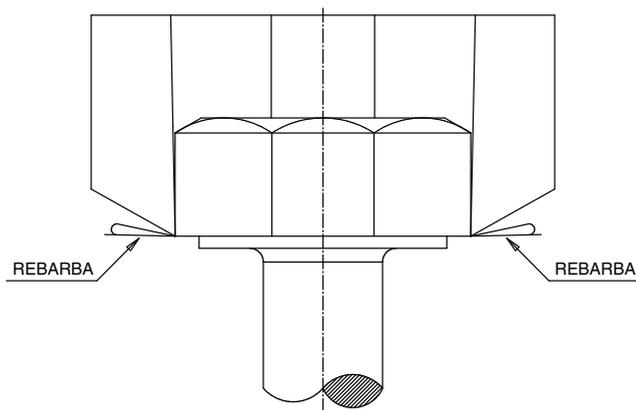


FIGURA 1.4 — Processo de corte/recorte.

Os processos de conformação podem ser classificados em trabalho a frio, a morno e a quente. Considera-se trabalho a frio quando os processos de recuperação e recristalização não são efetivos, ou seja, os grãos cristalinos permanecem encruados. No trabalho a morno ocorre recuperação, porém não há recristalização dos grãos. E o trabalho a quente ocorre quando há temperatura e taxa de deformação tais que processos de recuperação e recristalização ocorrem simultaneamente com a deformação, ou seja, o encruamento e a estrutura distorcida dos grãos produzida pela deformação, são rapidamente eliminados pela formação de novos grãos livres de deformação, como resultado da recristalização.

## 2. EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

### 2.1. Prensas horizontais de múltiplos estágios

As prensas de múltiplos estágios são fabricadas há décadas por países como Itália, Estados Unidos, Bélgica, Alemanha e China, e somente nos últimos anos o Brasil iniciou o desenvolvimento destes equipamentos ainda de forma bastante embrionária, mas muito importante para o desenvolvimento dos processos de conformação mecânica no país.

Nas operações de múltiplos estágios a área da seção transversal é progressivamente reduzida a fim de distribuir os esforços mecânicos nas ferramentas e na prensa.

Inicialmente as prensas horizontais destinavam-se apenas para a fabricação de porcas e parafusos padrão partindo-se de fio máquina ou arame. No entanto com o passar dos anos foram incorporadas tecnologias que permitiram a maior precisão dimensional dos produtos produzidos. Estas tecnologias permitiram a fabricação de produtos automotivos, aeronáuticos e eletroeletrônicos com geometrias de alta complexidade.

Atualmente estes equipamentos podem ter até sete estágios e utilizam-se das mais modernas técnicas de servo-acionamento e de acionamento direto, assim como o emprego de novos materiais, corte fino, alimentação linear do arame, revestimentos funcionais e métodos de processamento que resultam em soluções completamente inéditas, proporcionando grandes vantagens para o setor industrial. As figuras 2.1 e 2.2 mostram imagens ilustrativas de uma prensa horizontal de cinco estágios.

As prensas de múltiplos estágios possuem características construtivas que limitam os diâmetros e comprimentos dos componentes a serem conformados. A seguir serão elencadas algumas destas características:

- Diâmetro de entrada;
- Comprimento de corte;
- Comprimento dentro da matriz fixa;
- Comprimento dentro da matriz móvel;
- Número de estágios;

- Rotação da peça entre os estágios;
- Recorte;
- Furação;
- Força de conformação;
- Número de peças/minuto.

O diâmetro de entrada se refere a dimensão do fio máquina ou arame que será inserido na prensa. Este possui diâmetros máximos e mínimos de entrada que são limitados pelo orifício de entrada.

O comprimento de corte máximo é limitado pela máxima abertura entre as matrizes fixas e as matrizes móveis e o comprimento mínimo de corte é limitado pelo tamanho das pinças que realizam o transporte do componente de um estágio precedente para um estágio subsequente.

Os comprimentos dentro da matriz fixa e da matriz móvel limitam o comprimento do componente conformado, onde o máximo comprimento está relacionado a soma de ambos comprimentos das matrizes. No caso de conformação de componentes com cabeça, como por exemplo parafusos, o comprimento da haste do parafuso será limitado pelo comprimento da matriz fixa (figura 2.1).

A complexidade do componente será maior quanto maior for o número de estágios da prensa, pois a cada estágio o produto ganha uma nova forma.

Outra característica que possibilita a maior complexidade do conformado é a possibilidade de alguns tipos de prensas possuírem uma rotação de até 180° entre os estágios, ou seja, quando a pinça transporta o conformado de um estágio precedente para o subsequente esta pinça realiza uma rotação do conformado.

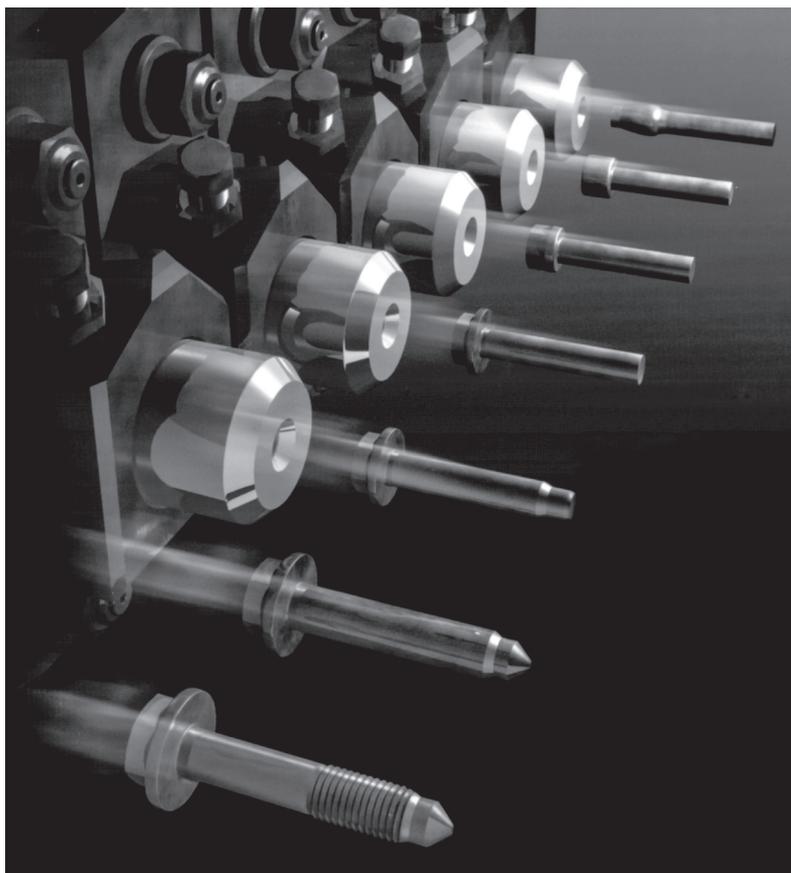
O recorte e a furação de partes do componente conformado somente é permitido caso exista a possibilidade de extrair o material. A matriz de recorte possui uma limitação quanto ao tamanho do recorte e, no caso da furação, em geral, existe um orifício onde o miolo retirado é forçado a passar dentro da matriz.

A força de conformação é a máxima força que o equipamento pode exercer sobre o componente a ser conformado. É de extrema importância que se projete a sequência de conformação a fim de distribuir igualmente os esforços nos diversos estágios do equipamento, minimizando as quebras de ferramentas e do equipamento.

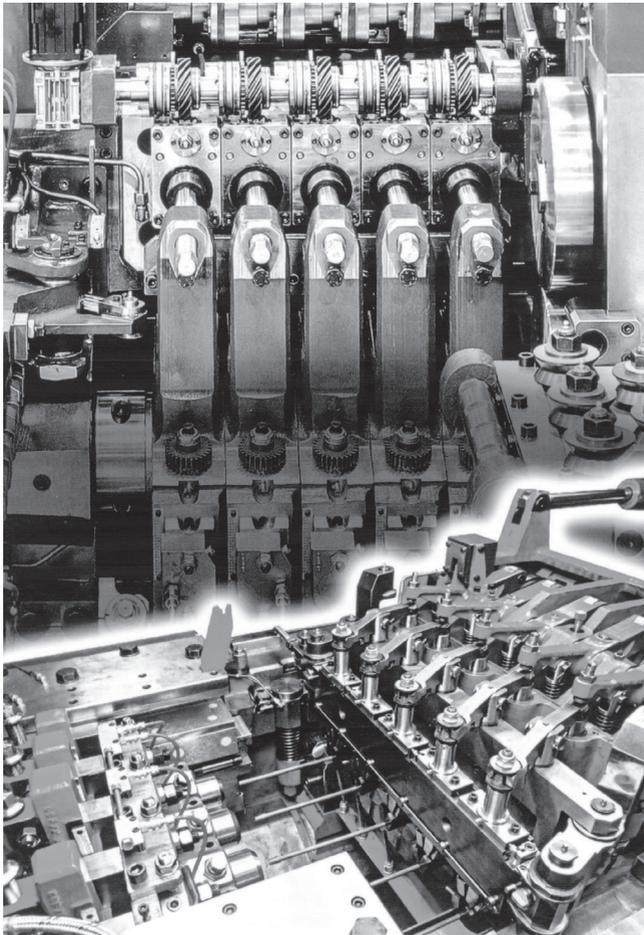
O número de peças/minuto se refere ao máximo de peças que poderão ser produzidas quando o equipamento estiver em regime.

Como exemplo, uma prensa de 5 estágios (curta) para parafusos, com

força de conformação de 190 toneladas e diâmetro de entrada de 10 a 16 mm, possui um comprimento de corte de 195 mm; comprimento dentro da matriz fixa de 170 mm; comprimento dentro da matriz móvel de 30 mm; a matriz de recorte possui um diâmetro de 60 mm e 120 peças/minuto.



**FIGURA 2.1** — Ilustração de uma prensa de cinco estágios e a sequência de conformação.



**FIGURA 2.2** — Prensa horizontal de cinco estágios.

Exemplos de seqncias de conformação de componentes:

As figura 2.3 e 2.4 mostram, respectivamente, seqncias de conformação de uma porca e uma bucha especial que podem ser fabricados em equipamentos de múltiplos estágios.

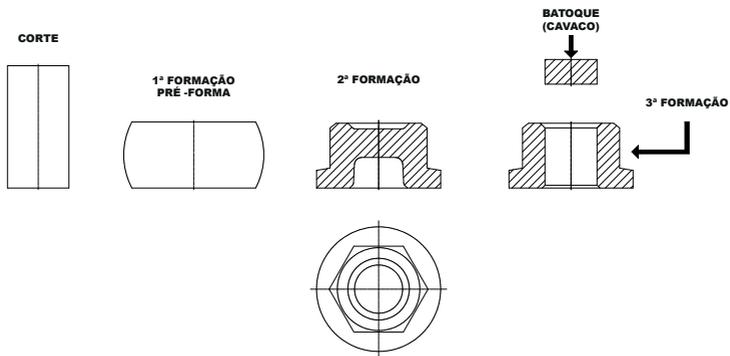


FIGURA 2.3 — Sequência de conformação de uma porca em três estágios.

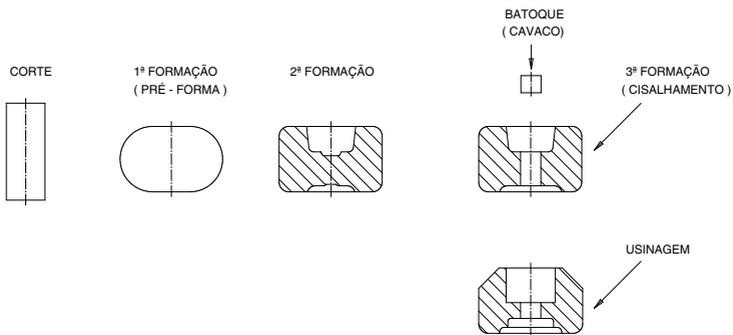


FIGURA 2.4 — Sequência de conformação de uma bucha especial em três estágios.

## 2.2. Ferramentas de conformação de múltiplos estágios

As ferramentas de conformação mecânica para processos de múltiplos estágios são formadas, principalmente, pelas matrizes fixas e matrizes móveis.

As matrizes fixas podem ser constituídas de capa (carça), anéis de contração (sobrecapa), núcleos (insertos) e extratores.

As matrizes móveis, também chamadas de martelos, podem ser constituídas de capa (carça), anéis de contração (sobrecapa), núcleos (insertos), punções e matrizes de corte/recorte.

Ambas as matrizes podem possuir diversas configurações construtivas, como por exemplo, encarcadas sob pressão (a frio), encarcadas a quente, fixas por rosqueamento, com sistema de gaveta, etc.

A figura 2.5 mostra um exemplo de conjunto de ferramentas de conformação mecânica para fabricação da pré-forma de uma porca.

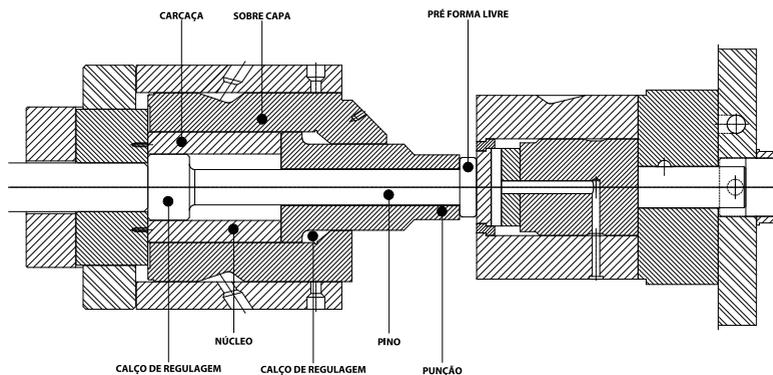


FIGURA 2.5 — Ferramenta de conformação mecânica.

### 2.3. Materiais para ferramentas de conformação mecânica

A escolha dos materiais e dos processos de fabricação de ferramentas devem levar em consideração alguns aspectos, como:

- Resistência ao desgaste;
- Tenacidade;
- Tensões e esforços no processo de conformação;
- Total de peças a produzir;
- Custo;
- Tratamento térmico;
- Acabamento superficial.

O aspecto econômico da escolha de materiais para ferramentas de conformação mecânica é extremamente importante visto que os custos são elevados quando se opta por materiais de elevada resistência ao desgaste como, por exemplo, o metal duro.

Os dois tipos de aços para trabalho a frio mais frequentemente empregados na fabricação de matrizes para conformação a frio são o M2 e o D2, temperados e revenidos para dureza entre 56 e 61 HRC. O aço D2 é mais facilmente encontrado, apresenta tratamento térmico mais fácil, porém apresenta resistência ao desgaste menor que o M2.

Outros materiais indicados para a fabricação de matrizes para conformação a frio são o VF800AT, os aços rápidos sinterizados e o metal duro de carboneto de tungstênio com adição de cobalto.

O metal duro apresenta elevada rigidez, resistência à compressão e ao desgaste, porém possui baixa tenacidade, baixa resistência à tração e à fadiga e custos elevados.

Desta forma o metal duro é indicado para grandes produções com tolerâncias dimensionais apertadas em equipamentos que possam evitar a falha das matrizes por tração ou fadiga.

Abaixo são indicados os principais materiais utilizados para cada um dos itens que compõe as ferramentas de conformação:

- Para as capas (carcaças) de martelos (matrizes fixas) e de matrizes móveis, aços para trabalho a quente H11, H12 e H13;
- Para anéis de contração (sobrecapas) de matrizes móveis, aços para trabalho a frio M4, M42, M2 e D2;
- Para núcleos de martelos e de matrizes móveis aços para trabalho a frio M4, M42, M2 e D2 e metal duro;
- Para punções de extrusão inversa e extratores, aços para trabalho a frio M4, M42, M2, D2 e os aços rápidos sinterizados;
- Para punções na extrusão direta, aços para trabalho a frio M2, D2, O1 e S1 e os aços rápidos sinterizados;

### 3. MECANISMOS DE FALHA DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

As ferramentas de conformação podem falhar por diversos mecanismos, tais como desgaste, lascamento, deformação plástica, fadiga, trincas, fluência, tratamento térmico inadequado, projeto deficiente, dentre outros.

O desgaste, juntamente com os erros de projeto, são os fatores que causam a maior parte das falhas e a redução na vida útil de ferramentas de conformação a frio, além de resultar em produtos com condições superficiais intoleráveis. Neste livro abordar-se-ão os fatores desgaste e projeto de conformados.

#### 3.1. Desgaste

O desgaste do ferramental influencia diretamente a eficiência, acabamento e qualidade do produto. Portanto, este é o ponto crítico com relação a reparos dos componentes da ferramenta, falhas e paradas indesejadas nas linhas de produção. Além disso, a tendência do mercado é o crescimento da velocidade de produção e a utilização de processos mais eficientes para a fabricação de produtos.

Um dos principais meios de desgaste para estas ferramentas é o atrito de superfícies de contato por escorregamento relativo. Em geral, com algumas exceções como para frenagem, o coeficiente de atrito e pressão devem ser tão baixos quanto possíveis para reduzir o desgaste do material da ferramenta.

Atrito e desgaste são fenômenos tão antigos quanto a humanidade. No período Paleolítico o fogo era gerado pelo atrito de madeira em madeira ou de lascas de pedras. No período Mesolítico, nas civilizações egípcias, muitas brocas, rodas e trenós para transporte pesado foram fabricados, além de muitas evidências de utilização de lubrificantes para minimizar o atrito e desgaste.

Após a Renascença, Leonardo Da Vinci (1452 – 1519) deu importantes contribuições no entendimento dos fenômenos de atrito e desgaste. Da Vinci mediu forças de atrito em planos horizontais e inclinados. Ele mostrou que as forças de atrito eram dependentes da força normal ao deslizamento de corpos e independentes da área de contato aparente. Propôs uma distinção entre atrito de escorregamento e de rolamento, além de investigar a influência do lubrificante na redução do atrito. Além disso, introduziu o coeficiente de atrito como sendo proporcional a força normal. Da Vinci estudou particularmente

o atrito em mancais, sugerindo a utilização de uma liga com 30 % de cobre e 70 % de estanho para mancais planos, com a intenção de reduzir o efeito do atrito (ZUM-GAHR, 1987).

Aproximadamente dois séculos depois Guillaume Amontons (1663 – 1705) confirmou, independentemente do trabalho de Da Vinci, que a força de atrito depende da força normal e independente da área de contato aparente. Além disso, mostrou que o uso de lubrificantes, como a gordura de porco, formava uma camada que impedia o contato entre os corpos, ou seja; independia dos pares de materiais estudados (ZUM-GAHR, 1987).

Assim, Amontons e Da Vinci, encontraram valores constantes ( $1/3$  e  $1/4$ , respectivamente) para o coeficiente de atrito, independente do material dos corpos de escorregamento em uso (madeira, aço, cobre, chumbo, etc.).

Cientistas como, Charles Augustin Coulumb (1736 – 1806), Leonhard Euler (1707 – 1783), John Theophilus Desagulier (1683 – 1744), Osborne Reynolds (1842 – 1919), Heirich Rudolph Hertz (1869 – 1851), George Vogelpohl (1900 – 1975), Frank Philip Boluden (1903 – 1968) e muitos outros deram importantes contribuições para o desenvolvimento histórico do conhecimento dos fenômenos de atrito, lubrificação e desgaste. Em 1979, Dowson apresentou uma revisão sobre a história da tribologia mostrando a contribuição de cada um destes cientistas (DOWSON, 1979).

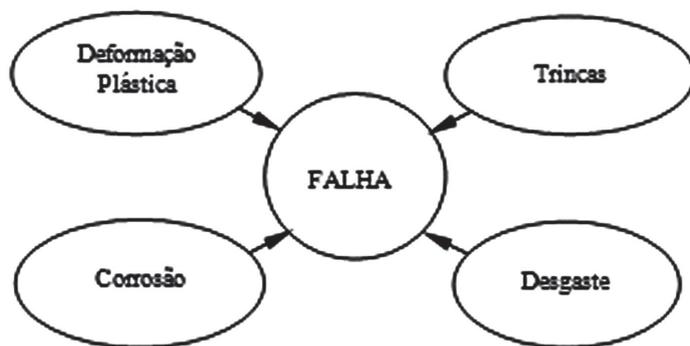
### **3.2. Tribologia**

A ciência que estuda o desgaste e o atrito, ou seja; a interação de superfícies em movimento e de técnicas relacionadas às mesmas é denominada de tribologia. Ela foi introduzida pelo comitê de lubrificação criado por Schofield e abrange a investigação de todos os tipos de atrito, lubrificação e desgaste (JOST & SCHOFIELD, 1981). Um grande número de estudos tem sido realizado nas últimas três décadas mostrando os aspectos econômicos da tribologia, como por exemplo; The Jost Report na Inglaterra (1966), The Tribology Reports na Alemanha (JOST et al., 1981), The Asme Report nos Estados Unidos (1977), o estudo de Jost e Schofield (1981), além de atividades de pesquisa em outros países (JOST et al., 1981).

A norma DIN 50320 (1979) define desgaste como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, isto é; o contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um corpo sólido, líquido ou gasoso. O desgaste, como mostrado na figura 3.1, é uma das possíveis

causas de falhas de componentes ou estruturas. A falha será função da aplicação, das condições de funcionamento e do meio no qual o mesmo se encontra.

O desgaste é a principal causa da deteriorização dos componentes de máquinas devido à fadiga superficial do material (BARWELL, 1979). Ele raramente é catastrófico, porém reduz a eficiência da operação, podendo resultar em mudanças dimensionais dos componentes ou danos na superfície, que podem gerar problemas secundários como vibrações e desalinhamentos. Entretanto, em casos extremos o desgaste causa a formação e propagação de trincas na superfície do componente ou próxima à mesma, podendo levar a sua fratura e a formação de fragmentos.



**FIGURA 3.1** — Mecanismos de falha de componentes e estruturas (ZUM-GAHR, 1987).

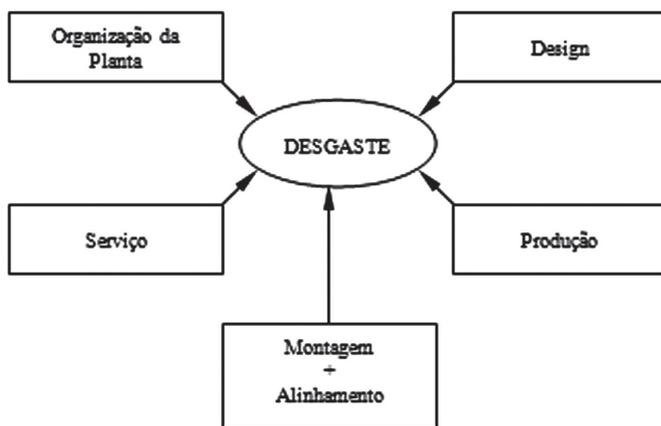
Estudos têm mostrado que as perdas devido ao atrito e desgaste são de aproximadamente 1 % na Alemanha (BMFT-REPORT, 1984), 2,5 % nos Estados Unidos (ASME-REPORT, 1977) e 2 % na Inglaterra (JOST, 1966) do total do produto nacional. Em outro estudo (BMFT-REPORT, 1984) realizado na Alemanha estimou que a perda anual devido ao atrito, desgaste e corrosão fosse de 4,5 % do total do produto nacional.

Resistência ao atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas do material, mas são características do sistema de engenharia (Tribosistema), podendo causar perdas de energia e material, respectivamente. Atrito é a resistência ao movimento e, aumenta com a interação da área de contato real dos sólidos.

As perdas devido ao desgaste podem ser reduzidas por otimização e organização, além de um design apropriado, produção, montagem, acessórios

(Fig. 3.2) e microestrutura do componente. O controle das perdas por desgaste deve iniciar com o correto processo de fabricação do produto, incluindo a escolha do material da ferramenta e revestimentos superficiais.

O design do produto pode reduzir efetivamente o desgaste de componentes, otimizando a transferência de força e movimento, o uso apropriado de materiais e lubrificantes em função da força, temperatura e ambiente. Partes submetidas ao desgaste devem ser projetadas para uma fácil substituição. O grau de exatidão da forma, tamanho, perfil da superfície, rugosidade e folga entre as superfícies durante o funcionamento influenciam o atrito e desgaste. A vida útil em serviço depende muito da exatidão da montagem, por exemplo, alinhamento exato e limpeza de quaisquer superfícies sujeitas à falha do componente.



**FIGURA 3.2** — Fatores que influenciam o desgaste da estrutura (ZUM-GAHR, 1987).

O conhecimento da microestrutura do componente e sua influência na resistência ao desgaste são de grande importância na seleção de materiais. Aspectos microestruturais, como por exemplo, defeitos cristalinos como vacâncias, discordâncias, contornos de grão, partículas de segunda fase, etc, podem afetar sensivelmente o desgaste das ferramentas. Através da composição química não se pode definir a microestrutura do material, porém a mesma pode ser alterada severamente através de tratamentos mecânicos, térmicos e termomecânicos.

### 3.3. Classificação dos processos de desgaste

Os processos de desgaste podem ser classificados pelos modos de desgaste. A figura 3.3 mostra esquematicamente os diferentes tipos de ações na interface de um corpo sólido. Em função do movimento das interfaces pode-se variar entre, deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão, dependendo da cinemática do sistema. A erosão pode ainda ser classificada pelo estado físico da contrapeça, por exemplo, sólido ou líquido, ou o ângulo de ação, conforme mostra a figura 3.3.

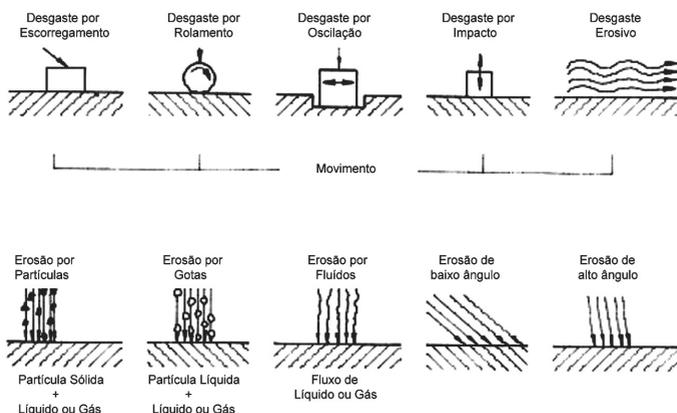
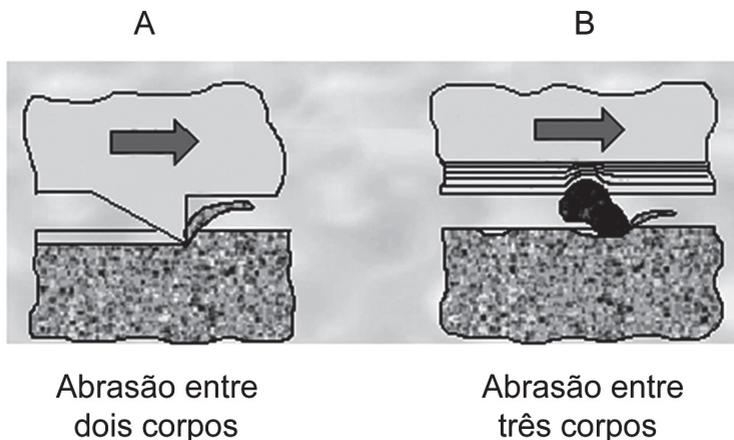


FIGURA 3.3 — Classificação dos processos de desgaste por modos de desgaste (PETERSON, 1980).

Os processos de desgaste também poderão ser classificados quanto ao elemento interfacial podendo ser de desgaste de 2-corpos ou estar sob ação de partículas sólidas pressionadas entre duas superfícies, por exemplo, poeira em lubrificantes ou minerais em rochas sob pressão, caracterizando um desgaste de 3-corpos (PETERSON, 1980), conforme pode-se observar na figura 3.4.



**FIGURA 3.4** — Desgaste de 2-corpos e 3-corpos (PETERSON, 1980).

### 3.4. Tribosistema

A aplicação de sistemas de conhecimento ou análise de sistemas pode ser muito útil para descrição dos processos tribológicos. Esta foi efetivamente aplicada para tribologia por Fleischer (1970), Czichos et al (1974), Molgaard (1975), Salomon (1974) e foi também inserida na norma DIN 50320 (1979).

O propósito do sistema tribológico é a transformação e/ou transmissão de entradas em saídas, as quais são utilizadas tecnologicamente. A figura 3.5 mostra a descrição funcional do sistema tribológico em geral. O relacionamento entre as entradas e saídas pode ser considerado como funções técnicas do tribosistema, onde de maneira geral os sistemas são formados por movimento, trabalho, massa e informação. Dependendo das entradas, como vibrações, tipo de material, aquecimento e atmosfera, pode-se ter fragmentos de desgaste, aquecimento, vibração e ruído.

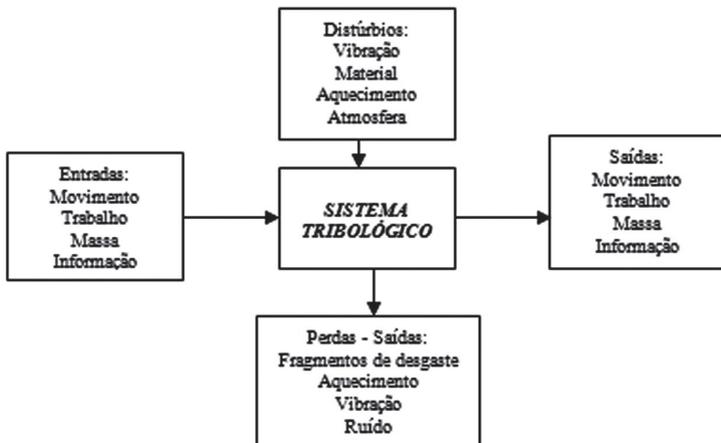


FIGURA 3.5 — Entradas e saídas do sistema tribológico (CZICHOS, 1977).

Usualmente um sistema tribológico é constituído de quatro elementos: (Figura 3.6)

- 1 – Corpo sólido
- 2 – Contrapeça
- 3 – Elemento interfacial
- 4 – Ambiente

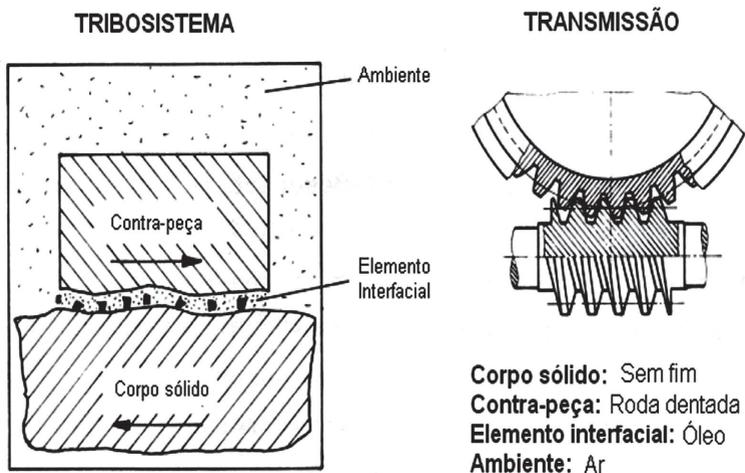


FIGURA 3.6 — Representação esquemática dos elementos do tribosistema (DIN 50320, 1979).

A contrapeça pode ser um sólido, um líquido, um gás ou uma mistura destes. Já os lubrificantes e poeira nos estados sólidos, líquidos, gasosos ou uma combinação entre estes, atuam como elemento interfacial. Em casos especiais, o elemento interfacial pode estar ausente.

A figura 3.6 mostra, de forma simplificada, o tribosistema geral de acordo com a norma DIN 50320 (1979). A estrutura do tribosistema é determinada pelos elementos, suas propriedades e interações entre eles.

### **3.5. Mecanismos de desgaste**

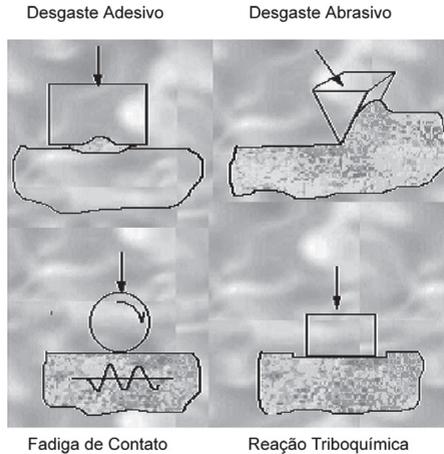
O enorme número de termos utilizados para descrever os mecanismos de desgaste frequentemente é um complicador do problema (LUDEMA, 1981). Termos que são relacionados ao aspecto da superfície desgastada ou mecanismos de desgaste (figura 3.7) muitas vezes são confundidos.

A tabela 3.1 mostra algumas destas classificações. Do ponto de vista dos mecanismos básicos, por exemplo, uma distinção entre fadiga, desgaste por impacto e delaminação parece ser arbitrária, enquanto desgaste adesivo baixo e desgaste adesivo severo descrevem a severidade de desgaste, porém apresentam o mesmo mecanismo de adesão. Por exemplo, na classificação de Jahanmir (1980), os primeiros sete tipos de desgaste ocorrem por interações de mecanismos, enquanto os últimos três são influenciados pelo ambiente e condições especiais.

Após redução de alguns termos da lista que são redundantes em relação aos mecanismos básicos, pode-se considerar quatro principais mecanismos de desgaste, conforme mostra a figura 3.7.

<b>Fonte</b>	<b>Referência</b>	<b>Mecanismos de desgaste</b>
Burwell e Strang	(BURWELL, 1952)	Desgaste abrasivo, desgaste corrosivo, desgaste por fadiga, erosão, fricção e cavitação.
Jahanmir	(JAHANMIR, 1980)	Adesão, delaminação, fricção, abrasão, erosão, desgaste por impacto, fadiga, desgaste por corrosão, desgaste difusivo e desgaste por contato elétrico.
Godfrey	(GODFREY, 1980)	Desgaste adesivo baixo, desgaste adesivo severo, abrasão, erosão, fadiga, delaminação, corrosão, eletrocorrosão, fricção corrosiva, falha por cavitação, descarga elétrica e polimento.
Rice	(RICE, 199_?; KALPAKJIAN, 1995)	Adesão, abrasão, fadiga, corrosão ou oxidação e elétrica.
DIN 50320	(DIN50320, 1979)	Adesão, abrasão, fadiga e reação triboquímica.

**TABELA 3.1** — Classificação dos mecanismos de desgaste obtidos em diversas fontes



**FIGURA 3.7** — Descrição esquemática de quatro principais mecanismos de desgaste (DIN 50320, 1979; KALPAKJIAN, 1995).

De acordo com a norma DIN 50320 (1979), os quatro mecanismos básicos de desgaste podem ser definidos como:

**Adesão:** Formação de pontos adesivos interfaciais, por exemplo, junções por soldagem fria.

**Abrasão:** Remoção de material devido a arrancamento.

**Fadiga:** Fadiga e formação de trincas nas regiões da superfície devido a tensões cíclicas, resultando em separação de material.

**Reação triboquímica:** formação de produtos de reação química como resultado de interações químicas entre elementos do tribosistema iniciado por ação tribológica.

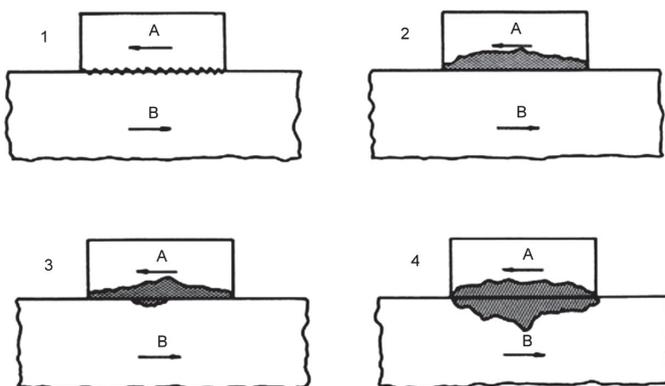
A seguir serão mostrados estes mecanismos básicos em maior detalhe.

### 3.5.1 Adesão

As superfícies dos materiais não são perfeitamente lisas e, portanto, contém reentrâncias de modo que o contato entre elas ocorre somente em alguns pontos. Assim, a área real de contato, é uma fração da área total aparente, tornando as tensões desenvolvidas nestas regiões muito elevadas, podendo ultrapassar o limite de escoamento do material e formar uma união. A tendência de união por adesão depende das propriedades físicas e químicas (KELLER et al., 1963; KALPAKJIAN, 1995) dos materiais

em contato, do modo e valor da força aplicada, além da contaminação (FRISCH, 1981) e rugosidade.

A figura 3.8 mostra diferentes separações de superfícies unidas por adesão. Se a resistência da união é menor do que a dos materiais A e B, a ruptura da adesão ocorre na interface. Isto frequentemente ocorre se as superfícies estão cobertas por óxidos que reduzem a aderência superficial [Figura 3.8 (1)]. A separação das uniões ocorre apenas no material A se este possuir a resistência mais baixa que a união ou que o material B [Figura 3.8 (2)]. Para uniões de alta resistência, o rompimento ocorre predominantemente no material A se este tiver menor resistência que a união e que o material B [Figura 3.8 (3)]. Nestas mesmas condições de uniões se os materiais tiverem resistências iguais ou muito similares a separação pode ocorrer em partes iguais de ambos os lados da interface [Figura 3.8 (4)].



**FIGURA 3.8** — Ruptura de uniões (1) Interface, (2) Adesão maior em A, (3) Adesão predominante em B, porém também em A, (4) Adesão distribuída igualmente (ZUM-GAHR, 1987; KALPAKJIAN, 1995).

Muitos mecanismos para o processo de adesão têm sido propostos na literatura (OUDAR et al., 1978). Kinloch (1980) propôs quatro grupos principais de mecanismos de adesão: (1) Adesão mecânica, (2) Adesão por difusão, (3) Adesão eletrônica e (4) Adesão por adsorção, representados esquematicamente na figura 3.9.

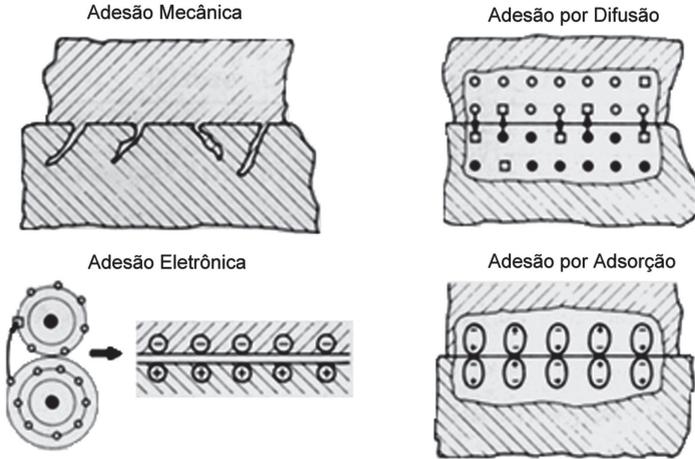
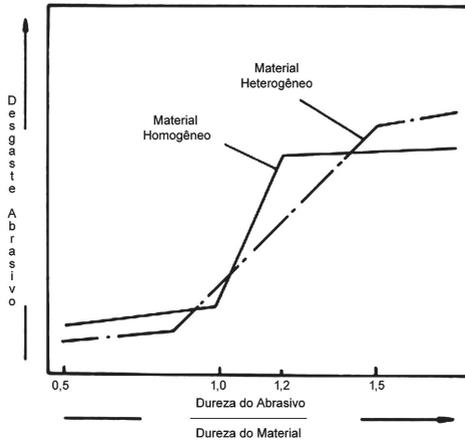


FIGURA 3.9 — Principais grupos de mecanismos de adesão (HOUWINK, 1965).

### 3.5.2 Abrasão

O desgaste por abrasão é causado pela interação mecânica de saliências grosseiras ou partículas não metálicas contra as superfícies de trabalho, provocando perda de massa por corte ou por arrancamento. Estas partículas podem ser, por exemplo, um mineral como a sílica ou um fragmento de desgaste de material de alta dureza. Protuberâncias, como a rugosidade superficial, podem agir como partículas de alta dureza caso esta superfície apresente maior dureza que a contrapeça.

Wahl et al (1951), em função da razão entre a dureza do abrasivo e a superfície que está sendo desgastada, classificaram o desgaste em baixo e alto nível. A figura 3.10 mostra a variação do desgaste abrasivo em função da razão entre as durezas para materiais homogêneos e heterogêneos (com carbonetos duros na matriz). Nos materiais homogêneos a mudança de nível ocorre quando a dureza do abrasivo é igual à do material desgastado, ou seja, a razão entre as durezas é igual a 1 (início da região inclinada – linha cheia). Nos materiais heterogêneos, devido a matriz ser mais dúctil do que a dos materiais homogêneos com o mesmo nível de dureza considera-se a transição de nível quando a dureza do abrasivo ultrapassa a do material (fase dura + matriz) - início da região inclinada, linha traço ponto.

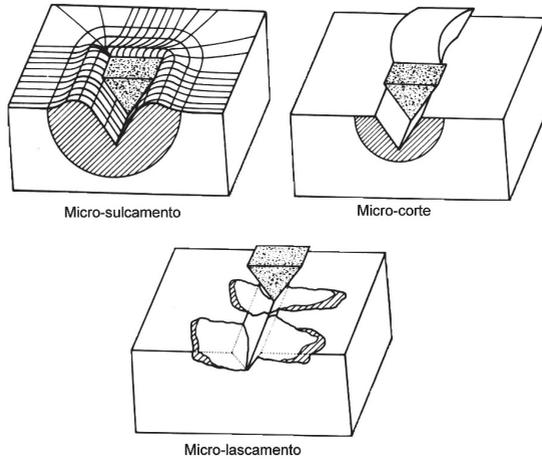


**FIGURA 3.10** — Desgaste abrasivo como função da razão de dureza de partículas abrasivas e dureza do material desgastado (WAHL et al, 1951).

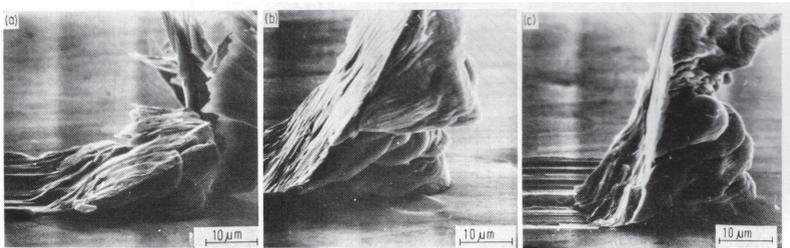
O desgaste abrasivo pode ser também classificado quanto ao aspecto da superfície desgastada (micromecanismo) em microsulcamento, microcorte e microlascamento, conforme mostrado na figura 3.11.

No microsulcamento a perda de material ocorre devido a muitas partículas abrasivas agirem simultaneamente e sucessivamente, formando um amassamento à frente da partícula abrasiva (MURRAY et al., 1979).

No microcorte puro tem-se uma perda de material igual ao volume do desgaste produzido, conforme se pode observar na figura 3.11. De acordo com Mulhearn, Samuels e Sedriks (1962), o material é destacado da superfície por microcorte quando o ângulo de ataque das partículas duras de abrasivo é maior do que um valor crítico. A figura 3.12 mostra um exemplo de microcorte em ferro ARMCO para diferentes ângulos de ataque.

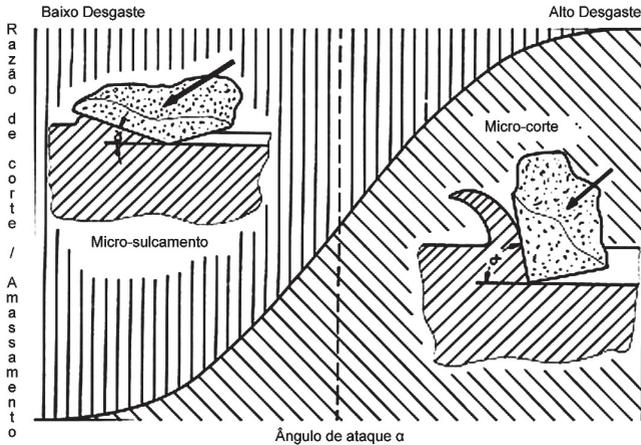


**FIGURA 3.11** — Interações físicas entre partículas abrasivas e superfícies de materiais (MURRAY et al., 1979).



**FIGURA 3.12** — Micrografias de ferro ARMCO com ângulos de ataque do abrasivo de (A) 30°, (B) 60° e (C) 90° (MULHEARN, 1962).

O ângulo de ataque crítico,  $\alpha_c$ , é uma função do desgaste do material e das condições do teste. Teoricamente,  $\alpha_c$  descreve uma severa transição entre microsulcamento e microcorte. Na prática, uma transição gradual de microsulcamento para microcorte é observada com o aumento do ângulo de ataque, conforme mostrado na figura 3.13.



**FIGURA 3.13** — Relação entre microsulcamento e microcorte em função da razão entre o ângulo de ataque e de ataque crítico (STROUD, 1962).

O microlascamento ocorre quando as partículas abrasivas impõem altas concentrações de tensões na superfície dos materiais, particularmente se forem frágeis. Nestes casos, fragmentos de desgaste são destacados da superfície devido à formação e propagação das trincas. De acordo com Bowden e Tabor (1964), muitos materiais frágeis podem escoar plasticamente acima de um valor crítico que resulta em formação de trincas.

De acordo com Williams (1994) o desgaste abrasivo pode ser representado pela equação de Archard:

$$\omega = \frac{2 \cdot \tan \theta \cdot W}{\pi \cdot S}$$

Onde:

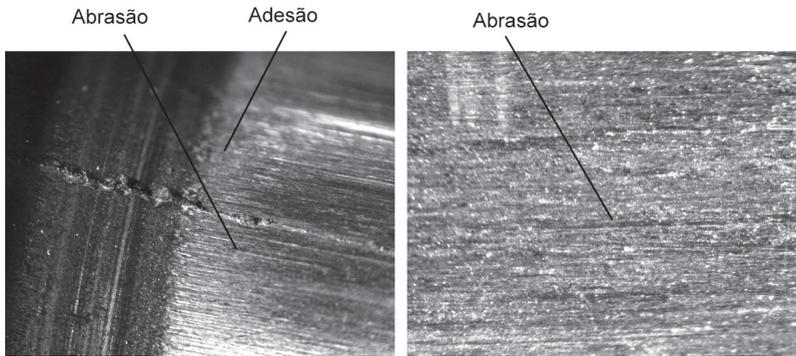
$\omega$  – Volume de desgaste [mm<sup>3</sup>]

$\theta$  – Ângulo de atuação do abrasivo [Graus]

$W$  – Carga (N)

$S$  - Dureza superficial

A figura 3.14 mostra um exemplo de combinação de desgaste adesivo e abrasivo em ferramentas de conformação mecânica de fabricação de elementos de fixação.



**FIGURA 3.14** — Ferramentas submetidas ao processo de extrusão (100 e 200 vezes de ampliação, respectivamente) (SUSKI, 2004).

### 3.5.3 Fadiga

O desgaste devido à fadiga é caracterizado pela formação de trincas e lascamento de material causados por carregamentos cíclicos na superfície do sólido. Estes carregamentos podem ser resultantes de rolamento, escorregamento de contato ou impacto de sólidos e/ou líquidos na superfície. E em escala microscópica este carregamento pode ser ocasionado pela rugosidade superficial de sólidos com movimento relativo.

Na fadiga por rolamento (BEAGLEY et al., 1976; KALPAKJIAN, 1995) são propostos dois mecanismos para formação de lascamentos superficiais; as trincas por compressão e as subsuperficiais, figura 3.15.

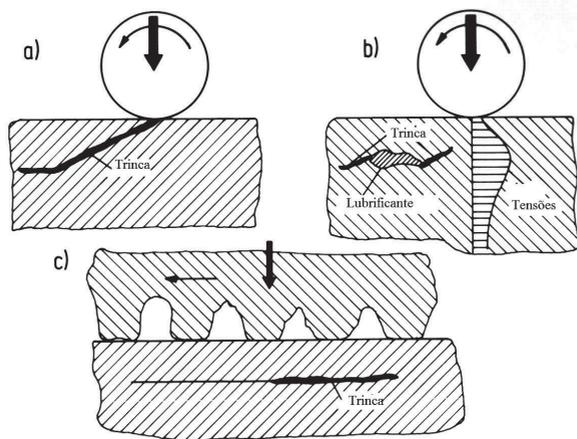
O primeiro assume que as trincas são causadas por alta tensão de compressão na área de contato. As trincas na superfície sólida iniciam em inclusões superficiais, endentações de processos produtivos, endentações causadas pelas partículas de desgaste, poeira ou algo que concentre as tensões na superfície do material. As trincas iniciadas na superfície propagam-se inclinadas a superfície do material, como mostrado esquematicamente na figura 3.15a.

Embora, as tensões máximas estejam localizadas logo abaixo da superfície, as trincas podem formar-se na superfície devido a interações químicas e mecânicas, ambiente ou elementos interfaciais, por exemplo, lubrificantes, poeira e fragmentos de desgaste. Para contatos lubrificadas, Way (1935) propôs que o lubrificante penetre nas trincas, com o contato dos corpos sobre a superfície trincada; e quando submetidas a cargas cíclicas surgem pressões hidrostáticas no lubrificante no interior da trinca, resultando em tensões

suficientes para a sua propagação (Figura 3.15b). De acordo com este modelo o aumento da viscosidade do lubrificante impede sua penetração na trinca, resultando em menor propagação das trincas e maior vida do material.

McClintock (1977) estudou os modelos de propagação das trincas sob atrito e tensões combinadas. Keer e Bryant (1982) propuseram um mecanismo onde a propagação da trinca pode ser causada pelo escorregamento entre faces adjacentes das trincas. Como os lubrificantes com alta viscosidade apresentam dificuldade de penetração na trinca, ocorre maior atrito entre as faces irregulares da mesma e, conseqüentemente, menor crescimento destas.

O segundo mecanismo assume a formação de trincas subsuperficiais. De acordo com a figura 3.15b a máxima tensão de contato é aumentada por descontinuidades internas, ou seja, inclusões ou carbonetos grandes, causando trincas subsuperficiais, conforme lascamentos observados por Fujita e Yoshida (1979) que se iniciam na interface nitreto-substrato de rolos temperados. As trincas subsuperficiais ocorrem principalmente em contatos sobre-carregados onde são formadas trincas nas zonas de deformação plástica, logo abaixo da superfície resultando em seu lascamento.



**FIGURA 3.15** — Formação e propagação de trincas devido à fadiga (FLEMING, 1977).

Durante a formação dos mecanismos de adesão ou abrasão, repetidos escorregamentos entre a rugosidades superficiais podem causar a formação e propagação

de trincas devido a fadiga, aflorando-as na superfície e resultando em partículas de desgaste. De acordo com o modelo proposto por Suh (1973) trincas subsuperficiais propagam-se paralelamente a superfície como mostrado na figura 3.15c.

### **3.5.4 Reação triboquímica**

O desgaste triboquímico é caracterizado por atrito entre duas superfícies sólidas em um ambiente corrosivo que pode ser líquido ou gasoso. O processo de desgaste ocorre por formação e remoção contínua da camada de reação na superfície de contato. Na presença de oxigênio, os fragmentos de desgaste consistem basicamente de óxidos, os quais são formados sobre as superfícies e são removidos por atrito.

Os mecanismos de desgaste triboquímicos podem ser divididos em 4 categorias, conforme mostrado na figura 3.16.

(A) Contato metálico entre a rugosidade das superfícies, que geram uma remoção de metal devido à adesão e pequenos fragmentos de desgaste.

(B) Reações químicas dos metais com o ambiente que resultam em camadas protetivas superficiais e reduzem o contato metálico.

(C) Trincamento de camadas protetivas superficiais devido a alta pressão local ou microfadiga resultando em fragmentos não-metálicos de desgaste.

(D) Fragmentos metálicos e não metálicos podem agir abrasivamente e desgastar as superfícies de contato. Novas formações e deslocamentos de camadas protetivas superficiais podem levar a um maior desgaste.

Falhas de superfícies desgastadas e perda de massa são causadas pela ocorrência repetida dos diferentes processos. Isto significa que o desgaste triboquímico é fortemente influenciado pela cinética de formação das camadas superficiais e das propriedades as quais determinam sua resistência à remoção, por exemplo, ductilidade, resistência mecânica e adesão ao substrato. A resistência ao trincamento das camadas triboquímicas é crescente com a resistência mecânica do substrato. O menor desgaste é favorecido quando a camada de reação produzida e o substrato apresentarem igual dureza. Neste caso o ataque abrasivo de fragmentos não-metálicos de desgaste no substrato é reduzido.

Camadas protetivas superficiais em sistemas lubrificadas podem ser formadas pela reação química lubrificante - metal. Os lubrificantes com

aditivos de extrema pressão formam camadas superficiais inorgânicas, as quais minimizam o contato metálico e, conseqüentemente, o desgaste adesivo.

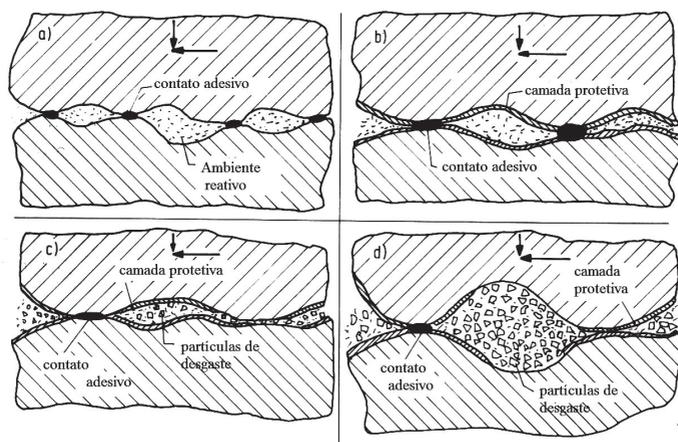


FIGURA 3.16 — Mecanismos envolvidos em desgaste triboquímico (ZUM-GAHR, 1987; KALPAKJIAN, 1995).

Camadas superficiais de pequena espessura ao longo de toda superfície podem resultar em menor desgaste do sistema. O aumento da espessura ou área coberta com camadas superficiais duras, pode resultar em aumento da ação abrasiva dos fragmentos de desgaste. Isto poderia acarretar a transição do desgaste adesivo para triboquímico, e ainda em desgaste abrasivo pelo aumento da atividade química. A reatividade química necessária para o mínimo desgaste depende da severidade do contato de escorregamento, pressão de contato, temperatura e qualidade da superfície, ou a razão da espessura específica do filme lubrificante para a rugosidade da superfície (HURRICKS et al., 1974; KALPAKJIAN, 1995). Camadas superficiais endurecidas podem reduzir o desgaste triboquímico, porém podem também aumentar o desgaste devido a ação abrasiva de seus fragmentos. O aumento do desgaste devido à ação abrasiva dos fragmentos é função das condições de carregamento e das propriedades das camadas superficiais como dureza, fragilidade, adesão ao substrato e das propriedades deste.

## 4. PROJETO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

O projeto da sequência de conformação dos componentes e das ferramentas que farão a conformação devem levar em consideração as características do equipamento (prensa de múltiplo estágio) que será utilizado para fabricação da peça, ou seja, os diâmetros, comprimentos de corte e pré-formas deverão respeitar as limitações de cada máquina.

Inicia-se o projeto mediante cálculo do volume total do componente a ser produzido. Em geral este volume total é dividido em diversos pequenos volumes conforme a geometria da peça.

### 4.1. Projeto da sequência de conformação

#### 4.1.1 Cálculo de volume

As equações de volume são as comumente encontradas em tabelas gerais de cálculo volumétrico.

#### 4.1.2 Cálculo do fator de recalque

O cálculo do fator de recalque tem como objetivo verificar a necessidade de se realizar pré-formas antes da forma final da peça conformada.

Onde:

$$Rq = \frac{Vol.recalcado}{\left[ (d_e)^3 * \pi / 4 \right]}$$

Vol. recalcado = volume recalcado [mm<sup>3</sup>]

d<sub>e</sub> = Diâmetro antes do recalque [mm]

R<sub>q</sub> = Fator de recalque

Se:  $R_q \leq 1,5$  não será necessária pré-forma  
Se:  $1,5 < R_q \leq 3,5$  será necessário pré-forma  
Se:  $R_q > 3,5$  será necessário aumentar  $d_e$

#### 4.1.3 Máximo diâmetro de recalque levando em conta o atrito

$$d_{\max rec} = 1,5 * d_e$$

Onde:

$d_{\max rec}$  = Diâmetro máximo de recalque [mm] (figura 4.1)

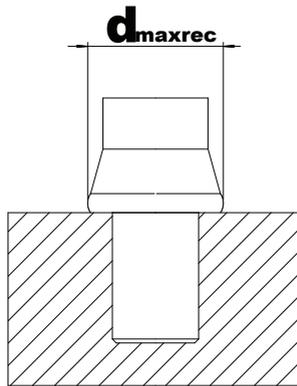
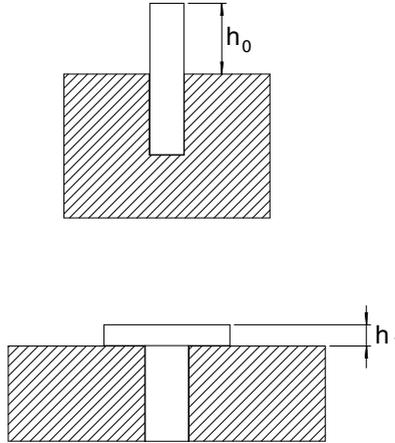


FIGURA 4.1 — Diâmetro máximo de recalque

Outra forma de se calcular o máximo diâmetro de recalque pode ser por meio do grau de deformação (figura 4.2).

$$\varphi = Ln \frac{h_0}{h_1}$$



**FIGURA 4.2** — Relação  $h_0/h_1$

Onde:

$\varphi$  = Grau de Deformação (Valor máximo = 1,5)

$h_0$  = Altura Inicial (do Recalque) [mm]

$h_1$  = Altura Final ( do Recalque) [mm]

#### 4.1.4 Porcentagem de redução

A porcentagem de redução é calculada a fim de definir se a redução será forçada ou livre.

$$\varepsilon_a = \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_i} \right)^2 \right] * 100$$

Onde:

$\varepsilon_a$  – Porcentagem de Redução[%]

$D_i$  – Diâmetro inicial [mm]

$D_f$  – Diâmetro final [mm]

Se  $\varepsilon_a > 30$  %, tem-se redução forçada, ou seja, o corte estará todo embutido na matriz ou no martelo.

Se  $\varepsilon_a \leq 30\%$  há possibilidade de se fazer pré-forma em cone, pêra, etc e não é necessário embutir todo o corte no interior da matriz. Neste caso chama-se de redução livre.

A Porcentagem de Redução ( $\varepsilon_a$ ) pode ser no máximo em torno de **80%**.

Outra forma de calcular a Porcentagem de Redução ( $\varepsilon_a$ ) é em função da altura inicial e final do Recalque, como segue formula abaixo.

$$\varepsilon_a = \frac{h_0 - h_1}{h_1} * 100$$

Onde:

$h_0$  = Altura Inicial (do Recalque) [mm]

$h_1$  = Altura Final (do Recalque) [mm]

Outra forma de se calcular o percentual de redução é através da equação abaixo:

$$\varphi_e = Ln \frac{A_0}{A_1}$$

Onde:

$\varphi_e$  = Grau de Deformação na extrusão direta [%]

$A_0$  = Área Inicial [mm<sup>2</sup>]

$A_1$  = Área Final [mm<sup>2</sup>]

#### 4.1.5 Ângulo ótimo

O ângulo que permite a otimização do processo de extrusão pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \sqrt{(3/2)} \mu \varphi_e$$

Onde:

$\alpha_{\text{ótimo}}$  = Ângulo Ótimo da Redução [Rad]

$\mu$  = Coeficiente de Atrito

#### 4.1.6 Distribuição de volumes nas pré-formas

Nesta etapa serão calculados os volumes totais das diversas formas geométricas, onde estes deverão possuir o mesmo volume do corte até o produto final, pois o produto conformado não possui alterações significativas de volume.

#### 4.1.7 Tensão de Recalque

A tensão de recalque pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$\sigma_r = K_f \left( 1 + \frac{2}{3} \mu^* \frac{h_0}{h_1} \right)$$

$\sigma_r$  = Tensão de Recalque [N/mm<sup>2</sup>]

$K_f$  = Tensão de Escoamento [N/mm<sup>2</sup>]

$\mu$  = Coeficiente de Atrito

$h_0$  = Altura Inicial (do Recalque) [mm]

$h_1$  = Altura Final (do Recalque) [mm]

#### 4.1.8 Cálculo de flambagem

Para cada uma das pré-formas deve-se calcular a relação de comprimento e diâmetros para que não ocorra o fenômeno de flambagem (figura 4.3).

$L/D > 2,5$  poderá ocorrer flambagem.

$L/D \leq 2,5$  não haverá flambagem.

Onde:

L – Comprimento da parte livre [mm]

D – Diâmetro da peça [mm]

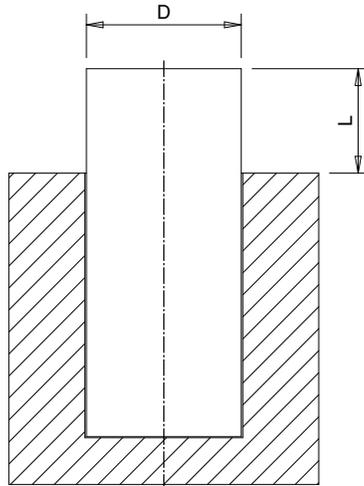


FIGURA 4.3 — Relação D/L

Outras limitações:

Quando não há espaço suficiente para alojar todo material dentro da matriz ou martelo, no caso de uma redução forçada ou no caso de um comprimento livre sujeito a flambagem (caso de reduções livres), pode-se optar por utilizar uma pancada móvel, na qual utiliza-se mola, eliminando a abertura entre martelo e matriz.

Quando do recalque no martelo há possibilidade da pré-forma permanecer presa ao martelo, devendo-se então, optar pela extração positiva da própria máquina ou através de molas.

#### 4.1.9 Extrusão livre

Quando da extrusão livre e direta (figura 4.4), ou seja, quando o material flui no mesmo sentido ao movimento da ferramenta e  $\epsilon_a \leq 30\%$  deve-se calcular a tensão de extrusão através da equação de Billigmann e Feldmann (1979) a seguir:

$$\sigma_{ext} = K_{fm} * \left( Ln A_0 / A_1 + \alpha 4 / \sqrt{3} \right) * (1 + \mu / \text{sen} \alpha \cos \alpha)$$

Onde:

$\sigma_{ext}$  = Tensão de extrusão direta ( $\sigma_{ext} \leq \sigma_{0,2}$ ) [N/mm<sup>2</sup>] ( $\sigma_{ext} \leq 2300$  N/mm<sup>2</sup>)

$K_{fm}$  = Tensão de Escoamento média [N/mm<sup>2</sup>]

$A_0 = \text{Área Inicial [mm}^2\text{]}$

$A_1 = \text{Área Final [mm}^2\text{]}$

$\alpha = \text{Semi-ângulo da Redução [Rad]}$

$\mu = \text{Coeficiente de Atrito (Redução forçada} = 0.05 \text{ e Redução livre} = 0.001)$

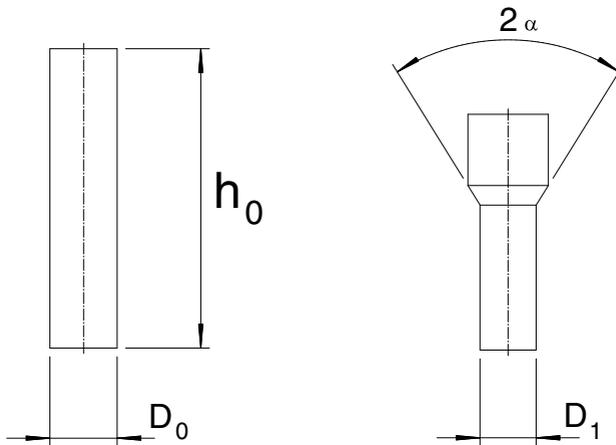


FIGURA 4.4 — Extrusão livre

#### 4.1.10 Extrusão forçada

No caso da extrusão forçada (figura 4.5) ( $\epsilon a > 30\%$ ) a tensão de extrusão é calculada através da equação de Billigmann e Feldmann (1979):

Onde:

$$\sigma_{ext} = K_{fm} * \left( Ln A_0 / A_1 + \alpha 4 / 3\sqrt{3} \right) * (1 + \mu / sen\alpha \cos \alpha) + (\sigma_0) \pi h_k D_0 \mu$$

$\sigma_{ext}$  = Tensão de extrusão a frente ( $\sigma_{ext} \leq \sigma_{0,2}$ ) [N/mm<sup>2</sup>]

$K_{fm}$  = Tensão de Escoamento média [N/mm<sup>2</sup>]

$A_0$  = Área Inicial [mm<sup>2</sup>]

$A_1$  = Área Final [mm<sup>2</sup>]

$\alpha$  = Semi-ângulo da Redução [Rad]

$h_k$  = Altura não extrudada [mm]

$D_0$  = Diâmetro inicial [mm]

$\mu$  = Coeficiente de Atrito

A Tensão de Extrusão ( $\sigma_{ext}$ ) deve ser menor ou igual a 2300 N/mm<sup>2</sup>.

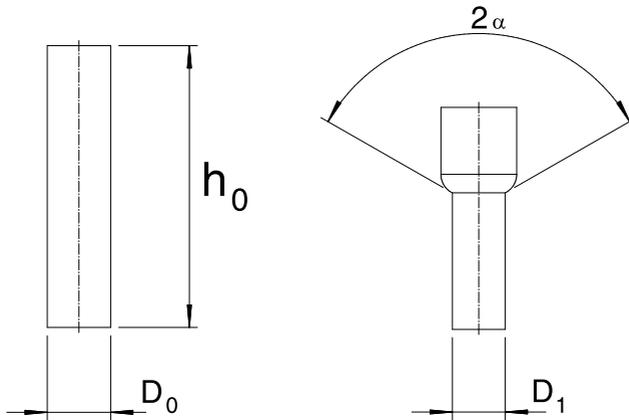


FIGURA 4.5 — Extrusão forçada

#### 4.1.11 Extrusão inversa

Quando da extrusão inversa (figura 4.6), ou seja, quando o material flui no sentido contrário ao movimento da ferramenta deve-se levar em consideração os diâmetros interno e externo mais a profundidade com as seguintes correlações:

##### 4.1.11.1 Porcentagem de Redução

$$\varepsilon_a = \frac{d^2}{D_0^2} * 100$$

Onde:

$\epsilon_a$  = Porcentagem de Redução [%]

$d$  = Diâmetro do Punção [mm]

$D_0$  = Diâmetro inicial (tarugo) [mm]

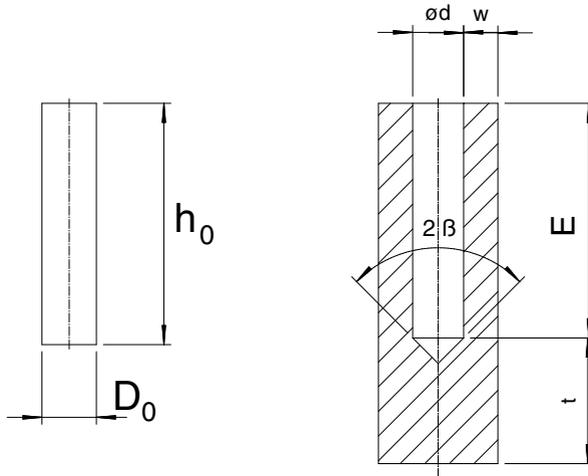


FIGURA 4.6 — Extrusão inversa

Limitações:

A Redução ( $\epsilon_a$ ) deve estar entre os seguintes limites de  $10\% < \epsilon_a < 70\%$ .

#### 4.1.11.2 Tensão de extrusão inversa

$$\sigma_{ext} = k_f * \left[ 2 + \left( \sqrt{3} / 3 \right) * \sqrt{\mu + 0,5 * \sqrt{\beta}} \right]$$

Onde:

$\sigma_{ext}$  = Tensão de extrusão ( $\leq 3500 \text{ N/mm}^2$ )

$\mu$  = Coeficiente de Atrito (Redução forçada = 0.05 e Redução livre = 0.001)

$\beta$  = Semi-ângulo do punção [Rad]

$K_f$  = Tensão de Escoamento [ $\text{N/mm}^2$ ]

Critérios:

O mínimo fator de redução para extrusão inversa não deve ultrapassar o valor de 20 %, pois caso contrário tem-se dificuldades com as tensões e há possível flambagem do punção.

O máximo fator de redução para extrusão inversa não deverá ultrapassar o valor de 70 %, pois o material terá dificuldades em contornar o punção e passar pela distância entre o punção e a matriz.

A máxima profundidade do furo [mm] extrudado é dada pela correlação:

$$E = (2 \text{ a } 3) \times d$$

A mínima espessura de fundo [mm] para um copo extrudado:

$$\tau = (1,0 \text{ a } 1,5) \times w$$

ou

$$t = w * \sqrt{\frac{\beta}{3(\mu + 0,5)}}$$

Onde:

$\tau$  = Espessura Mínima da parede (base) [mm]

$w$  = Espessura da parede (lateral) [mm]

$\beta$  = Semi-ângulo do punção [Rad]

$\mu$  = Coeficiente de Atrito (Redução forçada = 0.05 e Redução livre = 0.001)

O grau de deformação da extrusão inversa pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$\varphi_{ei} = Ln \frac{h_0}{t} * (1 + d / 8w)$$

Onde:

$\varphi_{ei}$  = Grau de deformação da extrusão inversa [%]

$h_0$  = Altura Inicial [mm]

$t$  = Espessura mínima da parede da base [mm]

$d$  = Diâmetro do Punção [mm]

$w$  = Espessura da parede lateral da Peça [mm]

### Importante: Centragem de peças com pequeno volume

Quando o volume do corpo é muito pequeno em relação ao volume da cabeça, procura-se utilizar estrias para facilitar a centralização da cabeça em relação ao corpo.

## 4.2. Projeto da ferramenta de conformação

O projeto das ferramentas de conformação é realizado por meio de cálculos das dimensões das ferramentas baseados nas tensões impostas pelo processo de conformação.

As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram, respectivamente, a forma de determinação das dimensões de ferramentas de extrusão forçada e livre e punção de extrusão inversa.

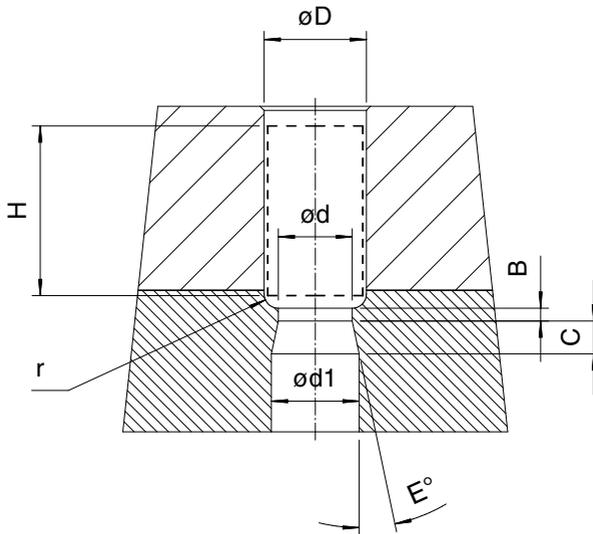


FIGURA 4.7 — Dimensões de ferramenta de extrusão forçada.

Onde:

$d$  = diâmetro de extrusão

$H$  = altura do tarugo

$D$  = diâmetro do tarugo

$r = D - d$

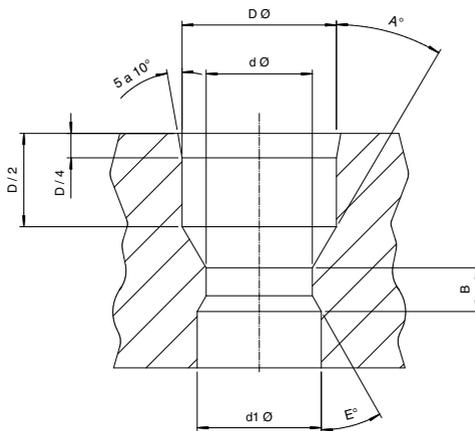
$d_1 = d + 0,10$  mm

$B = 0,8$  a  $1,6$  mm

$C = 4,8$  a  $9,5$  mm

$E^\circ$  = calculado pela tangente

$$\operatorname{tg}(E) = \frac{\frac{(d_1 - d)}{2}}{C}$$
$$E = \operatorname{inv.tg}(E)$$



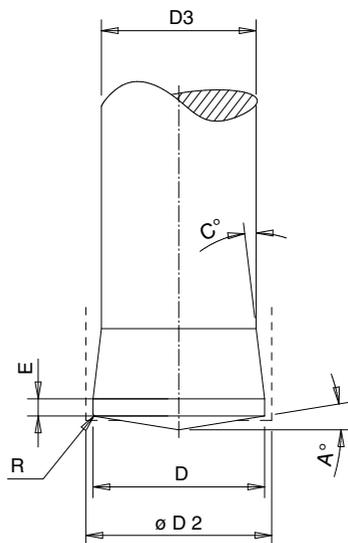
**FIGURA 4.8** — Dimensões de ferramenta de extrusão livre.

Onde:

$d$  = diâmetro de extrusão

$D$  = diâmetro do tarugo  $+0,05/+0,10$

$A^\circ = 20 \text{ a } 65^\circ$   
 $d_1 = d + 0,10 \text{ mm}$   
 $B = 2 \text{ a } 5 \text{ mm}$   
 $E^\circ < 20^\circ$



**FIGURA 4.9** — Dimensões de punção de extrusão inversa.

Onde:  
 $D$  = diâmetro do furo extrudado  
 $D_2 = D + 0,25/+0,30 \text{ mm}$   
 $D_3 = D - 0,20/-0,25 \text{ mm}$   
 $R = 1 \text{ a } 2 \text{ mm}$   
 $A^\circ = 6 \text{ a } 15^\circ$   
 $C^\circ = 3 \text{ a } 5^\circ$   
 $E = 0,8 \text{ a } 1,6 \text{ mm}$

A seguir serão apresentados alguns métodos de determinação dos diâmetros das ferramentas de conformação.

#### 4.2.1 Método da relação entre o diâmetro da carcaça e do inserto das matrizes na conformação a frio com um anél de contração e um inserto

Neste método de determinação dos diâmetros das ferramentas não há necessidade de se calcular as tensões radiais nas ferramentas, pois as constantes das equações já levam em consideração as necessidades em termos de resistência mecânica, ou seja, as tensões já estão inseridas nas equações a fim de simplificar os cálculos.

Baseado na figura 4.10 tem-se:

$B = 2,25 \times A$  desde que  $C = 6 \times A$  Condição ideal

$B = 2 \times A$  desde que  $C = 5 \times A$  Condição normal

$B = 1,75 \times A$  desde que  $C = 4,5 \times A$  Condição mínima

Quando  $C/A = 4$  ou maior, uma fórmula alternativa  $Y = X/4$  leva a valores semelhantes

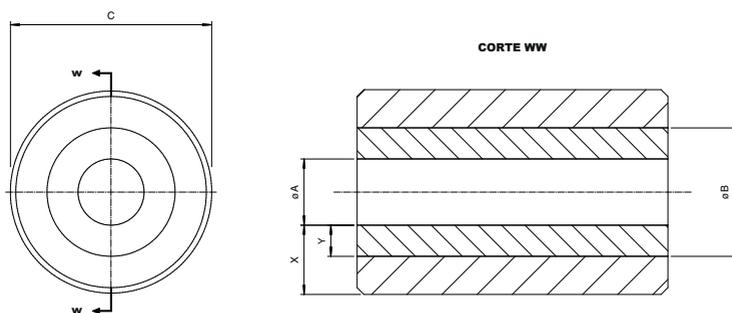


FIGURA 4.10 — Dimensões da ferramenta com um anél de contração e um inserto

### 4.2.2 Relação entre o diâmetro da carcaça e do inserto das matrizes na conformação a frio com um anél de contração e múltiplos insertos

Em matrizes com insertos múltiplos (figura 4.11), o valor para  $A$  geralmente é baseado no inserto com o maior diâmetro interno.

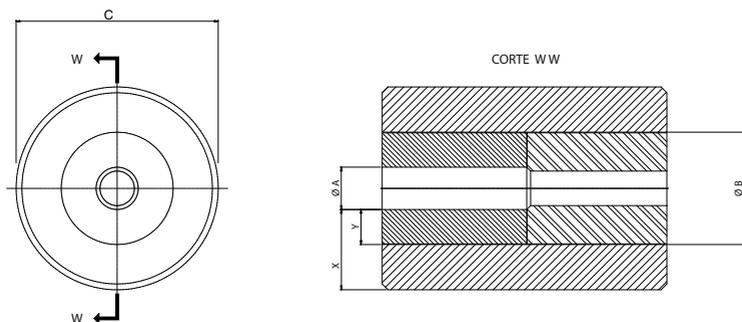


FIGURA 4.11 — Dimensões da ferramenta com um anél de contração e dois insertos

### 4.2.3 Método das tensões radiais

Outro método de cálculo dos diâmetros se baseia nas tensões radiais nas ferramentas. A tabela 4.1 apresenta formas de cálculos aproximados dos diâmetros das ferramentas de conformação sem anél de contração e com um e dois anéis.

Tensão radial ( $\sigma_r$ ) N/mm <sup>2</sup>	Número de anéis de contração	D/d	Diâmetro intermediário aproximado
$\sigma_r < 1000$	0	4 a 5	
$1000 < \sigma_r < 1600$	1	4 a 6	$d_1 \approx 0.9\sqrt{D \cdot d}$
$1600 < \sigma_r < 2000$	2	4 a 6	$d:d_1:d_2:D \approx 1:1.6:1.8:2.5$ a 3.2:4 a 6

TABELA 4.1 — Cálculos aproximados dos diâmetros das ferramentas de conformação baseados na tensão radial

#### 4.2.4 Interferências entre os anéis de contração

Além dos cálculos para obtenção dos diâmetros das ferramentas de conformação também deve-se calcular a interferência entre os diâmetros dos anéis de contração a fim de se realizar o encarçamento das ferramentas, ou seja, manter os anéis fixos sob pressão a frio ou a quente. Em geral se utiliza de 0,2 a 0,4% do respectivo diâmetro de interface a fim de garantir o encarçamento.

A figura 4.12 mostra uma representação de dois anéis de contração encarçados sobre um núcleo.

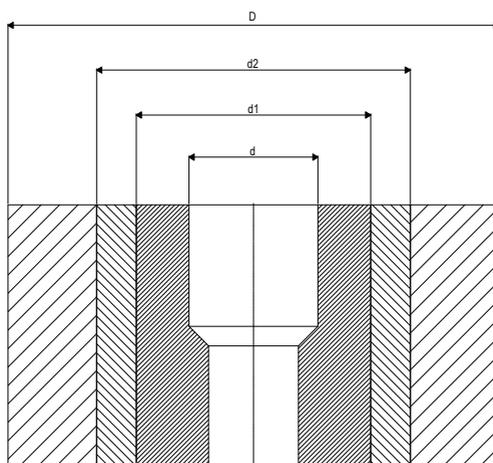


FIGURA 4.12 — Representação de anéis de contração para ferramentas de conformação.

## 4.2.5 Extração da peça

O sistema de extração deve ser projetado de tal forma a permitir que a peça seja expulsa da matriz e possa ser recolhida pelas pinças que a transportarão ao estágio seguinte.

O comprimento do pino extrator é dado pela correlação:

$$L_{\text{ext.}} = L_{\text{mat}} + 0,6 \text{ mm}$$

Onde:

$L_{\text{ext.}}$  - Comprimento do pino extrator [mm]

$L_{\text{mat}}$  - Comprimento da matriz [mm]

O diâmetro do pino extrator é dado pela correlação:

$$d_{\text{ext.}} = d_{\text{pré-forma}} - 0,5 \text{ mm}$$

$d_{\text{ext.}}$  - Diâmetro do pino extrator [mm]

$d_{\text{pré-forma}}$  - Diâmetro da pré-forma [mm]

### 4.2.5.1 Extração telescópica

No caso do diâmetro do produto ser pequeno em relação ao seu comprimento, deve-se optar pelo sistema de extração telescópica, na qual um pino com diâmetro maior empurra um outro com diâmetro menor e este, por sua vez, extrai a peça.

Buchas de nylon: Serve como guia do produto para que não haja a possibilidade de desalinhamento da peça em relação ao eixo de movimento entre matriz e martelo.

### 4.2.5.2 Extração com bucha

Utiliza-se quando se necessita extrair peças furadas e esta se encontra presa ao punção furador.

As dimensões da bucha são dadas pelas seguintes correlações:

$$db_{\text{ext.}} = D - 0,05 \text{ mm}$$

$$db_{\text{int.}} = d + 0,05 \text{ mm}$$

Onde:

$db_{\text{ext.}}$  – Diâmetro externo da bucha [mm]

$db_{\text{int.}}$  – Diâmetro interno da bucha [mm]

D - Diâmetro externo da peça furada [mm]

d - Diâmetro externo do punção furador [mm]

## **4.2.6 Recorte**

### **4.2.6.1 Recorte com uma matriz**

Quando se quer deixar cantos vivos em qualquer recorte para que não haja problemas de aplicação da chave.

### **4.2.6.2 Recorte com duas matrizes**

Visa deslocar a linha de cisalhamento para uma região distante das arestas da peça, evitando a possibilidade de formação de rebarbas na mesma.

## **4.3. Exemplo de desenvolvimento de projeto de sequência de conformação mecânica**

### **4.3.1 Análise do desenho do cliente**

Nesta primeira etapa deve-se observar as tolerâncias do produto (figura 4.13) a fim de verificar se há possibilidade de fabricar a peça pelo processo de

conformação mecânica a frio. Destaca-se que na cabeça já há previsão para um possível excesso de material quando do recalque dessa região para que, posteriormente, o sextavado seja recortado.

O material a ser conformado se trata de um aço ABNT 1010.

Verificação das reduções de área a serem obtidas, respeitando os limites do processo apresentados na teoria de conformação.

Nesta etapa deve-se observar se os limites de redução se enquadram como livres ou forçadas. No caso de reduções forçadas serão utilizados raios para o processo de redução e no caso de reduções livres serão utilizados chanfros.

### 4.3.2 Cálculo do volume total da peça

Para calcular o volume total da peça a mesma pode ser dividida em vários volumes e deve-se considerar o excesso de material para realizar o recorte do sextavado.

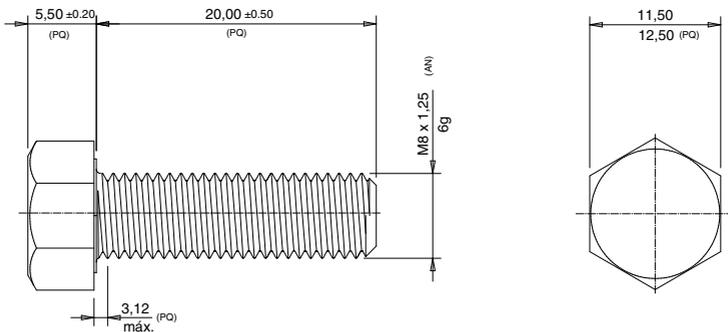
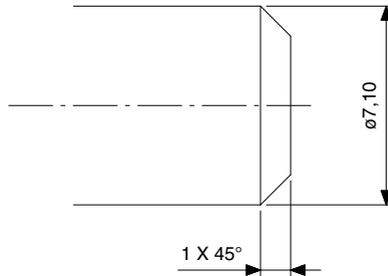


FIGURA 4.13 — Parafuso sextavado a ser projetada a sequência de conformação

$$\begin{aligned}\phi_{recorte} &= chave * 1,155 + 0,5 \\ \phi_{recorte} &= 12 * 1,155 + 0,5 \\ \phi_{recorte} &= 14,35mm\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{cabeça} &= \phi_{recorte}^2 * \frac{\pi}{4} * h \\ V_{cabeça} &= 14,35^2 * \frac{3,14}{4} * 5,5 \\ V_{cabeça} &= 890,30mm^3\end{aligned}$$

Considerando as dimensões do parafuso antes da laminação da rosca (figura 4.15) e que o chanfro da extremidade do parafuso possui 45° e altura de 1,00 mm (figura 4.14), temos:



**FIGURA 4.14** — Chanfro da extremidade do parafuso antes da laminação da rosca

$$\operatorname{tg}45^{\circ} = \frac{x}{1}$$

$$x = 1,00\text{mm}$$

$$d = 7,10 - 2 * x$$

$$d = 7,10 - 2 * 1,00$$

$$d = 5,00\text{mm}$$

$$V_{\text{cone}} = 0,2616 * h * (D^2 + D * d + d^2)$$

$$V_{\text{cone}} = 0,2616 * 1 * (7,10^2 + 7,10 * 5 + 5^2)$$

$$V_{\text{cone}} = 29,01\text{mm}^3$$

$$V_{\text{cilindro}} = \phi^2 * \frac{\pi}{4} * h$$

$$V_{\text{cilindro}} = 7,10^2 * \frac{\pi}{4} * 19$$

$$V_{\text{cilindro}} = 751,86\text{mm}^3$$

$$V_{\text{total}} = V_{\text{cabeça}} + V_{\text{cilindro}} + V_{\text{cone}}$$

$$V_{\text{total}} = 890,3 + 751,86 + 29,01$$

$$V_{\text{total}} = 1671,17\text{mm}^3$$

### 4.3.3 Determinação do comprimento inicial do tarugo

Optou-se por uma bitola nominal de entrada de  $\varnothing 9,86$  mm. Com o volume total da peça e o diâmetro de entrada, obtém-se um comprimento de tarugo igual a 22,00 mm.

$$V_{total} = V_{tarugo}$$

$$1671,17 = \frac{\pi}{4} * 9,86 * L_{tarugo}$$

$$L_{tarugo} = 22,00mm$$

#### **4.3.4 Definição da sequência de conformação, desde o corte até a peça final**

Deve-se observar os limites do processo como, o recalque da cabeça, a redução de área, comprimento máximo do tarugo fora da matriz superior e inferior. Considerar as limitações do equipamento, tais como: curso dos extratores, capacidade e velocidade.

A figura 4.15 apresenta a evolução da geometria do tarugo ao longo das etapas de extrusão, recalque e recorte, considerando os critérios quanto aos limites de deformação na extrusão forçada e no recalque.

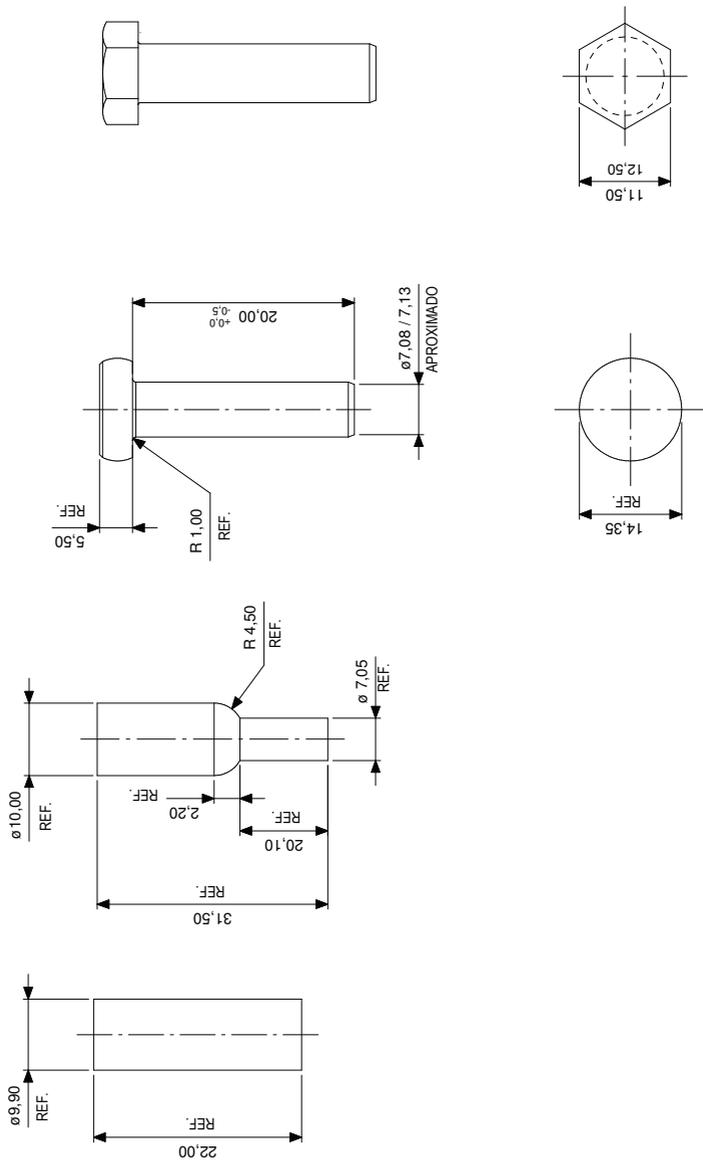


FIGURA 4.15 — Sequência de conformação do parafuso.

No primeiro estágio, antes de iniciar-se a extrusão da extremidade inferior ocorre o aumento do diâmetro do tarugo por recalque, que passa de 9,86 para algo em torno de 10,00 mm.

Nesse estágio realiza-se a extrusão forçada para o diâmetro de 7,06 mm com redução de seção de 50,15%.

Os comprimentos da peça no primeiro estágio são calculados baseados no volume total e nos diâmetros que se deseja na sequência. Os comprimentos do diâmetro extrudado, do segmento esférico (comprimento estipulado) e do corpo recalcado são 20,10 mm; 2,4 mm e 9,45 mm, respectivamente.

#### 4.3.5 Cálculo do percentual de redução

$$\varepsilon_a = \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_i} \right)^2 \right] * 100$$

$$\varepsilon_a = \left[ 1 - \left( \frac{7,06}{10,00} \right)^2 \right] * 100$$

$$\varepsilon_a = 50,15\%$$

#### 4.3.6 Cálculo dos comprimentos do primeiro estágio

$$V_{diam.extrudado} = V_{total} - V_{cabeça}$$

$$\frac{\pi}{4} * 7,06^2 * L_{diam.extrudado} = 1671,17 - 890,$$

$$L_{diam.extrudado} = 20,10mm$$

Estipulando um comprimento do segmento esférico de 2,4 mm, tem-se:

$$V_{\text{segmento.esférico}} = \frac{\pi * h * (3 * r_1^2 + 3 * r_2^2 + h^2)}{6}$$

$$V_{\text{segmento.esférico}} = \frac{\pi * 2,4 * (3 * 5^2 + 3 * 3,53^2 + 2,4^2)}{6}$$

$$V_{\text{segmento.esférico}} = 148,38 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{corpo.recalcado}} = V_{\text{cabeça}} - V_{\text{segmento.esférico}}$$

$$\frac{\pi}{4} * 10^2 * L_{\text{corpo.recalcado}} = 890,3 - 148,38$$

$$L_{\text{corpo.recalcado}} = 9,45 \text{ mm}$$

### 4.3.7 Recalque

No segundo estágio realiza-se o recalque da cabeça com valor de 1,18, um pequeno recalque do corpo do parafuso e a redução de um pequeno chanfro na extremidade do parafuso. A extremidade inferior do parafuso é mantida parada pelo extrator e é realizado o recalque da extremidade superior.

Como o comprimento livre é de aproximadamente 11,5 mm, ou seja, 1,18 vezes o diâmetro nessa região, não há perigo de flambagem.

Os comprimentos da peça no segundo estágio são os mesmos comprimentos da peça final (conformada).

$$R_q = \frac{\text{vol.recalcado}}{d^3 * \frac{\pi}{4}}$$

$$R_q = \frac{890,30}{9,86^3 * \frac{\pi}{4}}$$

$$R_q = 1,18$$

Como  $R_q < 1,5$  não será necessária pré-forma

Ou:

$$\frac{L}{D} \leq 2,5$$
$$\frac{11,85}{10} \leq 2,5$$
$$1,18 \leq 2,5$$

$L/D < 2,5$  não haverá flambagem.

No terceiro estágio é realizado apenas o recorte (cisalhamento) do sextavado da cabeça.

#### 4.4. Dimensionamento das ferramentas de conformação

Como exemplo, apresenta-se o dimensionamento da matriz para extrusão no primeiro estágio, do diâmetro de 10,00 mm para o diâmetro de 7,06 mm.

Primeiramente, deve-se determinar as dimensões internas do núcleo da matriz, como apresentado na figura 4.7. Assim, tem-se  $d = 7,06$  mm (definido pelo produto),  $D = 10,00$  mm (definido pelo recalque do tarugo),  $r = 3,00$  mm ( $D - d$ ),  $B$  adotado igual a 1,50 mm,  $C$  adotado igual a 6,50 mm, com  $d_1 = 7,16$  mm ( $d+0,10$ mm),  $H = 9,45$  mm e  $E \approx 5^\circ$ .

Baseando-se na figura 4.10 (Método da relação entre o diâmetro da carcaça e do inserto das matrizes) pode-se determinar os diâmetros das ferramentas com apenas um anél de contração:

Optando-se pela condição ideal tem-se:

$B = 2,25 \times A$  desde que  $C = 6 \times A$  Condição ideal

Onde:

$A = D = 10,00$  mm

$B = 2,25 \times 10,00 = 22,50$  mm

$C = 6 \times 10,00 = 60,00$  mm

Outra forma de se determinar os diâmetros baseia-se no método das tensões radiais que é calculada pela equação de Billigmann e Feldmann (1979) para extrusão direta forçada.

$$\sigma_{ext} = K_{fm} * \left( Ln A_0 / A_1 + \alpha 4 / 3\sqrt{3} \right) * (1 + \mu / \text{sen}\alpha \cos \alpha) + (\sigma_0) \pi h_k D_0 \mu$$

$$K_{fm} = (K_f + \sigma_0) / 2$$

$$K_f = K * \varepsilon^n$$

Para o aço ABNT 1010:

$$K = 530$$

$$n = 0,26$$

$$\sigma_0 = 310 \text{ MPa}$$

Portanto:

$$K_f = 530 * 0,50^{0,26} = 442,9 \text{ MPa}$$

$$K_{fm} = (442,9 + 310) / 2 = 376,5 \text{ MPa}$$

Considerando:

$$\alpha = 30^\circ = 0,52 \text{ rad}$$

$$\mu = 0,05$$

$$h_k = 2,4 \text{ mm}$$

$$D_0 = 10,00 \text{ mm}$$

$$D_1 = 7,06 \text{ mm}$$

Tem-se:

$$\sigma_{ext} = 376,5 * \left( Ln 10^2 / 7,06^2 + 0,52 * 4 / 3\sqrt{3} \right) * (1 + 0,05 / \text{sen}30^\circ \cos 30^\circ) + (310) \pi * 2,4 * 10 * 0,05$$

$$\sigma_{ext} = 1628 \text{ MPa}$$

A partir deste cálculo pode-se definir os diâmetros da ferramenta por meio da tabela 4.1 e da figura 4.12. Como a tensão radial é de 1628 N/mm<sup>2</sup>, adotou-se o encarcamento da matriz com dois anéis de contração. Os diâmetros do núcleo da matriz e do anel de contração, de acordo com a figura 4.12 são calculados da seguinte forma:

$$d:d_1:d_2:D \approx 1 : 1.6 \text{ a } 1.8 : 2.5 \text{ a } 3.2 : 4 \text{ a } 6$$

Ou seja,

$$d = 10,00 \text{ mm}$$

$$d_1 = 1,7 \times 10 = 17,00 \text{ mm}$$

$$d_2 = 2,8 \times 10 = 28,00 \text{ mm}$$

$$D = 5 \times 10 = 50,00 \text{ mm}$$

A interferência dimensional utilizada foi de 0,4% do diâmetro de montagem (encarçamento). Assim, tem-se uma interferência de 0,07 mm entre  $d_1$  e  $d_2$  e de 0,11 mm entre  $d_2$  e  $D$ .

Outra forma de determinar as tensões aproximadas é por meio de ábacos e nomogramas de normas, como por exemplo, VDI e ICFG.

A figura 4.16 e a tabela 4.2 apresentam as ferramentas projetadas para a conformação do parafuso em três estágios.

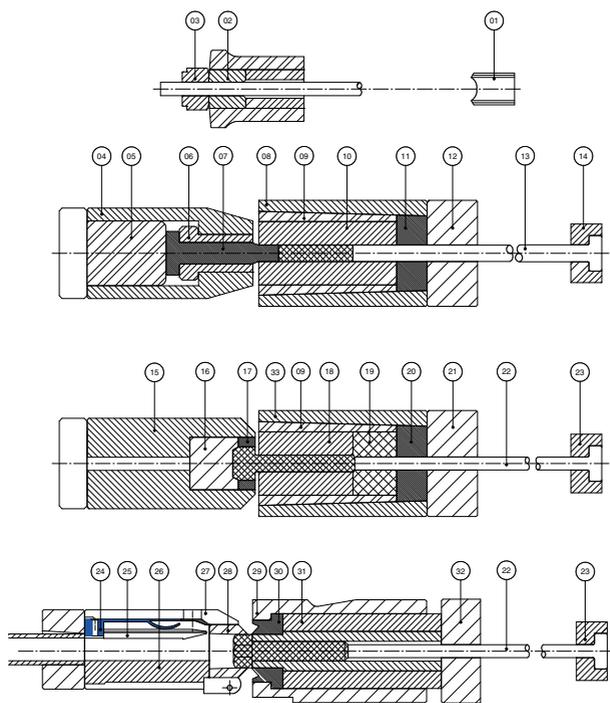


FIGURA 4.16 — Conjunto de ferramentas para fabricação do parafuso em três estágios.

<b>ITEM</b>	<b>FERRAMENTA</b>	<b>ITEM</b>	<b>FERRAMENTA</b>
01	Rolo alimentador	18	Núcleo
02	Bucha de corte	19	Núcleo
03	Faca de corte	20	Calço cônico
04	Punção	21	Calço
05	Contra pino	22	Extrator
06	Bucha do extrator	23	Bucha do extrator
07	Punção	24	Mola
08	Carcaça da matriz	25	Prendedor do parafuso
09	Sobrecapa	26	Calço
10	Núcleo da matriz	27	Carcaça da matriz
11	Calço cônico	28	Matriz de recorte
12	Calço	29	Carcaça da matriz
13	Extrator	30	Matriz de recorte
14	Bucha do extrator	31	Guia de recorte
15	Punção	32	Calço
16	Núcleo	33	Carcaça da matriz
17	Pastilha		

**TABELA 4.2** — Relação de ferramentas para o parafuso.

## 4.5. Outros exemplos

As figuras 4.17, 4.18, 4.19 e tabela 4.3 mostram outro exemplo de peça conformada (elemento especial de fixação), a sequência de conformação e o conjunto de ferramentas para fabricação desta peça, respectivamente.

As figuras 4.20, 4.21, 4.23 e 4.24 mostram, respectivamente, sequências: de quatro estágios de um parafuso com cabeça sextavada e extrudada; de seis estágios de conformação de uma bucha cilíndrica e de cinco estágios de duas buchas flangeadas. Nas figuras 4.21 e 4.22 percebe-se o detalhe com relação ao giro da peça na transferência das pré-formas em alguns dos estágios de conformação, característica esta relacionada as prensa de múltiplos estágios para fabricação de porcas e buchas que necessitam de inversões durante a sequência de conformação.

As figura 4.22 e 4.25 mostram, respectivamente, ferramentas similares as de conformação da bucha cilíndrica da figura 4.21 e das buchas flangeadas das figuras 4.23 e 4.24.

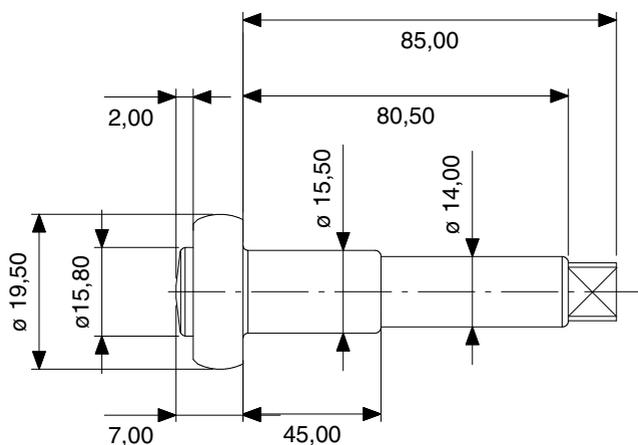


FIGURA 4.17 — Elemento especial de fixação a ser projetada a sequência de conformação.

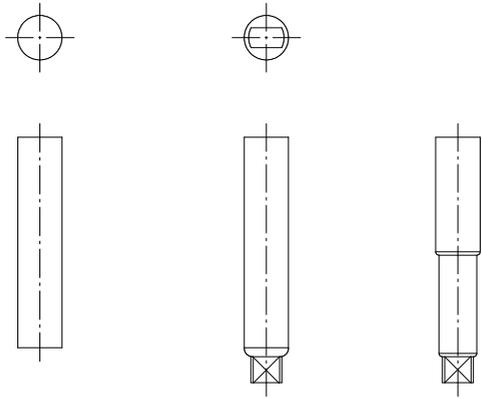


FIGURA 4.18 — Sequência de conformação da peça.

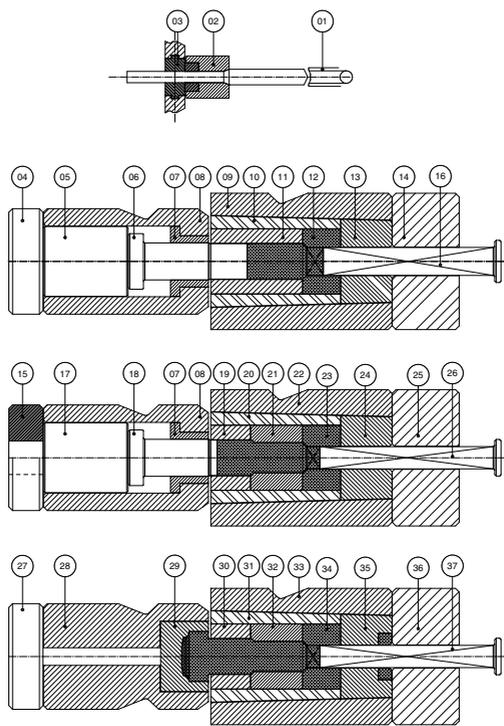


FIGURA 4.19 — Conjunto de ferramentas para fabricação da peça.

ITEM	FERRAMENTA	ITEM	FERRAMENTA
01	Rolo alimentador	20	Sobrecaça
02	Bucha de corte	21	Núcleo de redução
03	Faca de corte	22	Carcaça
04	Calço do martelo	23	Núcleo de redução
05	Contra pino	24	Calço cônico
06	Punção	25	Calço da matriz
07	Bucha para punção	26	Extrator
08	Punção	27	Calço do martelo
09	Carcaça	28	Punção
10	Sobrecaça	29	Núcleo da martelo
11	Núcleo da matriz	30	Núcleo da matriz
12	Núcleo de redução	31	Sobrecaça
13	Calço cônico	32	Núcleo da matriz
14	Calço da matriz	33	Carcaça
15	Calço do martelo	34	Núcleo de redução
16	Extrator	35	Calço cônico
17	Contra pino	36	Calço da matriz
18	Punção	37	Extrator
19	Núcleo da matriz		

**TABELA 4.3** — Relação de ferramentas para fabricação da peça.

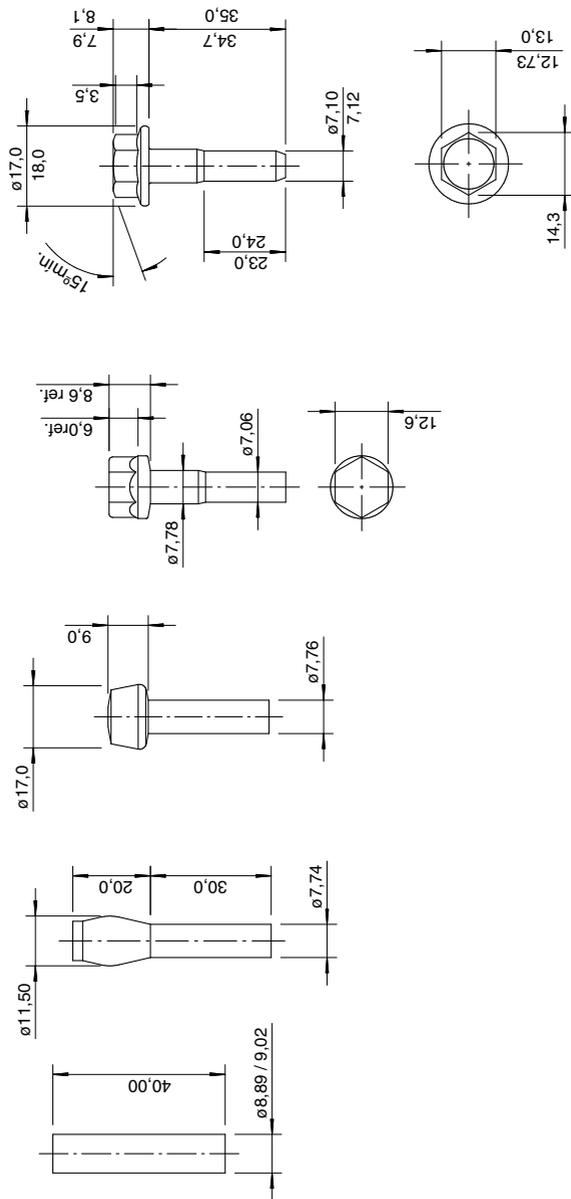
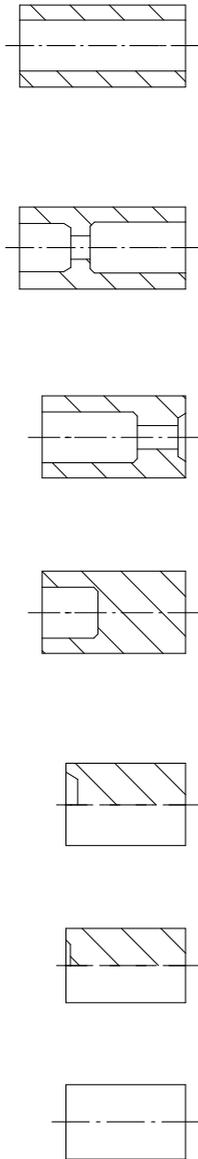


FIGURA 4.20 — Parafuso com cabeça sextavada e extrudada conformada em quatro estágios.



**FIGURA 4.21** — Bucha cilíndrica conformada em seis estágios.

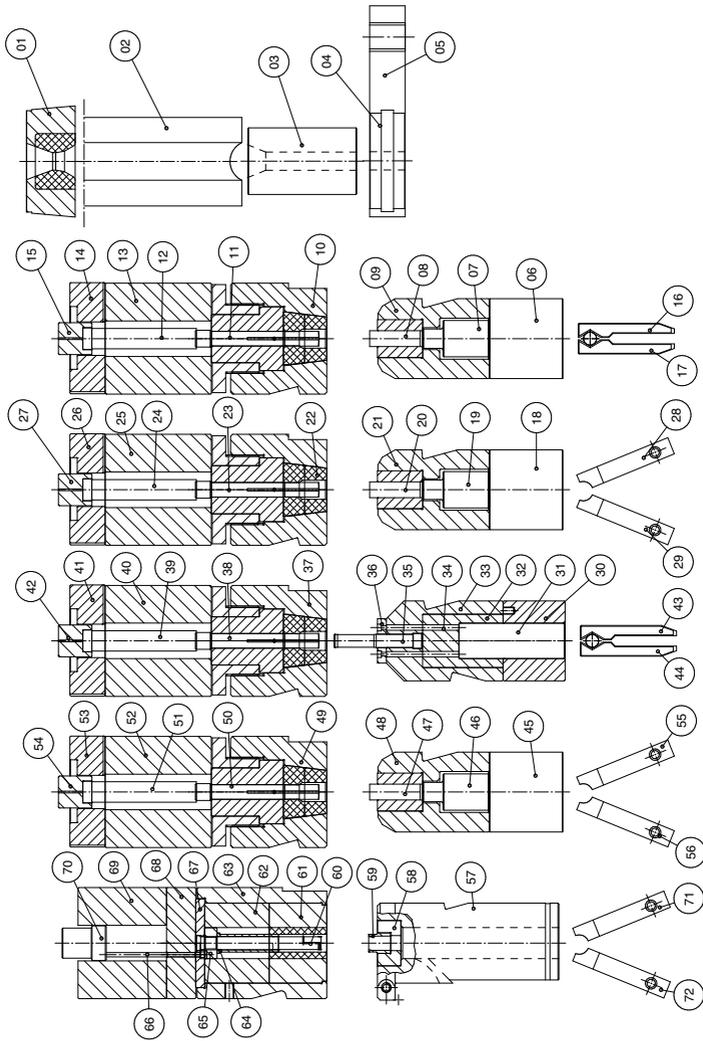
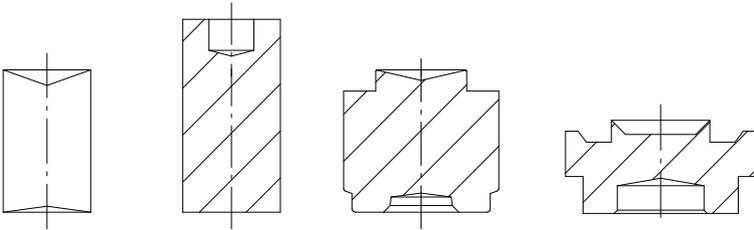
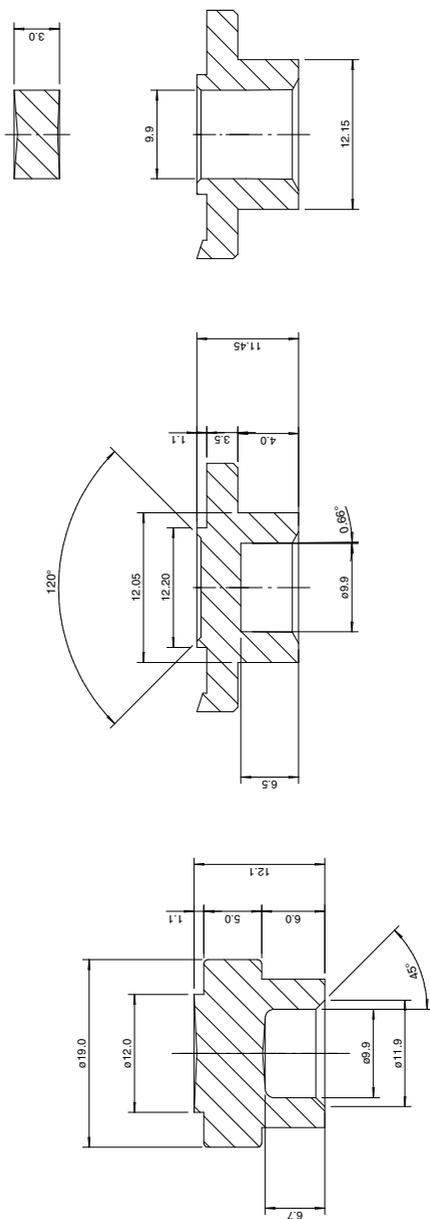


FIGURA 4.22 — Ferramentas de conformação da bucha cilíndrica da figura 4.21.



**FIGURA 4.23** — Bucha flangeada conformada em cinco estágios.



**FIGURA 4.24** — Detalhe de rompimento do miolo de bucha flangeada conformada em cinco estágios.

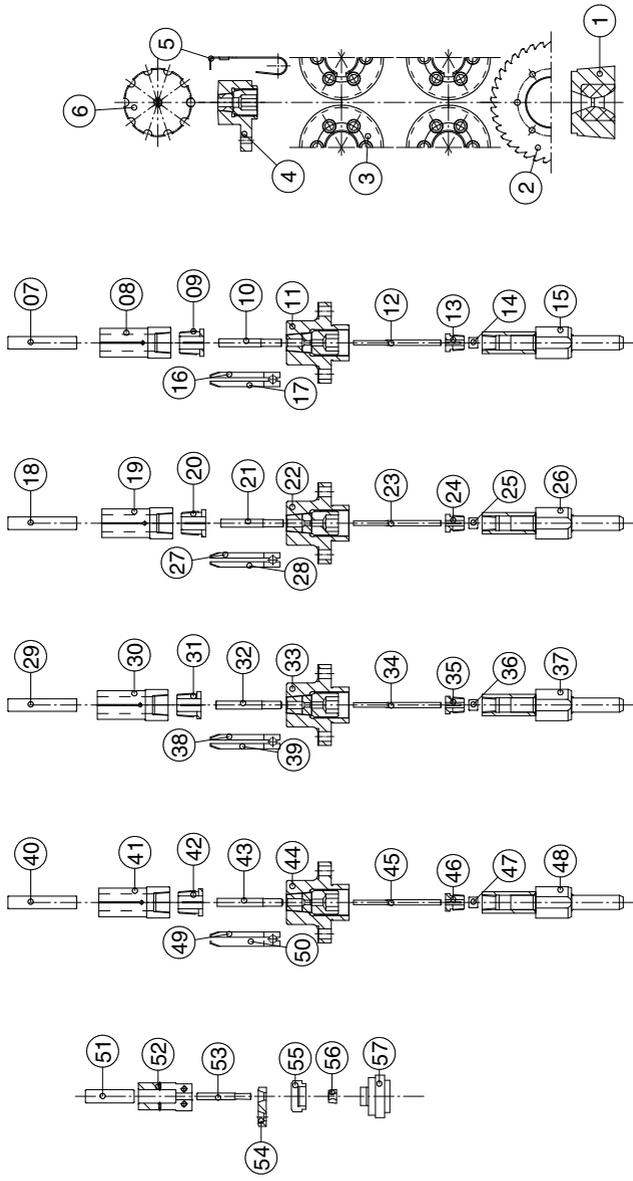


FIGURA 4.25 — Ferramentas de conformação de buchas flangeadas similares a das figuras 4.23 e 4.24.

A seguir são mostradas algumas peças conformadas em prensa de múltiplos estágios e sua sequência de conformação. As figuras 4.26 a 4.28 mostram, respectivamente, uma sequência de: um acento de válvula de admissão automotiva, um corpo de vela automotiva e uma porca solda quadrada.



**FIGURA 4.26** — Acento de válvula de admissão automotiva.



**FIGURA 4.27** — Corpo de vela automotiva.



**FIGURA 4.28** — Porca solda quadrada.

## 5. SIMULAÇÃO EM CONFORMAÇÃO

A crescente demanda da indústria por produtos cada vez mais específicos, complexos e com tolerâncias dimensionais bastante reduzidas gera a necessidade de investimentos em métodos que venham auxiliar ao desenvolvimento do processo de conformação mecânica.

Existem diferentes métodos aproximados, tanto analíticos quanto numéricos, para analisar as operações de conformação. Nenhum deles é exato, em função das hipóteses assumidas no desenvolvimento do modelo matemático e dos dados de entrada, a exemplo da curva de escoamento do material e coeficiente de atrito (MARUMO, SAIKI, RUAN, 2007).

Os métodos numéricos por simulação computacional através de elementos finitos apresentam os melhores resultados no desenvolvimento dos vários estágios do processo de deformação plástica do produto até alcançar a forma final do produto, porém há um custo elevado devido aos recursos computacionais (software e hardware) exigidos (WALKE e PASZENDA, 2007).

Estes métodos são utilizados na simulação de peças de automóveis, aeronaves, eletroeletrônica e construção naval, além das áreas biomecânicas, de medicina, mecatrônica e tecnologia de materiais (OKRAJNI e ESSLER, 2010).

Tais softwares permitem simular diferentes processos e parâmetros de fabricação, além de visualizar seus efeitos a partir da modificação de seus parâmetros e grandezas de influência, evitando a quebra de ferramentas de conformação e, conseqüentemente, justificando o investimento inicial de aquisição do software (OZTURK e ANLAS, 2011).

Em geral, os problemas de engenharia não possuem soluções analíticas simples, apresentando um nível de complexidade considerável para descrever o fenômeno físico. Por isso, são utilizadas as simulações computacionais, que realizam combinações gráficas através de métodos numéricos e utilizando para isto modelos previamente desenhados em software de CAD (Desenho assistido por computador).

Existem diversos softwares de simulação que podem ser utilizados na conformação mecânica e estes podem explicitar os diferentes efeitos causados nos processos quando são alterados alguns de seus parâmetros, como: o efeito das condições do atrito, da temperatura da matéria-prima, materiais e geometrias distintos com relação ao ferramental, maquinário, etc.

Na indústria de componentes especiais conformados a frio são utilizados alguns softwares, como por exemplo, o software de simulação de deformação plástica Eesy-2-form e de simulação de deformação elástica Eesy-DieOpt.

O objetivo dos softwares é a otimização dos projetos que possuem alto índice de ruptura de ferramentas a fim de proporcionar um aumento significativo da vida útil da ferramenta.

Pode-se utilizar uma forma de abordagem do estudo através de um método de análise e solução de problemas a fim de se delinear o andamento do projeto, conforme a figura 5.1.

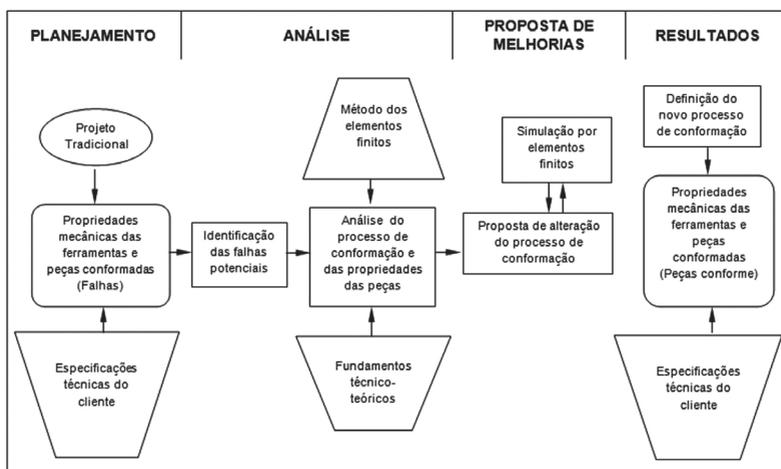


FIGURA 5.1 — Delineamento do andamento do projeto.

### 5.1. Exemplo de aplicação de software de simulação

A peça escolhida para estudo foi uma bucha com escalonamento do diâmetro externo produzida em aço carbono 10B22, cuja aplicação original é a indústria automotiva. A peça foi projetada para conformação em tamanho original em um prensa horizontal de múltiplos estágios utilizando uma sequência de quatro operações mediante dois caminhos: projeto convencional e projeto com auxílio de softwares de simulação. Na figura 5.2 pode ser observado o modelo geométrico tridimensional da peça conformada.

O produto se trata de uma bucha escalonada com dois diâmetros externos de 15,95 e 14,60 mm, diâmetro interno de 9,80 mm e comprimento de 22,95 mm.

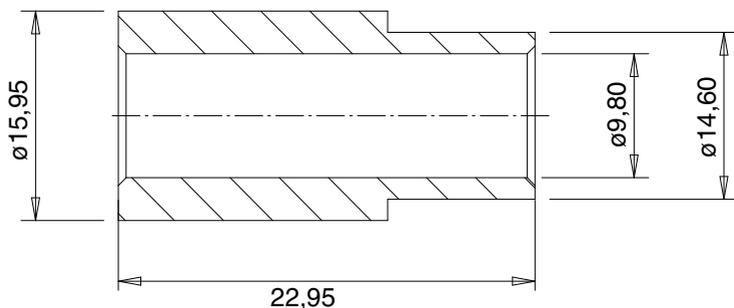


FIGURA 5.2 — Peça conformada

O ferramental foi desenvolvido em partes móveis e fixas. As partes móveis são compostas pelos punções furadores e as partes fixas compostas por núcleos, sobrecapa e carcaça. Os punções furadores, núcleos, sobrecapa e carcaça foram produzidos em aço M2, metal duro, D2 e H13, respectivamente.

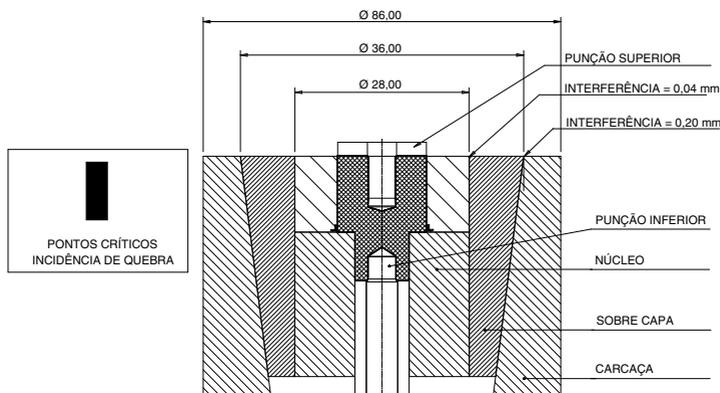
Os programas utilizados para simulação foram o Eesy-2-form, que simula a deformação plástica do produto e informa as tensões atuantes nas ferramentas e, o programa Eesy-DieOpt, especializado em otimizar as interferências entre núcleos, sobrecapas e carcaças, objetivando simular a deformação elástica das ferramentas e garantir maior vida útil.

## 5.2. Resultados

O alto índice de quebra das ferramentas desenvolvidas pelo projeto tradicional de conformação inviabilizava todo o processo de produção deste elemento de fixação para a indústria automotiva. Os punções furadores que realizavam o processo de furação em ambos os lados do produto não suportavam as tensões compressivas exercidas, pois as mesmas excediam o limite de resistência do material. Já o núcleo que envolve o diâmetro maior da peça apresentava quebra por tensões trativas exercidas na parte inferior e percebeu-se a necessidade de busca

por alternativas de melhorias a fim reduzir as fraturas de ferramentas e aumentar a produtividade do processo.

A figura 5.3 mostra os pontos críticos (locais de fratura) das ferramentas e as interferências utilizadas para o projeto tradicional.



**FIGURA 5.3** — Ilustração esquemática do ferramental desenvolvido pelo projeto tradicional.

A alternativa escolhida foi realizar a simulação do processo de conformação através de simulação por elementos finitos. A grande vantagem da simulação é a possibilidade de escolher vários caminhos a fim de visualizar as diversas formas que pode-se produzir o mesmo produto.

A primeira simulação realizada se refere à redução das tensões axiais na região onde existia a fratura dos punções furadores. No projeto tradicional percebeu-se que as tensões axiais apresentavam valores de até 3278 MPa (punção superior - figura 5.4) e 3183 MPa (punção inferior - figura 5.5), sendo que o limite de resistência do material está em aproximadamente 2500 MPa.

Após diversas simulações chegou-se a conclusão que, para reduzir as tensões atuantes nos punções furadores, deve-se alterar as profundidades dos punções furadores superior e inferior. Inicialmente o punção superior realizava uma furação de 15,95 mm e, com os resultados da simulação, a profundidade passou para 13,00 mm. Conseqüentemente, o punção furador inferior passou da profundidade inicial de 3,65 mm para 6,70 mm.

Estas profundidades foram definidas através de sucessivas tentativas de modo a convergir para uma relação onde as tensões axiais fossem menores, ambas bem abaixo do valor limite de 2500 MPa.

A figura 5.4 mostra o posicionamento do punção furador superior para o projeto tradicional (a) e o projeto otimizado por simulação (b), bem como as tensões trativas atuantes no punção. Percebe-se que as tensões trativas do projeto tradicional chegam em até 3278 MPa e no projeto otimizado por simulação estas tensões são reduzidas para um máximo de 1755 MPa.

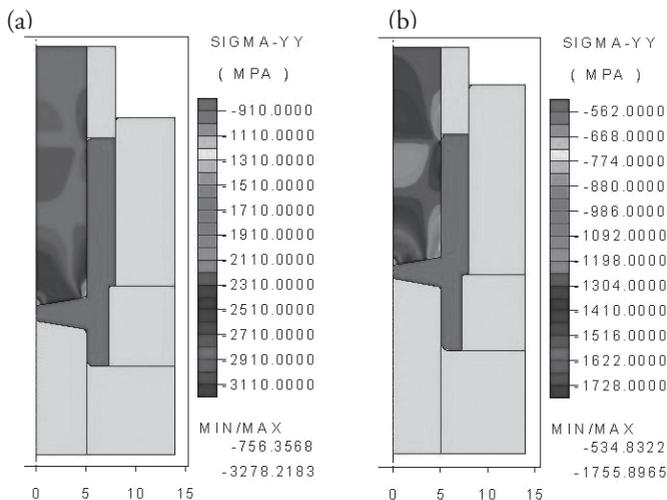


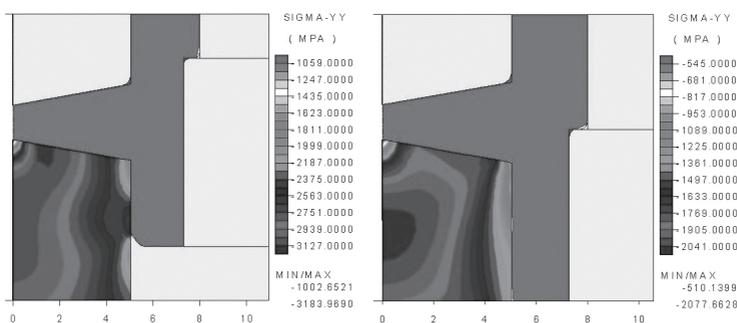
FIGURA 5.4 — Posicionamento e tensões trativas atuantes no punção superior.

Para definição do posicionamento do punção furador inferior manteve-se a mesma relação com o punção furador superior do projeto tradicional, ou seja, permanece a mesma camada de material entre ambos os punções e esta será eliminada no último estágio de conformação, tornando o furo passante.

A figura 5.5 mostra o posicionamento do punção furador inferior para o projeto tradicional (a) e o projeto otimizado por simulação (b), bem como as tensões trativas atuantes no punção. Percebe-se que as tensões trativas do projeto tradicional chegam em até 3183 MPa e no projeto otimizado por simulação estas tensões são reduzidas para um máximo de 2077 MPa.

A tabela 5.1 mostra o comparativo das tensões trativas atuantes nos

punções furadores superior e inferior para o projeto tradicional e para o projeto otimizado por simulação e a figura 5.6 mostra as sequências de conformação, passo a passo, do projeto tradicional e do projeto simulado.



**FIGURA 5.5** — Posicionamento e tensões trativas atuantes no punção inferior.

A análise das tensões tangenciais no núcleo que envolve o diâmetro maior da peça foi realizada através do programa Eesy-DieOpt, onde se otimizou as interferências entre as ferramentas, encontrando as interferências ideais para melhor desempenho e aumento da vida útil da ferramenta.

No projeto tradicional, as tensões tangenciais na parte inferior do núcleo eram de até 784 MPa, ou seja, superior ao limite de resistência do material (em torno de 500 MPa), ocasionando a fratura deste núcleo. Desta forma sabe-se que é necessário impor forças tangenciais contrárias de maior magnitude a fim de anular as forças trativas no núcleo.

	PUNÇÃO FURADOR SUPERIOR		PUNÇÃO FURADOR INFERIOR	
	PROJETO TRADICIONAL	PROJETO SIMULADO	PROJETO TRADICIONAL	PROJETO SIMULADO
TENSÕES AXIAIS	3278 MPa	1755 MPa	3183 MPa	2077 MPa

**TABELA 5.1** — Comparativo das tensões axiais dos punções superior e inferior para os projetos tradicional e otimizado por simulação

Foram inseridos valores para otimização através do programa Eesy-DieOpt e a análise dos resultados indicou a necessidade da utilização de uma maior interferência do que o habitualmente utilizado.

Após simulação houve uma significativa diminuição da tensão tangencial para  $-611$  MPa, ou seja, as tensões passaram a ser compressivas evitando as fraturas do núcleo. Esta solução possibilitou permanecer com a mesma geometria, porém otimizando-se ao máximo o desempenho do material e reduzindo em cerca de 56% a tensão tangencial no núcleo.

A figura 5.7 mostra as tensões tangenciais no projeto tradicional e após a otimização através do programa Eesy-DieOpt, onde percebe-se somente a presença de tensões compressivas no projeto simulado. A tabela 5.2 mostra os diâmetros, as interferências entre núcleo/sobrecapa e entre capa/carcaça e as respectivas tensões resultantes para os projetos tradicional e simulado.

### **5.3. Considerações sobre simulação**

Pode-se observar que os programas de simulação apresentam um diferencial bastante significativo com relação a ganhos de qualidade e precisão, vindo a somar na elaboração e desenvolvimento de projetos.

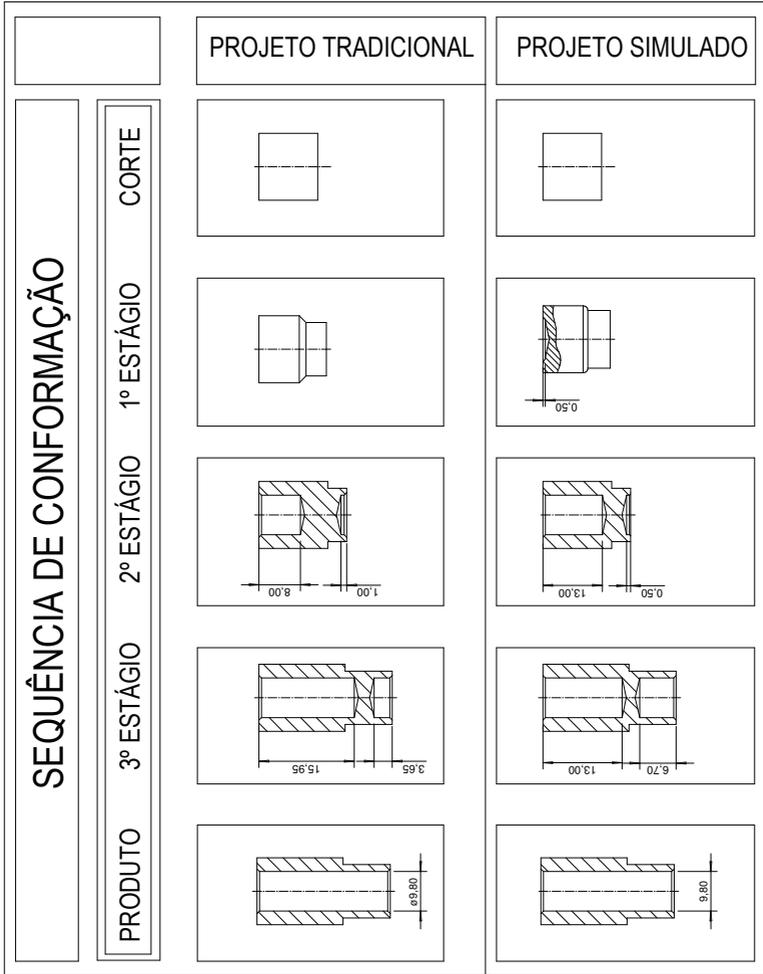
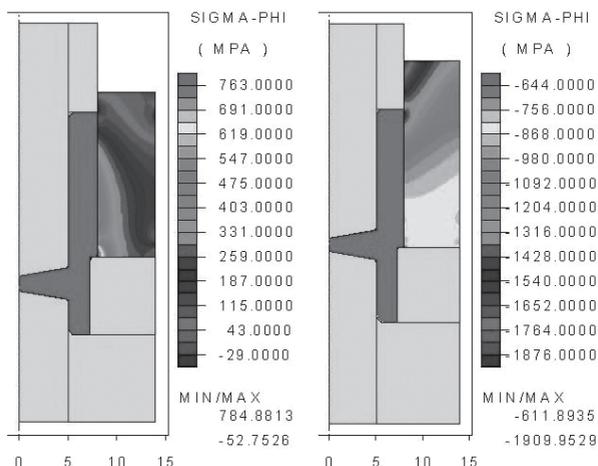


FIGURA 5.6 — Sequência de conformação para o projeto tradicional e para o projeto simulado



**FIGURA 5.7** — Tensões tangenciais nos projetos tradicional e simulado através do programa Eesy-DieOpt.

A redução de custos em projeto, produção de ferramental e tempo de ajustes durante a conformação comprovam a correta iniciativa de empresas que buscam soluções nos elementos finitos.

Visualizar de forma antecipada a realidade do processo produtivo, sem dúvida é o caminho que deve-se seguir no desenvolvimento de projetos cada vez mais específicos e precisos, não existindo mais tempo e espaço para “tentativa e erro”.

Mais do que uma necessidade é uma obrigação das organizações buscar o máximo desempenho de equipamentos e ferramental, onde planejar o seu desenvolvimento de processo significa colher resultados em direção a um futuro promissor.

	PROJETO TRADICIONAL	PROJETO SIMULADO
DIÂMETRO DO NÚCLEO	28,00 mm	28,00 mm
INTERFERENCIA ENTRE NÚCLEO/ SOBRECAPA	0,04 mm	0,12 mm
DIÂMETRO SOBRECAPA	36,00 mm	49,00 mm
INTERFERENCIA ENTRE SOBRECAPA/CARÇAÇA	0,20 mm	0,27 mm
TENSÃO TANGENCIAL MÁX. NA FERRAMENTA	784 MPa	-611 MPa

**TABELA 5.2** — Comparativo das dimensões, interferências e tensões tangenciais nos projetos tradicional e simulado.

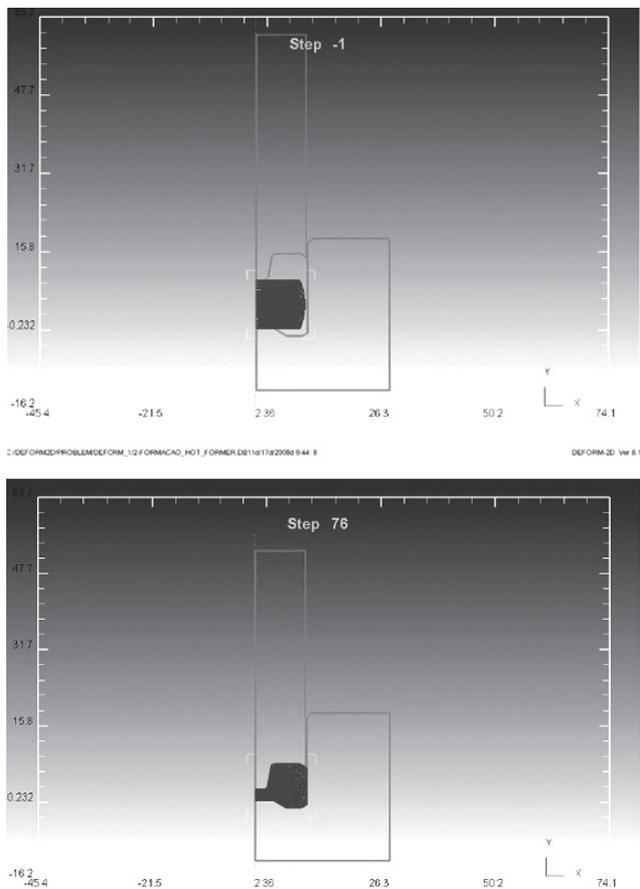
Através deste projeto possibilitou-se a utilização de diferentes caminhos para solucionar o problema de fratura de ferramental. Dentre estes caminhos a solução evidenciada para o caso dos punções furadores foi a alteração na profundidade de penetração entre o punção furador superior e inferior, mantendo-se a mesma camada de material entre ambos os punções do projeto tradicional.

No punção furador superior a tensão axial reduziu em 46% e no punção furador inferior a redução foi de 34%. A otimização das interferências no núcleo correspondeu à uma redução de 56% da tensão tangencial, evidenciando significativos ganhos e alternativas no desenvolvimento de projetos voltados para o segmento da indústria de conformação a frio.

Após realização das alterações e o acompanhamento dos lotes de produção observou-se a melhora do desempenho das ferramentas no processo produtivo em série, aumentando a vida útil da ferramenta e a capacidade produtiva, bem como reduzindo custos.

A seguir apresenta-se alguns exemplos de simulação realizadas com o software DEFORM2D e Easy-to-form2D e 3D.

A figura 5.8 mostra o posicionamento inicial e final das matrizes no forjamento a quente de aço ABNT 1045 na temperatura de 1250°C e com um fator de atrito constante igual a 0,3 do segundo estágio da sequência de conformação. A máquina especificada foi uma prensa progressiva com uma velocidade de 150 peças por minuto. Definiu-se também as superfícies que possuíam seus deslocamentos restritos em determinadas direções e suas condições de contorno. As geometrias das matrizes e punções foram desenhadas em programas CAD (Desenho assistido por computador) importado-as para um arquivo IGES que podem ser introduzidas no DEFORM2D.



**FIGURA 5.8** — Posição inicial e final de simulação de matrizes de conformação mecânica a quente.

As figuras 5.9 a 5.12 mostram peças simuladas a frio no software Eesy-to-form2D. A figura 5.9 mostra a simulação com a malha de elementos de peça similar às figuras 4.23 e 4.24 e a figura 5.10 mostra a peça em 3D.

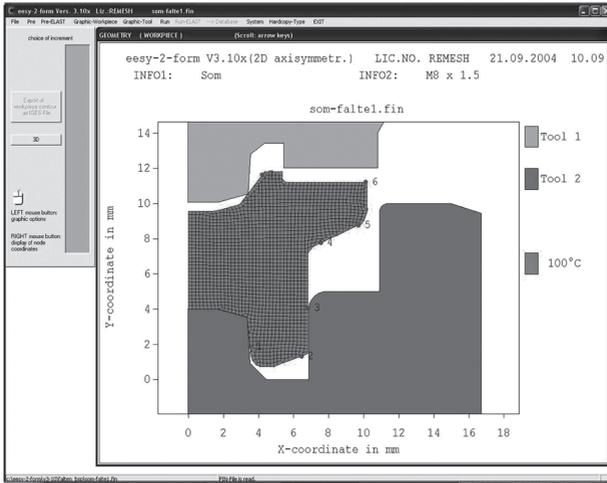


FIGURA 5.9 — Simulação da peça da figura 4.23.

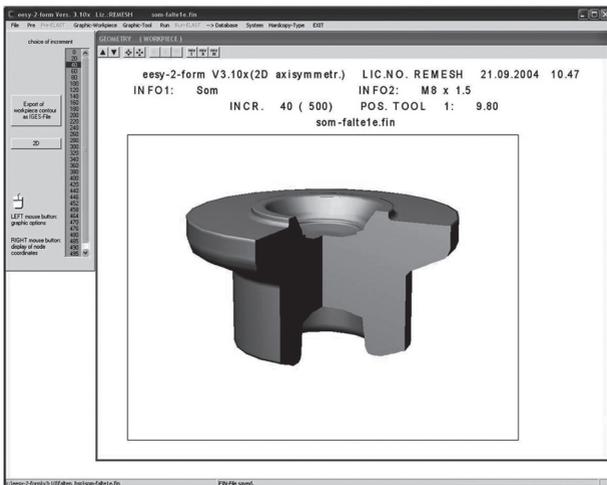


FIGURA 5.10 — Simulação da peça da figura 4.24.

As figuras 5.11 e 5.12 mostram a simulação com a malha de elementos das peças das figuras 4.26 e 4.27, respectivamente.

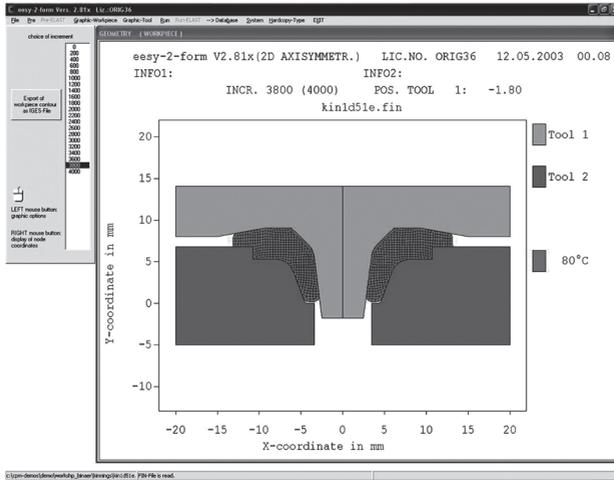


FIGURA 5.11 — Simulação da peça da figura 4.26.

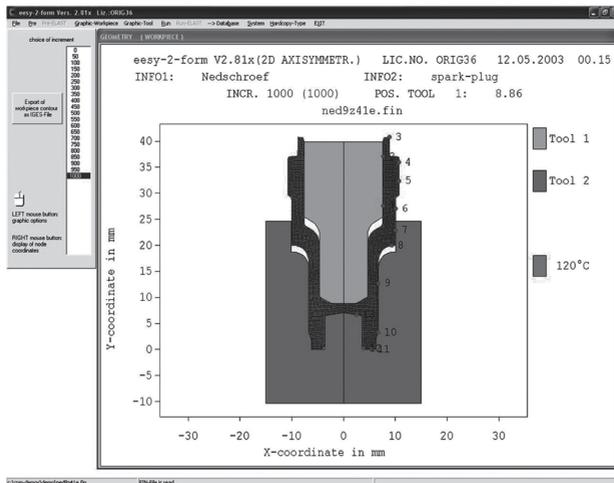


FIGURA 5.12 — Simulação da peça da figura 4.27.

As figuras 5.13 a 5.16 mostram peças simuladas no Eesy-to-form3D. Neste caso a principal vantagem com relação ao software 2D está na possibilidade de visualizar todos os detalhes da peça. As figuras 5.13 e 5.15 mostram as malhas de elementos de peças especiais simuladas e as figuras 5.14 e 5.16 mostram suas respectivas análises de tensões.

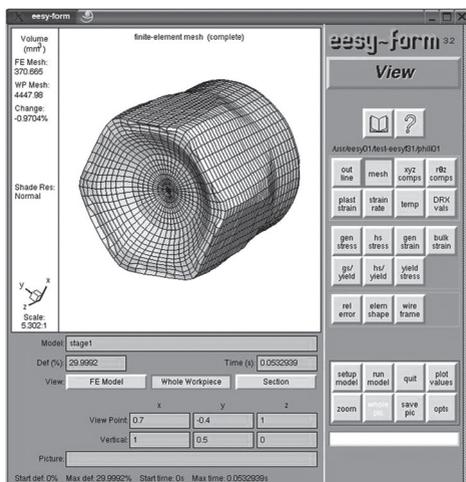


FIGURA 5.13 — Representação de malha de simulação de porca sextavada especial.

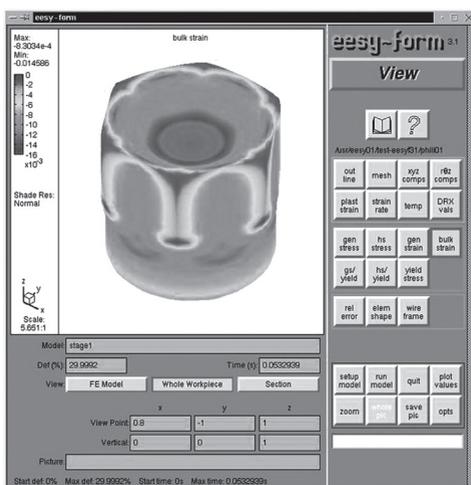


FIGURA 5.14 — Representação das tensões na porca sextavada especial da figura 5.12.

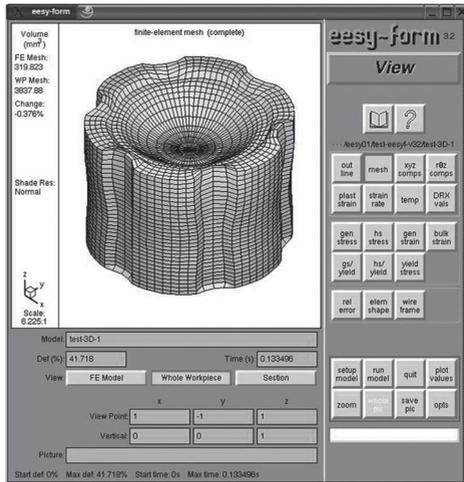


FIGURA 5.15 — Representação de malha de simulação de peça especial.

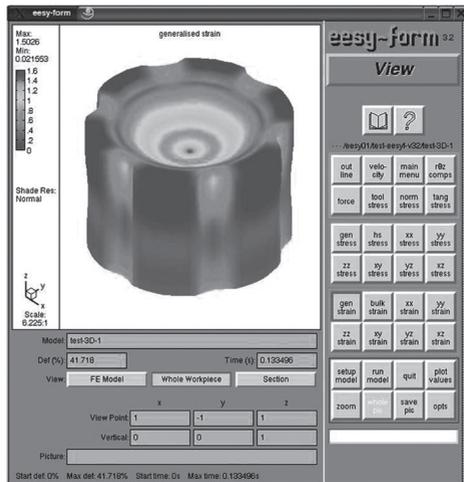


FIGURA 5.16 — Representação das tensões na peça especial da figura 5.14.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME-REPORT. **Strategy for Energy Conservation through Tribology.** ASME Publication Dep., New York 1977.

BARWELL, F.T. **Theories of wear and their significances for the engineering practice.** in: Treatise Mater. Sci. Technol. vol.13, Scott, D., ed., Academic Press, New York 1979, pp. 2-83.

BEAGLEY, T.M. **Severe wear of rolling/sliding contacts.** Wear, 36 (1976) 317-335.

BILLIGMANN, J. FELDMANN, H.D. **Estampado y prensado a máquina.** Ed. Reverté, Barcelona, 1979, p. 126.

BMFT-REPORT: **Damit Rost and Verschleiß nicht Milliarden fressen.** BMFT, Bonn 1984.

BMFT-REPORT: **Tribologie, Reibung-Verschleiß-Schmierung.** BMFT-Forschungsbericht T76-38, Bonn 1984.

BOWDEN, F.P. and TABOR, D.: **The friction and lubrication of**

BURWELL, J.T. and STRANG, C.D.: **On the empirical law of adhesive wear.** J. Appl. Phys., 23 (1952) 18-28.

CZICHOS, H.: **The principles of system analysis and their application to tribology.** ASLE Trans., 17 (1974) 300-305.

CZICHOS, H. and MOLGAARD, J.: **Towards a general theory of tribology systems.** Wear, 44 (1977) 247-264.

DIN 50320: **Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes.** Beuth Verlag, Berlin 1979.

DOWSON, D.: **History of tribology.** Longman, London 1979.

FLEMING, J.R. and SUH, N.p.: **Mechanical of crack propagation in delamination wear.** *Wear*, 44 (1977) 39-56.

FLEISCHER, G.: **Systembetrachtungen zur Tribologie.** *Wiss.Z.Tech. Hoch.Magdeburg*, 14 (1970) 415-420.

FRISCH, B.: **Adhesive wear, in Metallurgical Aspects of Wear.** Hornbogen, E. and Zum Gahr, K. H., eds., DGM Verlag, Oberursel 1981, pp. 51-72.

FUJITA, K. And YOSHIDA, A.: **Surface fatigue failure of nitride-hardened aluminium-chromium-molybdenum steel rollers under pure rolling and sliding-rolling contacts.** *Wear*, 53 (1979) 61-68.

GODFREY, D.: **Diagnosis of wear mechanisms, in Wear Control Handbook.** Peterson, M.B. and Winer, W.O., eds., ASME, New York 1980, pp. 283-311.

HOUWINK, R. and SALOMON, G., eds.: **Adhesion and Adhesives.** Vol.1 and 2. Elsevier, Amsterdam 1965.

HURRICKS, P.L.: **The fretting wear of mild steel from 200°C to 500°C.** *Wear*, 30 (1974) 189-212.

JAHANMIR, S: **On the wear mechanisms and the wear equations, in Fundamentals of Tribology.** Suh, N. P. and Saka, N., eds., MIT Press, Cambridge 1980, pp. 455-467.

JOST, H. P.: **Lubrication (Tribology) – A Report of the Present Position and Industry's Needs.** Dep. Of Education and Science, H. M. Stationary Office, London 1966.

JOST, H. P.: **The economic importance of tribology in the conservation of energy,** in: *Tribology Vol.1*, Bunk W.u.a., Hrsg., Springer Verlag, Berlin 1981, S.9-38.

JOST, H. P. and SCHOFIELD, J.: **Energy saving through tribology: a techno-economic study.** James Clayton Lecture. Proc., Inst. Mech. Eng., London, 195 (1981) No 16.

KALPAKJIAN, S.: **Manufacturing engineering and technology** – Tribology: Friction, Wear and Lubrication. Addison-Wesley publishing company, Illinois Institute of Technology, 1995, p. 969-989.

KEER, L.M. and BRYANT, M.D.: **A pitting model for rolling contact fatigue**. ASME Paper 82-Lub. 10, 1982.

KELLER, D.V.: **Adhesion between solid metals**. Wear, 6 (1963) 353-365.

KINLOCH, A.J.: **The science of adhesion**. J. Mater. Sci., 15 (1980) 2141-2166.

LUDEMA, K.C.: **Selecting material for wear resistance**, in wear of materials 1981. Rhee, S.K. et al., eds., ASME, New York 1981, pp. 1-6.

MCCLINTOCK, F.A.: **Plastic flow around a crack under friction and combined stress**, in: fracture 1977, Taplin, D.M.R., ed., University of Waterloo Press, Waterloo 1977, Vol. 4, pp. 49-64.

MOLGAARD, J.: **The dry wear of metals as a process in an open system**. Wear, 32 (1975) 353-362.

MULHEARN, T.O. and SAMUELS, L.E.: **The abrasion of metals: a model of the process**. Wear, 5 (1962) 478-498.

MURRAY, M.J., MUTTON, P.J. and WATSON, J.D.: **Abrasive wear mechanisms in steels**, in: Wear of Materials 1979, K.C. Ludema et al., eds., ASME, New York 1979, pp. 257-265.

OKRAJNI, J.; ESSLER, W. **Computer models of steam pipeline components in the evaluation of their local strength**, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 39/1 (2010) 71-78.

LOUDAR, J.: **Metal surfaces: structure and initial stages of activity**. Intern. Metals Rev., 2 (1978) 51-73.

OZTURK, U. E.; ANLAS, G. **Finite element analysis of expanded polystyrene foam under multiple compressive loading and unloading**, Materials and Design 32/2 (2011) 773-780.

PETERSON, M.B.: **Classification of wear processes**, in: Wear Control Handbook. Peterson, M.B. and Winer, W.O., eds., ASME, New York 1980, pp. 9-15.

RICE, S.L.: **A review of wear mechanisms and related topics**, in *ibid.*, pp. 469-476, 199\_?.

SALOMON, G.: **Application of systems thinking to tribology**. ASLE Trans., 17 (1974) 295-299.

SIEBEL, E, BEISSWANGER, H, Tiefziehen, 1955., **in**: MARUMO, Y, SAIKI, H, RUAN, L.; **Effect of sheet thickness on deep drawing of metal foils**; Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol 20, pg 479-482, 2007.

STROUD, M.F. and WILMAN, H.: **The proportion of the groove volume removed as wear in abrasion of metals**. Brit. J.Appl. Phys., 13 (1962) 173-178.

SUH, N.P.: **The delamination theory of wear**. Wear, 25 (1973) 111-124.

SUSKI, C.A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. Florianópolis, SC, 2004. xii, 88 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

ZUM-GAHR, K-H.: **Microstructure and Wear of Materials**. Tribology Series, 10. Elsevier (1987) 1-6.

WAHL, H.: **Verschleißprobleme im Braunkohlenbergbau**. Braunkohle, Wärme und Energie, 5/6 (1951) 75-87.

WALKE, W.; PASZENDA, Z. **Numerical analysis of three-layer vessel stent made from Cr-Ni-Mo steel and tantalum**, International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering 1/1 (2007) 129-137.

WAY, S.: **Pitting due to rolling contact.** J. Appl. Mech., 2 (1935) A49-A58.

WILLIAMS, J.A.: **Engineering tribology** – Department of engineering,  
University of Cambridge, Oxford University Press, 1994.

