

FUNDAMENTOS

Capítulo Três: Métodos de Cálculo

1. Introdução
2. Modos de deformação
3. Métodos da deformação homogênea
4. Método dos blocos
5. Método do limite superior
6. Elementos finitos
7. Redes neurais
8. Outros métodos



Capítulo Três: Métodos de Cálculo

3.1 - Introdução

Como existem vários processos de conformação plástica de metais, tornou-se prática comum classificar os processos de conformação de acordo com os processos básicos, mostrados na figura 3.1. Mais do que a geometria, esta classificação diferencia o método de aplicação dos esforços mecânicos em cada processo. A separação dos processos existentes em sistemas ou processos mais simples facilita os cálculos relacionados com este processo.

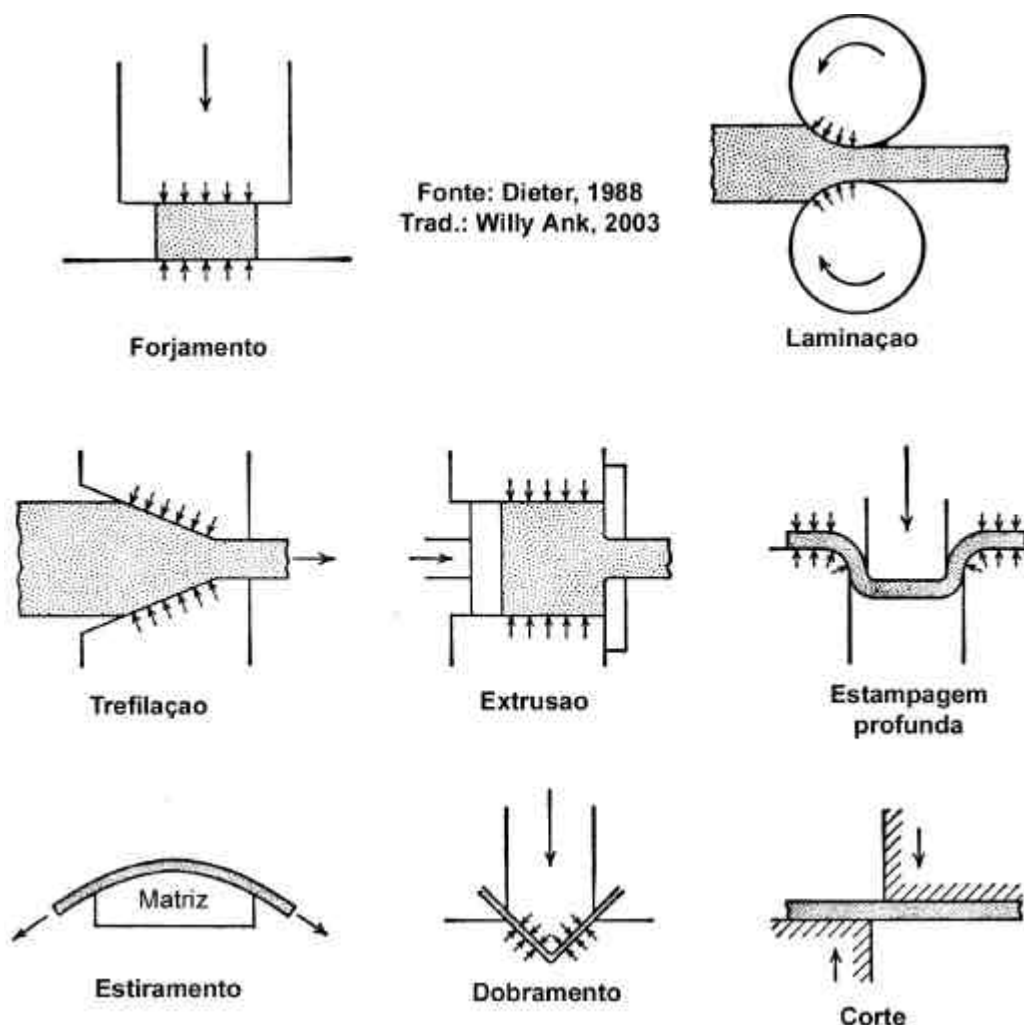


Figura 3.1 – Processos básicos de conformação mecânica, adaptação de Dieter (1988).

Desta forma, os processos podem ser separados em cinco categorias de acordo com a forma de aplicação dos esforços mecânicos para a conformação:

1. Compressão direta – resultantes de compressão são aplicadas na superfície da peça e o material deforma-se segundo ângulos em relação às direções de compressão. Processos típicos de conformação direta são o forjamento e a laminação (fig. 3.1).



2. Compressão indireta – nestes casos, uma força normalmente de tração é aplicada mas resultantes de compressão surgem pela reação da peça sob conformação com a matriz, desta forma, o metal flui sobre a ação de estados de tensão combinados que incluem intensas forças de compressão em ao menos uma das direções principais. Casos de processos nesta situação são: trefilação (para de arames ou tubos), extrusão e estampagem profunda, segundo ilustra a figura 3.1.
3. Tração – o processo mais facilmente associado a esforços de tração é o estiramento. Neste processo, a chapa metálica é puxada (tracionada em ambas as direções do plano) contra um punção ou matriz (vide fig. 3.1) que define o contorno da peça.
4. Flambagem – na flambagem a peça é dobrada de modo a adquirir um determinado contorno que pode variar de um simples “v” (fig. 3.1) até seções bem mais complexas.
5. Cisalhamento – no processo de cisalhamento são aplicados esforços de cisalhamento (fig. 3.1) até a ruptura da peça no plano de cisalhamento. Utilizada, em geral, conjuntamente com a estampagem.

Os círculos de Mohr da figura 3.2 ilustram a relativa facilidade e/ou dificuldade relativa de três processos de conformação mecânica na imposição da deformação plástica. Segundo o critério de escoamento de Tresca, relacionado diretamente com o diâmetro dos círculos, percebe-se qual sistema deverá escoar mais rapidamente.



Figura 3.2 – Exemplos de três situações de carregamento mecânico em conformação mecânica segundo descrito pelos círculos de Mohr nas regiões de conformação mecânica, Willy Ank.

O objetivo primordial dos cálculos da conformação plástica de metais é a determinação do esforço de conformação do material até a forma final desejada. Indiretamente, os métodos de cálculo também permitem obter dados, tais como:

- esforços de conformação (principal);
- potência a ser utilizada (importante no dimensionamento dos equipamentos e períodos de utilização);
- dimensionamento das ferramentas e/ou equipamentos auxiliares;
- necessidade do tipo e quantidade de lubrificação;
- determinação das trocas térmicas e/ou temperaturas dos produtos;

- distribuição das tensões e/ou deformações durante e após a conformação;
- encruamento presente e conseqüente alteração nas propriedades mecânicas;

Para obter estes dados é importante considerar os fenômenos básicos do processo de conformação, já discutidos nos capítulos 1 e 2, e empregá-los convenientemente na metodologia de cálculo trabalhada. Obviamente, existem vários métodos de cálculo, cada qual com vantagens e limitações, sendo que o método mais adequado a ser utilizado dependerá dos seguintes fatores básicos:

- precisão relativa necessária para o cálculo – se os valores a serem obtidos deverão ser utilizados para uma simples estimativa de carga (por exemplo na fase de dimensionamento dos equipamentos/instalações) ou se é necessário um valor mais preciso que será primordial para resolver uma questão (uma análise de falha do equipamento e/ou componente sendo conformado);
- possibilidade de modelar o sistema – existem várias metodologias de cálculo que permitem modelar o sistema a que se deseja estudar, mas nem todas são simples o suficiente para serem trabalhadas ou adequadas para o caso em questão;
- disponibilidade de pessoal e recursos para implementar o modelo – às vezes o melhor modelo não pode ser utilizado porque não existem recursos e/ou pessoal disponíveis para implementá-lo, especialmente quando é uma técnica que depende de conhecimentos específicos (elementos finitos ou redes neurais);
- disponibilidade e representatividade de dados (históricos ou não) – os melhores conjuntos de dados para serem utilizados nos modelos geralmente não são obtidos de tabelas disponíveis na bibliografia e sim exatamente àqueles obtidos na prática industrial. Nestes casos, modelos válidos por um grande conjunto de dados experimentais (práticos) possuem uma confiabilidade e representabilidade de uso muito maiores.

Os métodos de cálculo, por sua vez, podem ser classificados de acordo com a maneira como foram concebidos:

- Métodos empíricos – simplesmente baseados nas experiências de “sucesso” e “fracasso” com o processo empregado. Alguns profissionais chegam a desenvolver uma espécie de “extinto” do processo e conseguem prever, com maior ou menor precisão, sua resposta (carga) em algumas situações. Apresentam sérias limitações no que diz respeito à influência pessoal, limitação na aplicabilidade a novas situações, não compreensão do processo, etc.
- Métodos experimentais – estes métodos são oriundos, basicamente, da interpolação (algumas vezes de uma ligeira extrapolação) dos resultados obtidos diretamente na prática, sendo portanto, muito parecidos com os métodos empíricos. Sendo assim, apresentam os inconvenientes de necessitarem de um grande número de dados reais e limitação de aplicabilidade.



- Métodos teóricos – são metodologias baseadas no conhecimento determinístico (científico) do processo, desta forma, a precisão destes métodos será tanto maior quanto maior for o grau de determinismo utilizado. Assim sendo, podem existir modelos tão complexos e trabalhosos que são praticamente impossíveis de serem utilizados, assim como modelos tão simples e fáceis de serem implementados que os resultados obtidos limitam-se apenas ao dimensionamento dos equipamentos ou estimativa das cargas de uso.

Os métodos teóricos dividem-se, por sua vez, nos métodos:

- o Métodos analíticos – neste caso o processo de conformação é estudado com base na mecânica do contínuo, quando se obtém um modelo matemático, inicialmente preciso, que relaciona variáveis tais como: carga, forças de atrito, propriedades físicas, distribuição de tensões, campos de velocidade, etc. A resolução do modelo matemático é obtida por meio de aproximações convenientes, diretamente correlacionadas com a precisão dos resultados desejados.
- o Modelos numéricos – em geral os cálculos a serem efetuados nos modelos teóricos ou são muito complicados ou muito demorados, por isso, lança-se mão de recursos computacionais de modo a obter modelos relativamente precisos do processo de conformação com a grande vantagem de não necessitar de onerosas experiências práticas para a obtenção de resultados.

Nesta disciplina serão vistos somente os modelos teóricos, dando-se mais destaque para os modelos analíticos. Serão descritos alguns modelos numéricos, cujos fundamentos e estudos são temas que fogem ao contexto deste curso.

3.2 – Modos de deformação

Existem três tipos de deformação em materiais sob conformação mecânica:

1. Deformação homogênea;
2. Deformação por atrito;
3. Deformação redundante;

Todas as três formas de deformação ocorrem nos processos de conformação mecânica.

3.2.1 – Deformação homogênea

Um processo de conformação mecânica, necessita para ocorrer de uma energia, ao menos, igual àquela para produzir a alteração geométrica macro do material, obtida a partir das dimensões iniciais e finais da peça conformada. Assim sendo, o cálculo da deformação homogênea, revela a mínima quantidade de energia para a viabilidade de qualquer processo de conformação mecânica.

Porém, sabemos que a conformação plástica é imposta ao material, sempre através da aplicação desigual de tensões e deformações (vide figura 1.5), o que produz outros componentes de deformação além da homogênea. Estas demais deformações, que podem ou não ser desprezadas nos cálculos, absorvem mais energia para a conformação do material, reduzindo sua eficiência.

A deformação homogênea ocorreria para um material que estivesse livre para se deformar e no qual somente importa a dimensão inicial e final do mesmo para o cálculo da



energia de deformação absorvida no processo. Um caso típico seria o ensaio de tração convencional, no qual o corpo de prova (CP) se deforma livremente até o instante da estricção com uma distribuição de tensões e deformações que podem ser consideradas como homogêneas.

3.2.2 – Deformação por atrito

O atrito ocorre quanto existe movimento relativo de duas partes em contato, conforme já definido no item 2.7. Na região de contato são geradas tensões que modificam o campo de deformações local em maior ou menor grau. Esta alteração no campo de deformações produz uma absorção de energia que, às vezes, torna-se importante para o cálculo da força de conformação do material. Muitas vezes a energia absorvida pela existência do atrito é dissipada não na forma de deformações no material, mas sim sob a forma de calor (aquecimento das interfaces ou do lubrificante).

Alguns equacionamentos do processo de conformação levam em consideração, de maneira mais ou menos precisa, o efeito do atrito. Tais equacionamentos podem ser concebidos de modo a considerar o atrito da seguinte maneira:

- algumas vezes o atrito é considerado como gerador de um campo de deformações nas regiões próximas das interfaces (onde o atrito está presente), nestes casos, as deformações presentes neste campo e sua consequente absorção de energia são consideradas nos equacionamentos;
- muitas vezes o atrito é considerado apenas como uma força na interface que se dispõe contra a força de conformação, diminuindo a sua eficácia para a conformação;
- ou então pode ser negligenciado, quando se admite que o seu efeito é suficientemente pequeno no processo, não exigindo equacionamentos desnecessariamente complicados.

Nos processos de conformação o atrito geralmente é considerado como uma característica controlável ou desprezível. Mas na estampagem, como geralmente a área de contato com as ferramentas de conformação (matrizes, punções, etc) é muito grande e a espessura do material é muito pequena, o atrito pode inviabilizar a produção de determinadas peças que necessitam de grandes graus de conformação.

Nestes casos, a deformação induzida pelo atrito pode levar a peça à ruptura antes da mesma ser acabada. Nestes casos, somente a utilização de um bom lubrificante e/ou de um material de mais alta conformabilidade (capacidade de deformação plástica) pode viabilizar a peça, sem a alteração do seu projeto. Maiores detalhes estão descritos no capítulo 5.

3.2.3 – Deformação redundante

A deformação redundante é aquela deformação induzida pelo processo de conformação mecânica (vide figura 3.1) que não contribui em nada às mudanças dimensionais da peça em questão. No caso de um cilindro de comprimento inicial L_0 e área A_0 , a conformação deste para um arame de comprimento final L_f (muito maior) e uma área final A_f , (muito menor) estaria simplesmente associada uma deformação homogênea $\epsilon = \ln(A_0/A_f)$.

Porém existem várias formas de se produzir esta deformação final. Hipoteticamente, pode-se tomar este cilindro e achatá-lo até se transformar em um disco que seria posteriormente transformado no arame, conforme esquematizado na figura 3.3. Obviamente, existem melhores formas de se produzir este arame, ou seja, processos mais energeticamente econômicos, ou menos redundantes.

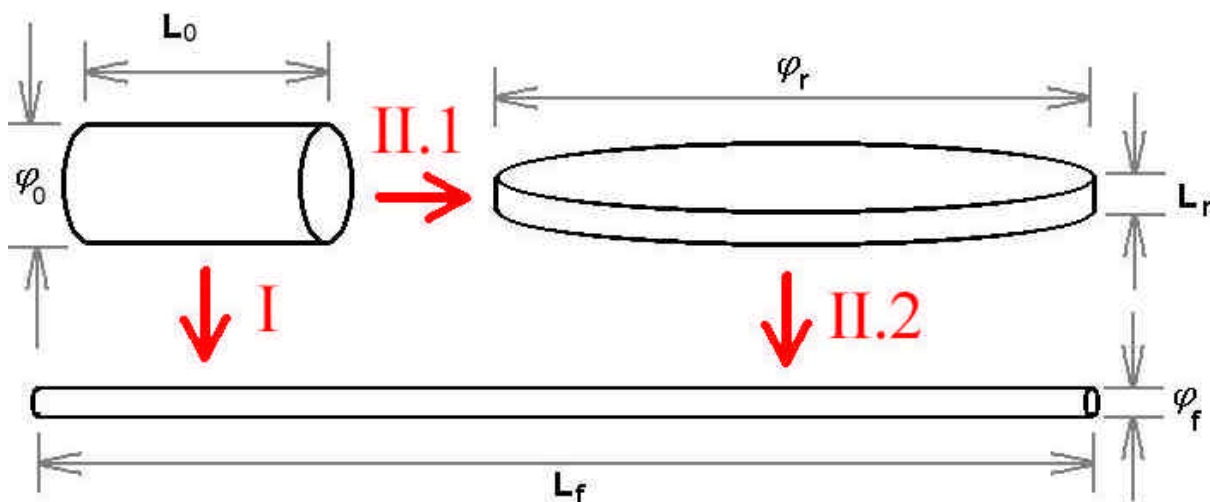


Figura 3.3 – Dois modos de se produzir um arame a partir de um cilindro: processo I (direto) e processo II (em duas etapas).

Mesmo considerado o processo de trefilação, conforme mostrado na figura 3.4, nota-se que durante a redução de secção reta, o material sofre uma pequena deformação intermediária por cisalhamento. Esta deformação, apesar de não estar presente na peça final (ou seja, redundante), absorve energia ao longo do processo de conformação, sendo especialmente maior quanto maior for o grau de deformação (redução) dado ao cilindro.

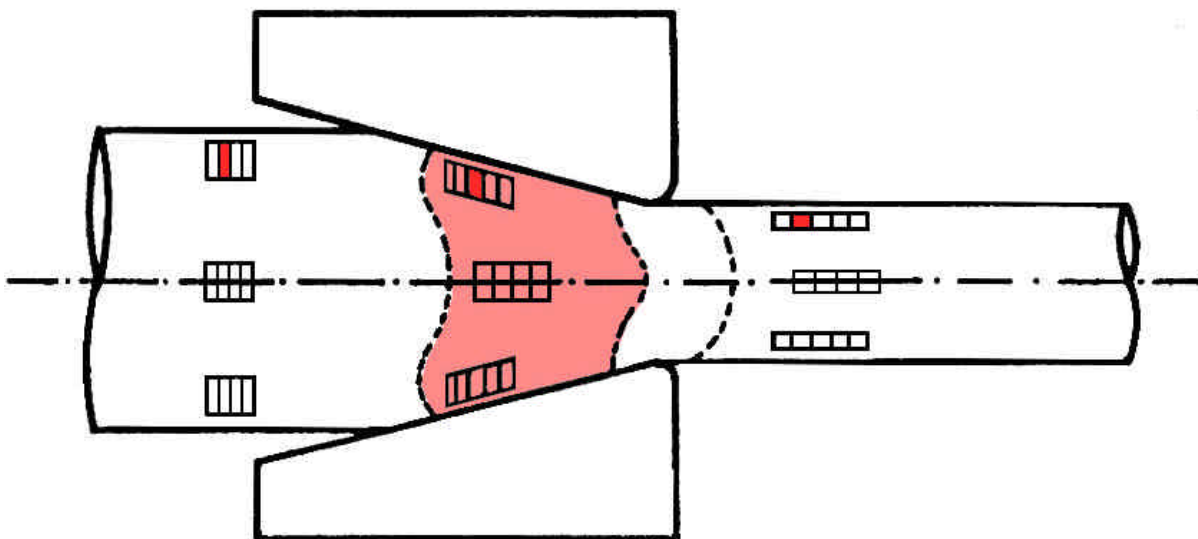


Figura 3.4 – Esquema demonstrando a ocorrência de deformações redundantes na trefilação, modificado de Helman e Cetlin, 1983.

Em geral, a deformação redundante é tanto maior quanto maior for a complexidade da conformação que se deve dar ao metal. No caso da trefilação, será tanto maior quanto maior for o grau de redução da seção reta (deformação em uma passada) e quanto maior for o ângulo da matriz (ou fieira) utilizada.

Dependendo da complexidade do campo de deformações, a deformação redundante poderá ser significativamente grande de modo a absorver grandes quantidades de energia,

assim aumentando a força necessária para a conformação do material. A deformação redundante está associada com processos de conformação plástica de materiais com uma relação área inicial/volume pequena, como por exemplo o forjamento e a extrusão. No caso de processos como o de estampagem, a deformação redundante perde a importância.

3.2.4 – Exemplo prático

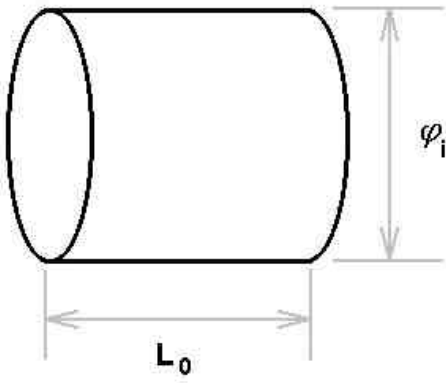
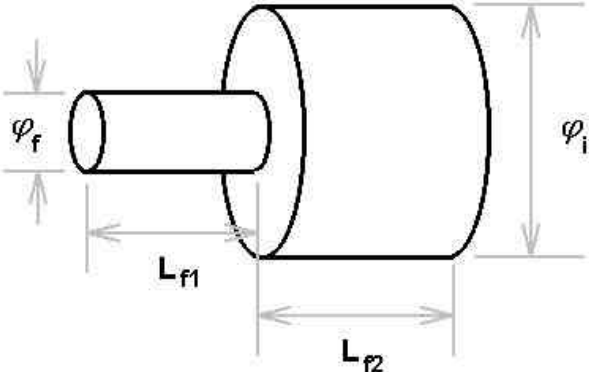
Depende da complexidade na qual o sistema é deformado. Em geral quanto menos se deforma, menor será a deformação redundante. Formas complexas também favorecem a deformação redundante.

Para ilustrar melhor os conceitos de deformação homogênea, por atrito e redundante, serão utilizados os resultados de uma simulação física, feita em sala de aula, do processo de extrusão de um cilindro. Neste caso, a partir dos perfis de deformação podem ser calculadas as deformações médias presentes no processo e assim a energia necessária para promovê-lo.

O processo de extrusão, conforme já ilustrado esquematicamente na figura 3.1 consta da compressão de uma massa metálica plástica (geralmente aquecida) contra uma matriz que possui uma abertura do tamanho e da geometria desejada para a peça final. Este processo pode ser direto ou inverso, conforme ilustra a figura 3.5. A simulação foi feita por meio de um arranjo experimental de extrusão direta, como àquele mostrado na figura 3.5.a.

O processo foi simulado em sala de aula com massas plásticas coloridas de modelar, daquelas encontradas em lojas de brinquedos. Este material foi escolhido porque permite simular a condição de um metal sob conformação, onde o somatório das deformações é nulo (não há variação no volume), ou seja: $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = e_1 + e_2 + e_3 = 0$. Além disso, o uso das diferentes cores permite identificar as regiões de deformação que ocorreram no material. As dimensões originais e finais do material, assim como sua geometria, estão descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dimensões iniciais e finais utilizadas no processo de extrusão.

Esquema		Dimensões / Áreas / Volumes
Antes		$\phi_i = 50\text{mm}$ $L_0 = 60\text{mm}$ $A_0 = 1,96 \times 10^3 \text{mm}^2$ $V_0 = 1,18 \times 10^5 \text{mm}^3$
Depois		$\phi_i = 50\text{mm}$ $\phi_f = 20\text{mm}$ $L_{f1} \approx 43,4\text{mm}$ $L_{f2} \approx 52,5\text{mm}$ ($L_{f1} + L_{f2} \approx 95,9\text{mm}$) $A_i = A_0 = 1,96 \times 10^3 \text{mm}^2$ $A_f = 3,14 \times 10^2 \text{mm}^2$ $V_1 = 1,47 \times 10^4 \text{mm}^3$ $V_2 = 1,03 \times 10^5 \text{mm}^3$ ($V_1 + V_2 = V_0$)



Fonte: Dieter, 1988
Tradução: Helman e Cetlin, 1983



Figura 3.5 – Esquema de funcionamento do processo de extrusão, Helman e Cetlin, 1983.

Assim, de acordo com os perfis mostrados na figura 3.6, pode-se calcular as deformações medindo-se as dimensões finais das faixas coloridas e correlacionando com as respectivas dimensões iniciais. Este trabalho foi feito pela turma da disciplina “Conformação Plástica dos Metais” do 1º semestre de 2003, para os casos (c) e (d). A deformação homogênea (a) pode ser medida facilmente pela figura e a deformação total para o caso (b), com deformação homogênea e por atrito, pode ser obtida facilmente pela diferença das demais. Os resultados estão listados na tabela 3.2 abaixo.

Tabela 3.2 – Resultados da medição da deformação total para as situações ilustradas na figura 3.6.

Identificação	Caso	Deformação total (ϵ_{Total})
a	Deformação homogênea	22,8%
b	Deformação homogênea + atrito	24,3% (=22,8+1,5)
c	Deformação homogênea + redundante	34,6% (=22,8+11,8)
d	Deformação homogênea + atrito + redundante	36,1% (=22,8+1,5+11,8)

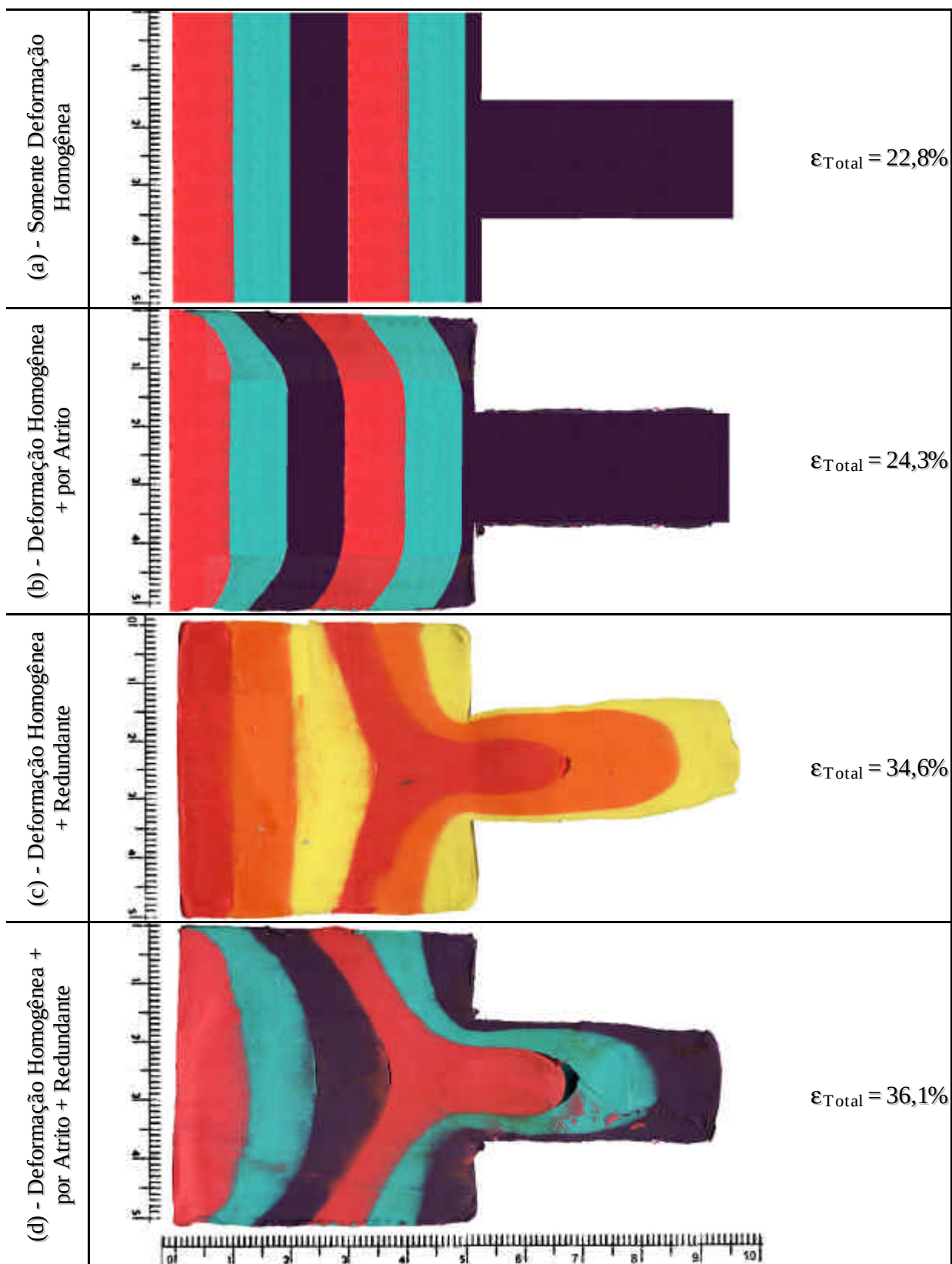


Figura 3.6 – Figuras ilustrando a simulação física de um processo de extrusão com várias combinações aproximadas da presença das deformações homogênea, por atrito e redundante. Escala de todas as figuras: 1:1, a régua de distâncias da figura (d) vale para as demais.

Uma outra maneira de visualizar a presença das deformações homogênea, redundante e por atrito é através do gráfico mostrado na figura 3.7. Este gráfico ilustra a quantificação da presença das três formas de deformação para o processo de trefilação (vide figura 3.1) de acordo com o semi-ângulo¹ da matriz ou fieira. À medida que o ângulo cresce, ocorre o seguinte:

- a deformação homogênea, que depende das dimensões inicial e final do material não varia (reta horizontal do gráfico da figura 3.1);
- aumenta-se a complexidade da conformação, aumentando a deformação redundante até valores comparáveis à deformação homogênea;
- diminui-se a área de contato e conseqüentemente o montante de deformação por atrito presente.

O gráfico também apresenta o resultado da deformação total do material, que é a soma de todas estas três deformações. Nota-se que existe um valor ótimo para o semi-ângulo onde a energia consumida (ou força de conformação) será mínima. Este ângulo e a maneira de estimá-lo serão discutidos no capítulo 4.

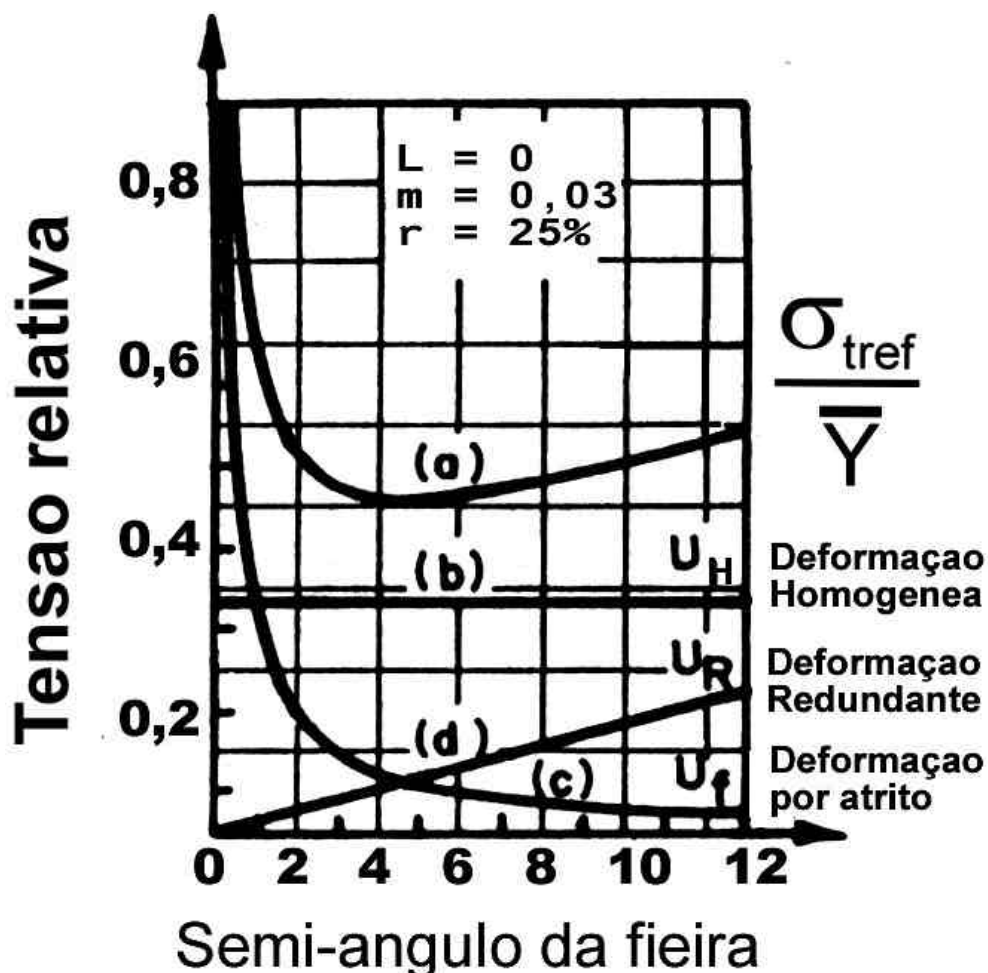


Figura 3.7 – Correlação relativa das deformações homogênea, redundante e por atrito presentes em um processo de trefilação, adaptado de Helman e Cetlin, 1983.

¹ Metade do ângulo de abertura da matriz ou fieira.